

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE FÍSICA

**Estudo de Aglomerados Estelares no Complexo
HII NGC 6357 com o VISTA Variables in the
Via Lactea***

Eliade Ferreira Lima

Tese realizada sob orientação dos professores Drs. Eduardo Bica e Charles Bonatto e apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Física da UFRGS em preenchimento parcial dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Física.

Porto Alegre - RS
Dezembro de 2013

*Trabalho financiado pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

AGRADEÇO

Aos meus orientadores, professores Drs. **Eduardo Bica** e **Charles Bonatto** pela orientação, paciência, amizade e por acreditar em meu trabalho, mesmo com minhas limitações.

Aos meus amigos que, de uma forma ou de outra, contribuíram com sua amizade e com sugestões efetivas para a realização deste trabalho, gostaria de expressar minha profunda gratidão em especial à **Dinalva, Andressa, Dani Pavani e Alejandra**.

Ao grupo de Astronomia da UFRGS por ser um GRUPO tão especial e único.

Ao **grupo VVV** pela oportunidade de fazer parte de um projeto tão incentivador.

Aos professores e funcionários da UFRGS em especial, **Prof^a. Márcia Barbosa, Prof. Durão, Mari, Liane e Lucinha** pela atenção, carinho e confiança.

Aos meus pais, **Railda** e **Moacir** e minha irmã **Adna** por acreditarem na minha capacidade de superação e compreenderem minha ausência.

Ao CNPq pelo apoio financeiro.

*"Nossas dúvidas são traidoras e nos fazem perder o bem
que poderíamos ganhar, por medo de arriscar."*

(William Shakespeare)

Resumo

Complexos de formação estelar são os principais blocos de formação das galáxias. O estudo da estrutura e do conteúdo estelar de aglomerados imersos nesses complexos permite conhecer melhor os processos de formação estelar na Galáxia, visto que a estrutura dos aglomerados estelares reflete a estrutura do gás denso onde eles se formaram.

Neste trabalho estudamos a natureza de uma série aglomerados estelares imersos/projetados no complexo de regiões HII e nuvens moleculares NGC 6357. A amostra consiste de 5 aglomerados imersos no complexo, 1 aglomerado de idade intermediária projetado no bordo de NGC 6357, além de 3 candidatos que necessitam de mais análises. Pismis 24 é o único aglomerado da amostra estudado previamente na literatura.

Usamos fotometria nas bandas JHK_S do VVV (VISTA Variables in the Via Láctea Survey) complementada com a do 2MASS para estrelas saturadas. Utilizamos como ferramenta um algoritmo de descontaminação das estrelas de campo que revela a morfologia intrínseca do aglomerado. Os parâmetros fotométricos da amostra foram derivados a partir do diagrama cor magnitude (CMD), por meio do ajuste de isócronas de Padova de metalicidade solar, computada com os filtros J , H e K_S do VVV. Os parâmetros estruturais foram derivados por meio dos perfis de densidade radial (RDPs). Os perfis foram construídos com estrelas selecionadas após a aplicação filtro cor-magnitude (CM) sobre a fotometria observada, o qual isola estrelas com grande probabilidade de serem membros do aglomerado.

A distância média dos aglomerados imersos no complexo nos permitiu estimar que NGC 6357 encontra-se a uma distância de 1.76 ± 0.1 kpc do Sol. Tal distância tem sido questão de debate na literatura. O aglomerado de idade intermediária descoberto possui 5 ± 2 Gyr. Dois objetos imersos parecem ser subestruturas do aglomerado massivo Pismis 24.

Concluimos que NGC 6357 possui pelo menos dois eventos de formação estelar da ordem de 5 e 9 Myr. Esta diferença de idade pode ajudar a compreender a história de formação estelar do complexo assim como a cinemática do gás.

Abstract

Star forming complexes are the major building blocks of galaxies. The study of the structure and stellar content of embedded clusters in these complexes allows us to better understand the processes of star formation in the Galaxy, since the structure of the star clusters reflects the structure of the dense gas in which they were formed.

In this work we study the nature of a series of star clusters embedded or projected towards the complex of HII regions and molecular clouds NGC 6357. The sample consists of five clusters embedded in the complex, one intermediate-age cluster projected in the outskirts of NGC 6357, and four candidates that need further analyses. Pismis 24 is the only cluster of the sample previously studied in the literature.

We use the VVV (VISTA Variables in the Via Láctea Survey) photometry in the JHK_S bands complemented with 2MASS for the saturated stars. We use an algorithm as a tool for field star decontamination which reveals the intrinsic morphology of the cluster. The photometric parameters of the sample were derived from the colour diagram magnitude (CMD) by means of solar-metallicity Padova isochrones computed with the VVV J , H and K_S filters. Structural parameters were derived by means of radial distribution profiles (RDPs). RDPs were built with stars selected after applying the colour-magnitude (CM) filter to the observed photometry, which isolates the stars with a high probability of being cluster members.

The mean distance of the embedded clusters in the complex allowed us to estimate that NGC 6357 is at a distance of 1.76 ± 0.1 kpc from the Sun. This distance has been a matter of debate in the literature. The discovered intermediate-age cluster has an age 5 ± 2 Gyr. The two embedded objects seem to be substructures of the massive cluster Pismis 24.

We conclude that NGC 6357 has had at least two stellar generation events, ranging in the 5 to 9 Myr. This age difference may help to understand the star forming history of the complex as well as the gas kinematics.

Sumário

Agradecimento	i
Resumo	iii
Abstract	iv
Lista de Figuras	xi
Lista de Tabelas	xii
Notações	xiii
1 Introdução	1
1.1 Regiões de formação estelar	2
1.1.1 O complexo HII NGC 6357	3
1.2 Aglomerados Estelares Imersos	9
1.2.1 Propriedades dos aglomerados estelares imersos	10
1.2.2 Objetivos do trabalho	13
2 Dados Fotométricos e Métodos de Análise	14
2.1 VVV - The VISTA Variables in the Via Láctea Survey	14

2.2	Fotometria 2MASS	18
2.3	Diagrama Cor-Magnitude	20
2.3.1	Descontaminação das Estrelas de Campo	21
2.4	Perfil de Densidade Radial	23
2.5	Ferramenta <i>Adaptive Simulated Annealing</i> - ASA	25
3	Amostra de Aglomerados e Abordagem Fotométrica	27
4	Análise e Discussão dos Aglomerados	33
4.1	Agglomerados Confirmados	33
4.1.1	Pismis 24	33
4.1.2	BDS 101	35
4.1.3	VVV CL164 - Agglomerado de idade intermerdiária	36
4.1.4	Caso particular: subaglomerados de Pismis 24?	37
4.1.5	VVV CL167	37
4.2	Possíveis aglomerados	39
4.2.1	LBB1-A	39
4.2.2	LBB1-C	39
4.2.3	NGC6357-C1	40
4.3	Discussão	40
5	Conclusões e Perspectivas	53
5.1	Perspectivas	54
	Apêndices	66
A	Artigos Publicados	66

Lista de Figuras

1.1	Mosaico de imagens de NGC 6357 em falsa cor. As regiões em vermelho, verde e azul indicam emissão em $[SII]$ 6716-31Å, $H\alpha$ e $[OIII]$ 5007Å, respectivamente. Estas imagens foram obtidas com o telescópio Curtis-Schmidt no CTIO em 1999 (Cappa et al., 2011).	5
1.2	Imagem no ótico obtida com o Digitized Sky Survey (DSS) de dimensões $\sim 65' \times 35'$; os círculos em vermelho indicam as regiões HII brilhantes G353.2+0.9, G353.19+0.84, G353.1+0.6 e a região central de NGC 6357, G353.12+0.86. Também é indicada a posição do aglomerado Pismis 24. Orientação norte para cima e leste para a direita.	6
1.3	Mosaico de imagens no ótico e infravermelho do aglomerado imerso Pismis-24 e da região HII G353.2+0.9. Imagens foram obtidas com o Hubble Space Telescope em 2006. Orientação norte para cima e leste para a direita.	11
2.1	Curvas de transmissão para os cinco filtros de bandas presentes na VIRCAM em comparação com o perfil de transmissão típico da atmosfera para a massa de ar = 1,0 e 1,0 mm de vapor de água. Os comprimentos de onda eficazes para todos os filtros estão listados na Tabela 2.1. Figura extraída de Saito et al. (2012).	16
2.2	Diagramas cor-magnitude para um campo do bojo identificado pelo VVV como b264, à esquerda mostrando as fontes de alta qualidade com índice -1 e à direita todos os outros índices. Figura extraída de Saito et al. (2012).	17
2.3	Curvas de transmissão para os três filtros de bandas presentes no 2MASS (J , H e K_s), comparado ao modelo de transmissão atmosférica para o instrumento localizado no Monte Hopkins (Skrutskie et al., 2006).	19

2.4	CMDs descontaminados por estrelas de campo (círculos cheios) dos aglomerados Collinder 197 (painel da esquerda) e Pismis 5 (painel da direita) comparados com os CMDs gerados por uma única simulação do ASA (círculos vazios) selecionados aleatoriamente entre os grupos simulados. Os raios de extração são 10' (Collinder 197) e 6' (Pismis 5). Isócronas representativas da história de formação estelar foram definidas de acordo com os parâmetros médios obtidos (Tabela 2 em Bonatto et al. (2012a) no anexo A).	26
3.1	Imagem SPITZER (bandas 3,6 μm , 4,5 μm e 8,0 μm) do complexo NGC 6357 de dimensões $\sim 60' \times 35'$, gerada pelo Aladin.	28
3.2	Distribuição de fontes pontuais do complexo NGC 6357 (Extração do catálogo 2MASS para R=60').	29
3.3	Painel a): CMD Jx(J-K _s) observado 2MASS (círculos vermelhos) e VVV (círculos pretos) do aglomerado Pismis 24 (R=1,5') centrado no objeto. Painel b): CMD Jx(J-K _s) observado 2MASS (círculos vermelhos) e VVV (círculos pretos) do candidato LBB1-C (R=2,5') centrado no objeto.	30
3.4	Painel a): RDP de Pismis 24 para uma extração de R=2,5' (2MASS). Painel b): RDP de Pismis 24 para uma extração de R=5,0' (VVV), onde podemos observar o ganho no números de estrelas quando comparado à fotometria 2MASS.	30
3.5	Painel a):RDP de LBB1-C para uma extração de R=2,5'(2MASS). Painel b): RDP de LBB1-C para uma extração de R=5,0' (VVV), onde podemos observar o ganho no números de estrelas quando comparado à fotometria 2MASS.	31
3.6	Imagens combinadas das bandas JHK _S VVV dos objetos da amostra. Primeira linha: Pismis 24 (esquerda), BDS 101 (direita). Segunda linha: Novo aglomerado VVV CL 164 (esquerda) e possível aglomerado LBB1-A (direita) Terceira linha: novo aglomerado VVV CL 167 (esquerda) e possível aglomerado LBB1-C (direita). Última linha: possível aglomerado N6357-C1. Os círculos verdes indicam o tamanho angular aproximado dos objetos. Os valores dos raios são dados na Tabela 3.1.	32
4.1	Imagem DSS do complexo NGC 6357, seus aglomerados confirmados são indicados. Imagem obtida com o Aladin (Bonnarel et al., 2000).	34

- 4.2 Painel a): CMD observado $J \times (J - K_S)$ de Pismis 24 (R=1,5') centrado no objeto (círculos pretos) e estrelas de campo extraídas de um anel externo da amostra e de mesma área da região central (círculos vermelhos). Painel b): CMD descontaminado das estrelas de campo e com ajuste das isócronas de Padova de 0.2, 1, 2, 3, 5 e 7 Myr. Painel c): Diagrama cor-cor das estrelas descontaminadas das estrelas de campo. O vetor avermelhamento equivale a $A_V=5$. Painel d): RDP de Pismis 24 filtrado por cor-magnitude (círculos vazados) e bruto (círculos cheios) para uma extração de R=5'. A linha sólida indica o melhor ajuste por um perfil de King e a região marrom ao seu redor mostra a incerteza de 1σ no seu ajuste. O nível de contribuição das estrelas de campo está representado pela região horizontal cinza. 42
- 4.3 Painel esquerdo: CMD original $K_S \times (J - K_S)$ descontaminado das estrelas de campo de Pismis 24 (R=1,5'). Painel central: CMD $m_4 \times c_3$ descontaminado das estrelas de campo. Painel direito: CMD $m_2 \times c_3$ descontaminado das estrelas de campo. Todos os CMDs apresentam ajuste das isócronas de Padova de 0.2, 1, 2, 3, 5 e 7 Myr. . . 43
- 4.4 Painel a): CMD observado $J \times (J - K_S)$ de BDS 101 (R=0,7') centrado no objeto (círculos pretos) e estrelas de campo extraídas de um anel externo da amostra e de mesma área da região central (círculos vermelhos). Painel b): CMD descontaminado das estrelas de campo e com ajuste das isócronas de Padova de 0.2, 1, 3, 5 e 7 Myr. Painel c): Diagrama cor-cor das estrelas descontaminadas das estrelas de campo. O vetor avermelhamento equivale a $A_V=5$. Painel d): O mesmo que a Figura 4.2d para o aglomerado para o aglomerado BDS 101. 44
- 4.5 Painel superior esquerdo: CMD observado $J \times (J - H)$ de VVV CL164 (R=0,5') centrado no objeto (círculos pretos) e estrelas de campo extraídas de um anel externo da amostra e de mesma área da região central (círculos vermelhos). Painel superior direito: o mesmo para $J \times (J - K_S)$. Painel inferior esquerdo: CMD descontaminado das estrelas de campo e com ajuste ds isócrona de Padova de 5 Gyr e Z solar junto com o filtro CM (polígono marrom) utilizado para isolar as estrelas MS e vizinhança. Painel inferior direito: o mesmo para $J \times (J - K_S)$ sem o filtro CM. 45
- 4.6 Painel a): Comparação entre os CMDs descontaminados de uma região central (R=0,5') de VVV CL164 (círculos vazados) e região central (R<10') de M67 (círculos cheios). Uma isócrona de Padova de 5 Gyr e Z solar é ajustada. Painel b): O mesmo que a Figura 4.2d para o aglomerado VVV CL164. 46

4.7	Imagem K_S VVV de dimensões (2×4 arcmin ²) dos subaglomerados VVV CL165 (círculo superior) e VVV CL166 (círculo inferior). Os círculos vermelhos pequenos indicam YSOs (Fang et al., 2012) em Pismis 24 (círculo maior). Imagem obtida com o Aladin (Bonnarel et al., 2000).	46
4.8	Painel a): CMD observado $J \times (J - K_S)$ de VVV CL167 (R=0,6') centrado no objeto (círculos pretos) e estrelas de campo extraídas de um anel externo da amostra e de mesma área da região central (círculos vermelhos). Painel b): CMD descontaminado das estrelas de campo e com ajuste da isócrona de Padova de 9 Myr. Painel c): Diagrama cor-cor das estrelas descontaminadas das estrelas de campo. A estrela WR 93≡HD 157504 é indicada. O vetor avermelhamento equivale a $A_V=5$. Painel d): RDP de VVV CL167 filtrado por cor-magnitude (círculos vazados) e bruto (círculos cheios) para uma extração de R=5', o nível de contribuição das estrelas de campo representado pela região horizontal cinza.	47
4.9	Painel a): CMD observado $J \times (J - K_S)$ de LBB1-A (R=1.0') centrado no objeto (círculos pretos) e estrelas de campo extraídas de um anel externo da amostra e de mesma área da região central (círculos vermelhos). Painel b): CMD descontaminado das estrelas de campo. Painel c): Diagrama cor-cor das estrelas descontaminadas das estrelas de campo, o retângulo indica estrelas acumuladas a direita no CMD (Figura 4.9b). O vetor avermelhamento equivale a $A_V=5$. Painel d): RDP de LBB1-A para uma extração de R=5' indicando a distribuição radial de todas as estrelas da subtração (pontos pretos), da área à direita do CMD descontaminado (pontos vermelhos) e à esquerda do CMD descontaminado (pontos azuis).	48
4.10	CMD descontaminado $J \times (J - K_S)$ das estrelas de campo de LBB1-A com ajuste das isócronas de Padova de 0.2, 1, 3, 5, 7 e 10 Myr.	49

- 4.11 Painel a): CMD observado $J \times (J - K_S)$ de LBB1-C ($R=0.6'$) centrado no objeto (círculos pretos) e estrelas de campo extraídas de um anel externo da amostra e de mesma área da região central (círculos vermelhos). Painel b): CMD descontaminado das estrelas de campo e filtro cor-magnitude aplicado (polígono marrom). Painel c): Diagrama cor-cor das estrelas descontaminadas das estrelas de campo; os círculos vazados indicam as estrelas acumuladas à direita no CMD (Figura 4.11b). O vetor avermelhamento equivale a $A_V=5$. Painel d): RDP de LBB1-C para uma extração de $R=5'$ indicando a distribuição radial de todas as estrelas da subtração (pontos pretos) e do RDP filtrado por cor-magnitude (círculos vazados). O nível de contribuição das estrelas de campo está representado pela região horizontal cinza. 50
- 4.12 Projeção das estrelas do CMD descontaminado por estrelas de campo (Figura 4.11b). Painel superior: Imagem 2MASS banda K_s . Painel inferior: Imagem DSS(F+R). O círculo maior representa o tamanho angular aproximado do objeto dado na Tabela 3.1. Os círculos vermelhos indicam as estrelas dentro do filtro cor-magnitude e os círculos azuis as estrelas à esquerda no CMD. 51
- 4.13 Painel a): CMD observado $J \times (J - K_S)$ de N6357-C1 ($R=0.5'$) centrado no objeto (círculos pretos) e estrelas de campo extraídas de um anel externo da amostra e de mesma área da região central (círculos vermelhos). Painel b): CMD descontaminado das estrelas de campo. Painel c): RDP de LBB1-C para uma extração de $R=5'$ indicando a distribuição radial de todas as estrelas da subtração (círculos vazados) e do RDP filtrado por cor-magnitude (círculos vazados). O filtro é aplicado separadamente para as regiões de MS e PMS do CMD. O nível de contribuição das estrelas de campo está representado pela região horizontal cinza. 52

Lista de Tabelas

2.1	Comprimentos de onda efetivos para o conjunto de filtros do telescópio VISTA, utilizados para as observações do VVV, e a extinção relativa em cada filtro baseada nos valores de Cardelli et al. (1989). Extraído de Catelan et al. (2011).	15
2.2	Estratégia de observação e tempos de exposição do VVV.	18
2.3	Limite de magnitude do 2MASS para fontes não-confusas fora do plano Galáctico ($ b > 10^\circ$) e de qualquer área problemática do céu.	19
3.1	Posições e raio aparente (r_{ap}) dos possíveis aglomerados projetados/imersos em NGC 6357.	28
4.1	Parâmetros fundamentais derivados.	38
4.2	Parâmetros estruturais	38

Notações

Abreviaturas

- 2MASS** *Two Micron All Sky Survey* ou Campanha de Todo o Céu em 2 microns
- ASA** *Adaptative Simulated Annealing*
- CASU** *Cambridge Astronomical Survey Unit* ou Unidade de Pesquisa Astronômica de Cambridge
- CMD** *Colour-Magnitude Diagram* ou Diagrama Cor-Magnitude
- DSS** *Digitized Sky Survey* ou Campanha Digitalizada do Céu
- DTI** *Detector Integration Time* - Tempo de Integração do Detector
- EC** *Embedded Cluster* - Aglomerado imerso
- EFE** Eficiência de Formação Estelar
- ESO** *European Southern Observatory*
- FCM** Filtro Cor-Magnitude
- FIR** *Far Infrared* ou Infravermelho Distante
- FMI** Função de Massa Inicial
- IR** *Infrared* ou Infravermelho
- MS** *Main sequence* - Sequência Principal
- NIR** *Near Infrared* ou Infravermelho Próximo
- NMGs** Nuvens Moleculares Gigantes
- PAH** *Polycyclic aromatic hydrocarbons* ou Hidrocarbonetos Aromáticos Policíclicos
- PDR** *Photodissociation Region* ou Região de Fotodissociação
- PMS** *Pre-main sequence* - Pré-Sequência Principal
- RDP** *Radial Density Profile* ou Perfil de Densidade Radial
- SR** Sinal-Ruído

UV Ultravioleta

VLT *Very Large Telescope*

VISTA *Visible and Infrared Survey Telescope for Astronomy* ou Telescópio da Campanha no Visível e no Infravermelho para Astronomia

VSA *VISTA Science Archive*

VVV *VISTA Variables in the Via Láctea*

YSO Young Stellar Objects ou Objetos Estelares Jovens

Unidades

M_{\odot} - Massa Solar ($1 M_{\odot} = 1,9891 \times 10^{30} \text{ kg}$)

pc - parsec ($1 \text{ pc} = 3,08568025 \times 10^{16} \text{ m}$)

Myr - 10^6 anos

Introdução

As regiões HII são fontes intensas de radiação nos comprimentos de onda do visível, infravermelho e rádio do espectro eletromagnético e são formadas quando estrelas O ou B ionizam o gás que as circundam. Tais regiões são caracterizadas pela presença de linhas intensas em seus espectros: linhas de HI, OII no violeta, OIII no verde e NII no vermelho, sendo a maioria delas proibidas. Regiões HII estão concentradas nos braços espirais da Via Láctea e das galáxias em geral e permitem o estudo de estruturas a grandes distâncias. Ao estudarmos uma região HII estamos possivelmente identificando complexos de formação estelar, pois essas regiões apresentam objetos muito jovens e que estão sempre ligados às regiões de formação estelar denominados aglomerados imersos (EC, do inglês *Embedded Cluster*).

O estudo de aglomerados imersos em nuvens moleculares realizado por Lada and Lada (2003) mostrou que a quantidade desse tipo de objeto presente na Galáxia é surpreendentemente alta. No entanto, a fase de aglomerado imerso dura apenas alguns Myr. O nascimento de estrelas e subsequente formação de aglomerados estelares pode ser um processo catastrófico para a nuvem molecular gigante (NMG) que o gerou. As explosões de supernovas, expansão de regiões HII devido à ação de estrelas massivas, radiação UV e ventos estelares podem destruir completamente a NMG numa escala de alguns 10^7 anos (Elmegreen, 2000; Dobbs and Bonnell, 2006). Um estudo dos aglomerados imersos de uma dada região nos permite melhor compreender os processos que regulam a formação de estrelas na região, por exemplo, através do estudo da idade desses objetos podemos determinar se a formação ocorreu ou não de forma sequenciada.

1.1 Regiões de formação estelar

Nuvens moleculares gigantes localizadas nos braços de galáxias tipo espiral são o principal local de formação de estrelas dentro da maioria das galáxias *late-type*. Estes berçários estelares são extensos ($d \sim 10\text{-}50$ pc) e compostos principalmente de hidrogênio molecular denso ($n \gtrsim 10^3 \text{cm}^{-3}$) e frio ($T \sim 10$ K) misturado a pequenas quantidades de poeira e outros elementos pesados. A maior parte dos processos de formação estelar é concentrada em regiões relativamente pequenas e de alta densidade com aproximadamente 1-10 pc de extensão e contendo na ordem de algumas centenas de massas solares de gás e estrelas. Alguns dos primeiros estudos de formação de estrelas dentro de nuvens moleculares indicam que quase todos os objetos estelares jovens foram associados a aglomerados jovens densos ao invés de distribuídos por toda a nuvem. Os complexos de formação estelar são caracterizados por nuvens moleculares, regiões HII e estrelas OB.

Denominamos de regiões HII aquelas associadas a nuvens de gás ionizado e poeira que envolvem estrelas do tipo OB isoladas ou em grupos de estrelas jovens. As regiões HII são, resumidamente, nebulosas de gás ionizado formadas pela influência de estrelas jovens massivas e quentes sobre o gás. Segundo Gorti and Hollenbach (2002), as estrelas jovens massivas dos tipos espectrais O e B (e estrelas anãs brancas) influenciam significativamente a estrutura, a dinâmica, e o balanço térmico das nuvens ricas em gás ionizado, gás molecular e poeira. Seus fótons no ultravioleta ionizam o gás imediatamente ao seu redor produzindo uma região de hidrogênio ionizado chamada de região HII. Os fótons na faixa do ultravioleta distante conseguem penetrar mais no meio interestelar e dissociam o gás molecular além da região HII, criando uma região de interface conhecida como região de fotodissociação (PDR). Maiores detalhes podem ser encontrados em Hollenbach and Tielens (1999).

Uma vez que apenas as estrelas mais massivas ($M > 8 M_{\odot}$) produzem radiação significativa além do limite de Lyman, as regiões HII podem ser utilizadas como um identificador de formação de estrelas massivas.

Como está bem estabelecido que as estrelas massivas jovens e suas regiões HII associadas nascem e evoluem a partir de nuvens moleculares gigantes (e.g. Zuckerman and Palmer, 1974; Burton, 1976), pode-se naturalmente esperar que as diferentes regiões HII pertencentes ao mesmo complexo são espacialmente e cinematicamente agrupadas em torno da nuvem molecular progenitora. Assim, um complexo de formação estelar pode ser visto como o agrupamento de várias fontes ionizadas e moleculares, seu agrupamento baseia-se em considerações cinemáticas e espaciais. Na prática, um complexo pode ser constituído por:

- (1) As regiões HII e fragmentos ionizados;
- (2) regiões HII, fragmentos ionizados e nuvens moleculares;
- (3) apenas nuvens moleculares.

No último caso, a nuvem não é realmente um complexo de formação de estelar massivo (esta pode conter sítios de formação estelar com nenhuma região HII ainda detectável) (Russeil et al., 2012).

Na Galáxia, podemos destacar como importantes regiões de formação estelar já estudadas, como exemplos podemos destacar o complexo NGC 6334 (nebulosa da Pata de Gato) (Feigelson et al., 2009) e o complexo NGC 2237 (nebulosa da Roseta) (Feigelson et al., 2013). Neste trabalho estudamos o complexo de formação estelar NGC 6357 que está localizado no braço espiral de Sagitário na direção da constelação de Escorpião, apresentado na próxima seção.

1.1.1 O complexo HII NGC 6357

A nebulosa NGC 6357 (\equiv Sh2-11 \equiv W22 \equiv RCW 131), Figura 1.1, tem cerca de 60 arcmin de diâmetro. Imagens no ótico têm mostrado que NGC 6357 é constituída de regiões HII individuais em diferentes estágios evolutivos, numerosas estrelas O e B (Neckel, 1978, 1984), regiões de fotodissociação (PDRs) e algumas fontes no IR, sendo algumas destas fontes candidatas a objetos estelares jovens (YSOs). Durante o trabalho faremos referência também ao complexo de formação estelar associado.

Por razões desconhecidas, esta nebulosa está formando três das estrelas mais massivas já observadas, Pismis 24-1NE, Pismis 24-1SW e Pismis 24-17, (todas membros do aglomerado Pismis 24), com cerca de 100 M_{\odot} cada (Maíz Apellániz et al., 2007). As estruturas apresentadas pela nebulosa são formadas pelas complexas interações entre ventos interestelares, pressão da radiação, campos magnéticos e gravidade. O brilho da nebulosa é resultado da emissão de hidrogênio ionizado (Cappa et al., 2011).

Diversos estudos já foram realizados sobre NGC 6357. Em particular, sobre o aglomerado Pismis 24. A base de dados WEBDA* tem como coordenadas centrais de Pismis 24 $\alpha(2000)=17^h25^m32^s$ e $\delta(2000)=-34^{\circ}25'00''$, além de ter como distância ao Sol $d_{\odot} \sim 1,99$ kpc, avermelhamento $E(B-V)=1,72$ e idade 10 Myr. Frequentemente a estrela binária Wolf-Rayet

*<http://www.univie.ac.at/webda/webda.html>

(WR/O) WR 93 é considerada membro de Pismis 24 (Massey et al., 2001). Ao sudeste do complexo ($\alpha(2000)=17^h25^m32^s$ and $\delta(2000)=-34^\circ24'20''$) está localizado ESO392-SC11 (Holmberg et al., 1978), também catalogado como BDS 100 (Bica et al., 2003), G351.1+0.7 (Damke et al., 2006), AH03 J1725-34.4 (SIMBAD[†]) e também indicado em Moisés et al. (2011). Esta sobredensidade estendida ($\sim 3,5'$) parece estar relacionada à população jovem do complexo em geral. Neste trabalho, nos restringimos ao aglomerado compacto BDS 101 (Tabela 3.1) descoberto por Bica et al. (2003) e localizado a $\sim 1'$ noroeste do centro de ESO392-SC11.

A distância de NGC 6357 é usualmente estabelecida a partir de Pismis 24. A primeira determinação da distância foi feita por Wilson et al. (1970) que obteve o valor $1,0 \pm 2,3$ kpc. Logo em seguida, Neckel (1978) encontrou $1,74 \pm 0,31$ kpc utilizando diagrama cor-magnitude. As determinações mais recentes foram realizadas por Fang et al. (2012) e por Russeil et al. (2012), que obtiveram $1,7 \pm 0,2$ kpc e $1,9 \pm 0,4$ kpc, respectivamente. Também foi determinado o valor de $2,5 \pm 0,5$ kpc por Massey et al. (2001), bem como $1,1$ kpc e $1,74$ kpc derivados por Conti and Vacca (1990) e van der Hucht (2001), respectivamente. Como podemos observar, existe uma considerável dispersão nos valores encontrados na literatura.

Um estudo de YSOs realizado por Persi et al. (1986), juntamente com pesquisas mais recentes, resultaram na descoberta de objetos que vão desde um grande número de candidatos a fontes de infravermelho e de raios-X até YSOs e estrelas massivas com alto avermelhamento, mostrando que todo o complexo HII é uma área ativa de formação estelar (Bohigas et al., 2004; Wang et al., 2007). Até o momento, 38 estrelas OB já foram identificadas em NGC 6357 (Russeil et al., 2012).

A distribuição do gás molecular associado às regiões brilhantes do complexo foi investigada por McBreen et al. (1983), Massi et al. (1997) e Cappa et al. (2011). Os últimos autores encontraram que o gás molecular de NGC 6357 tem velocidades que variam entre $[-14, +4]$ km.s⁻¹. A Figura 1.1 mostra uma imagem composta de NGC 6357. A região H α é mostrada em verde, [OIII] em azul e [SII] em vermelho. Na imagem é possível notar o gás ionizado na estrutura de filamentos e que a grande região tipo casca contém diversas características de sub-regiões tipo casca, faixas de poeira e glóbulos.

A temperatura da poeira em NGC 6357 varia entre ~ 20 -50 K, onde o valor mais alto é detectado em G353.2+0.9 (Persi et al., 1986; Cappa et al., 2011). Regiões com altas temperaturas, porém distantes de Pismis 24 (por exemplo G353.1+0.6), sugerem a existência

[†]<http://simbad.u-strasbg.fr/simbad/sim-fid>

de fontes de excitação ainda não conhecidas (Damke et al., 2006). Uma análise das imagens no ótico revelam que áreas com poeira a altas temperaturas coincidem com regiões que emitem em $H\alpha$ ou em rádio no contínuo. Este comportamento é compatível com o fato da radiação UV proveniente das estrelas presentes no meio ser responsável pelo aquecimento da poeira interestelar.

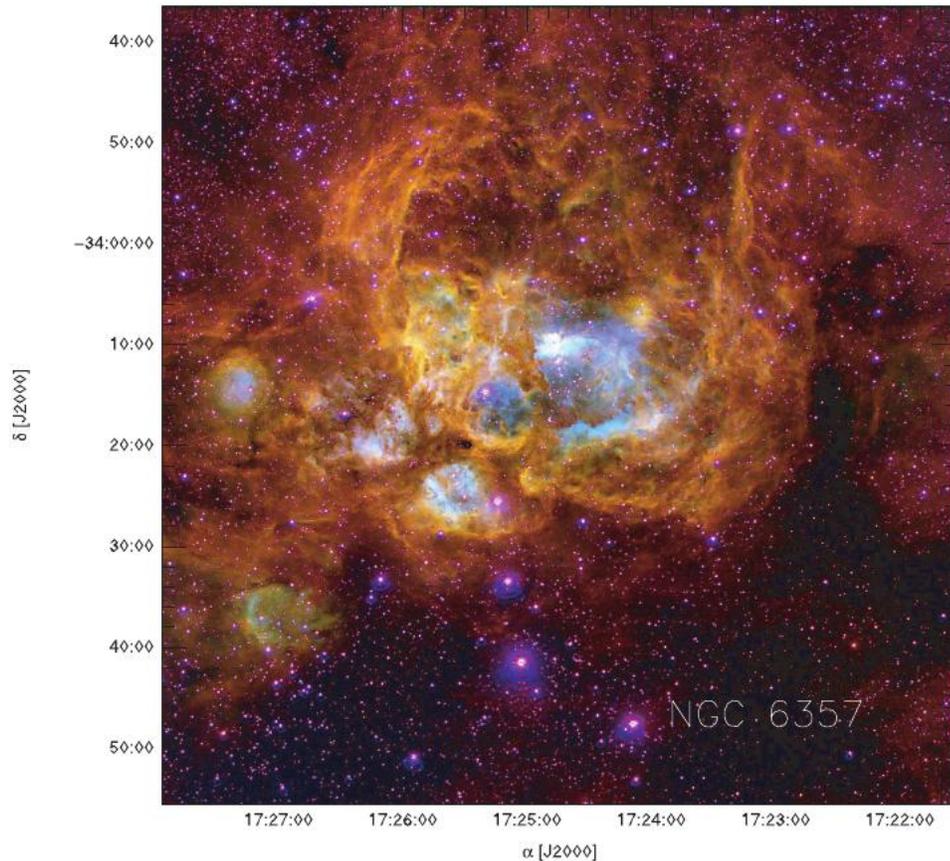


Figura 1.1: Mosaico de imagens de NGC 6357 em falsa cor. As regiões em vermelho, verde e azul indicam emissão em $[SII]$ 6716-31Å, $H\alpha$ e $[OIII]$ 5007Å, respectivamente. Estas imagens foram obtidas com o telescópio Curtis-Schmidt no CTIO em 1999 (Cappa et al., 2011).

A radiação das estrelas massivas tipo OB presentes no complexo pode modificar os grãos de poeira da vizinhança modificando a lei de extinção global. Qualquer mudança na lei de extinção irá afetar a extinção local e desta maneira também afetará a determinação da distância fotométrica. A lei normal de extinção associada à razão de absorção total sobre a seletiva ($R_V=3,1$) parece ser válida em praticamente toda a nossa Galáxia, embora algumas exceções sejam notadas especialmente na direção de regiões de formação estelar e de aglomerados abertos jovens, onde o valor de R_V pode ser maior (O'dell and Wen, 1992). Diferentes valores de R_V indicam diferentes condições do meio, tais como distribuição dos

tamanhos dos grãos de poeira e composição química. Baixos valores de R_V são esperados ao longo da linha de visada de grãos pequenos (Fitzpatrick, 2004).

NGC 6357 apresenta um coeficiente de extinção R_V maior que o do meio interestelar difuso. Recentemente, o valor de R_V para NGC 6357 foi estimado em $3,53 \pm 0,08$, indicando uma distância de 1,75 Kpc (Russeil et al., 2012). Tal valor não difere muito do coeficiente $R_V = 3,8$ encontrado por Neckel and Chini (1981), e também é compatível com o coeficiente $R_V = 3,51$ encontrado por Bohigas et al. (2004).

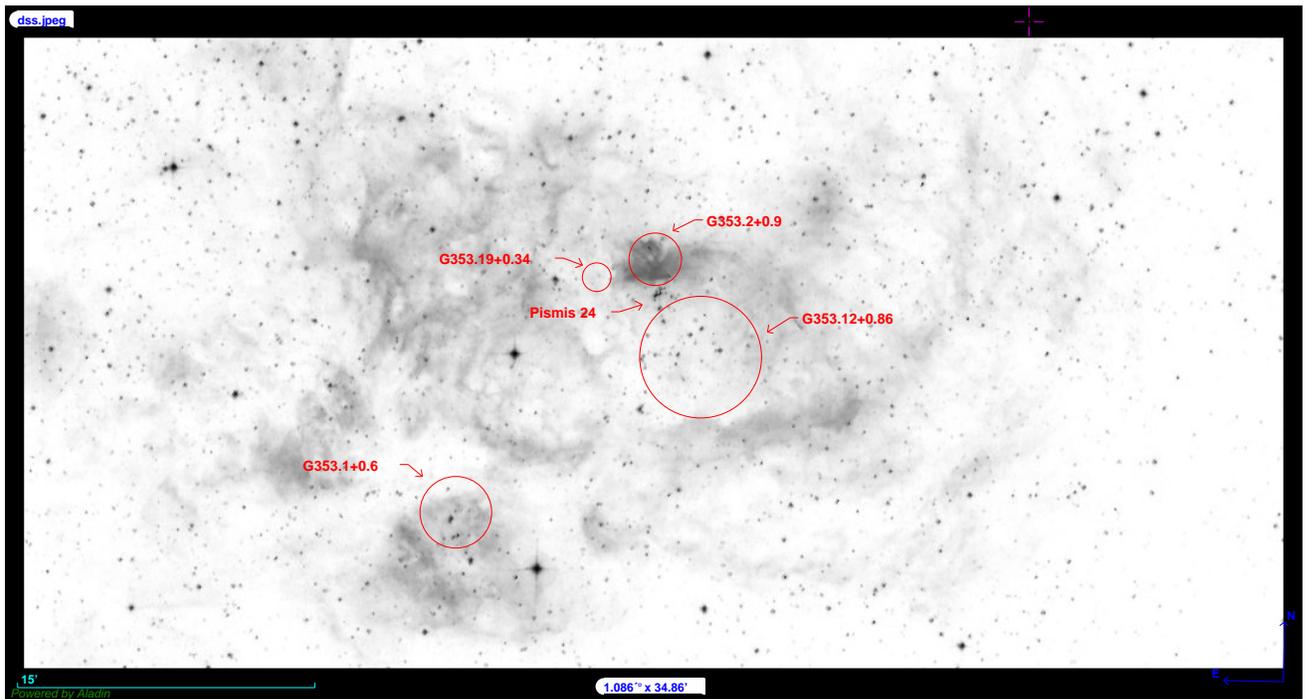


Figura 1.2: Imagem no ótico obtida com o Digitized Sky Survey (DSS) de dimensões $\sim 65' \times 35'$; os círculos em vermelho indicam as regiões HII brilhantes G353.2+0.9, G353.19+0.84, G353.1+0.6 e a região central de NGC 6357, G353.12+0.86. Também é indicada a posição do aglomerado Pismis 24. Orientação norte para cima e leste para a direita.

No ótico, NGC 6357 apresenta diversas regiões do tipo bolha e casca (Figura 1.2). As duas regiões HII mais brilhantes associadas ao complexo são G353.2+0.9 e G353.1+0.6, onde G353.2+0.9 é a mais brilhante no ótico e rádio. Ambas as fontes estendidas de rádio foram detectadas em diversas frequências. Estudos detalhados destas duas regiões brilhantes foram realizados utilizando observações VLA (Very Large Array) em 5 GHz com uma resolução angular de 10.0 arcseg (Felli et al., 1990). A região HII G353.2+0.9 mostra uma nítida fronteira frente ao aglomerado Pismis 24. As regiões HII mais brilhantes G353.2+0.9 e G353.1+0.6, bem como outras estruturas óticas interessantes, são mostradas na Figura 1.2 e

descritas em detalhes a seguir.

- **A região central - G353.12+0.86**

A região em forma de bolha no centro do grande complexo (Figura 1.1) é chamada G353.12+0.86 e pode ser claramente visível no ótico. É possível ver que esta bolha é separada por uma coluna de poeira que divide a região em duas cavidades centradas em $17^h24^m35^s$, $-34^o14'27''$ e $17^h25^m13^s$, $-34^o16'35''$, respectivamente. A região G353.12+0.86 apresenta emissão difusa de [OIII]; tal característica revela que esta encontra-se preenchida por gás quente a $T \approx 10^4$ K e também possui regiões PDR. A razão [OIII]/H α tem valor $\approx 0,09 - 0,12$, indicando condições de alta excitação do gás.

O aglomerado Pismis 24 é a principal fonte de excitação dessa região; a estrela mais massiva de Pismis 24 encontra-se projetada ao norte da cavidade. A distribuição de emissão H α e [OIII] indica a existência de um gradiente de excitação que diminui à medida que nos afastamos de Pismis 24 (sentido norte-sul). Ao leste da bolha, em $\alpha = 17^h25^m$, existe uma intensa emissão em [SII] circundando a região de emissão H α (Cappa et al., 2011). A distribuição de emissão em diferentes comprimentos de onda originada em G353.12+0.86 sugere a existência de PDRs e filamentos óticos ao longo da parede que delimita a bolha.

De acordo com o estudo realizado por Massey et al. (2001) não existem estrelas OB projetadas na direção da região central de NGC 6357. Por outro lado, de acordo com o estudo realizado por Wang et al. (2007), tem-se uma dúzia dessas estrelas projetadas na cavidade, e uma análise do CMD e do diagrama cor-cor 2MASS indica que estas estrelas são do tipo A ou tardias. Cappa et al. (2011) indicaram que esta região é uma bolha interestelar provocada pelas estrelas de Pismis 24 e que os ventos das estrelas massivas do aglomerado varrem e comprimem o material interestelar contra a parede formada pela nuvem molecular.

- **G353.2+0.9**

Esta é a região mais brilhante no ótico, infravermelho e rádio (Figura 1.2). As emissões em H α e [OIII] se correlacionam com a emissão em rádio. A detecção tanto de linhas óticas quanto de contínuo de rádio indica que o gás ionizado está sendo empurrado pelos ventos das estrelas massivas do aglomerado Pismis 24, que está localizado ao sul desta região brilhante. Além disso, foi possível também observar emissão de PAHs em

8 μm . Emissão em 4,5 μm próxima a Pismis 24 pode ter sido originada por choques no gás (Cappa et al., 2011).

As densidades de elétrons para essa região derivadas a partir de imagens no contínuo de rádio revelam que esta é a área com maior densidade eletrônica do complexo, em torno de 2.000 cm^{-3} (Bohigas et al., 2004) em contraste com o valor 400 cm^{-3} derivado por Cappa et al. (2011). A massa de gás ionizado é cerca de $290 M_{\odot}$ (Bohigas et al., 2004).

Westmoquette et al. (2010) encontraram evidências cinemáticas de uma forte interação entre Pismis 24 e o gás na coluna de poeira; a temperatura da poeira nessa área é maior que a esperada para uma região HII, o que é compatível com a região onde frentes de choque e ionização estão presentes.

- **G353.19+0.84**

Em G353.19+0.84 é possível identificar, numa emissão em rádio no contínuo, uma concentração ionizada de dimensões $3,1 \times 2,1\text{ pc}^2$ localizada ao sudeste de G353.2+0.9. Esta região ionizada encontra-se atrás de uma área de forte absorção visual, não podendo ser detectada no ótico. Porém, no infravermelho distante pode-se notar que esta região está parcialmente projetada em um anel de emissão de PAHs. Tais características sugerem que os grãos interestelares de maior dimensão e frios estão misturados ao gás ionizado, e nesse ambiente os PAHs são destruídos.

- **G353.1+0.6**

G353.1+0.6 é uma região HII mais evoluída que está em expansão e interagindo com o material da nuvem molecular que encontra-se no lado norte. De acordo com Felli et al. (1990), esta região é caracterizada pela presença de emissão em contínuo de rádio e uma forte emissão no FIR. A luminosidade derivada para esta região está em torno de $5,9 \times 10^5 L_{\odot}$, a temperatura estimada é de $\sim 43\text{ K}$ e a densidade média de elétrons está em torno de 250 cm^{-3} . A densidade de H_2 está entre $10^3\text{-}10^4\text{ cm}^{-3}$ e a massa de gás ionizado é de $81 M_{\odot}$. Pelo menos 3 estrelas do tipo O presentes nessa região podem ser responsáveis pela emissão no FIR e pela excitação da região HII. A fonte Irs 3, presente em G353.1+0.6, apresenta baixa luminosidade $L(1\text{-}10\ \mu\text{m}) \leq 9 L_{\odot}$, e de acordo com Persi et al. (1986), esta pode ser uma estrela T-Tauri.

1.2 Aglomerados Estelares Imersos

Observações de NMGs no infravermelho ao longo dos últimos 30 anos forneceram uma forte evidência de que a formação estelar em aglomerados é uma forma dominante de formação de estrelas. Estima-se que mais de 90% de todas as estrelas são formadas dentro de aglomerados com mais de 100 membros (Lada and Lada, 2003). Nos estágios iniciais de formação, esses aglomerados estelares estão profundamente imersos nas nuvens moleculares em que foram gerados. Como são circundados por gás e poeira, estes aglomerados são observáveis apenas no infravermelho.

Objetos estelares jovens estão associados aos ventos estelares, aos *outflows*[‡] e à emissão UV das estrelas massivas. Esses ventos e os campos de radiação dispersam muito do material remanescente e acabam esculpindo cavidades nas NMGs. A combinação destes processos tende a transformar os aglomerados imersos em aglomerados visivelmente expostos em um período de tempo relativamente curto (2-4 milhões de anos). Na verdade, os aglomerados com idades superiores a ~ 5 milhões de anos são raramente associados ao gás molecular (Leisawitz et al., 1989; Lada and Lada, 2003; Allen et al., 2007). Em média, 10% a 30% do material da nuvem molecular é convertido em estrelas antes da dispersão do gás frear o processo de formação estelar.

Aglomerados estelares jovens e ainda imersos representam peças fundamentais da formação estelar, visto que em menor escala a formação isolada de estrelas compreende uma pequena fração de toda a formação de estrelas. Assim, uma compreensão de sua criação e evolução fornece uma análise mais profunda de diversos processos astrofísicos. Em escalas maiores, a evolução estelar é responsável pela reciclagem de material galáctico, e descrições precisas de formação estelar e da sua evolução são componentes necessárias para as teorias de evolução de galáxias.

Na escala de estrelas individuais, a conservação do momento angular requer que a formação estelar seja acompanhada pela formação de disco circumestelar. Estes discos são os progenitores de sistemas planetários. Portanto, a formação de estrelas e planetas está intrinsecamente ligada, e o ambiente de formação estelar pode ter consequências significativas para a formação de sistemas tipo solar onde haja estabilidade e habitabilidade. Teorias de formação estelar também devem fornecer informações sobre propriedades gerais da população estelar galáctica, tais como a universalidade aparente da função inicial de massa estelar (FMI),

[‡]Material ejetado pelas estrelas no meio interestelar.

a distribuição de binárias e as frequências e estrutura dos sistemas planetários.

O processo de formação estelar é de natureza destrutiva para a NMG, pois as estrelas recém formadas começam imediatamente a erodir gás ao seu redor. Em função dessa ação destrutiva, a formação estelar é um processo bastante ineficiente. A energia potencial que mantém o sistema gás + estrelas ligado provém principalmente do gás. Portanto, o ambiente em que mais ocorre formação de estrelas impõe limites à eficiência de formação estelar (EFE), ao tamanho dos discos que formam planetas e à escala de tempo em que a formação planetária pode ocorrer. Além de dispersar o gás molecular e assim limitar a EFE, os fortes campos de radiação produzidos por YSOs podem fotoevaporar os discos que cercam as estrelas jovens e então restringir o seu potencial de formação planetário. Aglomerados estelares também podem proporcionar ambientes densos em que as interações gravitacionais entre seus membros podem afetar os discos circunestelares, limitando desta maneira a formação de planetas e a formação de sistemas tipo solar (Adams and Laughlin, 2001; Smith and Bonnell, 2001; Shu et al., 1993).

1.2.1 Propriedades dos aglomerados estelares imersos

Aglomerados imersos diferem-se dos outros tipos de aglomerados estelares pela sua associação a quantidades significativas de gás molecular e poeira (e.g., aglomerado estelar imerso Pismis 24 - Figura 1.3.). Este material interestelar é opticamente espesso nos comprimentos de onda da luz visível, com valores de extinção tão elevados como $A_V \sim 100$ magnitudes (Vrba et al., 1975; Strom et al., 1976; Chini et al., 1977; Wilking and Lada, 1983). Em contraste, a extinção é muito menos evidente nas bandas do infravermelho próximo J , H , e K_s ($1,2 \mu\text{m}$, $1,6 \mu\text{m}$ e $2,2 \mu\text{m}$, respectivamente): $A_K \sim A_V/10$, permitindo que as observações no infravermelho possam penetrar o gás revelando aglomerados estelares muito jovens (Zinnecker et al., 1993). Portanto, mesmo para altos valores de A_V as absorções JHK_S dos aglomerados imersos são relativamente baixos.

Observações no infravermelho próximo têm a vantagem adicional de que as estrelas são significativamente mais brilhantes no infravermelho durante a fase de PMS do que em toda a sua permanência na sequência principal. Esta propriedade facilita a detecção de novos objetos estelares em aglomerados imersos dentro de uma grande faixa de massas através da utilização de fotometria no infravermelho. Baseando-se nessas informações, vemos que a utilização de dados de *surveys* no NIR tendem a possibilitar a identificação e estudo de aglomerados jovens imersos.



Figura 1.3: Mosaico de imagens no óptico e infravermelho do aglomerado imerso Pismis-24 e da região HII G353.2+0.9. Imagens foram obtidas com o Hubble Space Telescope em 2006. Orientação norte para cima e leste para a direita.

O *survey* da Nuvem Molecular de Orion realizado por Lada et al. (1991) sugeriu que $\sim 96\%$ de toda a formação de estrelas dentro da nuvem estava ocorrendo dentro de 4 aglomerados jovens. Observações recentes continuam a indicar que a formação estelar em aglomerados é um modo dominante dentro de complexos de nuvens moleculares, embora o processo de formação de estrelas distribuídas por toda a nuvem ainda seja observado. Estudos de complexos de nuvens moleculares concluídos recentemente com o Telescópio Espacial Spitzer produziram estimativas da fração total da formação estelar que ocorre em aglomerados; esta fração tem valores entre $\sim 70\%$ e 90% (Megeath et al., 2005; Padgett et al., 2008). Fora da nossa galáxia, Whitney et al. (2008) constataram que objetos estelares jovens na Grande Nuvem de Magalhães são altamente concentrados em menor escala, podendo ser resolvidos com o Telescópio Espacial Spitzer (~ 3 pc).

Aglomerados imersos localizados na vizinhança solar (dentro de ~ 2 kpc) têm massa total estelar variando por quase três ordens de grandeza, de $\sim 20 M_{\odot}$ até mais de $\sim 1000 M_{\odot}$. A função de distribuição de massa de aglomerados imersos é aproximadamente plana na faixa de 50 - $1000 M_{\odot}$ (Lada and Lada, 2003), o que implica que a massa total dos membros do aglomerado é uniformemente distribuída ao longo de *bins* de massa espaçados logaritmicamente.

Definir o tamanho típico de um aglomerado não é uma tarefa simples, que torna-se ainda mais complicada em função da geometria não-esférica da maioria desses objetos (Schmeja and Klessen, 2006). No entanto, aglomerados imersos têm raios R_c variando entre 0,1 - 10 pc, e densidade superficial mais ou menos constante. O tamanho pode ser escrito pela função:

$$R_c = R_{sc} \sqrt{\frac{N}{300}}, \quad (1.1)$$

onde N é o número de membros do aglomerado e R_{sc} é o raio de escala em pc que normalmente tem valores entre $\sim 1 - 3$ pc.

Aglomerados jovens imersos apresentam duas morfologias: i) centralmente concentrada e 2) hierárquica. Os aglomerados IC 348 (Muench et al., 2003) e NGC 7129 (Allen et al., 2007) são alguns exemplos de aglomerados centralmente concentrados que são muitas vezes acompanhados por um halo de menor densidade de YSOs em torno do pico de alta densidade. Por outro lado, aglomerados como NGC 1333 (Lada et al., 1996) e NGC 2264 (Lada et al., 1993) apresentam múltiplos picos de alta densidade e estrutura variando dentro de um grande intervalo de escalas espaciais, sendo assim classificados como hierárquicos (Lada and Lada, 2003).

Embora as estrelas mais massivas estejam preferencialmente localizadas na região central dos aglomerados abertos, variações acerca da segregação de massa são observadas em aglomerados imersos. O Trapézio é um exemplo bem conhecido de aglomerado que tem segregação de massa significativa; porém, este é ainda jovem para que a segregação tenha sido resultado da evolução dinâmica (Bonnell and Davies, 1998). NGC 2071 e NGC 2024 (Lada et al., 1991) também apresentam evidências de segregação de massa. No entanto, tal característica não ocorre com frequência, pois a maioria dos aglomerados jovens imersos, incluindo R2 Mon, não apresenta fortes evidências de segregação em massa ou qualquer variação da distribuição de massa em suas diferentes regiões (Carpenter et al., 1997).

A formação de estrelas muito massivas dentro de um aglomerado imerso geralmente marca o início do fim da formação estelar. A radiação produzida por estrelas massivas O e B aquecem o material que circunda o aglomerado, aumentando a pressão e resultando em rápida expansão do gás. Este mecanismo pode remover gás da região em escalas de tempo menores que 10^4 anos. Aglomerados menores não apresentam formação de estrelas massivas; por outro lado, os ventos produzidos pelas estrelas de baixa massa são os prováveis responsáveis pela dispersão do material interestelar, embora em escalas de tempo mais longas (Matzner and McKee, 2000). Se o aglomerado imerso suportar a ação dos mecanismos de dissociação, ele

poderá evoluir para um aglomerado gravitacionalmente ligado ou uma distribuição de estrelas centralmente concentrada. Caso contrário, o seu destino será uma distribuição praticamente homogênea de estrelas que provavelmente irá se dispersar.

As estrelas que compõem os aglomerados imersos encontram-se em processo de formação ou em estágios iniciais de evolução e grande parte dessas estrelas está na fase de PMS. Portanto, ao observar o CMD de um aglomerado estelar imerso, este apresentará uma sequência principal em desenvolvimento e uma PMS bem destacada.

1.2.2 Objetivos do trabalho

Os aglomerados e candidatos a aglomerados da amostra do presente estudo (Capítulo 3) são aglomerados imersos na região HII NGC 6357.

Como as regiões HII estão geralmente ligadas a regiões de formação estelar, consideramos o complexo NGC 6357 um excelente alvo de estudo para verificação de novos aglomerados estelares imersos. Tal estudo é pioneiro no que diz respeito à análise de complexos de formação estelar utilizando duas gerações de dados (2MASS e VVV), e tende a consolidar o VVV como ferramenta na investigação de aglomerados ainda imersos nas nuvens moleculares. Trabalhos relacionados a descobertas de aglomerados estelares com o *survey* VVV tem sido realizados (e.g. Borissova et al., 2011, 2014; Chené et al., 2012). Na realização desta tese pretende-se: (i) testar os níveis de contraste, descontaminação e detecção, comparando os resultados do 2MASS com o VVV, além de investigar como o estado dinâmico destes aglomerados pode ser inferido de tais dados, e com que precisão; (ii) estudar a estrutura interna dos aglomerados com muito mais resolução e profundidade com o VVV; (iii) analisar em novos candidatos a aglomerados estelares qual o avanço do horizonte de detecção nas regiões de baixa latitude Galáctica, de alta contaminação de campo e absorção; (iv) estudar aglomerados imersos em nuvens moleculares, aglomerados com PMS de várias idades, aglomerados jovens em dissolução, além de verificar as consequências da expulsão do gás primordial.

A organização deste trabalho dá-se em cinco capítulos como segue: No capítulo 2 é feita uma descrição dos dados fotométricos utilizados e dos métodos de análise que serão aplicados. No capítulo 3 são apresentados os objetos estudados. Por fim, no capítulo 4 são apresentadas as análises e discussões dos resultados e no capítulo 5 temos as conclusões e perspectivas. Os artigos publicados até o momento estão no Anexo A.

Dados Fotométricos e Métodos de Análise

Aglomerados estelares jovens em estágios iniciais de sua formação e ainda imersos na nuvem que os originou apresentam estrelas na PMS e grande parte delas com emissão no infravermelho que pode ser detectada como excesso na banda K_s . Baseando-se nessa informação realizamos a busca e análise de aglomerados estelares jovens no complexo NGC 6357 utilizando a fotometria infravermelha VVV substituindo as estrelas saturadas por estrelas 2MASS. A fotometria VVV acrescenta em média 3 magnitudes aos CMDs obtidos com a fotometria 2MASS. Utilizamos ferramentas como diagrama cor-magnitude, perfil de densidade radial e imagens do 2MASS, VVV, Spitzer (Werner et al., 2004) e DSS empregando a ferramenta Aladin* Sky Atlas.

2.1 VVV - The VISTA Variables in the Via Láctea Survey

O projeto VVV é um dos seis levantamentos (*surveys*) públicos selecionados pelo ESO para utilizar o novo telescópio de 4,1 m VISTA. O projeto VVV foi planejado para monitorar o bojo da Via Láctea, assim como a região mais interna do plano Galáctico, nos comprimentos de onda do infravermelho próximo, Z ($0,87 \mu\text{m}$), Y ($1,02 \mu\text{m}$), J ($1,25 \mu\text{m}$), H ($1,64 \mu\text{m}$) e K_s ($2,14 \mu\text{m}$) (Figura 2.1). O filtro “K-short” (K_s) exclui comprimentos de onda superiores a $2,31 \mu\text{m}$, o que torna os ruídos nas observações da banda K_s menos sensíveis a variações da temperatura ambiente. O principal objetivo do VVV é revelar a estrutura da região central

*Aladin é um software interativo que permite ao usuário visualizar imagens astronômicas digitalizadas e sobrepor entradas a partir de catálogos ou bancos de dados astronômicos. Disponível em <http://aladin.u-strasbg.fr/>. (Bonnarel et al., 2000)

da Via Láctea utilizando indicadores de distância conhecidos, como estrelas RR Lyrae e Cefeidas. O VVV permite novos estudos sobre a história da Via Láctea, sua evolução, e um censo de populações estelares do centro Galáctico, bem como estudos sobre as regiões de formação estelar do disco (Minniti et al., 2010).

O telescópio VISTA está localizado no Observatório de Cerro Paranal, norte do Chile, com coordenadas $24^{\circ}36'57''$ S e $70^{\circ}23'51''$ W, a uma altitude de 2.518 m acima do nível do mar. O VISTA possui uma razão focal de $f/3,25$, ótica ativa, e apenas um instrumento, chamado de “VIRCAM” (*Visual and InfraRed CAMera*), composto por uma matriz de 4×4 detectores de $2,048 \times 2,048$ pixels, somando um total de 67 bilhões de pixels. O campo de visão do VISTA é de 1,64 graus quadrados, com uma escala de placa de 0,34 arcseg/pixel.

As observações do VVV foram iniciadas no ano de 2010 e monitorarão um número superior a 10^9 objetos ao longo de um período de cinco anos. A área total observada pelo VVV é de 562 graus quadrados, entre as coordenadas Galácticas $-10,0^{\circ} < l < +10,4^{\circ}$ e $-10,3^{\circ} < b < +5,1^{\circ}$ na região do bojo, e com coordenadas $294,7^{\circ} < l < 350,0^{\circ}$ e $-2,25^{\circ} < b < +2,25^{\circ}$ sobre o plano Galáctico.

A estratégia de observação do VVV é composta da observação de toda a área do bojo e disco nas cinco bandas, e uma campanha de variabilidade com ~ 100 épocas na banda K_s ao longo dos cinco anos (Tabela 2.2). As observações em $ZYJHK_s$ têm sido realizadas desde 2010, com a cobertura total dos 562 graus quadrados (Saito et al., 2013). O *seeing* das imagens em J , H e K_s é de $0,9''$, enquanto que nas bandas Z e Y é de $1,0''$.

Tabela 2.1: Comprimentos de onda efetivos para o conjunto de filtros do telescópio VISTA, utilizados para as observações do VVV, e a extinção relativa em cada filtro baseada nos valores de Cardelli et al. (1989). Extraído de Catelan et al. (2011).

Filtro	$\lambda_{\text{ef}}(\mu\text{m})$	A_X/A_V	$A_X/E(B - V)$
Z	0,878	0,499	1,542
Y	1,021	0,390	1,206
J	1,254	0,280	0,866
H	1,646	0,184	0,567
K_s	2,149	0,118	0,364

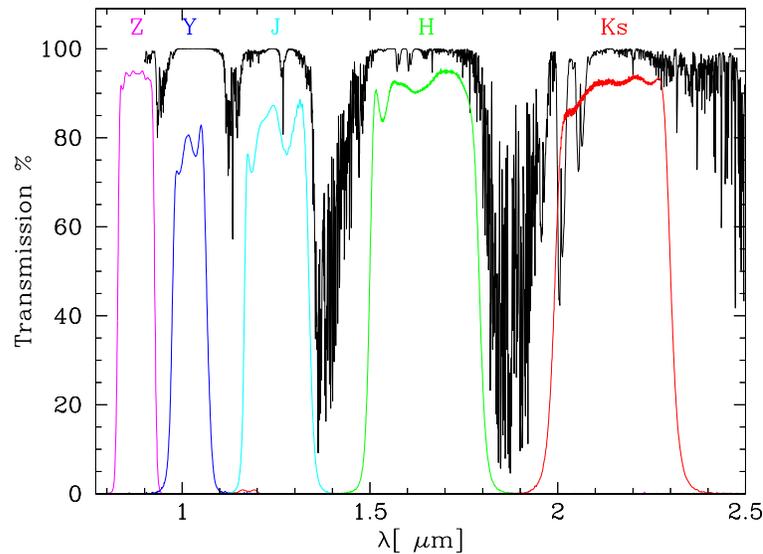


Figura 2.1: Curvas de transmissão para os cinco filtros de bandas presentes na VIRCAM em comparação com o perfil de transmissão típico da atmosfera para a massa de ar = 1,0 e 1,0 mm de vapor de água. Os comprimentos de onda eficazes para todos os filtros estão listados na Tabela 2.1. Figura extraída de Saito et al. (2012).

Os dados observados pelo VVV são processados e calibrados com o VISTA *data flow system* no centro de processamento de dados astronômicos da Universidade de Cambridge - Reino Unido, “CASU”. O CASU também efetua a fotometria de abertura das imagens do VVV, fornecendo um catálogo fotométrico contendo posições, fluxos e medidas da forma das fontes, extraídas com diferentes aberturas, assim como um índice indicando a mais provável classificação da fonte. Fontes classificadas com “-1” caracterizam fontes “estelares” com a melhor qualidade fotométrica. Outros índices presentes nos catálogos são “-2” (objetos *quase* estelares), “0” (ruído, ou fontes com barras de erro a baixo de 5 sigma), “+1” (objetos não estelares), “-7” (fontes contendo pixels com problema) e “-9” (para fontes saturadas)(Figura 2.2).

Os dados utilizados neste trabalho foram extraídos com a abertura *apermag3*, que é a abertura padrão utilizada pelo CASU para representar o fluxo. Os dados do VVV estão no sistema fotométrico do telescópio VISTA (VISTA *Vegamag system*[†]), com a calibração nas bandas *J*, *H* e *K_s* sendo feita utilizando as magnitudes de estrelas do catálogo 2MASS presentes nas imagens do VVV no sistema VISTA.

Os catálogos de abertura do VVV, produzidos pelo CASU, atingem o limite de

[†]O sistema VISTA *Vegamag* é ele próprio derivado do sistema 2MASS, e onde a estrela Vega tem uma magnitude igual a 0 em todos os filtros. O procedimento é amplamente discutido em Girardi et al. (2002, 2008).

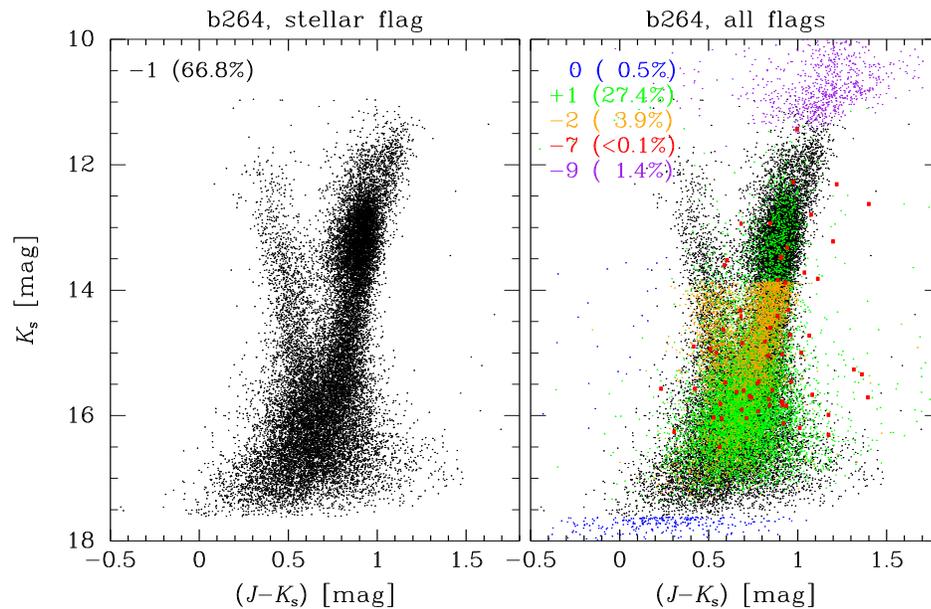


Figura 2.2: Diagramas cor-magnitude para um campo do bojo identificado pelo VVV como b264, à esquerda mostrando as fontes de alta qualidade com índice -1 e à direita todos os outros índices. Figura extraída de Saito et al. (2012).

precisão de 5σ em $K_s \sim 18,5$ mag, porém este valor varia de maneira importante com o aumento da densidade de fontes no campo, alcançando o valor extremo de $K_s \sim 16,5$ mag na região mais central do bojo Galáctico, onde a densidade de estrelas é máxima na área do VVV. Estes valores são aproximadamente quatro magnitudes mais profundos do que os obtidos com os dados do levantamento 2MASS, permitindo uma mais completa visão das populações estelares da parte central da Galáxia. Testes realizados com um experimento de estrelas artificiais demonstram que os catálogos de fotometria do VVV são $\sim 80\%$ completos até o limite de $K_s \sim 17,0$ nas regiões mais externas do bojo, mantendo a mesma porcentagem de 80% na região central da Galáxia, até $K_s \sim 15,5$ magnitudes.

Tabela 2.2: Estratégia de observação e tempos de exposição do VVV.

Área	Filtro	Tempo de exposição médio por pixel (s)
Bojo	Z, Y	40
Bojo	J	48
Bojo	H, K_s	16
Bojo	K_s (var)	16
Disco	Z, Y	80
Disco	J, H, K_s	80
Disco	K_s (var)	16

2.2 Fotometria 2MASS

O projeto 2MASS (Skrutskie et al., 2006) foi concebido para *surveys* no infravermelho próximo J ($1,25\mu\text{m}$), H ($1,65\mu\text{m}$) e K_s ($2,17\mu\text{m}$) (Figura 2.3), e entre junho de 1997 e fevereiro de 2001 coletou 25,4 Tbytes de dados e imagens cobrindo 99,998% da esfera celeste. A Universidade de Massachussetts foi responsável pela administração geral do projeto e pelo desenvolvimento das câmeras infravermelhas e dos sistemas computacionais, e o Centro de Processamento e Análise no Infravermelho (IPAC) da NASA responsável por todo o processamento da base de dados e a construção e distribuição dos dados.

Nas observações do 2MASS foram utilizados 2 telescópios de 1,3 m, um localizado no Mount Hopkins, Arizona - EUA, e o outro em Cerro Tololo - Chile. Os telescópios eram equipados com uma câmera de 3 canais, cada canal constituído por uma grade 256×256 de detectores de Hg-Cd-Te. Os filtros de transmissão J e H são basicamente os mesmos do sistema Johnson.

Durante as observações o céu foi escaneado em tiras de $8,5'$ de largura em ascensão reta e 6° em declinação. O tempo efetivo de exposição para cada ponto do céu foi de 7,8 s em cada banda, e por ser curto, as imagens têm um limite relativamente baixo em magnitudes (Tabela 2.3). As fontes selecionadas para o *survey* foram aquelas com sensibilidade de $1 mJy$ e com razão sinal-ruído maior que 10.

Os dados do 2MASS estão compilados na forma de dois catálogos: o Catálogo de Fontes Puntuais (PSC), contendo 470.992.970 fontes (estrelas e objetos não resolvidos) e o

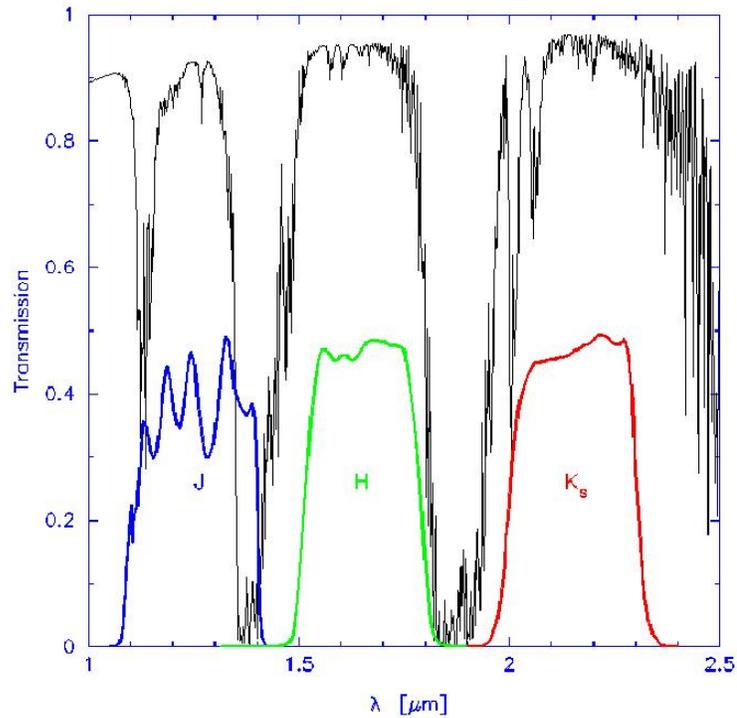


Figura 2.3: Curvas de transmissão para os três filtros de bandas presentes no 2MASS (J , H e K_s), comparado ao modelo de transmissão atmosférica para o instrumento localizado no Monte Hopkins (Skrutskie et al., 2006).

Catálogo de Fontes Extensas (XSC), contendo 1.647.599 fontes (galáxias e nebulosas), além do Atlas de Imagens nas três bandas do *survey*. O PSC é composto por dois subconjuntos de dados: o catálogo de alta confiabilidade e o de extensão fraca.

Tabela 2.3: Limite de magnitude do 2MASS para fontes não-confusas fora do plano Galáctico ($|b| > 10^\circ$) e de qualquer área problemática do céu.

Filtro	$\lambda(\mu m)$	Fonte puntual ($SR = 10$)	Fontes extensas
J	1,25	15,8	14,0
H	1,65	15,1	14,3
K_s	2,17	14,3	13,5

O PSC é mais de 99% completo para $J < 15,8$, $H < 15,1$ e $K_s < 14,3$ mag, exceto nas regiões de alta densidade de fontes. Na parte mais afastada do plano Galáctico e do bojo, a densidade cai suavemente, e para $|l| < 90^\circ$ essa queda torna-se abrupta devido ao ruído.

O conjunto de dados de extensão fraca contém fontes que atingem 0,5-1,0 mag além

de $J < 15,8$, $H < 15,1$ e $K_s < 14,3$. As fontes são incluídas no PSC caso tenham $SR > 7$ em pelo menos uma das bandas ou $SR > 5$ nas três bandas. As fontes da extensão fraca compreendem 29,5%, 38,3% e 43,8% de todas as detecções em J, H e K_s , respectivamente.

Para obter a fotometria 2MASS extraímos através da ferramenta *VizieR*[‡] regiões circulares centradas nas coordenadas do aglomerado a ser estudado.

A fotometria 2MASS tem sido bastante utilizada no estudo de aglomerados abertos (Bica et al., 2006b; Bonatto and Bica, 2007a), e tem-se mostrado bastante confiável, porém no estudo de aglomerados muito jovens e ainda imersos nas nuvens moleculares que os geraram faz-se necessária uma maior profundidade observacional para que as estrelas menos brilhantes (que ocupam a região da PMS) possam ser utilizadas nas análises dos CMDs.

2.3 Diagrama Cor-Magnitude

O diagrama cor-magnitude (CMD) consiste num plano contendo uma cor e uma magnitude das estrelas que compõem o objeto estudado. Ao analisarmos o CMD das regiões que contém um aglomerado estelar podemos verificar que suas estrelas não estão distribuídas de maneira uniforme, mas sim seguindo algumas sequências preferenciais chamadas sequências evolutivas do aglomerado. As sequências evolutivas de um aglomerado estelar podem ser ajustadas por uma isócrona[§] que fornece a distância, idade e avermelhamento ou excesso de cor das estrelas que compõem o aglomerado.

Tratando-se de aglomerados jovens, o estudo do CMD baseia-se em parte no ajuste de isócronas de MS e também no ajuste de isócronas derivadas de modelos evolutivos para estrelas da PMS[¶]. Porém, a determinação da idade de aglomerados ainda imersos nas nuvens moleculares pode ser bastante difícil em função de fatores como a extinção, a binaridade, a variabilidade estelar e, principalmente, o excesso infra-vermelho, que é uma característica comum das estrelas de PMS (Bonatto et al., 2012a,b). Como consequência desses fatores, a idade de aglomerados imersos determinada por meio do CMD pode ser imprecisa, especialmente quando as estrelas da PMS em um aglomerado imerso são confundidas com as estrelas de campo (e.g. Kumar et al., 2004). Entretanto, com estudos baseados no método de descontaminação do campo (Saurin et al., 2012; Soares et al., 2008), tem-se que a idade

[‡]Disponível em <http://vizier.u-strasbg.fr/viz-bin/VizieR-3>.

[§]Sequência de estrelas de mesma idade, metalicidade e diferentes massas obtida a partir de modelos.

[¶]Neste trabalho, para a determinação de parâmetros fundamentais dos aglomerados ajustamos isócronas PARSEC v1.1 (Bressan et al., 2012), que neste trabalho, por tradição, chamaremos isócronas de Padova.

para esses objetos varia entre 0,5 e 5 milhões de anos. O CMD observado de um aglomerado imerso geralmente apresenta uma PMS bastante desenvolvida, povoada por estrelas fracas e avermelhadas, e uma MS pouco populosa e de inclinação vertical (Bonatto and Bica, 2009b).

Diferentes grupos têm desenvolvido isócronas de PMS (D’Antona and Mazzitelli, 1997, 1998; Palla, 1999; Baraffe et al., 1998; Siess et al., 2000), porém, mesmo nesses modelos as incertezas nos caminhos evolutivos são grandes, inclusive para idades inferiores a 1 milhão de anos. Existe também o método baseado em simulações de Monte Carlo, que tem como propósito determinar a idade para aglomerados imersos fazendo uma comparação com aglomerados sintéticos construídos a partir de isócronas, uma FMI e erros fotométricos realísticos (Stead and Hoare, 2011). Além disso, há o método iterativo desenvolvido por Bonatto et al. (2012b), que compara o CMD observado com CMDs sintéticos utilizando uma otimização global para determinar os parâmetros fundamentais do aglomerado.

2.3.1 Descontaminação das Estrelas de Campo

O CMD é uma das principais ferramentas na busca por parâmetros fundamentais de aglomerados, porém a contaminação por estrelas de campo gera incertezas (Bonatto et al., 2004, 2005), principalmente quando estes aglomerados encontrados estão situados a baixas latitudes e/ou projetados na direção do bojo. Portanto, métodos de descontaminação por estrelas de campo devem ser empregados para que o conteúdo estelar dos aglomerados possa ser isolado.

No presente trabalho, o método de descontaminação aplicado é o mesmo descrito em Bonatto and Bica (2007b). Este método trabalha com bases estatísticas fazendo a contagem de estrelas por área na região do aglomerado e no campo de comparação, dividindo o CMD observado em uma grade de 3 dimensões, a magnitude J e as cores $(J - H)$ e $(J - K_s)$, considerando uma incerteza de 1σ em cada banda (σ_J , σ_H e σ_{K_s}) da fotometria. Em seguida computa-se a densidade de estrelas de campo esperada para cada célula da grade, baseando-se na densidade de estrelas do campo de comparação que apresentam magnitude e cores compatíveis com as da célula, e subtraem-se estrelas numa fração consistente com a densidade de estrelas de campo esperada para cada célula. Por simplicidade, vamos redefinir os eixos $\chi = J$, $\xi = (J - H)$ e $\zeta = (J - K_s)$. As dimensões típicas das células são $\Delta\chi = 1,0\ mag$ e $\Delta\xi = \Delta\zeta = 0,2\ mag$. Esses valores garantem uma contagem estatística significativa de estrelas nas células individuais e ao mesmo tempo preservam a morfologia das diferentes sequências evolutivas no CMD.

Consideremos agora uma célula tridimensional típica com eixos (χ, ξ, ζ) e dimensões $(\chi_c \pm \frac{\Delta\chi}{2}, \xi_c \pm \frac{\Delta\xi}{2}, \zeta_c \pm \frac{\Delta\zeta}{2})$, onde (χ_c, ξ_c, ζ_c) representam as coordenadas centrais da célula. Para computar a probabilidade de uma estrela com coordenadas $(\bar{\chi} \pm \sigma_\chi, \bar{\xi} \pm \sigma_\xi, \bar{\zeta} \pm \sigma_\zeta)$ pertencer a esta célula, o algoritmo usa uma distribuição gaussiana da magnitude e cores. As prováveis estrelas do aglomerado estão situadas na região $0 < R < R_{RDP}$, cuja área projetada é A_{agl} , e as estrelas do campo estão localizadas na região $R > R_{RDP}$, cuja área é A_{fs} . A densidade (ρ_{fs}^{cel}) de estrelas de campo esperada para determinada célula é calculada considerando a probabilidade individual (P_{fs}^{cel}) de todas as estrelas do campo de comparação (N_{fs}) pertencerem à célula, dividida pela área do referido campo, $\rho_{fs}^{cel} = \frac{P_{fs}^{cel}}{A_{fs}}$, onde

$$P_{fs}^{cel} = \sum_{i=1}^{N_{fs}} \int \int \int P_i(\chi, \bar{\chi}_i; \xi, \bar{\xi}_i; \zeta, \bar{\zeta}_i) d\chi d\xi d\zeta \quad (2.1)$$

e $P_i(\chi, \bar{\chi}_i; \xi, \bar{\xi}_i; \zeta, \bar{\zeta}_i)$ representa a probabilidade de a i -ésima estrela do campo, com coordenadas no CMD $(\bar{\chi}_i, \bar{\xi}_i, \bar{\zeta}_i)$ e incerteza $(\sigma_{\chi_i}, \sigma_{\xi_i}, \sigma_{\zeta_i})$, ter a magnitude e cores (χ, ξ, ζ) . A integração é feita sobre toda a extensão da célula em cada dimensão, $\chi_c - \frac{\Delta\chi}{2} \leq \chi \leq \chi_c + \frac{\Delta\chi}{2}$, $\xi_c - \frac{\Delta\xi}{2} \leq \xi \leq \xi_c + \frac{\Delta\xi}{2}$ e $\zeta_c - \frac{\Delta\zeta}{2} \leq \zeta \leq \zeta_c + \frac{\Delta\zeta}{2}$, respectivamente; elas basicamente se reduzem à função erro computada para as bordas da célula.

A densidade de estrelas observadas na célula $\rho_{obs}^{cel} = \frac{P_{obs}^{cel}}{A_{agl}}$ é calculada utilizando o mesmo procedimento. Nesse caso, consideramos somente estrelas que se encontram na região $0 \leq R \leq R_{RDP}$. O número de estrelas de campo esperado para a célula é dado por

$$n_{fs}^{cel} = \frac{\rho_{fs}^{cel}}{\rho_{obs}^{cel}} \times n_{obs}^{cel}, \quad (2.2)$$

onde n_{obs}^{cel} é o número de estrelas observadas no campo de comparação localizadas na célula. O número provável de estrelas membros na célula é $n_{agl}^{cel} = n_{obs}^{cel} - n_{fs}^{cel}$, e o número total de prováveis membros do aglomerado é a soma n_{agl}^{cel} em todas as células do CMD,

$$N_{agl} = \sum_{cel} n_{agl}^{cel}. \quad (2.3)$$

Os parâmetros obtidos por meio do algoritmo de descontaminação são N_{obs} , N_{agl} , $N_{1\sigma}$, σ_{fs} e FS_{obs} , onde o parâmetro $N_{1\sigma}$ é uma medida da significância estatística do número de estrelas no CMD descontaminado, e corresponde à razão entre o número de estrelas no CMD descontaminado e a flutuação de 1σ medida no CMD observado. Por definição, CMDs de sobredensidades devem ter $N_{1\sigma} > 1$. É esperado que CMDs de aglomerados estelares tenham um $N_{1\sigma}$ integrado muito maior do que 1. O parâmetro σ_{fs} corresponde à flutuação poissôniana em torno da média da contagem de estrelas em 8 setores de mesma área no campo de comparação. Campos de comparação uniformes fornecem baixos valores para σ_{campo} . O ideal é que aglomerados estelares apresentem um N_{agl} superior a $\sim 3\sigma_{fs}$.

Ao trabalharmos com campos de comparação muito maiores do que a área de extração do aglomerado, a correção para a diferença de área entre o campo e o aglomerado pode produzir um número fracionário de prováveis estrelas de campo (n_{campo}^{cel}) em algumas células. Antes da subtração célula-a-célula, os números fracionários são arredondados para o inteiro mais próximo, porém são limitados ao número de estrelas observadas em cada célula $n_{sub}^{cel} = NI(n_{fs}^{cel}) \leq n_{obs}^{cel}$, onde NI representa o arredondamento para o inteiro mais próximo. O efeito global é quantificado pela diferença entre o número de estrelas de campo esperado para cada célula (n_{fs}^{cel}) e o número real de estrelas subtraídas (n_{sub}^{cel}). A soma sobre todas as células dá uma estimativa da eficiência do processo de subtração total, onde uma eficiência de $f_{sub} = 100\%$ nos daria o resultado ideal:

$$f_{sub} = 100 \times \sum_{cel} n_{sub}^{cel} / \sum_{cel} n_{fs}^{cel} \quad (\%). \quad (2.4)$$

2.4 Perfil de Densidade Radial

Os parâmetros estruturais de aglomerados estelares podem ser derivados a partir dos RDPs que são definidos como a distribuição radial da densidade de estrelas projetada na direção do aglomerado. O RDP fornece uma visão geral da estrutura do aglomerado ao assumirmos, por simplicidade, simetria esférica na distribuição radial de estrelas. Normalmente, o raio

do aglomerado (R_{RDP}) é a distância do centro do aglomerado até onde o RDP e o campo se tornam estatisticamente indistinguíveis. Os RDPs também podem fornecer informações importantes sobre a estrutura do aglomerado estudado a partir do ajuste de curvas previstas por modelos (King, 1962, 1966b).

Tratando-se de aglomerados imersos, seu RDP geralmente apresenta múltiplos picos distribuídos espacialmente ou centralmente concentrados, e pode ser ajustado uma lei de King (Lada and Lada, 2003). Já para os aglomerados imersos de baixa massa e/ou em fase inicial de evolução o RDP não ajusta um perfil de King, apresentando picos e depressões que se confundem com o perfil de distribuição das estrelas de campo. Essas depressões são consequência da absorção diferencial por poeira, ou efeitos de baixa estatística.

Os RDPs são construídos na primeira extração dos dados fotométricos do aglomerado ainda contaminado pelas estrelas de campo, e após a aplicação do algoritmo de descontaminação é feita a aplicação de um filtro cor-magnitude (FCM) nos dados fotométricos observados. Tal procedimento descarta estrelas com cores compatíveis com aquelas apresentadas pelas estrelas do fundo do céu, selecionando as regiões do CMD que contém as sequências evolutivas do aglomerado levando em consideração os efeitos de evolução dinâmica, como o aumento da fração de binárias, que provocam o alargamento da sequência principal, principalmente nas regiões centrais do aglomerado. Podemos dizer que o FCM isola as estrelas com grande probabilidade de serem membros do aglomerado, porém com a aplicação do filtro a descontaminação não é completa, pois estrelas de campo com cores similares às do aglomerado ainda permanecem no interior do filtro (Bica et al., 2006b).

Os RDPs são construídos com a contagem de estrelas em anéis concêntricos cuja largura aumenta com a distância ao centro. Dessa forma evitamos superamostragem próximo do centro do objeto estudado e uma baixa estatística em regiões mais afastadas. A largura e o número de anéis podem ser ajustados garantindo uma boa resolução espacial bem como erros poissonianos adequados (Bonatto and Bica, 2006).

Existem casos em que, próximo ao objeto estudado, não existe um céu que forneça um campo considerado confiável para análise (e.g., regiões com muita poeira). Então, faz-se necessária a busca por campos a diferentes distâncias, até que se obtenha um nível das estrelas abaixo do nível das estrelas do aglomerado.

Neste trabalho, os RDPs foram utilizados para derivarmos os parâmetros estruturais (quando possível) dos objetos da amostra considerados aglomerados. Quando possível, ajustamos o perfil de King de 2 parâmetros, $\sigma(R) = \sigma_{bg} + \sigma_0 / [1 + (R/R_c)^2]$ (King, 1966a), adaptado

para contagem de estrelas, onde σ_0 e σ_{bg} são as densidades estelares central e residual, e R_c é o raio de core. Os parâmetros estruturais σ_0 e R_c são derivados a partir do ajuste, enquanto σ_{bg} é previamente medido no campo de comparação e considerado constante. Por estarmos tratando de aglomerados muito jovens (com exceção de VVV CL164), não esperamos sistemas relaxados dinamicamente.

2.5 Ferramenta *Adaptive Simulated Annealing* - ASA

Normalmente, os parâmetros importantes de aglomerados estelares jovens de baixa massa são muito difíceis de obter por meio de fotometria, especialmente quando avermelhamento diferencial e/ou fração de binárias ocorrem em grandes quantidades. O método de otimização global conhecido como *Adaptive Simulated Annealing* (ASA) é utilizado para minimizar os resíduos da comparação entre os diagramas de Hess observado e simulado do aglomerado estelar. As simulações levam em conta os parâmetros mais relevantes de aglomerados jovens. No desenvolvimento desta ferramenta é feita uma abordagem semi-analítica que, aplicada ao diagrama de Hess de um aglomerado estelar jovem, é capaz de recuperar os valores de massa, idade, tempo de propagação da formação estelar, módulo de distância, avermelhamento diferencial, excesso de cor e fração de binárias (M_{clu} ; t_{clu} ; τ_{SFS} ; $(m-M)_J$; $\overline{\delta A_V}$; $E(J-K_s)$ e F_{bin} , respectivamente).

Testes com aglomerados modelo construídos com os parâmetros que se estendem numa ampla gama de valores mostraram que *ASA* recupera os valores de entrada com uma alta precisão para a massa do aglomerado, o módulo de distância e para o excesso de cor. Dada a natureza estatística das simulações, vários testes devem ser realizados para obtenção de padrões de convergência significativa. Especificamente, os parâmetros recuperados (mínimo absoluto) devem convergir para os valores médios com uma baixa dispersão com a diminuição do resíduo dos diagramas de Hess.

Aplicamos essa ferramenta em aglomerados jovens reais, Collinder 197 (Bonatto and Bica, 2010) e Pismis 5 (Bonatto and Bica, 2009b), com dados fotométricos 2MASS. Estes objetos são projetados perto do equador Galáctico ($b \approx 1^\circ$) e têm CMDs dominados por estrelas fracas. Os resultados comparados aos CMDs reais são mostrados na Figura 2.4. Os parâmetros recuperados seguem padrões de convergência semelhantes aos modelos. Como a estocasticidade associada às fases iniciais pode afetar os resultados, especialmente em aglomerados de baixa massa, este efeito pode ser minimizado pela média de vários aglomerados

quase idênticos dos diagramas de Hess simulados.

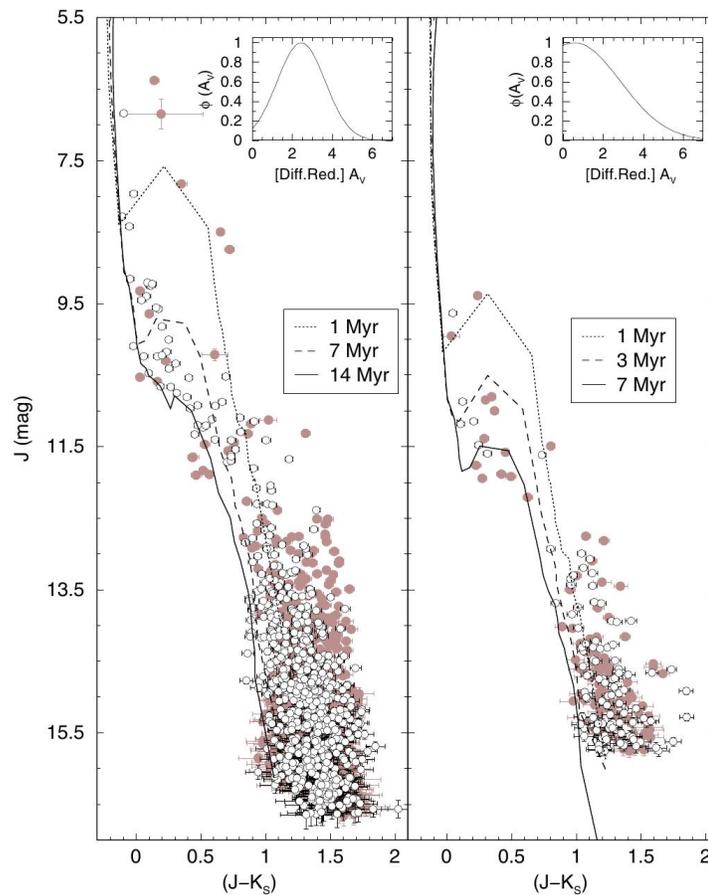


Figura 2.4: CMDs descontaminados por estrelas de campo (círculos cheios) dos aglomerados Collinder 197 (painel da esquerda) e Pismis 5 (painel da direita) comparados com os CMDs gerados por uma única simulação do ASA (círculos vazios) selecionados aleatoriamente entre os grupos simulados. Os raios de extração são $10'$ (Collinder 197) e $6'$ (Pismis 5). Isócronas representativas da história de formação estelar foram definidas de acordo com os parâmetros médios obtidos (Tabela 2 em Bonatto et al. (2012a) no anexo A).

A determinação robusta de parâmetros de aglomerados estelares pode ter um impacto positivo em diversos campos. Por exemplo, massa, idade e fração de binárias são importantes para estabelecer o estado dinâmico de um aglomerado ou para derivar uma taxa mais precisa de formação estelar da Galáxia. Maiores detalhes sobre o desenvolvimento e aplicação desta ferramenta encontram-se no Apêndice A, ou seja, nos artigos Bonatto et al. (2012a,b). Atualmente esta ferramenta encontra-se em adaptação à fotometria VVV, e depende das isócronas que estão sendo desenvolvidas para o sistema VISTA.

Neste trabalho utilizamos como ferramentas as fotometrias 2MASS e VVV, os CMDs, RDPs e o algoritmo de descontaminação apresentados neste capítulo.

Amostra de Aglomerados e Abordagem Fotométrica

A Figura 3.1 no IR médio nos permite ver a estrutura da poeira da região estudada. A busca por candidatos a aglomerados estelares no complexo HII NGC 6357 deu-se por análise visual das imagens no infravermelho das bandas J, H e K_s do VVV e do 2MASS, das imagens compostas do SPITZER nas bandas 3,6, 4,5 e 8,0 μm e de imagens no ótico pelo DSS utilizando a ferramenta Aladin. Procuramos por sobredensidades de estrelas em pelo menos duas imagens analisadas. A partir dessa análise foram eleitos os alvos (mostrados na Tabela 3.1 e imagens combinadas das bandas J, H e K_S mostradas na Figura 3.6). O raio de cada candidato a aglomerado foi inicialmente estimado a partir da análise visual das sobredensidades e chamado raio visual aparente (r_{ap}).

Foram feitas extrações pelo catálogo 2MASS centradas em cada alvo realizadas diversas tentativas de encontrar um campo de comparação que tivesse um nível de contribuição estelar significativo o suficiente para que a descontaminação das estrelas de campo fosse bem sucedida. No entanto, estamos tratando de uma região bastante influenciada pela poeira, que causa falsas regiões vazias dentro de NGC 6357 (Figura 3.2). Como resultado da utilização da fotometria 2MASS tivemos diversos casos de RDPs com muitas flutuações e com nível das estrelas de campo acima ou no mesmo nível das estrelas dos candidatos a aglomerados (e.g. Figura 3.5b).

Em março de 2012 deu-se a minha entrada na equipe de colaboradores do VVV, o que nos possibilitou acesso aos dados prioritários do *Survey* e um excelente ganho de profundidade na fotometria, o que pode ser visto nas Figuras 3.3a e 3.3b. Ao compararmos os RDP do



Figura 3.1: Imagem SPITZER (bandas 3,6 μm , 4,5 μm e 8,0 μm) do complexo NGC 6357 de dimensões $\sim 60' \times 35'$, gerada pelo Aladin.

Tabela 3.1: Posições e raio aparente (r_{ap}) dos possíveis aglomerados projetados/imersos em NGC 6357.

Cluster	α (J2000)	δ (J2000)	l ($^\circ$)	b ($^\circ$)	R (arcmin)	Comentários
Pismis 24 ^a	17:24:44	-34:11:56	353.17	0.89	1.5	EC infravermelho
BDS 101 ^b	17:25:34	-34:23:09	353.11	0.65	0.7	EC infravermelho
VVV CL164 ^c	17:24:31	-34:13:15	353.12	0.92	0.5	OC infravermelho
LBB1-A ^c	17:24:39	-34:15:19	353.11	0.88	0.8	Possível EC (protocluster?)
VVV CL165 ^c	17:24:45	-34:11:28	353.18	0.89	0.2	Subaglomerado de Pismis 24?
VVV CL166 ^c	17:24:47	-34:12:36	353.17	0.88	0.2	Subaglomerado de Pismis 24?
VVV CL167 ^c	17:25:09	-34:11:13	353.23	0.83	0.6	EC infravermelho em torno da WR 93
LBB1-C ^c	17:25:20	-34:17:00	353.17	0.74	0.6	Possível OC infravermelho
N6357C1 ^c	17:25:24	-34:25:18	353.07	0.64	0.5	Possível EC infravermelho

^a Moffat and Vogt (1973)

^b Bica et al. (2003).

^c Descoberto no presente trabalho.

objeto LBB1-C obtido com a fotometria 2MASS e o RDP da fotometria VVV (Figura 3.5b) podemos notar que a utilização da fotometria VVV pode nos levar a recuperar objetos antes classificados como flutuações de campo.

Observando o CMD do aglomerado Pismis 24 (Fig. 3.3a) podemos notar uma deficiência de estrelas brilhantes nos dados VVV. Isso nos indica que a junção dos dados VVV+2MASS é necessária para que não existam perdas de estrelas brilhantes no CMD. Concluimos então que o uso dos dados do projeto VVV são imprescindíveis no tratamento de aglomerados imersos em NGC 6357, pois estes apresentam PMS povoada por estrelas fracas.

Para obter CMDs mais completos realizamos a junção dos dados do catálogo 2MASS e da fotometria de abertura `apermag3` do VVV - CASU para cada alvo, desta forma as mag-

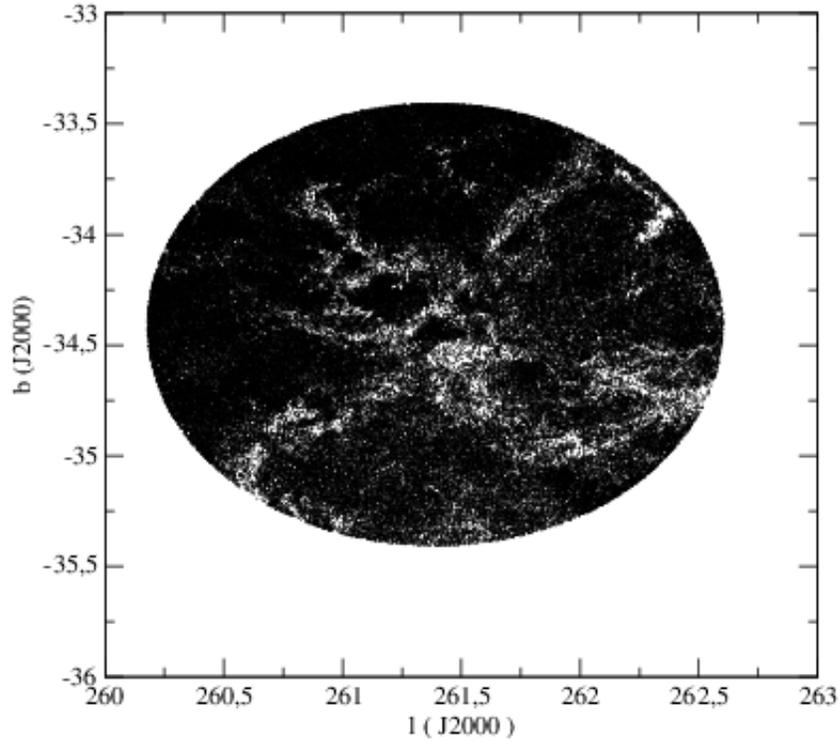


Figura 3.2: Distribuição de fontes pontuais do complexo NGC 6357 (Extração do catálogo 2MASS para $R=60'$).

nitudes das estrelas 2MASS são convertidas para magnitudes esperadas no sistema VISTA *Vegamag* usando as equações* de cores abaixo:

$$\begin{aligned}
 J_{VVV} &= J_{2MASS} - 0.077 \times (J - H)_{2MASS}, \\
 H_{VVV} &= H_{2MASS} + 0.032 \times (J - H)_{2MASS}, \\
 K_{sVVV} &= K_{s2MASS} + 0.010 \times (J - K_s)_{2MASS}.
 \end{aligned}
 \tag{3.1}$$

Ao localizar uma estrela saturada VVV busca-se a estrela 2MASS mais próxima (sendo $d=0.5''$ a maior distância) e então são feitas as substituições das estrelas saturadas banda a banda. Consequentemente, temos um CMD completo que abrange desde as estrelas mais fracas da PMS até as mais brilhantes da MS.

A seguir mostramos os resultados obtidos para o estudo dos aglomerados na direção do complexo NGC 6357 utilizando a fotometria VVV.

*Equações extraídas de <http://casu.ast.cam.ac.uk/surveys-projects/vista>, desenvolvidas por M. J. Irwin e colaboradores.

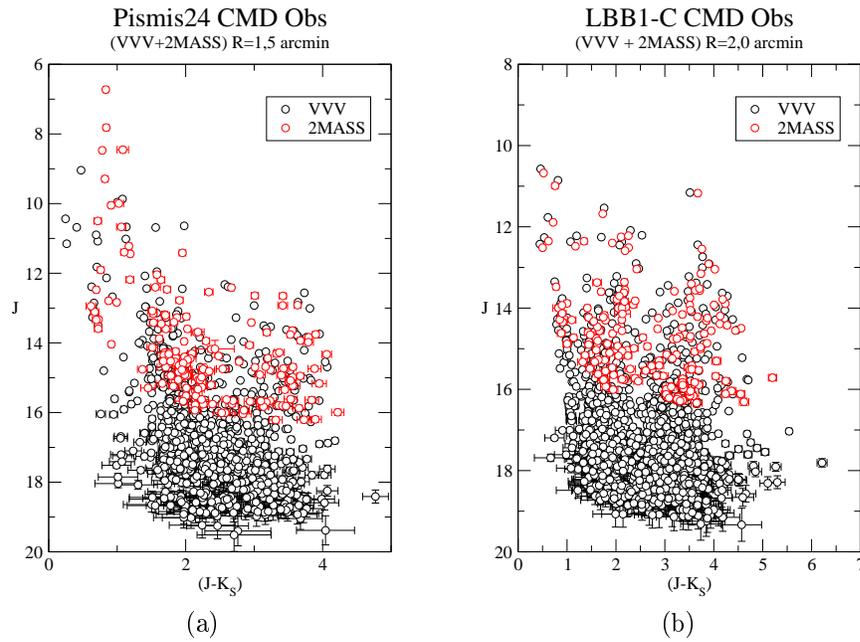


Figura 3.3: Painel a): CMD $J \times (J-K_s)$ observado 2MASS (círculos vermelhos) e VVV (círculos pretos) do aglomerado Pismis 24 ($R=1,5'$) centrado no objeto. Painel b): CMD $J \times (J-K_s)$ observado 2MASS (círculos vermelhos) e VVV (círculos pretos) do candidato LBB1-C ($R=2,5'$) centrado no objeto.

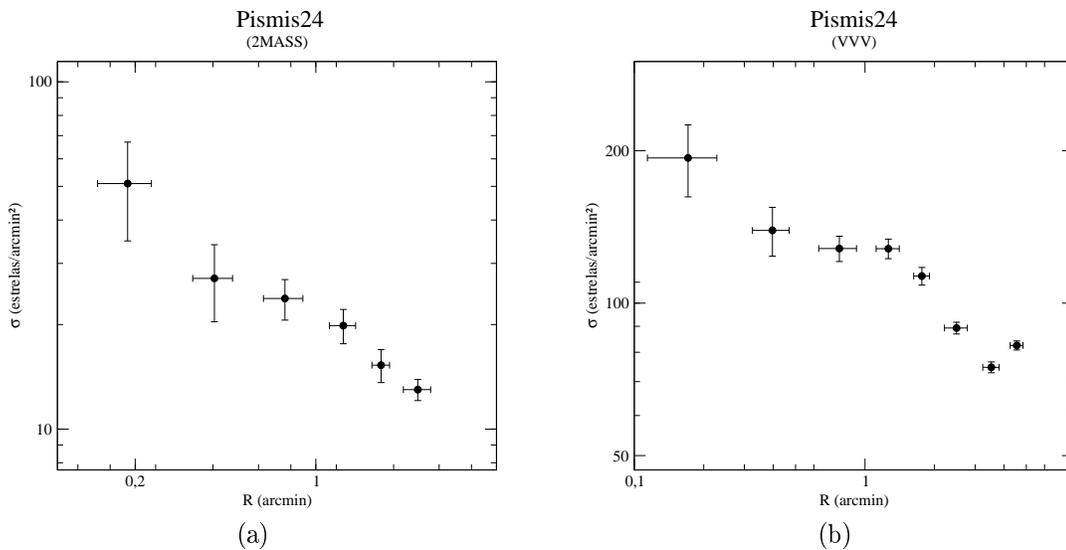


Figura 3.4: Painel a): RDP de Pismis 24 para uma extração de $R=2,5'$ (2MASS). Painel b): RDP de Pismis 24 para uma extração de $R=5,0'$ (VVV), onde podemos observar o ganho no números de estrelas quando comparado à fotometria 2MASS.

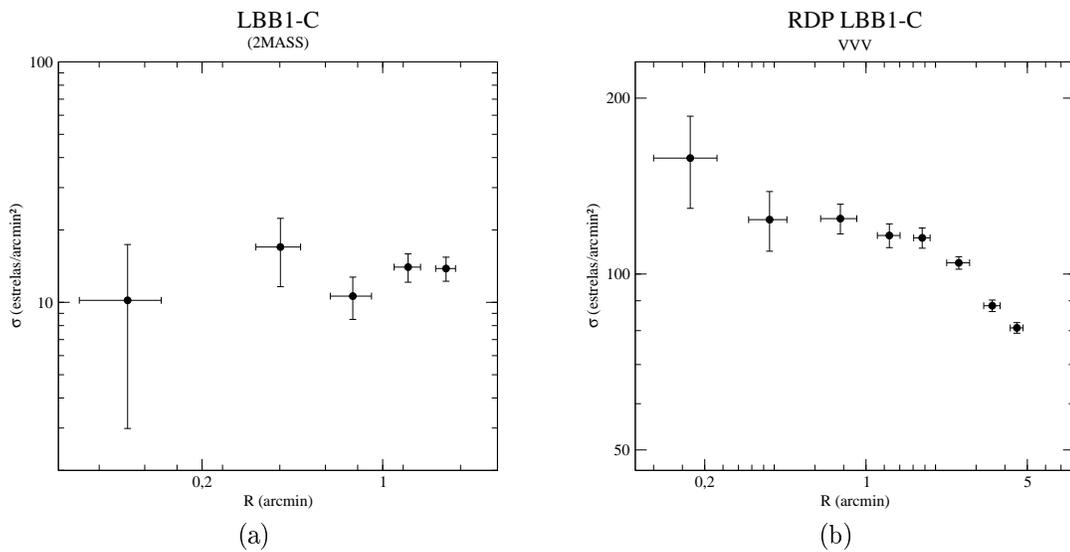


Figura 3.5: Painel a):RDP de LBB1-C para uma extração de $R=2,5'$ (2MASS). Painel b): RDP de LBB1-C para uma extração de $R=5,0'$ (VVV), onde podemos observar o ganho no números de estrelas quando comparado à fotometria 2MASS.

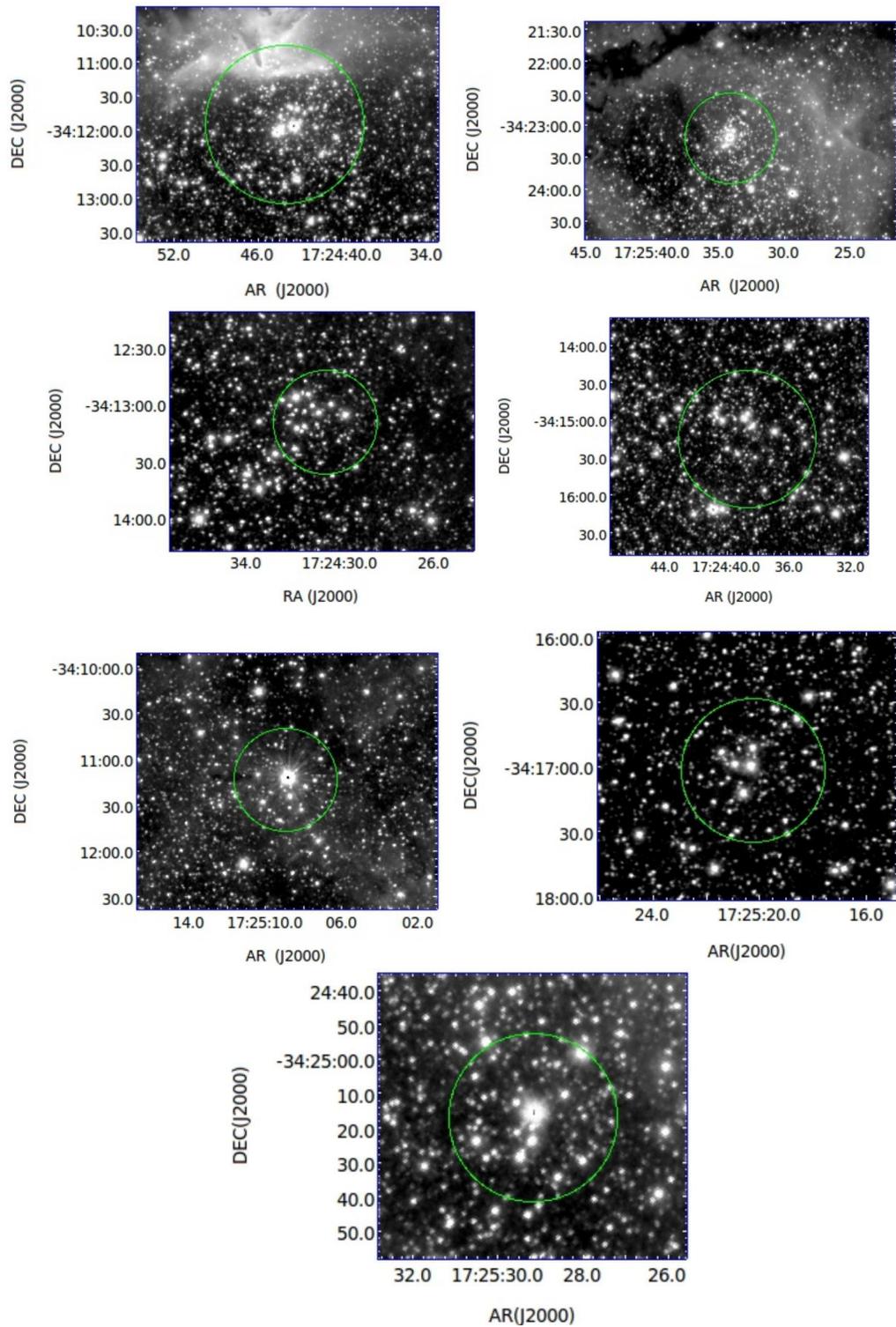


Figura 3.6: Imagens combinadas das bandas JHK_s VVV dos objetos da amostra. Primeira linha: Pismis 24 (esquerda), BDS 101 (direita). Segunda linha: Novo aglomerado VVV CL 164 (esquerda) e possível aglomerado LBB1-A (direita) Terceira linha: novo aglomerado VVV CL 167 (esquerda) e possível aglomerado LBB1-C (direita). Última linha: possível aglomerado N6357-C1. Os círculos verdes indicam o tamanho angular aproximado dos objetos. Os valores dos raios são dados na Tabela 3.1.

Análise e Discussão dos Aglomerados

Além de analisar aglomerados abertos (e.g. Bonatto and Bica, 2009a), o nosso grupo também tem concentrado esforços no estudo detalhado de aglomerados imersos através do desenvolvimento de ferramentas para extrair informações dos CMDs e RDPs (e.g. Bonatto and Bica, 2009b, 2010).

Neste capítulo analisaremos a natureza de 9 objetos associados/projetados na região HII NGC 6357. Seis destes objetos foram descobertos por nós, usando os surveys do 2MASS e VVV.

4.1 Aglomerados Confirmados

Neste grupo estão os objetos cujo CMD descontaminado apresenta sequências evolutivas bem definidas e RDP que ajusta um perfil de King. Foi possível estimar os parâmetros astrofísicos para 4 objetos desse grupo e outros dois foram classificados como subaglomerados. Neste capítulo apresentamos os CMDs dos objetos da amostra, os respectivos RDPs e os diagramas cor-cor quando julgamos necessário para análise. Uma visão geral do complexo NGC 6357 e dos seus aglomerados confirmados é dada na Figura 4.1.

4.1.1 Pismis 24

Esse objeto tem como coordenadas $\alpha(\text{J2000})=17^h:24^m:44^s$ e $\delta(\text{J2000})=-34^\circ:11':56''$, que correspondem, em coordenadas Galácticas, a $l=353.17^\circ$ e $b=0.89^\circ$. A área considerada como

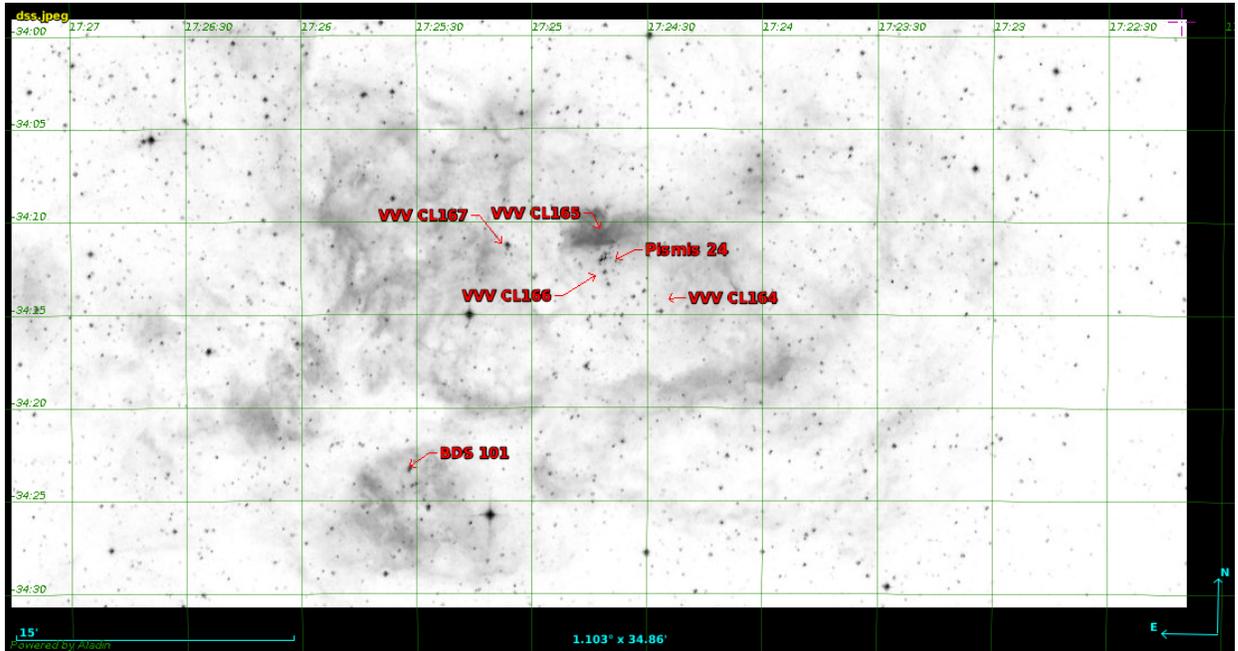


Figura 4.1: Imagem DSS do complexo NGC 6357, seus aglomerados confirmados são indicados. Imagem obtida com o Aladin (Bonnarel et al., 2000).

campo de comparação para descontaminação foi um anel centrado no objeto de raio interno $r_i=2'$ e raio externo $r_{ext}=4'$.

Na Figura 3.3a temos a imagem JHK_s centrada nas coordenadas otimizadas de Pismis 24. O objeto apresenta uma MS relativamente vertical e populosa, e a maior parte das estrelas do CMD é composta por estrelas vermelhas fracas. Este aglomerado contém 12 estrelas massivas conhecidas, três delas (Pismis 24-1NE, Pismis 24-1SW e Pismis 24-17) com massas de $\sim 100 M_\odot$ (Maíz Apellániz et al., 2007). Estas estrelas não estão presentes no catálogo 2MASS e estão saturadas nos dados VVV. Consequentemente, elas não aparecem nos CMDs do Pismis 24 (Figuras 4.2a e 4.2b). Na literatura, são estimadas distâncias para este aglomerado entre 1,0 e 3,0 kpc. Na Figura 4.2b mostramos o ajuste obtido para este objeto, onde utilizamos um conjunto de isócronas de Padova (0,2, 1, 3, 5 e 7 Myr) e Z solar. Os parâmetros obtidos foram $E(J - K_S) = 1.01 \pm 0.01$, $E(B - V) = 1.75 \pm 0.10$ ou $A_V = 5.87 \pm 0.06$. Os módulos de distância observado e absoluto são $(m - M)_J = 13.20 \pm 0.10$ e $(m - M)_0 = 11.50 \pm 0.10$, respectivamente. Finalmente, a distância obtida foi $d_\odot = 2.0 \pm 0.1$ kpc.

Para os parâmetros estruturais a solução de melhor ajuste é mostrada na Figura 4.2d. A partir do ajuste de um perfil de King derivamos o $R_c=0.44 \pm 0.11$ pc, a densidade de estrelas projetadas sobre a região central $\sigma_0=85 \pm 26$ estrelas/arcmin² e a densidade do campo

$\sigma_{bg}=31.9\pm 0.9$ estrelas/arcmin². O raio estimado para o aglomerado é de $R_{RDP}=2.2\pm 0.2$ pc. A escala é de $1'=0.578$ pc, o raio de core $R_c=0.76\pm 0.20'$ e $R_{RDP}=3.7\pm 0.4'$.

Sabemos que os resultados obtidos podem ser afetados por avermelhamento diferencial. Em Catelan et al. (2011) temos uma lista dos diversos índices livres de avermelhamento para o sistema VISTA $ZYJHK_S$. Para o aglomerado Pismis 24 (mais povoado na MS entre os aglomerados da amostra) tentamos minimizar este efeito (Figura 4.3 empregando os parâmetros livres de avermelhamento m_2 , m_4 e c_3 definidos por:

$$\begin{aligned} m_2 &= H - 1,13 \times (J - H), \\ m_4 &= K_S - 1,22 \times (J - H), \\ c_3 &= (J - H) - 1,47 \times (H - K_S). \end{aligned} \quad (4.1)$$

Nos CMDs desavermelhados podemos notar um estreitamento na faixa das estrelas de PMS, no entanto a MS permanece como no CMD original. A idade e distância estimadas para Pismis 24 apresentaram basicamente resultados comparáveis aos do CMD original após a aplicação dos índices.

4.1.2 BDS 101

Este é o segundo aglomerado mais populoso do complexo, tendo como coordenadas otimizadas $\alpha(J2000)=17^h:25^m:34^s$ e $\delta(J2000)=-34^\circ:23':09''$, que correspondem, em coordenadas Galácticas, a $l=352.11^\circ$ e $b=0.65^\circ$. A área considerada como campo de comparação para descontaminação foi um anel centrado no objeto de raio interno $r_i=3'$ e raio externo $r_{ext}=4'$.

Diferentemente de Pismis 24, o CMD de BDS 101 (Figura 4.4b) mostra uma MS pobre em estrelas e uma rica PMS. A única estrela que ocupa a MS é uma estrela O5*. Ajustamos um conjunto de isócronas de Padova de 0,2, 1, 3, 5 e 7 Myr e Z solar 4.4b. Os parâmetros obtidos foram: $E(J - K_S) = 1.13 \pm 0.01$, $E(B - V) = 1.95 \pm 0.10$ ou $A_V = 6.57 \pm 0.06$. Os módulos de distância observado e absoluto são $(m - M)_J = 13.0 \pm 0.10$ e $(m - M)_0 = 11.09 \pm 0.10$, respectivamente. Finalmente, a distância obtida foi $d_\odot = 1.66 \pm 0.09$ kpc.

Para os parâmetros estruturais a solução de melhor ajuste é mostrada na Figura 4.4d.

*SIMBAD

A partir do ajuste de um perfil de King derivamos o $R_c=0.23\pm0.04$ pc, a densidade de estrelas projetadas sobre a região central $\sigma_0=157\pm40$ estrelas/arcmin² e a densidade do campo $\sigma_{bg}=22.1\pm1.0$ estrelas/arcmin². O raio estimado para o aglomerado é de $R_{RDP}=1.3\pm0.2$ pc. A escala é de $1'=0.480$ pc, o raio de core $R_c=0.48\pm0.21'$ e $R_{RDP}=2.7\pm0.3'$.

Os parâmetros são consistentes com os obtidos para Pismis 24, indicando que BDS 101 está também imerso no complexo NGC 6357.

4.1.3 VVV CL164 - Aglomerado de idade intermerdiária

Esse objeto tem como coordenadas otimizadas $\alpha(\text{J2000})=17^h:24^m:32^s$ e $\delta(\text{J2000})=-34^\circ:13':15''$, que correspondem, em coordenadas Galácticas, a $l=353.12^\circ$ e $b=0.88^\circ$. A área considerada como campo de comparação para descontaminação foi um anel centrado no objeto de raio interno $r_i=1.5'$ e raio externo $r_{ext}=4.5'$.

Os CMDs descontaminados das estrelas de campo $J \times (J - H)$ e $J \times (J - K_S)$ são mostrados no painel inferior da Figura 4.5. Também está incluído o filtro CM usado no CMD descontaminado $J \times (J - H)$. VVV CL164 apresenta erros relativamente grandes no nível do turn-off ($J \sim 18\text{-}19$ mag). Ajustamos isócronas de Padova de idades entre 3 e 7 Gyr e adotamos 5 Gyr como melhor solução (painel inferior da Figura 4.5). Os parâmetros obtidos foram: $E(J - H) = 1.70 \pm 0.01$, $E(B - V) = 4.73 \pm 0.15$ ou $A_V = 15.9 \pm 0.1$. O valor de A_V é muito maior que o dos outros aglomerados da amostra. Os módulos de distância observado e absoluto são $(m - M)_J = 15.30 \pm 0.10$ e $(m - M)_0 = 10.69 \pm 0.10$, respectivamente. A distância derivada é $d_\odot = 1.37 \pm 0.07$ kpc. Concluimos que VVV CL 164 é um aglomerado de idade intermediária (5 ± 2 Gyr) que está projetado próximo ao complexo NGC 6357.

Diferentemente de um aglomerado jovem, VVV CL164 apresenta estrelas que povoam as sequências típicas de um aglomerado aberto de idade intermediária, com *red clump*, *turn-off* e *blue stragglers*[†] em ambas as cores, similar ao CMD do clássico aglomerado de idade intermediária M67 que utilizamos como modelo (Figura 4.6a).

Para os parâmetros estruturais, a solução de melhor ajuste é mostrada na Figura 4.6b. A partir do ajuste de um perfil de King, derivamos o $R_c=0.19\pm0.1$ pc, a densidade de estrelas projetadas sobre a região central $\sigma_0=90\pm68$ estrelas/arcmin² e a densidade do campo

[†]Estrelas da sequência principal em aglomerados abertos ou globulares que se diferenciam por serem mais luminosas e azuis que as estrelas no ponto de saída da sequência principal do aglomerado. Foram descobertas por Allan Sandage em 1953 enquanto ele realizava a fotometria das estrelas do aglomerado globular M3. (Sandage, 1953)

$\sigma_{bg}=50.8\pm 1.0$ estrelas/arcmin². O raio estimado para o aglomerado é de $R_{RDP}=1.3\pm 0.1$ pc. A escala é de $1'=0.398$ pc, o raio de core $R_c=0.48\pm 0.28'$ e $R_{RDP}=3.3\pm 0.3'$.

4.1.4 Caso particular: subaglomerados de Pismis 24?

A distribuição espacial dos YSOs num aglomerado fornece informações sobre o processo de fragmentação que levou à formação de núcleos protoestelares, além de evidências sobre a formação estelar sequenciada e a posterior evolução dinâmica das estrelas desde a fase protoestelar até a MS (Megeath et al., 2004).

Na Figura 4.7 os YSOs do catálogo Fang et al. (2012) foram sobrepostos na imagem VVV K_S de Pismis 24. O aglomerado Pismis 24 parece ter dois vizinhos próximos que são possíveis subaglomerados contendo YSOs. As coordenadas dessas aglomerações são $\alpha(\text{J2000})=17^h:24^m:45^s$ e $\delta(\text{J2000})=-34^\circ:14':28''$ para VVV CL165 e $\alpha(\text{J2000})=17^h:24^m:47^s$ e $\delta(\text{J2000})=-34^\circ:12':36''$ para VVV CL166 (Fig 4.7). Os excessos na RDP de Pismis 24 (Figura 4.2d) são produzidos por estes dois possíveis subaglomerados. A formação destas estrelas jovens pode ter sido influenciada pelos ventos originados nas estrelas OB da região central de Pismis 24. Um possível destino destes subaglomerados é coalescerem com o aglomerado massivo (McMillan et al., 2007; Pang et al., 2013).

4.1.5 VVV CL167

Esse objeto tem como coordenadas otimizadas $\alpha(\text{J2000})=17^h:25^m:09^s$ e $\delta(\text{J2000})=-34^\circ:11':13''$, que correspondem, em coordenadas Galácticas, a $l=353.23^\circ$ e $b=0.83^\circ$. A área considerada como campo de comparação para descontaminação foi um anel centrado no objeto de raio interno $r_i=2'$ e raio externo $r_{ext}=4'$.

Consideramos que este aglomerado contém a estrela Wolf-Rayet HD157504 (WR 93) do tipo WC7 (van der Hucht, 2001). Historicamente, esta estrela tem sido considerada membro de Pismis 24 (Massey et al., 2001). Usualmente, estrelas WR têm massas entre 10 e 25 M_\odot e apresentam linhas largas de emissão de He e N (tipo espectral WN) ou He e C (tipo espectral WC) (Meynet and Maeder, 2005). Recentemente, aglomerados que possuem estrelas WR foram estudados com o VVV (Chené et al., 2012). A estrela WR 93 está localizada a ~ 5 arcmin Oeste do centro de Pismis 24. A imagem (Figura 3.6) e o CMD (Figura 4.8b) indicam um aglomerado em torno da estrela WR. É possível identificar algumas estrelas de PMS no CMD.

Adotamos como melhor ajuste a isócrona de Padova de 9 Myr e Z solar (Figura 4.8b) que nos dá os resultados: $E(J - K_S) = 0.85 \pm 0.01$, $E(B - V) = 1.47 \pm 0.10$ ou $A_V = 4.94 \pm 0.06$. Os módulos de distância observado e absoluto são $(m - M)_J = 12.50 \pm 0.10$ e $(m - M)_0 = 11.07 \pm 0.10$, respectivamente. A distância derivada é $d_\odot = 1.6 \pm 0.1$ kpc. No diagrama cor-cor (Figura 4.8c) a estrela WR 93 apresenta excesso em K_S . Um excesso similar também foi observado para estrelas massivas no aglomerado aberto NGC4755 de ~ 14 Myr (Bonatto et al., 2006). Observando o RDP de VVV CL167 temos que este não ajusta um perfil de King. No entanto, este apresenta características de um aglomerado dinamicamente evoluído, resultado dos ventos de WR 93 e outras estrelas menos massivas que removem o material interestelar do aglomerado (Tutukov, 1978; Goodwin and Bastian, 2006).

Tabela 4.1: Parâmetros fundamentais derivados.

Aglomerado	A_V (mag)	Age (Myr)	d_\odot (kpc)	R_{GC} (kpc)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
Pismis 24	5.87 ± 0.06	5 ± 2	2.0 ± 0.1	5.25 ± 0.09
BDS 101	6.57 ± 0.06	5 ± 2	1.7 ± 0.1	5.58 ± 0.08
VVV CL 164	15.9 ± 0.09	$(5 \pm 2) \times 10^3$	1.4 ± 0.1	5.86 ± 0.06
VVV CL167	4.94 ± 0.06	9 ± 2	1.6 ± 0.1	5.60 ± 0.08

Notas da tabela. Col. 2: absorção na região central do aglomerado. Col. 3: idade, a partir da fotometria VVV. Col. 4: distância ao Sol. Col. 5: Distância galactocêntrica R_{GC} , calculada com $R_\odot = 7.2$ kpc como sendo a distância do Sol ao centro da Galáxia (Bica et al., 2006a).

Tabela 4.2: Parâmetros estruturais

Aglomerado	σ_0 (stars/' ²)	r_c (')	R_c (pc)	σ_{bg} (stars/' ²)	r_{RDP} (')	R_{RDP} (pc)
Pismis 24	85 ± 26	0.76 ± 0.20	0.44 ± 0.11	31.9 ± 0.9	3.7 ± 0.4	2.2 ± 0.2
BDS 101	157 ± 40	0.48 ± 0.21	0.23 ± 0.04	22.1 ± 1.0	2.7 ± 0.3	1.3 ± 0.2
VVV CL 167	24 ± 14	-	-	6.8 ± 0.4	-	-
VVV CL 164	90 ± 68	0.48 ± 0.28	0.22 ± 0.13	50.8 ± 1.0	3.3 ± 0.3	1.5 ± 0.4

Col. 2: densidade central. Col. 3: raio de core (arcmin). Col. 4: raio de core (pc), distância ao Sol assumida d_\odot de acordo com a Tabela 4.1. Col. 5: densidade do campo. Col. 6: raio de extensão do aglomerado (arcmin). Col. 7: raio de extensão do aglomerado (pc).

4.2 Possíveis aglomerados

Os objetos desse grupo geralmente apresentam um CMD descontaminado das estrelas de campo com sequências não tão bem definidas quanto os objetos confirmados como ECs ou OCs. No entanto, os RDPs sugerem a existência de um aglomerado. Sugerimos que sejam analisados com fotometria mais profunda por meio de observação com telescópios das classes de 4 e 8 m (e.g. SOAR, GEMINI e VLTs) para detalhamento da fotometria.

4.2.1 LBB1-A

Este objeto tem como coordenadas otimizadas $\alpha(2000)=17^h:24^m:39^s$ e $\delta(J2000)=-34^\circ:15':19''$. A área considerada como campo de comparação para descontaminação foi um anel centrado no objeto de raio interno $r_i=2'$ e raio externo $r_{ext}=3.5'$.

Na Figura 4.9a mostramos o CMD observado $J \times (J - K_S)$ de LBB1-A ($R=1.0'$) centrado no objeto e as estrelas de campo extraídas de um anel externo da amostra e de mesma área da região central. Na Figura 4.9b mostramos a fotometria descontaminada das estrelas de campo, onde aparecem 2 sequências que podem indicar dois protoaglomerados (Majaess, 2013), ou seja, as estrelas desse objeto ainda não atingiram a MS. O RDP (Figura 4.9d) indica que as duas áreas do CMD seguem a distribuição radial similar a do RDP do CMD completo, portanto temos que ambas as distribuições podem fazer parte de um mesmo objeto, sendo a parte direita do CMD avermelhada por poeira, ou temos um segundo protoaglomerado.

Na tentativa de um ajuste de isócronas (Figura 4.10) obtivemos os parâmetros em primeira ordem $(m-M)_J=13.40\pm 0.10$ e $E(J-K_S)=0.69\pm 0.01$, $(m-M)_o=12.24\pm 0.10$ e $d_\odot=2.80\pm 0.13$ kpc. Mesmo com barras de erros pequenas, necessitamos de uma fotometria mais completa que justifique as duas sequências no CMD.

4.2.2 LBB1-C

Este objeto tem como coordenadas otimizadas $\alpha(2000)=17^h:25^m:20^s$ e $\delta(J2000)=-34^\circ:17':00''$. A área considerada como campo de comparação para descontaminação foi um anel centrado no objeto de raio interno $r_i=3'$ e raio externo $r_{ext}=4.5'$.

Na Figura 4.11a mostramos o CMD observado $J \times (J - K_S)$ de LBB1-C ($R=0.6'$)

centrado no objeto e as estrelas de campo extraídas de um anel externo da amostra e de mesma área da região central. Na Figura 4.11b mostramos a fotometria descontaminada das estrelas de campo, onde aparecem duas sequências separadas por uma ordem de 1.5 mag em cor. O filtro cor-magnitude aplicado no CMD mostra que as estrelas à direita do CMD encontram-se projetadas numa nuvem de poeira (Figura 4.12), enquanto as estrelas à esquerda do CMD encontram-se nas cavidades da poeira. Pelas características do CMD, este parece ser um aglomerado aberto projetado no complexo NGC 6357. O diagrama cor-cor (Figura 4.11c) mostra a separação por avermelhamento das estrelas. No RDP (Figura 4.11d) temos que as estrelas tanto da extração completa quanto após a aplicação do filtro cor-magnitude seguem uma distribuição radial similar. Dados com maior profundidade devem ser obtidos para uma maior clareza na fotometria desse objeto.

4.2.3 NGC6357-C1

Este objeto tem como coordenadas otimizadas $\alpha(2000)=17^h:25^m:29^s$ e $\delta(J2000)=-34^{\circ}:25':18''$. A área considerada como campo de comparação para descontaminação foi um anel centrado no objeto de raio interno $r_i=1'$ e raio externo $r_{ext}=2.5'$.

Na Figura 4.13a mostramos o CMD observado $J \times (J - K_S)$ de LBB1-A ($R=1.0'$) centrado no objeto e as estrelas de campo extraídas de um anel externo da amostra e de mesma área da região central. Na Figura 4.13b mostramos a fotometria descontaminada das estrelas de campo, onde aparece uma separação de pelo menos 1.5 mag entre a possível MS e a PMS. Nosso grupo tem se dedicado a estudar outros objetos que apresentam essa configuração (Saurin et al., 2013). Concluimos que este objeto necessita de mais análise ou ainda maior profundidade na fotometria.

4.3 Discussão

O estudo de aglomerados imersos em nuvens moleculares realizado por Lada and Lada (2003) mostrou que a quantidade desta classe de objeto presente na Galáxia é surpreendentemente alta. No entanto, a fase densa de aglomerado imerso dura entre 2-5 Myr, se ele possui estrelas massivas (Tutukov, 1978; Goodwin and Bastian, 2006). Um estudo dos aglomerados imersos de uma dada região pode trazer informações interessantes a respeito dos processos de formação estelar na região estudada e sua evolução.

Ao estudarmos o complexo NGC 6357 por meio das ferramentas apresentadas no Capítulo 3, estimamos a distância média do complexo em 1.76 ± 0.1 kpc, baseando-nos nas distâncias que calculamos para os aglomerados imersos. Este resultado contribui de forma significativa para a definição da distância de NGC 6357, que tem sido uma questão de debate na literatura. Nossos resultados indicam que NGC 6357 possui pelo menos dois eventos de formação estelar da ordem de 5 e 9 Myr. Encontramos também 2 subaglomerados de YSOs provavelmente dentro do aglomerado massivo Pismis 24. Estudamos também a estrutura dos aglomerados imersos no complexo e este estudo nos trouxe informações sobre a evolução dinâmica desses objetos.

Com os resultados obtidos podemos concluir que, através dos dados VVV, inserimos uma nova fotometria ao método de verificação de novos aglomerados e de determinação de parâmetros estruturais de aglomerados imersos, já consolidado pelo nosso grupo de pesquisa. Em estudos anteriores, o catálogo 2MASS nos limitava a CMDs pouco profundos, ou seja, sem a presença das estrelas mais fracas da PMS. No entanto, estas estrelas são as que mais povoam o CMD de um aglomerado ainda imerso na nuvem que o gerou. Logo, para estudar complexos de formação estelar faz-se necessária a utilização de dados fotométricos mais profundos. O VVV nos permitiu enxergar estrelas até magnitudes 18–18.5 na banda J sem grandes erros. Nesse contexto, abrimos um novo caminho no que diz respeito ao estudo de aglomerados jovens em geral e/ou ainda imersos.

Concluimos que o estudo do complexo NGC 6357 realizado neste trabalho vem a acrescentar melhor entendimento das regiões de formação estelar da Galáxia, pois esta é por si própria um laboratório astrofísico, não só pela sua riqueza em estruturas interestelares, tais como bolhas, casca, e filamentos, mas também pelos seus aglomerados imersos.

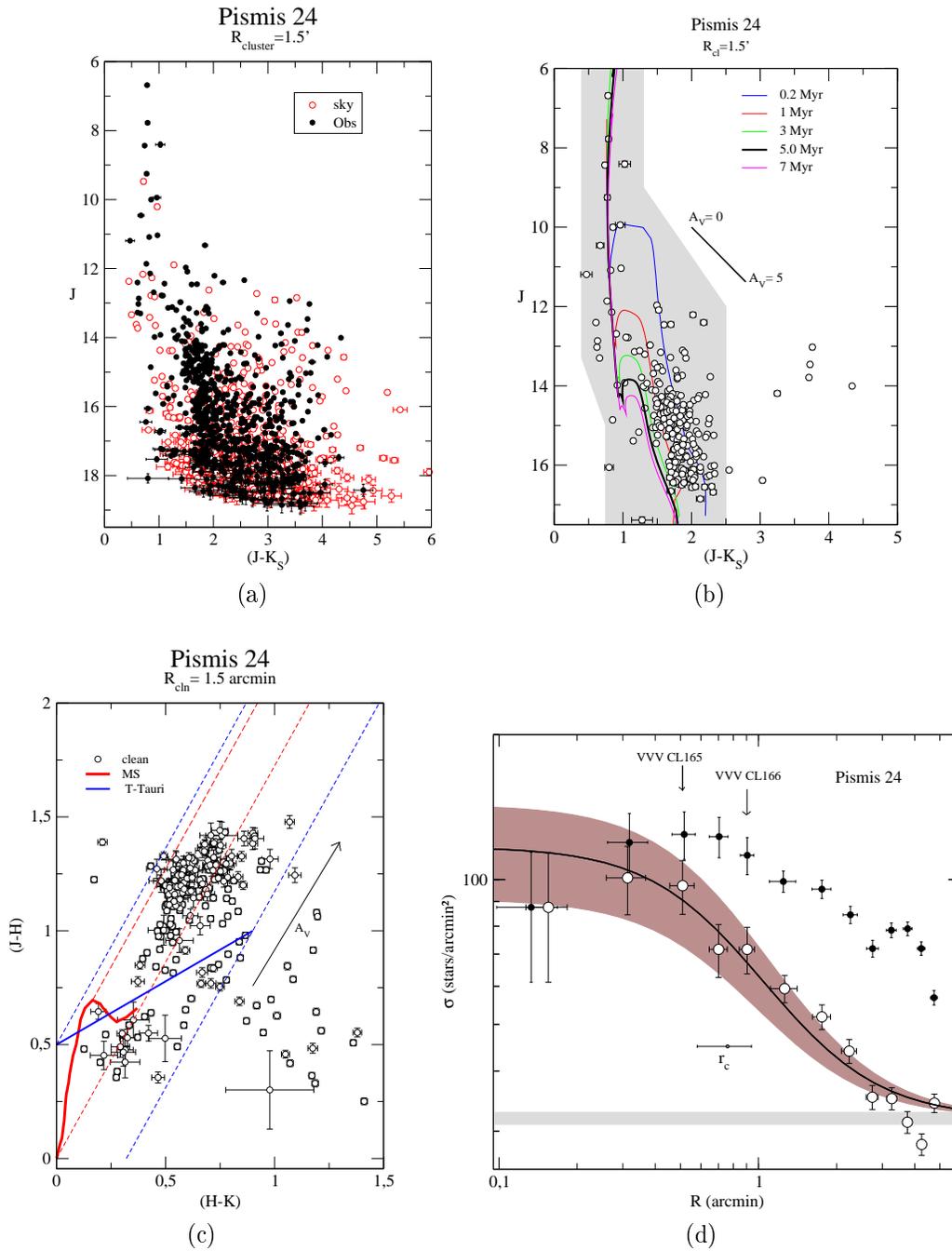


Figura 4.2: Painel a): CMD observado $J \times (J - K_S)$ de Pismis 24 ($R=1,5'$) centrado no objeto (círculos pretos) e estrelas de campo extraídas de um anel externo da amostra e de mesma área da região central (círculos vermelhos). Painel b): CMD descontaminado das estrelas de campo e com ajuste das isócronas de Padova de 0.2, 1, 2, 3, 5 e 7 Myr. Painel c): Diagrama cor-cor das estrelas descontaminadas das estrelas de campo. O vetor avermelhamento equivale a $A_V=5$. Painel d): RDP de Pismis 24 filtrado por cor-magnitude (círculos vazados) e bruto (círculos cheios) para uma extração de $R=5'$. A linha sólida indica o melhor ajuste por um perfil de King e a região marrom ao seu redor mostra a incerteza de 1σ no seu ajuste. O nível de contribuição das estrelas de campo está representado pela região horizontal cinza.

Pismis 24

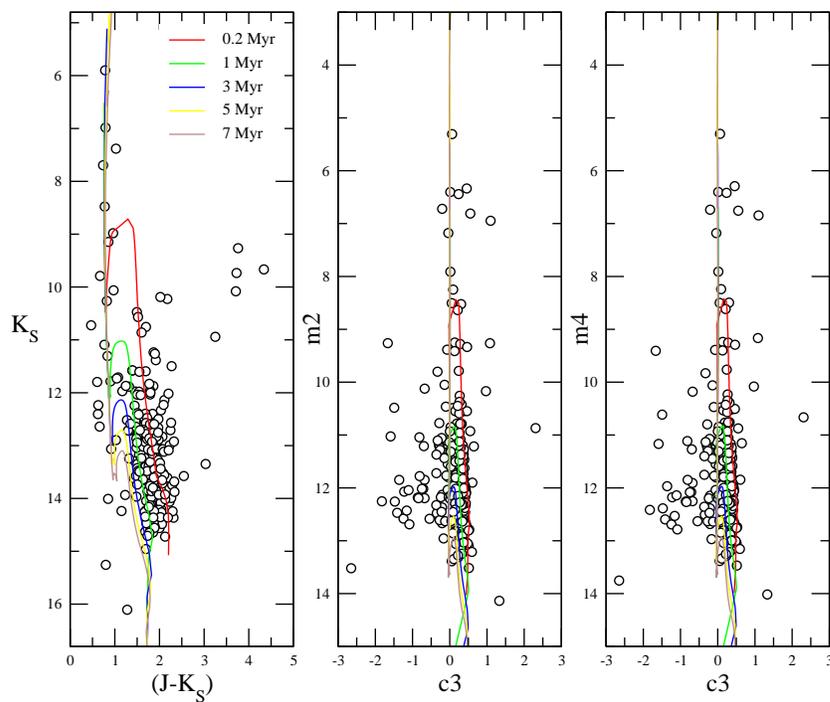


Figura 4.3: Painel esquerdo: CMD original $K_S \times (J - K_S)$ descontaminado das estrelas de campo de Pismis 24 ($R=1,5'$). Painel central: CMD $m_4 \times c_3$ descontaminado das estrelas de campo. Painel direito: CMD $m_2 \times c_3$ descontaminado das estrelas de campo. Todos os CMDs apresentam ajuste das isócronas de Padova de 0.2, 1, 2, 3, 5 e 7 Myr.

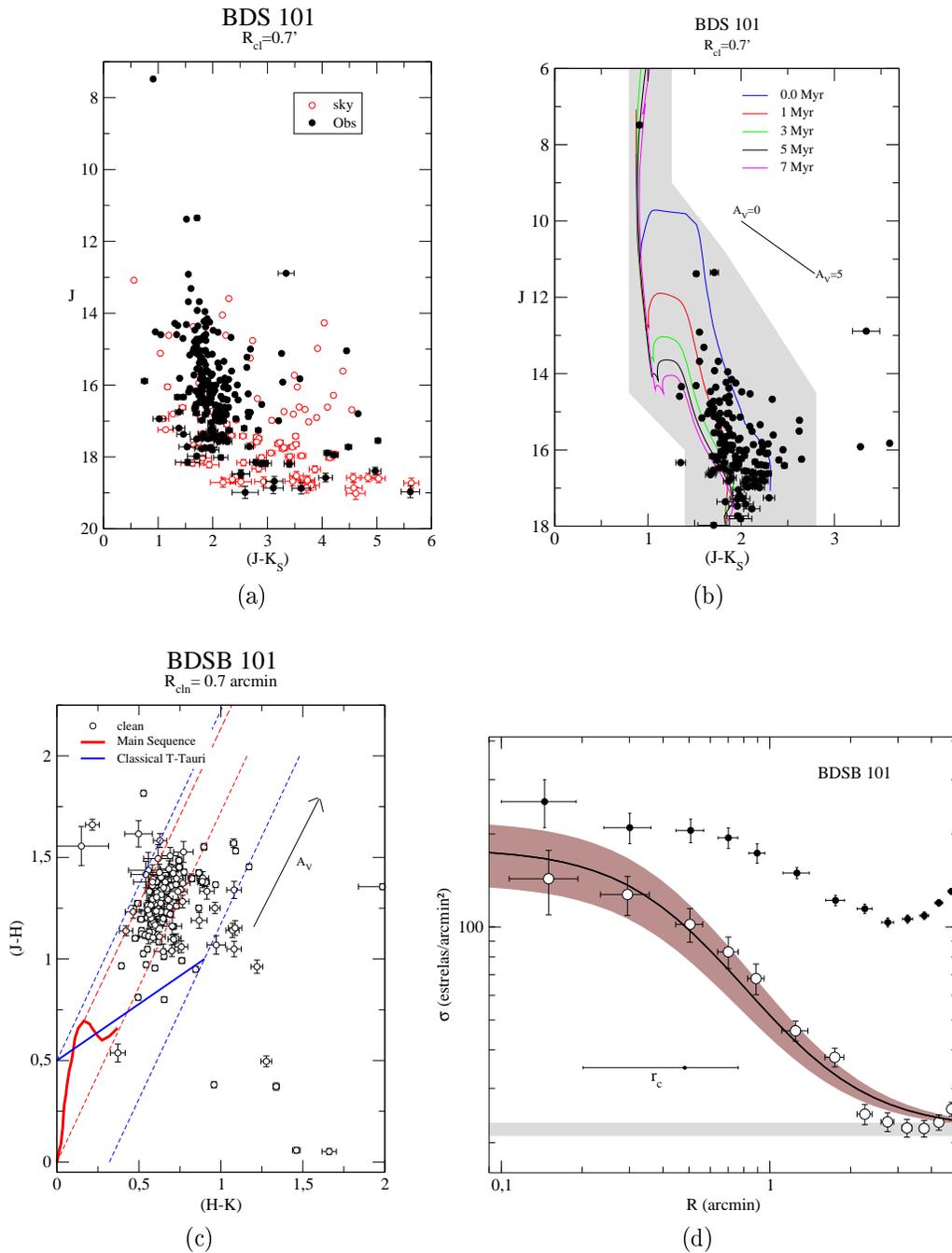


Figura 4.4: Painel a): CMD observado $J \times (J - K_S)$ de BDS 101 ($R=0,7'$) centrado no objeto (círculos pretos) e estrelas de campo extraídas de um anel externo da amostra e de mesma área da região central (círculos vermelhos). Painel b): CMD descontaminado das estrelas de campo e com ajuste das isócronas de Padova de 0.2, 1, 3, 5 e 7 Myr. Painel c): Diagrama cor-cor das estrelas descontaminadas das estrelas de campo. O vetor avermelhamento equivale a $A_V=5$. Painel d): O mesmo que a Figura 4.2d para o aglomerado para o aglomerado BDS 101.

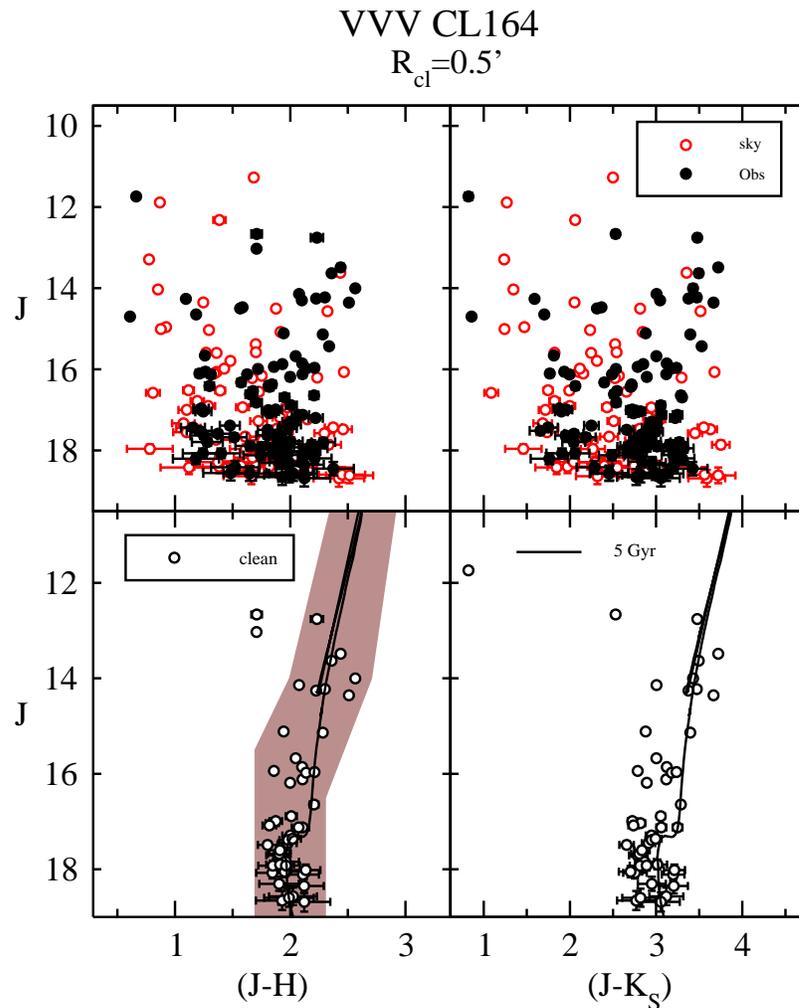


Figura 4.5: Painel superior esquerdo: CMD observado $J \times (J - H)$ de VVV CL164 ($R=0,5'$) centrado no objeto (círculos pretos) e estrelas de campo extraídas de um anel externo da amostra e de mesma área da região central (círculos vermelhos). Painel superior direito: o mesmo para $J \times (J - K_S)$. Painel inferior esquerdo: CMD descontaminado das estrelas de campo e com ajuste ds isócrona de Padova de 5 Gyr e Z solar junto com o filtro CM (polígono marrom) utilizado para isolar as estrelas MS e vizinhança. Painel inferior direito: o mesmo para $J \times (J - K_S)$ sem o filtro CM.

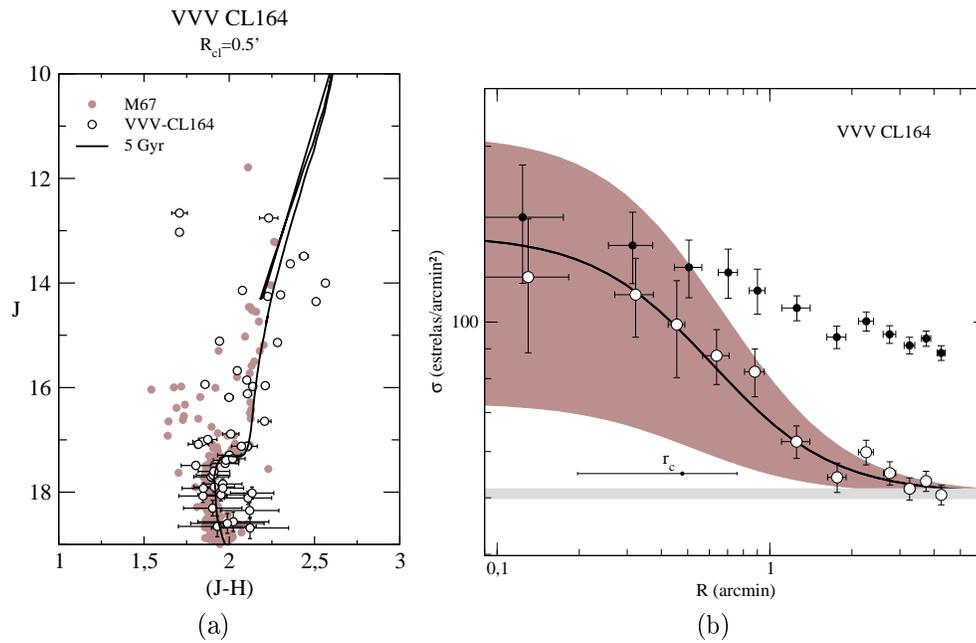


Figura 4.6: Painel a): Comparação entre os CMDs descontaminados de uma região central ($R=0.5'$) de VVV CL164 (círculos vazados) e região central ($R<10'$) de M67 (círculos cheios). Uma isócrona de Padova de 5 Gyr e Z solar é ajustada. Painel b): O mesmo que a Figura 4.2d para o aglomerado VVV CL164.

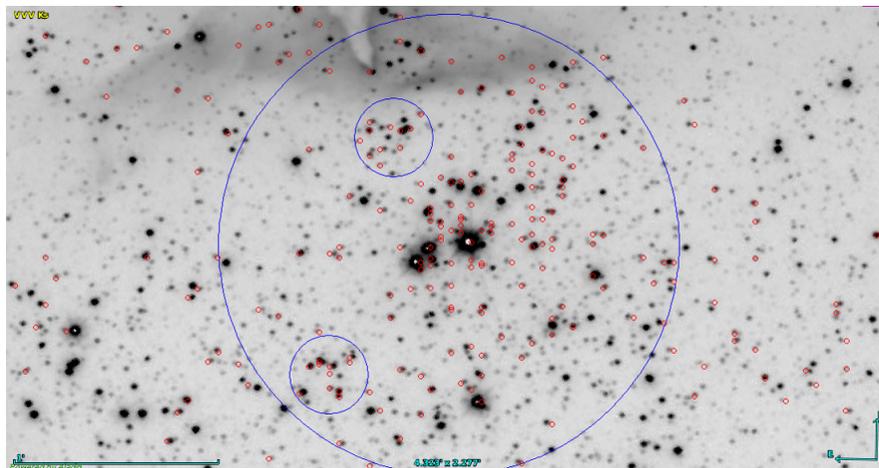


Figura 4.7: Imagem K_S VVV de dimensões (2×4 arcmin²) dos subaglomerados VVV CL165 (círculo superior) e VVV CL166 (círculo inferior). Os círculos vermelhos pequenos indicam YSOs (Fang et al., 2012) em Pismis 24 (círculo maior). Imagem obtida com o Aladin (Bonnarel et al., 2000).

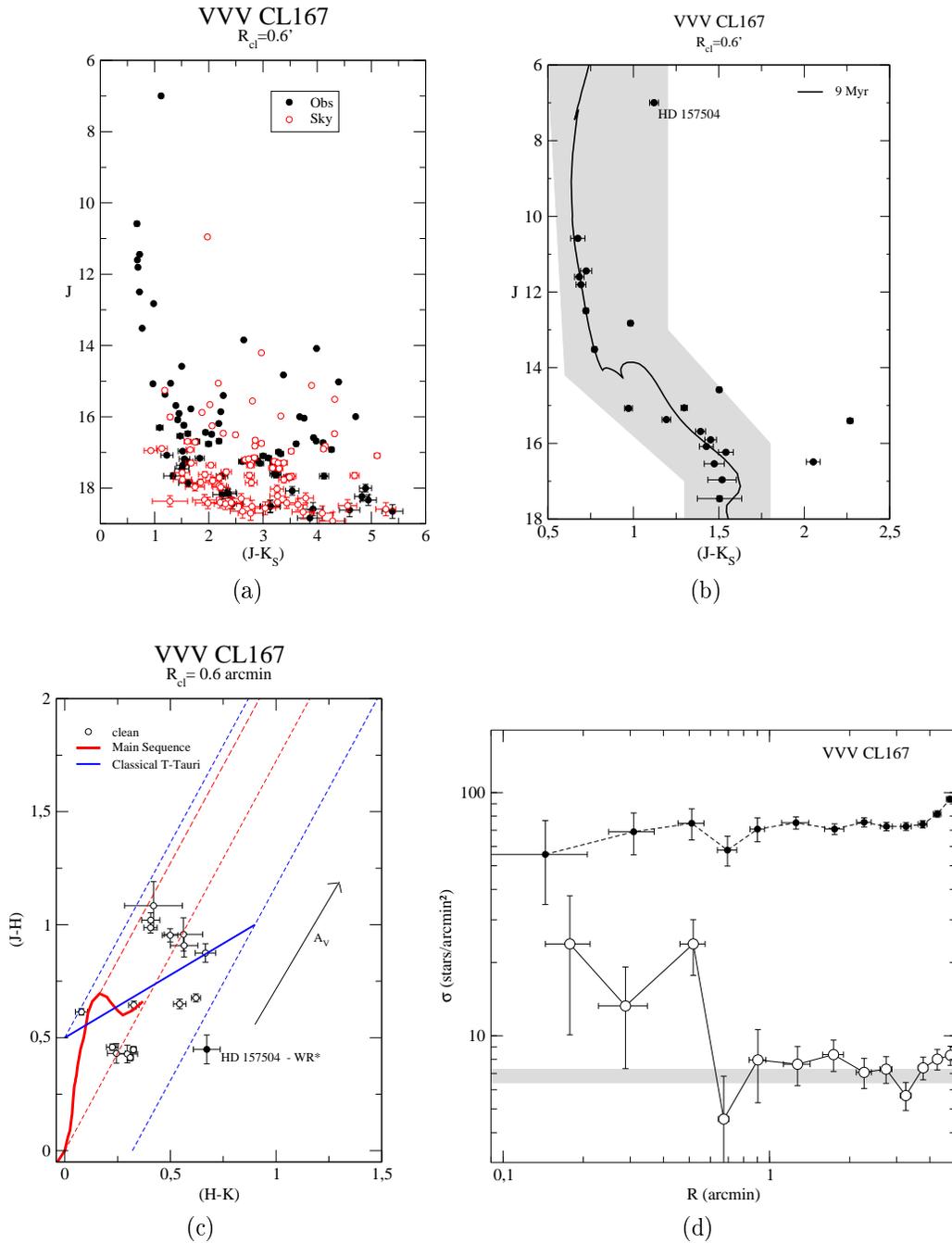


Figura 4.8: Paineis a) e b): CMD observado $J \times (J - K_S)$ de VVV CL167 ($R=0,6'$) centrado no objeto (círculos pretos) e estrelas de campo extraídas de um anel externo da amostra e de mesma área da região central (círculos vermelhos). Paineis c) e d): Diagrama cor-cor das estrelas descontaminadas das estrelas de campo. A estrela WR 93 \equiv HD 157504 é indicada. O vetor avermelhamento equivale a $A_V=5$. Paineis e) e f): RDP de VVV CL167 filtrado por cor-magnitude (círculos vazados) e bruto (círculos cheios) para uma extração de $R=5'$, o e nível de contribuição das estrelas de campo representado pela região horizontal cinza.

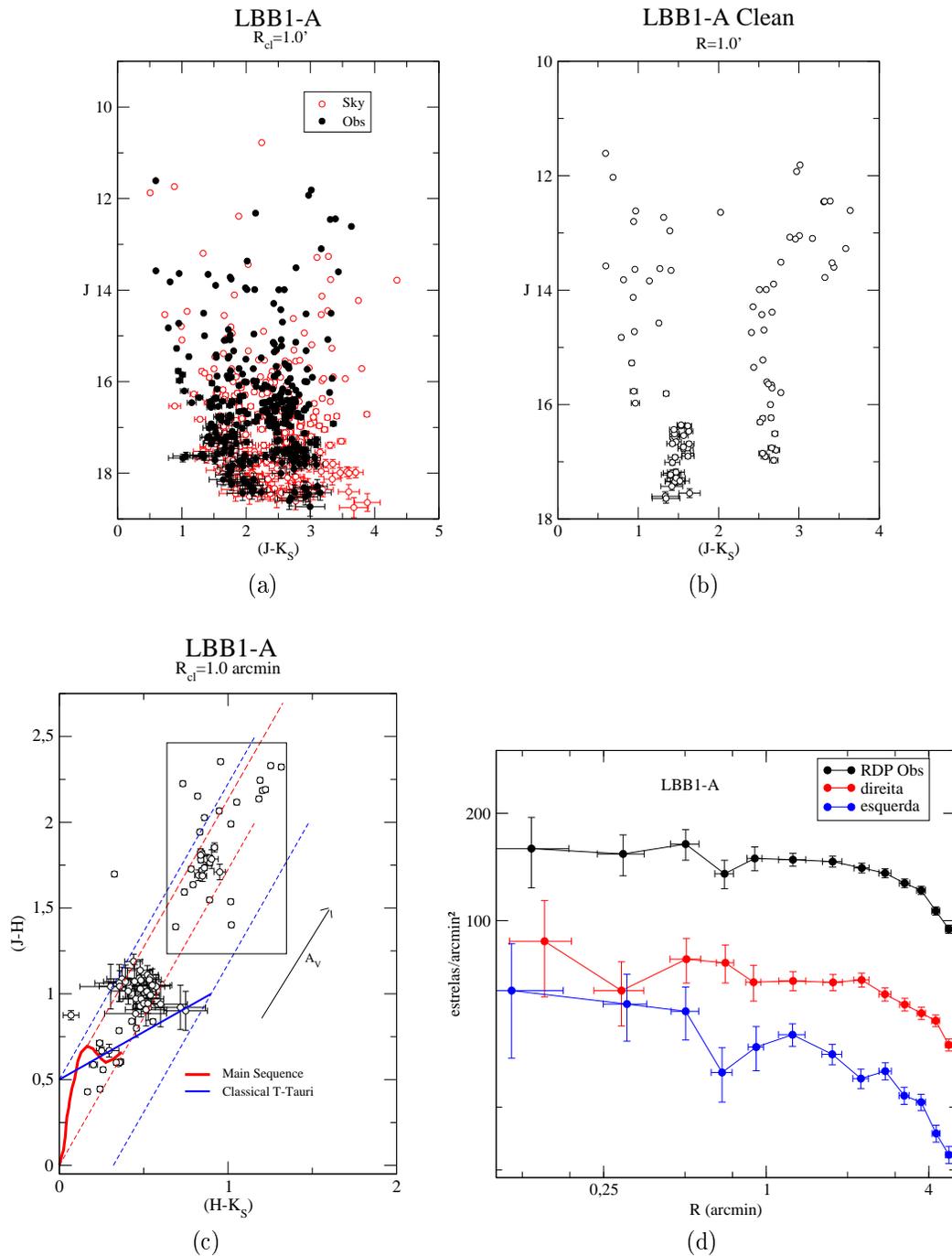


Figura 4.9: Painel a): CMD observado $J \times (J - K_S)$ de LBB1-A ($R=1.0'$) centrado no objeto (círculos pretos) e estrelas de campo extraídas de um anel externo da amostra e de mesma área da região central (círculos vermelhos). Painel b): CMD descontaminado das estrelas de campo. Painel c): Diagrama cor-cor das estrelas descontaminadas das estrelas de campo, o retângulo indica estrelas acumuladas a direita no CMD (Figura 4.9b). O vetor avermelhamento equivale a $A_V=5$. Painel d): RDP de LBB1-A para uma extração de $R=5'$ indicando a distribuição radial de todas as estrelas da subtração (pontos pretos), da área à direita do CMD descontaminado (pontos vermelhos) e à esquerda do CMD descontaminado (pontos azuis).

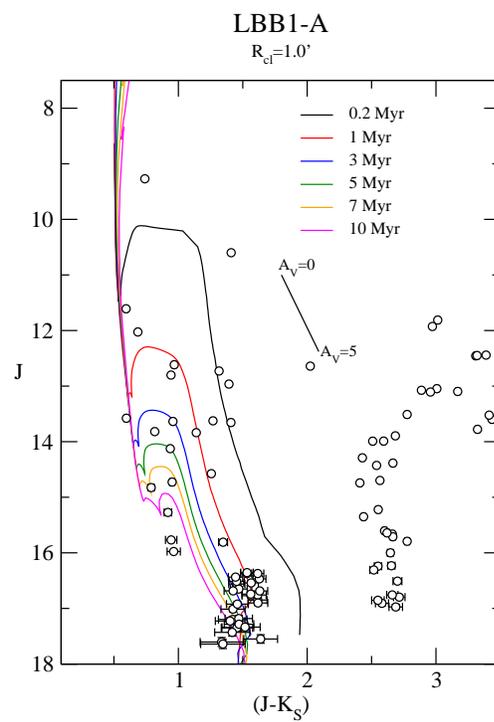


Figura 4.10: CMD descontaminado $J \times (J-K_S)$ das estrelas de campo de LBB1-A com ajuste das isócronas de Padova de 0.2, 1, 3, 5, 7 e 10 Myr.

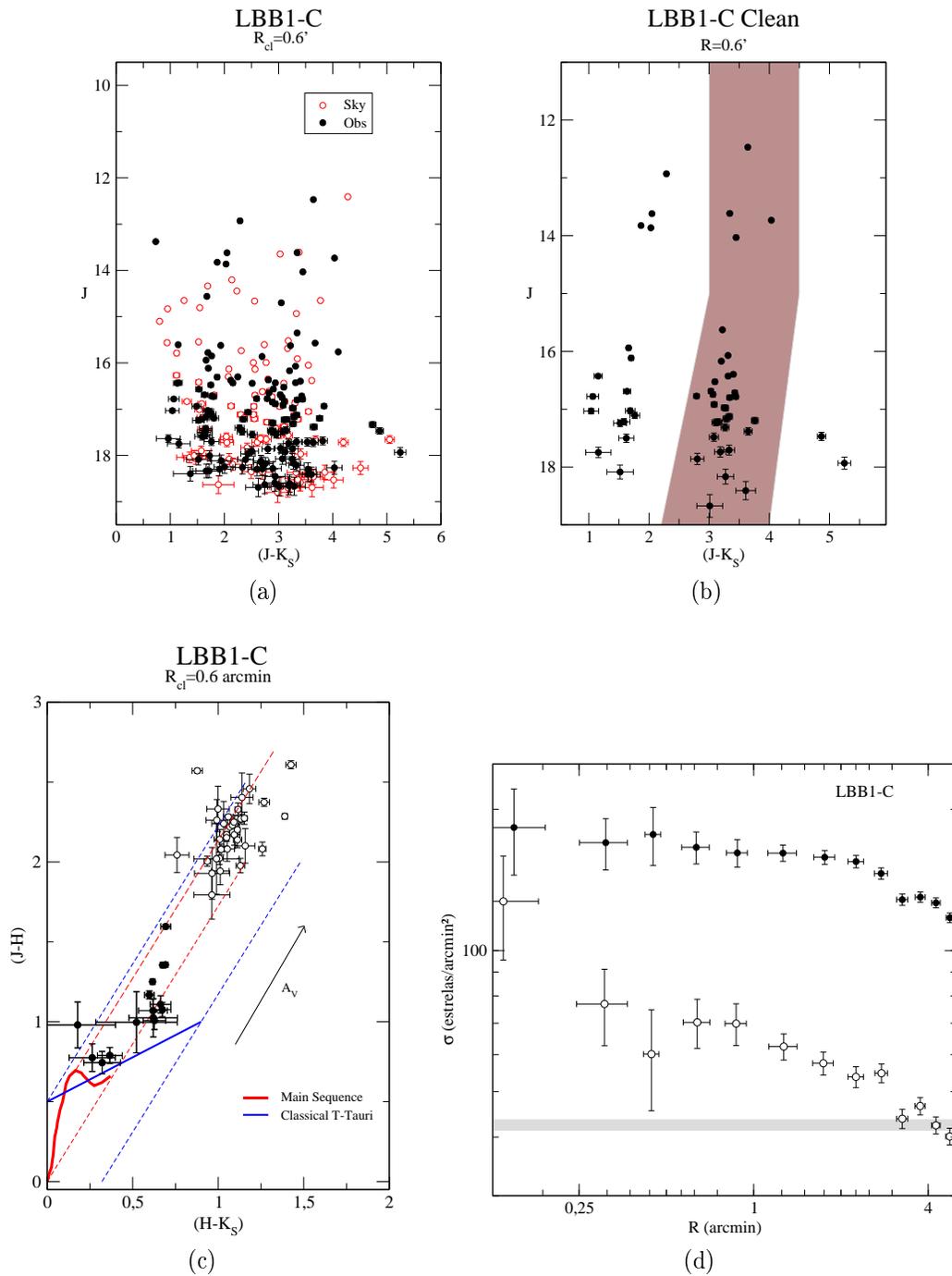


Figura 4.11: Paineis a) e b): CMDs observadas e descontaminadas de LBB1-C ($R=0.6'$) centradas no objeto (círculos pretos) e estrelas de campo extraídas de um anel externo da amostra e de mesma área da região central (círculos vermelhos). Paineis c) e d): Diagrama cor-cor das estrelas descontaminadas das estrelas de campo; os círculos vazados indicam as estrelas acumuladas à direita no CMD (Figura 4.11b). O vetor avermelhamento equivale a $A_V=5$. Paineis d): RDP de LBB1-C para uma extração de $R=5'$ indicando a distribuição radial de todas as estrelas da subtração (pontos pretos) e do RDP filtrado por cor-magnitude (círculos vazados). O nível de contribuição das estrelas de campo está representado pela região horizontal cinza.

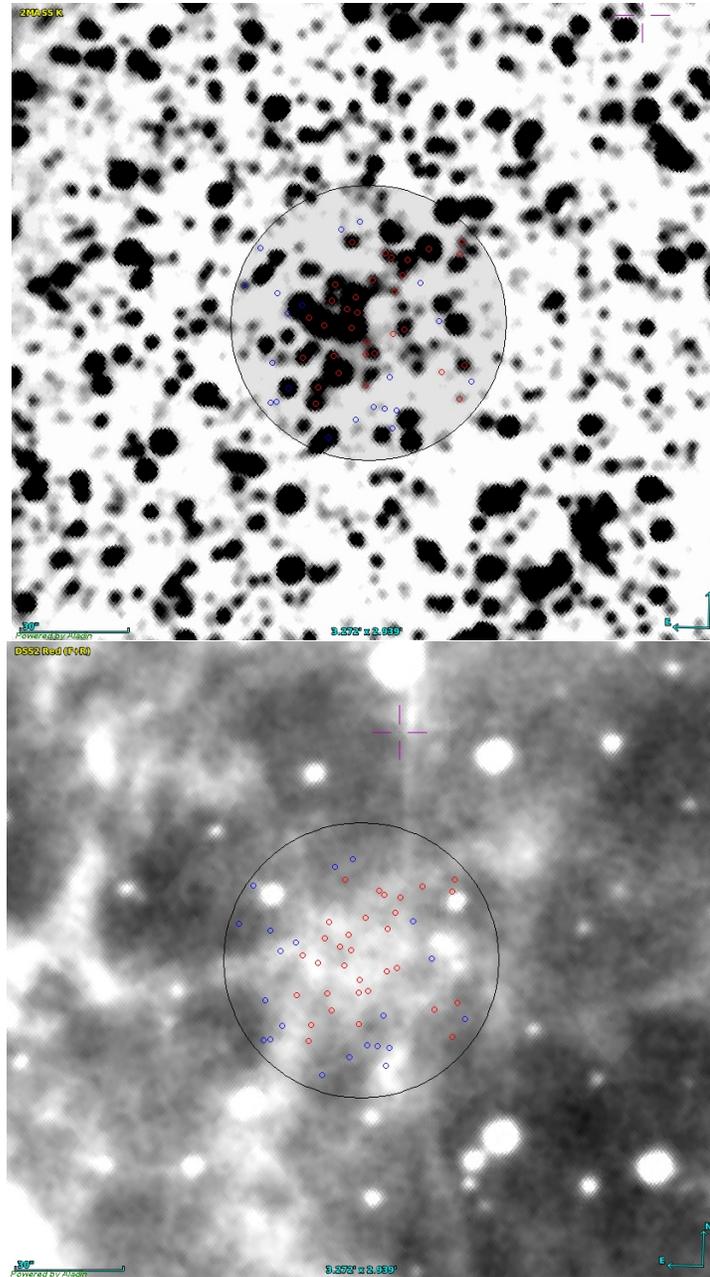


Figura 4.12: Projeção das estrelas do CMD descontaminado por estrelas de campo (Figura 4.11b). Painel superior: Imagem 2MASS banda K_s . Painel inferior: Imagem DSS(F+R). O círculo maior representa o tamanho angular aproximado do objeto dado na Tabela 3.1. Os círculos vermelhos indicam as estrelas dentro do filtro cor-magnitude e os círculos azuis as estrelas à esquerda no CMD.

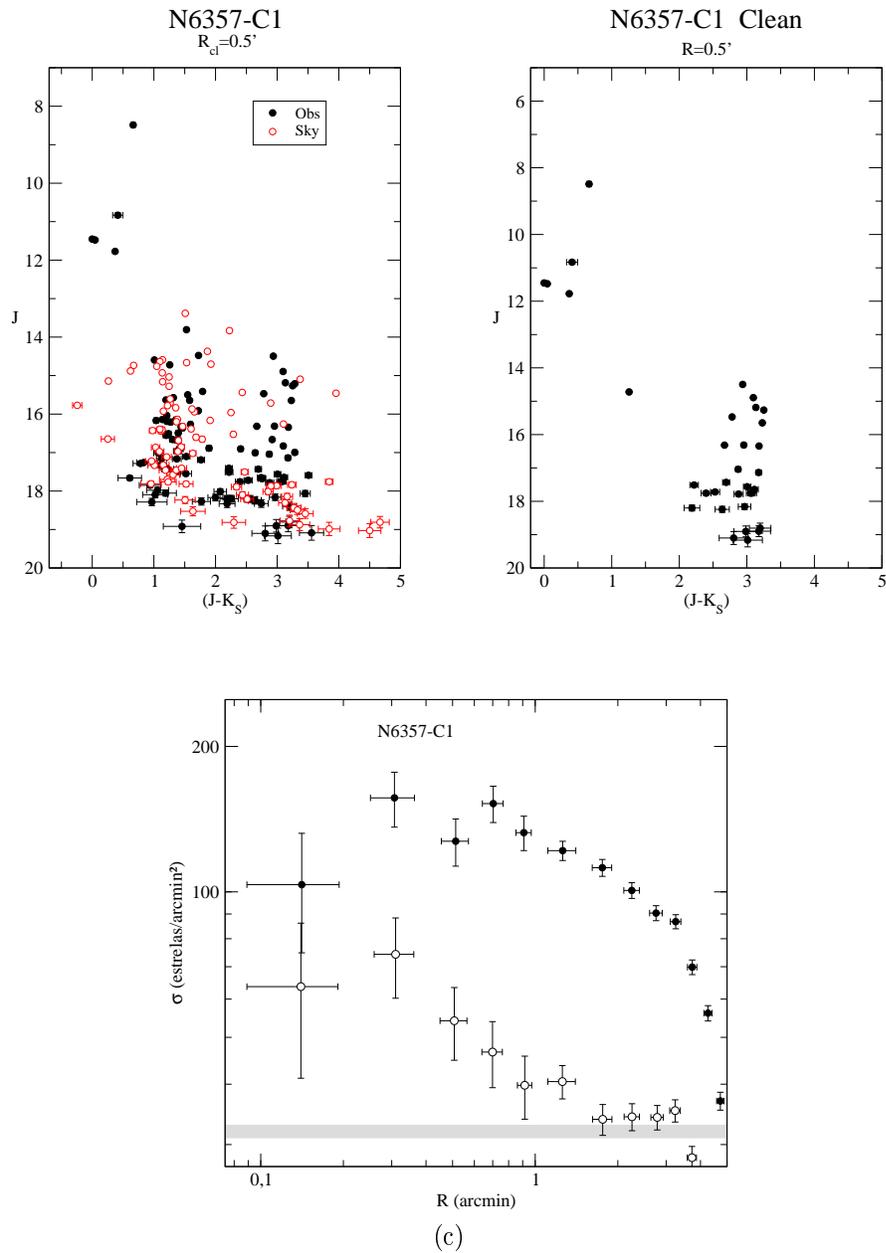


Figura 4.13: Painei a): CMD observado $J \times (J - K_S)$ de N6357-C1 ($R=0.5'$) centrado no objeto (círculos pretos) e estrelas de campo extraídas de um anel externo da amostra e de mesma área da região central (círculos vermelhos). Painei b): CMD descontaminado das estrelas de campo. Painei c): RDP de LBB1-C para uma extração de $R=5'$ indicando a distribuição radial de todas as estrelas da subtração (círculos vazados) e do RDP filtrado por cor-magnitude (círculos vazados). O filtro é aplicado separadamente para as regiões de MS e PMS do CMD. O nível de contribuição das estrelas de campo está representado pela região horizontal cinza.

Conclusões e Perspectivas

Aglomerados imersos e aglomerados abertos são uma excelente forma de explorar a estrutura e evolução do disco e em particular os braços da Galáxia. Os aglomerados imersos são importantes ferramentas de estudo das regiões de formação estelar, pois estes ainda encontram-se associados ao gás em que foram gerados. Nesse contexto, no presente trabalho exploramos o complexo de regiões HII NGC 6357 a fim de mapear e estudar os aglomerados estelares existentes na região e determinar seus parâmetros quando possível.

Utilizando a fotometria nas bandas JHK_S do VVV complementada com a do 2MASS para estrelas saturadas, analisamos a natureza de uma amostra composta por 5 aglomerados imersos (sendo 2 subaglomerados), 1 aglomerado aberto de idade intermediária e outros 3 objetos considerados possíveis aglomerados. Como ferramenta de análise utilizamos um algoritmo de descontaminação das estrelas de campo e derivamos os parâmetros fundamentais da amostra a partir dos diagramas cor-magnitude ajustando isócronas de Padova de metalicidade solar. Construimos RDPs após a aplicação de filtro cor-magnitude sobre a fotometria observada, para então derivarmos os parâmetros estruturais dos aglomerados.

Através da fotometria VVV inserimos uma nova fotometria ao método de constatação de novos aglomerados e de determinação de parâmetros estruturais de aglomerados imersos já consolidado pelo nosso grupo de pesquisa. Ao utilizar o catálogo 2MASS estávamos limitados a diagramas cor-magnitude pouco profundos, ou seja, sem a presença das estrelas mais fracas da PMS. No entanto, estas estrelas são as que mais povoam o diagrama cor-magnitude de um aglomerado ainda imerso na nuvem que o gerou. Logo, com a utilização dos dados fotométricos do VVV (com ganho de pelo menos 3 magnitudes em relação aos dados da base 2MASS), abrimos um novo caminho no que diz respeito ao estudo de aglomerados jovens

e/ou ainda imersos.

Determinamos a distância média do complexo NGC 6357 em 1.76 ± 0.1 kpc baseando-nos nas distâncias calculadas para os seus aglomerados imersos. Tal resultado contribui de forma significativa para estabelecer a distância de NGC 6357, que tem sido uma questão de debate na literatura. O complexo possui pelo menos dois eventos de formação estelar em torno de 5 e 9 Myr.

Concluimos que o estudo do complexo NGC 6357 é de grande importância para o entendimento das regiões de formação estelar da Galáxia, pois esta apresenta diversos eventos de formação de estrelas com diferentes propriedades astrofísicas e estruturais. O que nos permite enxergar numa única região eventos que poderiam estar associados à inúmeros complexos HII. NGC 6357 é por si própria um laboratório astrofísico, não só pelas suas numerosas estruturas interestelares, e.g. filamentos, bolhas, casca, etc., mas também pelos seus aglomerados imersos. Concluimos também que a fotometria VVV fornece um importante ganho em profundidade para explorar os aglomerados desta região, visto que este objeto encontra-se num campo extremamente denso na direção do disco central e bojo.

5.1 Perspectivas

Em estudos futuros, pretendemos utilizar telescópios das classes de 4 e 8 m (e.g. SOAR, GEMINI e VLTs) para detalhar a fotometria dos aglomerados considerados como objetos débeis. Um pedido de tempo já foi feito para um objeto da região.

Pretendemos fazer inspeções mais detalhadas de imagens VVV a fim de dar continuidade ao estudo de outros aglomerados e candidatos que podem estar presentes no complexo NGC 6357. Este *survey* será importante para um quadro mais completo do complexo.

Buscaremos também utilizar a ferramenta ASA e os índices livres de avermelhamento para analisar detalhadamente os aglomerados empregando parâmetros adicionais dos aglomerados de NGC 6357, usando o banco de dados fotométricos do VVV.

Pretendemos fazer um estudo similar para o complexo vizinho NGC 6334, pois recentemente participei do *workshop* COSPAR (Capacity Building Workshop-(NASA)), e pude criar mapas de contorno que indicaram a atividade de formação estelar desse complexo por meio da razão $70 \mu\text{m}/160 \mu$ do telescópio Herschel. Portanto, pretendemos buscar e analisar aglomerados jovens nas regiões previamente mapeadas.

Referências Bibliográficas

- Adams, F. C. and Laughlin, G. (2001). Constraints on the Birth Aggregate of the Solar System. *Icarus*, 150:151–162.
- Allen, L., Megeath, S. T., Gutermuth, R., Myers, P. C., Wolk, S., Adams, F. C., Muzerolle, J., Young, E., and Pipher, J. L. (2007). The Structure and Evolution of Young Stellar Clusters. *Protostars and Planets V*, pages 361–376.
- Baraffe, I., Chabrier, G., Allard, F., and Hauschildt, P. H. (1998). Evolutionary models for solar metallicity low-mass stars: mass-magnitude relationships and color-magnitude diagrams. *A&A*, 337:403–412.
- Bica, E., Bonatto, C., Barbuy, B., and Ortolani, S. (2006a). Globular cluster system and Milky Way properties revisited. *A&A*, 450:105–115.
- Bica, E., Bonatto, C., and Blumberg, R. (2006b). Faint open clusters with 2MASS: BH 63, Lyngå 2, Lyngå 12 and King 20. *A&A*, 460:83–92.
- Bica, E., Dutra, C. M., Soares, J., and Barbuy, B. (2003). New infrared star clusters in the Northern and Equatorial Milky Way with 2MASS. *A&A*, 404:223–232.
- Bohigas, J., Tapia, M., Roth, M., and Ruiz, M. T. (2004). Optical Imaging and Spectroscopy of the H II Region G353.2+0.9 in NGC 6357 and Its Relation to Pismis 24. *AJ*, 127:2826–2837.
- Bonatto, C. and Bica, E. (2006). Methods for improving open cluster fundamental parameters applied to M 52 and NGC 3960. *A&A*, 455:931–942.

- Bonatto, C. and Bica, E. (2007a). Old open clusters in the inner Galaxy: FSR 1744, FSR 89 and FSR 31. *A&A*, 473:445–455.
- Bonatto, C. and Bica, E. (2007b). Open clusters in dense fields: the importance of field-star decontamination for NGC 5715, Lyngå 4, Lyngå 9, Trumpler 23, Trumpler 26 and Czernik 37. *MNRAS*, 377:1301–1323.
- Bonatto, C. and Bica, E. (2009a). Investigating the age and structure of the infrared old open clusters LK1, LK10, FSR1521 and FSR1555. *MNRAS*, 392:483–496.
- Bonatto, C. and Bica, E. (2009b). The nature of the young and low-mass open clusters Pismis5, vdB80, NGC1931 and BDSB96. *MNRAS*, 397:1915–1925.
- Bonatto, C. and Bica, E. (2010). The fate of the pre-main sequence-rich clusters Collinder 197 and vdB 92: dissolution? *A&A*, 516:A81.
- Bonatto, C., Bica, E., and Lima, E. F. (2012a). Deriving reliable fundamental parameters of pre-main-sequence-rich star clusters affected by differential reddening. *MNRAS*, 420:352–360.
- Bonatto, C., Bica, E., Ortolani, S., and Barbuy, B. (2006). Detection of K_s-excess stars in the 14 Myr open cluster NGC 4755. *A&A*, 453:121–132.
- Bonatto, C., Bica, E., and Pavani, D. B. (2004). NGC 2180: A disrupting open cluster? *A&A*, 427:485–494.
- Bonatto, C., Bica, E., and Santos, Jr., J. F. C. (2005). Spatial dependence of 2MASS luminosity and mass functions in the old open cluster NGC 188. *A&A*, 433:917–929.
- Bonatto, C., Lima, E. F., and Bica, E. (2012b). Unveiling hidden properties of young star clusters: differential reddening, star-formation spread, and binary fraction. *A&A*, 540:A137.
- Bonnarel, F., Fernique, P., Bienaymé, O., Egret, D., Genova, F., Louys, M., Ochsenbein, F., Wenger, M., and Bartlett, J. G. (2000). The ALADIN interactive sky atlas. A reference tool for identification of astronomical sources. *A&AS*, 143:33–40.
- Bonnell, I. A. and Davies, M. B. (1998). Mass segregation in young stellar clusters. *MNRAS*, 295:691.

- Borissova, J., Bonatto, C., Kurtev, R., Clarke, J. R. A., Peñaloza, F., Sale, S. E., Minniti, D., Alonso-García, J., Artigau, E., Barbá, R., Bica, E., Baume, G. L., Catelan, M., Chenè, A. N., Dias, B., Folkes, S. L., Froebrich, D., Geisler, D., de Grijs, R., Hanson, M. M., Hempel, M., Ivanov, V. D., Kumar, M. S. N., Lucas, P., Mauro, F., Moni Bidin, C., Rejkuba, M., Saito, R. K., Tamura, M., and Toledo, I. (2011). New Galactic star clusters discovered in the VVV survey. *A&A*, 532:A131.
- Borissova, J., Chene, A. N., and et al. (2014). New Galactic star clusters discovered in the VVV Survey II. Candidates projected in the inner disk and bulge area. Submitted for publication.
- Bressan, A., Marigo, P., Girardi, L., Salasnich, B., Dal Cero, C., Rubele, S., and Nanni, A. (2012). PARSEC: stellar tracks and isochrones with the PAdova and TRieste Stellar Evolution Code. *MNRAS*, 427:127–145.
- Burton, W. B. (1976). The morphology of hydrogen and of other tracers in the Galaxy. *ARA&A*, 14:275–306.
- Cappa, C. E., Barbá, R., Duronea, N. U., Vasquez, J., Arnal, E. M., Goss, W. M., and Fernández Lajús, E. (2011). A multifrequency study of the active star-forming complex NGC 6357 - I. Interstellar structures linked to the open cluster Pis 24. *MNRAS*, 415:2844–2858.
- Cardelli, J. A., Clayton, G. C., and Mathis, J. S. (1989). The relationship between IR, optical, and UV extinction. In Allamandola, L. J. and Tielens, A. G. G. M., editors, *Interstellar Dust*, volume 135 of *IAU Symposium*, page 5P.
- Carpenter, J. M., Meyer, M. R., Dougados, C., Strom, S. E., and Hillenbrand, L. A. (1997). Properties of the Monoceros R2 Stellar Cluster. *AJ*, 114:198–221.
- Catelan, M., Minniti, D., Lucas, P. W., Alonso-García, J., Angeloni, R., Beamín, J. C., Bonatto, C., Borissova, J., Contreras, C., Cross, N., Dékány, I., Emerson, J. P., Eyheramendy, S., Geisler, D., González-Solares, E., Helminiak, K. G., Hempel, M., Irwin, M. J., Ivanov, V. D., Jordán, A., Kerins, E., Kurtev, R., Mauro, F., Moni Bidin, C., Navarrete, C., Pérez, P., Pichara, K., Read, M., Rejkuba, M., Saito, R. K., Sale, S. E., and Toledo, I. (2011). The Vista Variables in the Vía Láctea (VVV) ESO Public Survey: Current Status and First Results. In McWilliam, A., editor, *RR Lyrae Stars, Metal-Poor Stars, and the Galaxy*, pages 145–vol 5, Carnegie Observatories Astrophysics Serie.

- Chené, A.-N., Borissova, J., Clarke, J. R. A., Bonatto, C., Majaess, D. J., Moni Bidin, C., Sale, S. E., Mauro, F., Kurtev, R., Baume, G., Feinstein, C., Ivanov, V. D., Geisler, D., Catelan, M., Minniti, D., Lucas, P., de Grijs, R., and Kumar, M. S. N. (2012). Massive open star clusters using the VVV survey. I. Presentation of the data and description of the approach. *A&A*, 545:A54.
- Chini, R., Elsaesser, H., Hefele, H., and Weinberger, R. (1977). On the infrared sources in the Ophiuchus dark cloud region. *A&A*, 56:323–325.
- Conti, P. S. and Vacca, W. D. (1990). The distribution of massive stars in the Galaxy. I - The Wolf-Rayet stars. *AJ*, 100:431–444.
- Damke, G., Barbá, R., and Morrell, N. I. (2006). The open cluster G353.1+0.7 in NGC6357. In *Revista Mexicana de Astronomía y Astrofísica Conference Series*, volume 26 of *Revista Mexicana de Astronomía y Astrofísica*, vol. 27, page 180.
- D’Antona, F. and Mazzitelli, I. (1997). Evolution of low mass stars. *Mem. Societa Astronomica Italiana*, 68:807.
- D’Antona, F. and Mazzitelli, I. (1998). A Role for Superadiabatic Convection in Low Mass Structures? In Rebolo, R., Martin, E. L., and Zapatero Osorio, M. R., editors, *Brown Dwarfs and Extrasolar Planets*, volume 134 of *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, page 442.
- Dobbs, C. L. and Bonnell, I. A. (2006). Spurs and feathering in spiral galaxies. *MNRAS*, 367:873–878.
- Elmegreen, B. G. (2000). Star Formation in a Crossing Time. *ApJ*, 530:277–281.
- Fang, M., van Boekel, R., King, R. R., Henning, T., Bouwman, J., Doi, Y., Okamoto, Y. K., Roccatagliata, V., and Sicilia-Aguilar, A. (2012). Star formation and disk properties in Pismis 24. *A&A*, 539:A119.
- Feigelson, E. D., Martin, A. L., McNeill, C. J., Broos, P. S., and Garmire, G. P. (2009). Stellar Clusters in the NGC 6334 Star-Forming Complex. *AJ*, 138:227–239.
- Feigelson, E. D., Townsley, L. K., Broos, P. S., Busk, H. A., Getman, K. V., King, R. R., Kuhn, M. A., Naylor, T., Povich, M. S., Baddeley, A., Bate, M. R., Indebetouw, R., Luhman, K. L., McCaughrean, M. J., Pittard, J. M., Pudritz, R. E., Sills, A., Song, Y.,

- and Wadsley, J. (2013). Overview of the Massive Young Star-Forming Complex Study in Infrared and X-Ray (MYStIX) Project. *ApJS*, 209:26.
- Felli, M., Persi, P., Roth, M., Tapia, M., Ferrari-Toniolo, M., and Cervelli, A. (1990). Radio continuum, IR and CCD images of selected regions in NGC 6357. *A&A*, 232:477–494.
- Fitzpatrick, E. L. (2004). Interstellar Extinction in the Milky Way Galaxy. In Witt, A. N., Clayton, G. C., and Draine, B. T., editors, *Astrophysics of Dust*, volume 309 of *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, page 33.
- Girardi, L., Bertelli, G., Bressan, A., Chiosi, C., Groenewegen, M. A. T., Marigo, P., Salasnich, B., and Weiss, A. (2002). Theoretical isochrones in several photometric systems. I. Johnson-Cousins-Glass, HST/WFPC2, HST/NICMOS, Washington, and ESO Imaging Survey filter sets. *A&A*, 391:195–212.
- Girardi, L., Dalcanton, J., Williams, B., de Jong, R., Gallart, C., Monelli, M., Groenewegen, M. A. T., Holtzman, J. A., Olsen, K. A. G., Seth, A. C., Weisz, D. R., and ANGST/ANGRRR Collaboration (2008). Revised Bolometric Corrections and Interstellar Extinction Coefficients for the ACS and WFPC2 Photometric Systems. *PASP*, 120:583–591.
- Goodwin, S. P. and Bastian, N. (2006). Gas expulsion and the destruction of massive young clusters. *MNRAS*, 373:752–758.
- Gorti, U. and Hollenbach, D. (2002). Photoevaporation of Clumps in Photodissociation Regions. *ApJ*, 573:215–237.
- Hollenbach, D. J. and Tielens, A. G. G. M. (1999). Photodissociation regions in the interstellar medium of galaxies. *Reviews of Modern Physics*, 71:173–230.
- Holmberg, E. B., Lauberts, A., Schuster, H.-E., and West, R. M. (1978). The ESO/Uppsala survey of the ESO(B) Atlas of the Southern Sky. VI. *A&AS*, 34:285–340.
- King, I. (1962). The structure of star clusters. I. an empirical density law. *AJ*, 67:471.
- King, I. R. (1966a). The structure of star clusters. III. Some simple dynamical models. *AJ*, 71:64.
- King, I. R. (1966b). The structure of star clusters. IV. Photoelectric surface photometry in nine globular clusters. *AJ*, 71:276.

- Kumar, M. S. N., Kamath, U. S., and Davis, C. J. (2004). Embedded star clusters in the W51 giant molecular cloud. *MNRAS*, 353:1025–1034.
- Lada, C. J., Alves, J., and Lada, E. A. (1996). Near-Infrared Imaging of Embedded Clusters: NGC 1333. *AJ*, 111:1964.
- Lada, C. J. and Lada, E. A. (2003). Embedded Clusters in Molecular Clouds. *ARA&A*, 41:57–115.
- Lada, C. J., Young, E. T., and Greene, T. P. (1993). Infrared images of the young cluster NGC 2264. *ApJ*, 408:471–483.
- Lada, E. A., Depoy, D. L., Evans, II, N. J., and Gatley, I. (1991). A 2.2 micron survey in the L1630 molecular cloud. *ApJ*, 371:171–182.
- Leisawitz, D., Bash, F. N., and Thaddeus, P. (1989). A CO survey of regions around 34 open clusters. *ApJS*, 70:731–812.
- Maíz Apellániz, J., Walborn, N. R., Morrell, N. I., Niemela, V. S., and Nelan, E. P. (2007). Pismis 24-1: The Stellar Upper Mass Limit Preserved. *ApJ*, 660:1480–1485.
- Majaess, D. (2013). Discovering protostars and their host clusters via WISE. *Ap&SS*, 344:175–186.
- Massey, P., DeGioia-Eastwood, K., and Waterhouse, E. (2001). The Progenitor Masses of Wolf-Rayet Stars and Luminous Blue Variables Determined from Cluster Turnoffs. II. Results from 12 Galactic Clusters and OB Associations. *AJ*, 121:1050–1070.
- Massi, F., Brand, J., and Felli, M. (1997). Molecular cloud/HII region interfaces in the star forming region NGC 6357. *A&A*, 320:972–992.
- Matzner, C. D. and McKee, C. F. (2000). Efficiencies of Low-Mass Star and Star Cluster Formation. *ApJ*, 545:364–378.
- McBreen, B., Jaffe, D. T., and Fazio, G. G. (1983). Far-infrared and CO observations of NGC 6357 and regions surrounding NGC 6357 and NGC 6334. *AJ*, 88:835–843.
- McMillan, S. L. W., Vesperini, E., and Portegies Zwart, S. F. (2007). A Dynamical Origin for Early Mass Segregation in Young Star Clusters. *ApJ*, 655:L45–L49.

- Megeath, S. T., Allen, L. E., Gutermuth, R. A., Pipher, J. L., Myers, P. C., Calvet, N., Hartmann, L., Muzerolle, J., and Fazio, G. G. (2004). Initial Results from the Spitzer Young Stellar Cluster Survey. *ApJS*, 154:367–373.
- Megeath, S. T., Flaherty, K. M., Hora, J., Allen, L. E., Fazio, G. G., Hartmann, L., Myers, P. C., Muzerolle, J., Pipher, J. L., Siegler, N., Stauffer, J. R., and Young, E. (2005). A Spitzer/IRAC survey of the Orion Molecular Clouds. In Cesaroni, R., Felli, M., Churchwell, E., and Walmsley, M., editors, *Massive Star Birth: A Crossroads of Astrophysics*, volume 227 of *IAU Symposium*, pages 383–388.
- Meynet, G. and Maeder, A. (2005). Stellar evolution with rotation. XI. Wolf-Rayet star populations at different metallicities. *A&A*, 429:581–598.
- Minniti, D., Lucas, P. W., Emerson, J. P., Saito, R. K., Hempel, M., Pietrukowicz, P., Ahumada, A. V., Alonso, M. V., Alonso-Garcia, J., Arias, J. I., Bandyopadhyay, R. M., Barbá, R. H., Barbuy, B., Bedin, L. R., Bica, E., Borissova, J., Bronfman, L., Carraro, G., Catelan, M., Clariá, J. J., Cross, N., de Grijs, R., Dékány, I., Drew, J. E., Fariña, C., Feinstein, C., Fernández Lajús, E., Gamen, R. C., Geisler, D., Gieren, W., Goldman, B., Gonzalez, O. A., Gunthardt, G., Gurovich, S., Hambly, N. C., Irwin, M. J., Ivanov, V. D., Jordán, A., Kerins, E., Kinemuchi, K., Kurtev, R., López-Corredoira, M., Maccarone, T., Masetti, N., Merlo, D., Messineo, M., Mirabel, I. F., Monaco, L., Morelli, L., Padilla, N., Palma, T., Parisi, M. C., Pignata, G., Rejkuba, M., Roman-Lopes, A., Sale, S. E., Schreiber, M. R., Schröder, A. C., Smith, M., Sodr e, Jr., L., Soto, M., Tamura, M., Tappert, C., Thompson, M. A., Toledo, I., Zoccali, M., and Pietrzynski, G. (2010). VISTA Variables in the Via Lactea (VVV): The public ESO near-IR variability survey of the Milky Way. *New Astronomy*, 15:433–443.
- Moffat, A. F. J. and Vogt, N. (1973). Southern open stars clusters. III. UBV-Hbeta photometry of 28 clusters between galactic longitudes 297d and 353d. *A&AS*, 10:135.
- Moisés, A. P., Damineli, A., Figuerêdo, E., Blum, R. D., Conti, P. S., and Barbosa, C. L. (2011). Spectrophotometric distances to Galactic H II regions. *MNRAS*, 411:705–760.
- Muench, A. A., Lada, E. A., Lada, C. J., Elston, R. J., Alves, J. F., Horrobin, M., Huard, T. H., Levine, J. L., Raines, S. N., and Román-Zúñiga, C. (2003). A Study of the Luminosity and Mass Functions of the Young IC 348 Cluster Using FLAMINGOS Wide-Field Near-Infrared Images. *AJ*, 125:2029–2049.

- Neckel, T. (1978). UBV, VRI and H-beta observations of stars in the H II regions NGC 6334 and NGC 6357. *A&A*, 69:51–56.
- Neckel, T. (1984). Polarimetric and new photometric observations in the NGC6334/6357 region. *A&A*, 137:58–62.
- Neckel, T. and Chini, R. (1981). The interstellar extinction law in some dusty HII regions. *A&AS*, 45:451–454.
- O'dell, C. R. and Wen, Z. (1992). Motion at the ionization front in the Orion nebula - A kinematic study of the forbidden O I line. *ApJ*, 387:229–240.
- Padgett, D. L., Rebull, L. M., Stapelfeldt, K. R., Chapman, N. L., Lai, S.-P., Mundy, L. G., Evans, II, N. J., Brooke, T. Y., Cieza, L. A., Spiesman, W. J., Noriega-Crespo, A., McCabe, C.-E., Allen, L. E., Blake, G. A., Harvey, P. M., Huard, T. L., Jørgensen, J. K., Koerner, D. W., Myers, P. C., Sargent, A. I., Teuben, P., van Dishoeck, E. F., Wahhaj, Z., and Young, K. E. (2008). The Spitzer c2d Survey of Large, Nearby, Interstellar Clouds. VII. Ophiuchus Observed with MIPS. *ApJ*, 672:1013–1037.
- Palla, F. (1999). *Pre-Main-Sequence Evolution of Stars and Young Clusters*, pages 9–134.
- Pang, X., Grebel, E. K., Allison, R. J., Goodwin, S. P., Altmann, M., Harbeck, D., Moffat, A. F. J., and Drissen, L. (2013). On the Origin of Mass Segregation in NGC 3603. *ApJ*, 764:73.
- Persi, P., Ferrari-Toniolo, M., Roth, M., and Tapia, M. (1986). Infrared observations and star formation in NGC 6357. *A&A*, 170:97–106.
- Russeil, D., Zavagno, A., Adami, C., Anderson, L. D., Bontemps, S., Motte, F., Rodon, J. A., Schneider, N., Ilmane, A., and Murphy, K. J. (2012). Statistical study of OB stars in NGC 6334 and NGC 6357. *A&A*, 538:A142.
- Saito, R. K., Hempel, M., Minniti, D., Lucas, P. W., Rejkuba, M., Toledo, I., Gonzalez, O. A., Alonso-García, J., Irwin, M. J., Gonzalez-Solares, E., Hodgkin, S. T., Lewis, J. R., Cross, N., Ivanov, V. D., Kerins, E., Emerson, J. P., Soto, M., Amôres, E. B., Gurovich, S., Dékány, I., Angeloni, R., Beamin, J. C., Catelan, M., Padilla, N., Zoccali, M., Pietrukowicz, P., Moni Bidin, C., Mauro, F., Geisler, D., Folkes, S. L., Sale, S. E., Borissova, J., Kurtev, R., Ahumada, A. V., Alonso, M. V., Adamson, A., Arias, J. I., Bandyopadhyay, R. M., Barbá, R. H., Barbuy, B., Baume, G. L., Bedin, L. R., Bellini,

- A., Benjamin, R., Bica, E., Bonatto, C., Bronfman, L., Carraro, G., Chenè, A. N., Clariá, J. J., Clarke, J. R. A., Contreras, C., Corvillón, A., de Grijs, R., Dias, B., Drew, J. E., Fariña, C., Feinstein, C., Fernández-Lajús, E., Gamen, R. C., Gieren, W., Goldman, B., González-Fernández, C., Grand, R. J. J., Gunthardt, G., Hambly, N. C., Hanson, M. M., Hełminiak, K. G., Hoare, M. G., Huckvale, L., Jordán, A., Kinemuchi, K., Longmore, A., López-Corredoira, M., Maccarone, T., Majaess, D., Martín, E. L., Masetti, N., Mennickent, R. E., Mirabel, I. F., Monaco, L., Morelli, L., Motta, V., Palma, T., Parisi, M. C., Parker, Q., Peñaloza, F., Pietrzyński, G., Pignata, G., Popescu, B., Read, M. A., Rojas, A., Roman-Lopes, A., Ruiz, M. T., Saviane, I., Schreiber, M. R., Schröder, A. C., Sharma, S., Smith, M. D., Sodr e, L., Stead, J., Stephens, A. W., Tamura, M., Tappert, C., Thompson, M. A., Valenti, E., Vanzı, L., Walton, N. A., Weidmann, W., and Zijlstra, A. (2012). VVV DR1: The first data release of the Milky Way bulge and southern plane from the near-infrared ESO public survey VISTA variables in the Vía L ctea. *A&A*, 537:A107.
- Saito, R. K., Minniti, D., Angeloni, R., Catelan, M., Beamin, J. C., Borissova, J., D ek ny, I., Kerins, E., Kurtev, R., and Mennickent, R. E. (2013). A near-infrared catalogue of the Galactic novae in the VVV survey area. *A&A*, 554:A123.
- Sandage, A. R. (1953). The color-magnitude diagram for the globular cluster M 3. *AJ*, 58:61–75.
- Saurin, T. A., Bica, E., and Bonatto, C. (2012). The embedded cluster or association Trumpler 37 in IC 1396: a search for evolutionary constraints. *MNRAS*, 421:3206–3216.
- Saurin, T. A., Bica, E., and Bonatto, C. (2013). Detached pre-main sequence in 2MASS colour magnitude diagrams of young clusters. Submitted for publication.
- Schmeja, S. and Klessen, R. S. (2006). Evolving structures of star-forming clusters. *A&A*, 449:151–159.
- Shu, F., Najita, J., Galli, D., Ostriker, E., and Lizano, S. (1993). The collapse of clouds and the formation and evolution of stars and disks. In Levy, E. H. and Lunine, J. I., editors, *Protostars and Planets III*, pages 3–45.
- Siess, L., Dufour, E., and Forestini, M. (2000). An internet server for pre-main sequence tracks of low- and intermediate-mass stars. *A&A*, 358:593–599.

- Skrutskie, M. F., Cutri, R. M., Stiening, R., Weinberg, M. D., Schneider, S., Carpenter, J. M., Beichman, C., Capps, R., Chester, T., Elias, J., Huchra, J., Liebert, J., Lonsdale, C., Monet, D. G., Price, S., Seitzer, P., Jarrett, T., Kirkpatrick, J. D., Gizis, J. E., Howard, E., Evans, T., Fowler, J., Fullmer, L., Hurt, R., Light, R., Kopan, E. L., Marsh, K. A., McCallon, H. L., Tam, R., Van Dyk, S., and Wheelock, S. (2006). The Two Micron All Sky Survey (2MASS). *AJ*, 131:1163–1183.
- Smith, K. W. and Bonnell, I. A. (2001). Free-floating planets in stellar clusters? *MNRAS*, 322:L1–L4.
- Soares, J. B., Bica, E., Ahumada, A. V., and Clariá, J. J. (2008). Near infrared photometric and optical spectroscopic study of 22 low mass star clusters embedded in nebulae. *A&A*, 478:419–427.
- Stead, J. J. and Hoare, M. G. (2011). Determining the age of young embedded clusters. *MNRAS*, 418:2219–2233.
- Strom, S. E., Vrba, F. J., and Strom, K. M. (1976). Infrared surveys of dark cloud complexes V. The NGC 7129 region and the Serpens dark cloud. *AJ*, 81:638–640.
- Tutukov, A. V. (1978). Early Stages of Dynamical Evolution of Star Cluster Models. *A&A*, 70:57.
- van der Hucht, K. A. (2001). The VIIth catalogue of galactic Wolf-Rayet stars. *New A. Rev.*, 45:135–232.
- Vrba, F. J., Strom, K. M., Strom, S. E., and Grasdalen, G. L. (1975). Further study of the stellar cluster embedded in the Ophiuchus dark cloud complex. *ApJ*, 197:77–79.
- Wang, J., Townsley, L. K., Feigelson, E. D., Getman, K. V., Broos, P. S., Garmire, G. P., and Tsujimoto, M. (2007). An X-Ray Census of Young Stars in the Massive Southern Star-forming Complex NGC 6357. *ApJS*, 168:100–127.
- Werner, M. W., Roellig, T. L., Low, F. J., Rieke, G. H., Rieke, M., Hoffmann, W. F., Young, E., Houck, J. R., Brandl, B., Fazio, G. G., Hora, J. L., Gehrz, R. D., Helou, G., Soifer, B. T., Stauffer, J., Keene, J., Eisenhardt, P., Gallagher, D., Gautier, T. N., Irace, W., Lawrence, C. R., Simmons, L., Van Cleve, J. E., Jura, M., Wright, E. L., and Cruikshank, D. P. (2004). The Spitzer Space Telescope Mission. *ApJS*, 154:1–9.

- Westmoquette, M. S., Slavin, J. D., Smith, L. J., and Gallagher, III, J. S. (2010). VLT/FLAMES-ARGUS observations of stellar wind-ISM cloud interactions in NGC 6357. *MNRAS*, 402:152–160.
- Whitney, B. A., Sewilo, M., Indebetouw, R., Robitaille, T. P., Meixner, M., Gordon, K., Meade, M. R., Babler, B. L., Harris, J., Hora, J. L., Bracker, S., Povich, M. S., Churchwell, E. B., Engelbracht, C. W., For, B.-Q., Block, M., Misselt, K., Vihj, U., Leitherer, C., Kawamura, A., Blum, R. D., Cohen, M., Fukui, Y., Mizuno, A., Mizuno, N., Srinivasan, S., Tielens, A. G. G. M., Volk, K., Bernard, J.-P., Boulanger, F., Frogel, J. A., Gallagher, J., Gorjian, V., Kelly, D., Latter, W. B., Madden, S., Kemper, F., Mould, J. R., Nota, A., Oey, M. S., Olsen, K. A., Onishi, T., Paladini, R., Panagia, N., Perez-Gonzalez, P., Reach, W., Shibai, H., Sato, S., Smith, L. J., Staveley-Smith, L., Ueta, T., Van Dyk, S., Werner, M., Wolff, M., and Zaritsky, D. (2008). Spitzer Sage Survey of the Large Magellanic Cloud. III. Star Formation and ~ 1000 New Candidate Young Stellar Objects. *AJ*, 136:18–43.
- Wilking, B. A. and Lada, C. J. (1983). The discovery of new embedded sources in the centrally condensed core of the Rho Ophiuchi dark cloud - The formation of a bound cluster. *ApJ*, 274:698–716.
- Wilson, T. L., Mezger, P. G., Gardner, F. F., and Milne, D. K. (1970). A Survey of H 109 α Recombination Line Emission in Galactic H II Regions of the Southern Sky. *A&A*, 6:364–384.
- Zinnecker, H., McCaughrean, M. J., Rayner, J. T., Wilking, B. A., and Moneti, A. (1993). Near Infrared Images of Star-Forming Regions. In Klare, G., editor, *Reviews in Modern Astronomy*, volume 6 of *Reviews in Modern Astronomy*, pages 191–208.
- Zuckerman, B. and Palmer, P. (1974). Radio radiation from interstellar molecules. *ARA&A*, 12:279–313.

Artigos Publicados

- Bonatto, C., Bica, E. and Lima, E. F. (2012). Deriving reliable fundamental parameters of pre-main-sequence-rich star clusters affected by differential reddening. *MNRAS*, 420:352-360.

- Bonatto, C., Lima, E. F. and Bica, E. (2012). Unveiling hidden properties of young star clusters: differential reddening, star-formation spread, and binary fraction. *A&A*, 540:A137.

- Lima, E. F., Bica, E., Bonatto, C. and Saito, R. K. (2013). Probing embedded star clusters in the HII complex NGC 6357 with VVV. *A&A*, (submetido para publicação).