

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

Rafael Santos Flauzino

**Aglomerados estelares associados a uma
nuvem molecular sob efeito de antigas
supernovas**

São Paulo

2021

Rafael Santos Flauzino

**Aglomerados estelares associados a uma
nuvem molecular sob efeito de antigas
supernovas**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências
Atmosféricas da Universidade de São Paulo
como requisito parcial para a obtenção do título
de Bacharel em Astronomia.

Vertente: Pesquisa básica

Orientadores: Dr. Felipe Navarete (IAG/USP)
e Prof.^a Dr.^a Jane Gregório-Hetem (IAG/USP)

São Paulo

2021

Agradecimentos

À minha mãe e ao meu pai, pelo constante apoio a distância ao longo destes anos.

Aos meus orientadores, pela ótima supervisão ao longo deste trabalho.

Aos meus amigos, que sempre me apoiaram, me auxiliaram e me motivaram ao longo desta jornada.

Ao time dos sonhos, ao grupo da Tormenta e ao Conselho, minhas melhores companhias.

À minha queria Prudence, minha fiel companhia.

Ao meu melhor amigo, o caminhante do Velho Oeste, que já me deu a honra de sua visita.

Obrigado!

“I’ve got to admit it’s getting better, a little better all the time”

The Beatles

“You lose yourself, you reappear, you suddenly find you got nothing to fear”

Robert Allen Zimmerman

Resumo

Contexto: Existem indícios de que a formação estelar ocorrendo na região de CMa OB1/R1 seja induzida por um acontecimento recente de supernova, o que a torna uma interessante região de estudo.

Objetivos: Melhorar o censo de estrelas jovens em duas regiões internas, CMa04 e CMa03, e caracterizar as estrelas da região através de análise fotométrica e astrométrica.

Métodos: Produziu-se e analisou-se diagramas cor-cor usando dados no infravermelho próximo obtidos pela câmera Spartan no telescópio SOAR. Realizou-se uma correlação cruzada entre esses dados e os catálogos 2MASS, AllWISE e Gaia para fazer a extração de mais informações astrométricas e fotométricas da região. Por fim, usou-se de isócronas das idades de aglomerados estelares, para estimar a idade de eventuais aglomerados encontrados

Resultados: Através dos diagramas cor-cor usando dados do SOAR e do AllWISE, foram identificadas 64 e 14 fontes candidatas a estrelas na pré-sequência principal (PMS) das regiões de CMa04 e CMa03 respectivamente. Usando de dados do AllWISE, encontrou-se 10 candidatas a protoestrelas (Classe I) e 19 candidatas a estrelas Herbig Ae/Be ou a estrelas T Tauri (Classe II) para CMa04, enquanto para CMa03, nenhuma fonte do tipo Classe I foi encontrada, enquanto 9 fontes foram classificadas como Classe II. Usando a astrometria do Gaia-EDR3, encontrou-se aglomerados estelares em ambas as regiões localizados a aproximadamente 1 kpc de distância, valor esperado para objetos pertencentes ao complexo de CMa OB1/R1. Por fim, estimou-se através de isócronas faixas de idades de 1-5 milhões de anos para CMa03 e 5-10 milhões de anos para CMa04. A falta de objetos de Classe I em um aglomerado jovem como o localizado em CMa03 é um forte indício da influência da explosão de supernovas nas proximidades da região estudada.

Abstract

Context: Important evidences of star formation process triggered by supernova explosion are observed towards the CMa OB1/R1 region.

Objectives: Improve the census of the young stellar population in two regions of the CMa complex, CMa04 and CMa03, and characterize their stellar content through photometric and astrometric analysis.

Methods: Near-infrared JHK photometry was obtained with the Spartan camera at the SOAR telescope. A cross-correlation between the Spartan data and 2MASS, AllWISE and Gaia catalogs was performed to extend the analysis towards other spectral windows, and to include the astrometric information of these regions. Color-magnitude and color-color diagrams were constructed using near- and mid-infrared data to classify the sources, and the proper motion of the young sources was used to select the members of stellar clusters. Finally, the age of the clusters were estimated through the fitting of isochrones on the color-magnitude diagrams.

Results: With SOAR and AllWISE data, were made color-color diagrams and identified 64 and 14 star candidates in the Pre-Main Sequence (PMS) from the CMa04 and CMa03 regions, respectively. Using AllWISE data, 10 protostars candidates (Class I) and 19 for Herbig Ae/Be stars or T Tauri stars (Class II) candidates was found for CMa04, while for CMa03, no source of type Class I was found, and 9 sources was classified as Class II. Using Gaia-EDR3, were found stellar clusters located approx. 1 kpc in both regions, the expected value for objects belonging to the CMa OB1/R1 complex. Using isochrones, were estimated to range in age from 1-5 million years for CMa03 and 5-10 million years for CMa04. The lack of Class I objects in a young cluster, like in CMa03, is a strong indication from the supernova explosion influence in the environment of the studied region.

Lista de Figuras

1.1	Campo de CMA R1/OB1 com dados do AllWISE.	18
2.1	Distribuição espacial dos objetos identificados na fotometria JHK com a câmara Spartan.	20
3.1	Distribuição da magnitude nos filtros J, H e K dos dados SOAR de CMA04	24
3.2	Diagrama cor-cor composto com os filtros H, K e w2, de CMA04	24
3.3	Diagrama cor-cor composto com os filtros J, H e K com dados do SOAR para CMA04	25
3.4	Diagrama cor-cor usando dados do AllWISE para CMA04	26
3.5	Histograma com os valores do RUWE de CMA04	27
3.6	Movimento próprio dos objetos de CMA04	28
3.7	Distâncias dos objetos de CMA04	28
3.8	Diagrama cor-magnitude dos objetos de CMA04	29
3.9	Diagrama cor-magnitude ilustrando as distâncias	30
3.10	Diagrama cor-magnitude com dados de possíveis aglomerados	31
3.11	Distribuição da magnitude nos filtros J, H e K dos dados SOAR de CMA03	32
3.12	Diagrama cor-cor composto com os filtros H, K e w2, de CMA03	33
3.13	Diagrama cor-cor usando dados do AllWISE para CMA03	33
3.14	Diagrama cor-cor composto com os filtros J, H e K com dados do SOAR para CMA03	34
3.15	Imagens do movimento próprio dos objetos de CMA03	35
3.16	Distâncias dos objetos de CMA03	35
3.17	Diagrama cor-magnitude dos objetos de CMA03	36

Lista de Tabelas

2.1	Estatísticas dos catálogos investigados para a região de CMa04.	21
2.2	Estatísticas dos catálogos investigados para a região de CMa03.	21

Sumário

1. <i>Introdução</i>	17
2. <i>Metodologia</i>	19
3. <i>Resultados</i>	23
3.1 <i>CMa04</i>	23
3.2 <i>CMa03</i>	32
4. <i>Conclusões</i>	37
<i>Referências</i>	39

Introdução

Realizou-se um estudo na região de formação estelar localizada em Canis Majoris OB1/R1 (CMaOB1/R1). Esta região possui uma estrutura em forma de arco que sugere o acontecimento recente de explosões de supernova (Fernandes et al., 2019). A região de estudo no presente trabalho corresponde a duas áreas internas de CMaOB1/R1, Canis Majoris 04 (CMa04) e Canis Majoris 03 (CMa03), que se situam respectivamente nas coordenadas equatoriais (J2000) de R.A. = 07:09:15, Dec. = -10:30:18 e R.A = 07:04:28 DEC = -11:32:47. Ambas são áreas que contém indícios de objetos estelares jovens (YSO, do inglês, *Young Stellar Object*).

A Figura 1.1 foi retirada do artigo de Fernandes et al. (2019), e mostra a região de CMa OB1/R1, além de indicar a posição de CMa04 e CMa03.

De acordo com o trabalho de Koenig e Leisawitz (2014), os YSO podem ser classificados a partir dos seus índices de cor no infravermelho próximo e médio, a partir de dados do catálogo AllWISE¹ obtidos pelo satélite WISE, com os filtros W1 (3.4 μm), W2 (4.6 μm) e W3 (12 μm), em Classes I, II e III. Os objetos de Classe I são os candidatos a protoestrelas em fases iniciais de formação e, portanto, apresentam os índices de cor mais avermelhados. Os objetos de Classe II são os candidatos a estrelas Herbig Ae/Be ou a estrelas T Tauri. Os membros da Classe III são objetos com disco fraco ou resquícios de disco de transição.

Com base nisso, visa-se melhorar o censo das estrelas jovens na região de CMa04 e CMa03 a partir da análise fotométrica no infravermelho próximo e uso de astrometria e fotometria em outros comprimentos de onda disponíveis em catálogos e bancos de dados. Além disso, pretende-se identificar a população jovem destes aglomerados estelares e

¹ <https://wise2.ipac.caltech.edu/docs/release/allwise/>

verificar se ela é compatível com o estudo realizado por [Fernandes et al. \(2015\)](#).

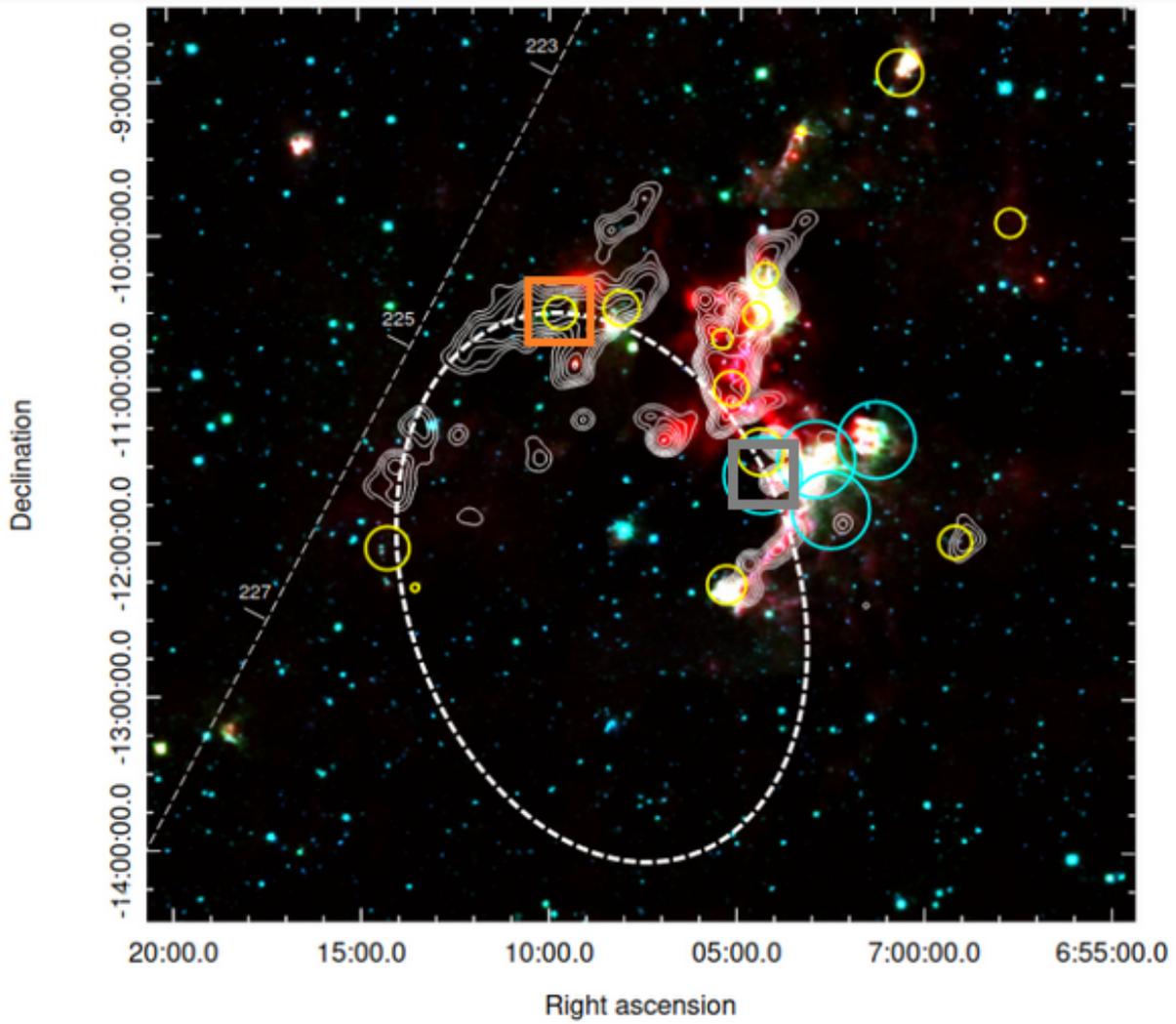


Figura 1.1: Imagem composta com dados do AllWISE da região de CMa R1/OB1. A região de CMa04 está indicada pelo quadrado laranja e a região de CMa03 é mostrada pelo quadrado cinza. Vermelho: Banda 4, 22,2 μm . Verde: Banda 3, 12,1 μm . Azul: Banda 1, 3,4 μm . Retirada de [Fernandes et al. \(2019\)](#).

Metodologia

Imagens nos filtros J ($1.24 \mu\text{m}$), H ($1.66 \mu\text{m}$) e K ($2.16 \mu\text{m}$) das regiões de CMa04 e de CMa03 foram obtidas com a câmera Spartan, um imageador de alta resolução no infravermelho próximo, instalada no telescópio SOAR (Chile).

Para a obtenção dos dados de CMa04, utilizou-se tempos de exposição totais de 168 segundos na banda J, 88 segundos na banda H e uma imagem de curta exposição na banda K, com 48 segundos totais, a fim de evitar saturação das fontes mais brilhantes, e uma outra de longa exposição, com 168 segundos, para evidenciar objetos mais fracos. Para os dados de CMa03, usou-se uma exposição de 168 segundos na banda J, 48 segundos na banda H, uma curta e uma longa na banda K, de 48 e 128 segundos, respectivamente.

Devido a uma falha do *Charge-Coupled Device* (CCD) da câmera do SOAR, duas regiões internas não foram observadas. Com o propósito de substituir estes dados faltantes, usou-se dados do 2MASS ¹ destas regiões, para fazer uma análise mais completa. A Figura 2.1 mostra as regiões de CMa03 e CMa04 e destaca os objetos que foram adicionados (em azul).

A fotometria das fontes foi obtida utilizando-se a técnica de fotometria PSF (do inglês, *Point Spread Function*). A fotometria PSF se baseia na configuração instrumental utilizada (câmera + telescópio) para extrair o fluxo dos objetos presentes no campo. Ela se mostra mais vantajosa do que a fotometria de abertura especialmente para campos muito densos. Consiste em observar o perfil de estrelas do campo e selecionar objetos que não estejam saturados, mas com fluxos relativamente altos para amostrar bem as asas da PSF (Navarete, 2013; Navarete et al., 2015).

A calibração fotométrica (conversão das magnitudes instrumentais para magnitudes

¹ <https://irsa.ipac.caltech.edu/Missions/2mass.html>

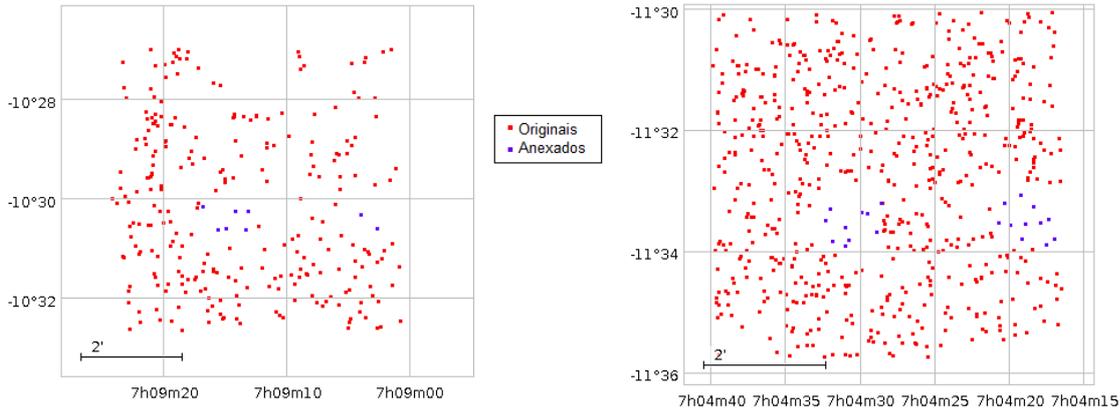


Figura 2.1: Região de CMa03 (direita) e CMa04 (esquerda). Os pontos vermelhos indicam quais pontos foram observados pelo SOAR. Os pontos azuis mostram os pontos que foram adicionados pelo catálogo 2MASS.

aparentes) foi realizada a partir da comparação das fontes identificadas nas imagens da câmara Spartan com os objetos presentes no catálogo 2MASS, tal como mostrado na Seção 4.1 do trabalho de Navarete (2013).

Em seguida utilizou-se o *software* TOPCAT (Taylor, 2011) para realizar a correlação cruzada entre os dados do Spartan e os dados dos catálogos do AllWISE, que é uma combinação dos dados do WISE e NEOWISE², da terceira liberação antecipada dos dados do *Global Astrometric Interferometer for Astrophysics* (Gaia-EDR3) e do *Two Micron All Sky Survey* (2MASS).

O catálogo do 2MASS fornece também magnitudes nas bandas J, H e K, porém possui uma pior resolução angular (aprox. 2") que os dados do SOAR ($\lesssim 0.8''$). Seus dados foram usados para verificar se as magnitudes aparentes no catálogo produzido neste trabalho com as fontes do SOAR são realmente compatíveis com o 2MASS, e tentar entender o que acontece com as fontes que apresentam diferenças muito significativas.

O AllWISE fornece dados no infravermelho médio, nas bandas W1 (3.4 μm), W2 (4.6 μm), W3 (12 μm) e W4 (22 μm), usadas para classificar as estrelas de interesse em Classe I, Classe II e Classe III.

O catálogo Gaia fornece dados astrométricos que interessam para obter informações sobre o movimento próprio dos objetos, e a paralaxe, que podem ser usados para identificar membros de uma associação, ou um aglomerado estelar. Apesar de sua precisão, vários

² <https://wise2.ipac.caltech.edu/docs/release/allwise/>

dos dados do Gaia se referem a estrelas que são muito fracas, ou muito distantes, o que aumenta consideravelmente a incerteza dos dados de paralaxe e consequentemente dos dados de distância. Com o propósito de obter dados mais precisos de distância, usa-se do catálogo desenvolvido por [Bailer-Jones et al. \(2021\)](#), baseado na determinação das distâncias individuais das fontes do Gaia determinadas através da mediana do posterior da distância fotogeométrica (`rpgeo`), utilizando-se uma abordagem Bayesiana.

Por fim, o código *PAdova and TRieste Stellar Evolution Code* (PARSEC, [Bressan et al. 2012](#)) pode ser acessado online³, produzindo dados necessários para criar isócronas, as quais podem ser usadas para estimar idades de aglomerados estelares.

A Tabela 2.1 mostra quais os números de correspondências encontradas para cada catálogo, e também a magnitude máxima e a mínima observada na banda K das fontes presentes em cada catálogo para o campo da região de CMa04. Por completeza, a Tabela 2.2 apresenta os mesmos dados para a região de CMa03.

Tabela 2.1 - Correlação cruzada entre a amostra de fontes identificadas no catálogo do SOAR com os demais catálogos para CMa04. Também são apresentados os limites de magnitudes na banda K (K_{min} e K_{max}) das fontes identificadas em cada um dos catálogos investigados.

Catálogo	Número de fontes	K_{min}	K_{max}
SOAR	271	9.129	17.468
2MASS	124	9.129	16.363
AllWISE	109	9.129	17.468
Gaia-EDR3	93	9.129	16.983
Gaia (BJ21)	90	9.129	16.983

Tabela 2.2 - Correlação cruzada entre a amostra de fontes identificadas no catálogo do SOAR com os demais catálogos para CMa03. Também são apresentados os limites de magnitudes na banda K (K_{min} e K_{max}) das fontes identificadas em cada um dos catálogos investigados.

Catálogo	Número de fontes	K_{min}	K_{max}
SOAR	640	7.764	17.665
2MASS	276	7.764	16.811
AllWISE	135	8.067	16.735
Gaia-EDR3	567	7.764	17.665
Gaia (BJ21)	529	7.764	17.665

³ <http://stev.oapd.inaf.it/cgi-bin/cmd>

Resultados

3.1 CMa04

Com o propósito de verificar a qualidade da calibração fotométrica dos dados do SOAR, montou-se um diagrama entre a diferença das magnitudes obtidas e as fornecidas pelo 2MASS *versus* a magnitude do SOAR. O diagrama é apresentado na Figura 3.1. Os pontos bem distribuídos ao redor de $y = 0$ indicam que a calibração é de boa qualidade, pois os resíduos entre as calibrações foram baixos. Espera-se também obter alguns valores altos em y , principalmente para magnitudes mais fracas. Devido à melhor resolução dos dados do SOAR ($\lesssim 0.7''$) quando comparada com o 2MASS ($2''$), é esperado que algumas fontes do 2MASS sejam resolvidas em mais objetos. Dada a confirmação da boa qualidade da calibração fotométrica dos dados do SOAR, foi possível usar os dados do 2MASS com alta qualidade fotométrica para completar o catálogo no caso de alguns objetos com dados faltantes (ver Figura 2.1).

A Figura 3.2 apresenta o diagrama cor-cor, construído a partir dos índices de cor H-K e K-[4.6]¹ combinando as magnitudes no infravermelho próximo (Spartan) com o infravermelho médio (AllWISE). Para selecionar candidatos a estrelas jovens, adotou-se os critérios de seleção estabelecidos no trabalho de [Fernandes et al. \(2015\)](#). O quadrado delimitado pelos extremos inferiores de $H-K > 0.12$ e $K-[4.6] > 0.8$ destaca a região onde as estrelas da pré-sequência principal (PMS) foram identificadas na amostra de [Cusano et al. \(2011\)](#). Tais critérios foram baseados nos valores de excesso infravermelho esperado para objetos jovens com discos circunstelares.

Montou-se um diagrama cor-cor a partir dos índices de cor J-H e H-K, mostrado na

¹ o filtro de $4.6 \mu\text{m}$ é designado como `w2mpro` na figura.

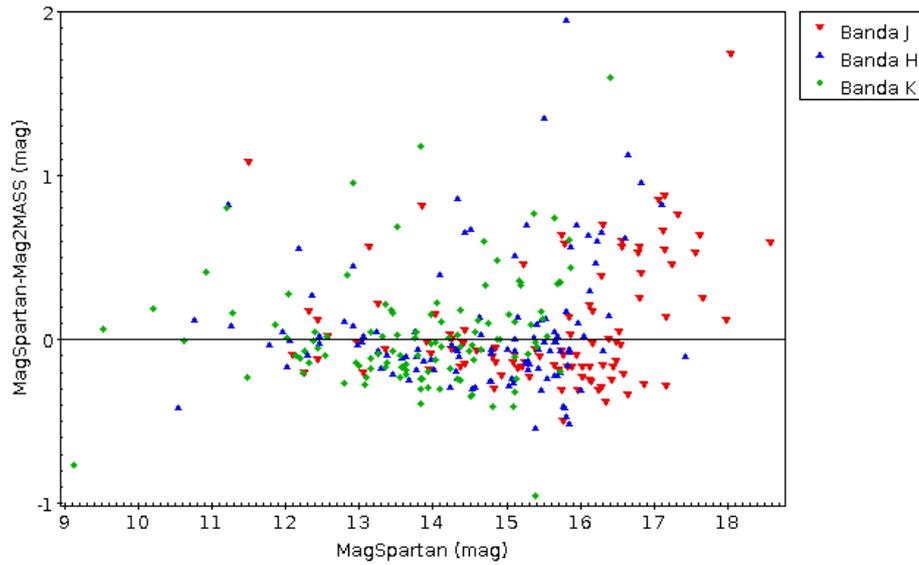


Figura 3.1: Distribuição da magnitude nos filtros J (vermelho), H (azul) e K (verde) dos dados SOAR, obtidos com a câmera Spartan, *versus* os resíduos absolutos entre a magnitude Spartan e a 2MASS. A linha horizontal indica $y=0$.

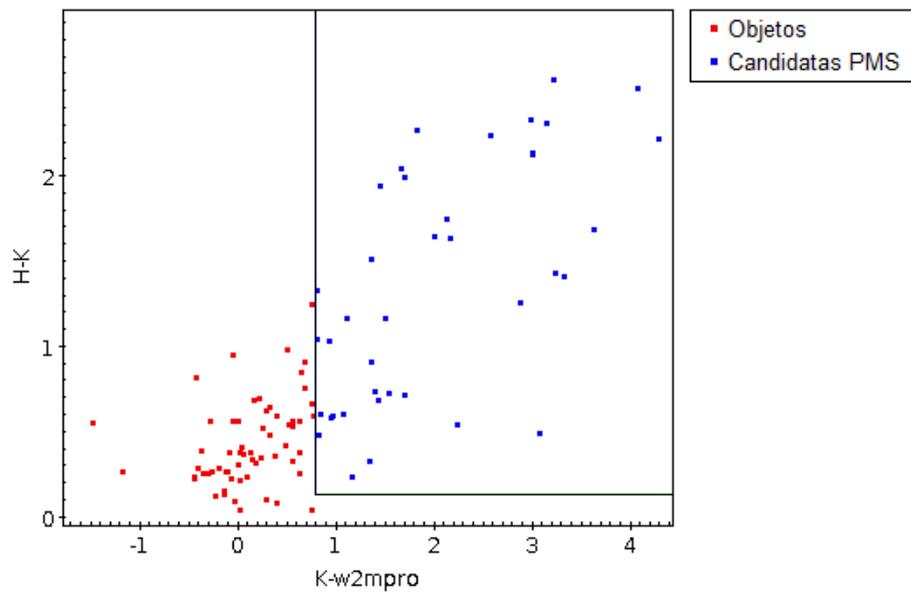


Figura 3.2: Diagrama cor-cor combinando a fotometria no infravermelho próximo obtida com o Spartan e a fotometria no infravermelho médio do catálogo AllWISE. As estrelas azuis foram selecionadas com base no critério de [Cusano et al. \(2011\)](#).

Figura 3.3. Sobre este diagrama, foram traçadas linhas que indicam o avermelhamento de estrelas de tipo espectral O (linha preta intermediária), o avermelhamento de estrelas de tipo espectral M (linha preta mais à esquerda) e a linha que indica o local esperado das estrelas T-Tauri (linha preta mais à direita). A faixa verde corresponde à posição da

sequência principal desavermelhada. O espaço entre as duas linhas superiores delimita o intervalo onde espera-se encontrar estrelas na sequência principal com diferentes níveis de avermelhamento, e o espaço entre as duas linhas inferiores indica a posição de candidatas a estrelas na pré-sequência principal. Os objetos na cor azul correspondem aos objetos selecionados a partir do diagrama cor-cor mostrado na Figura 3.2. Conforme esperado, uma fração considerável dos objetos selecionados são compatíveis com objetos na pré-sequência principal, indicando uma boa correlação entre os resultados obtidos com dados no infravermelho médio e próximo.

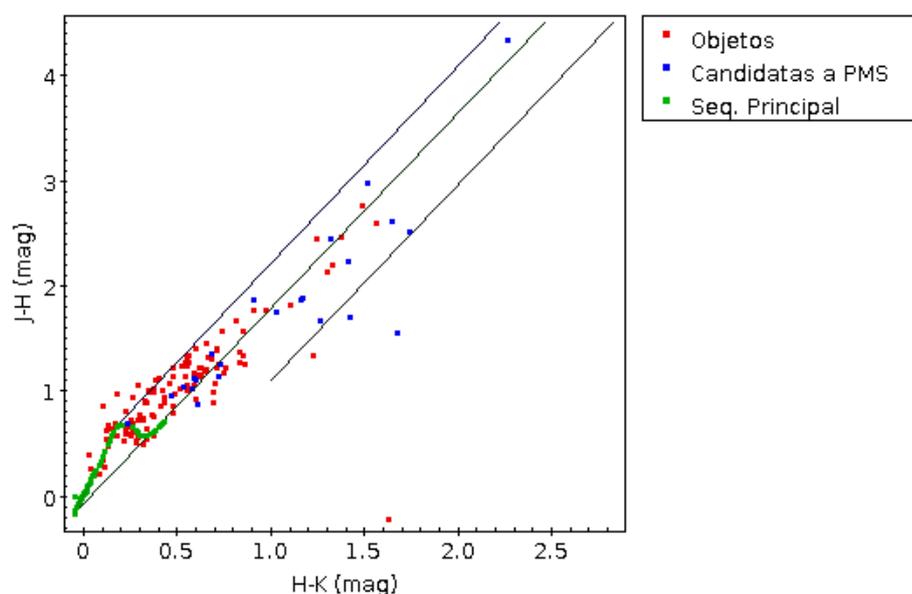


Figura 3.3: Diagrama cor-cor com os dados obtidos pela câmera Spartan. Os pontos azuis foram selecionados usando o critério de Cusano et al. (2011), os pontos vermelhos ilustram todos os pontos da amostra e a faixa verde mostra a região aonde espera-se encontrar as estrelas da sequência principal.

Além disso, também conferiu-se que, com a exceção de um objeto, os pontos vermelhos situados na região das candidatas a estrelas na pré-sequência principal na Figura 3.3 não possuem correspondência no catálogo do AllWISE. Esse resultado era esperado e confirmam que essas fontes são fortes candidatas a objetos na PMS.

No painel esquerdo da Figura 3.4, utilizou-se os critérios definidos por Koenig e Leisawitz (2014) para identificar as estrelas candidatas a objetos de Classe I (em azul), II (verde), e as estrelas classificadas como possíveis candidatas a Classe III (em rosa) apresentando índice de cor $[W1]-[W2] < 0.25$. Das 104 fontes com contrapartida no catálogo AllWISE, 10 foram identificadas como Classe I, 19 como Classe II e 58 como Classe III.

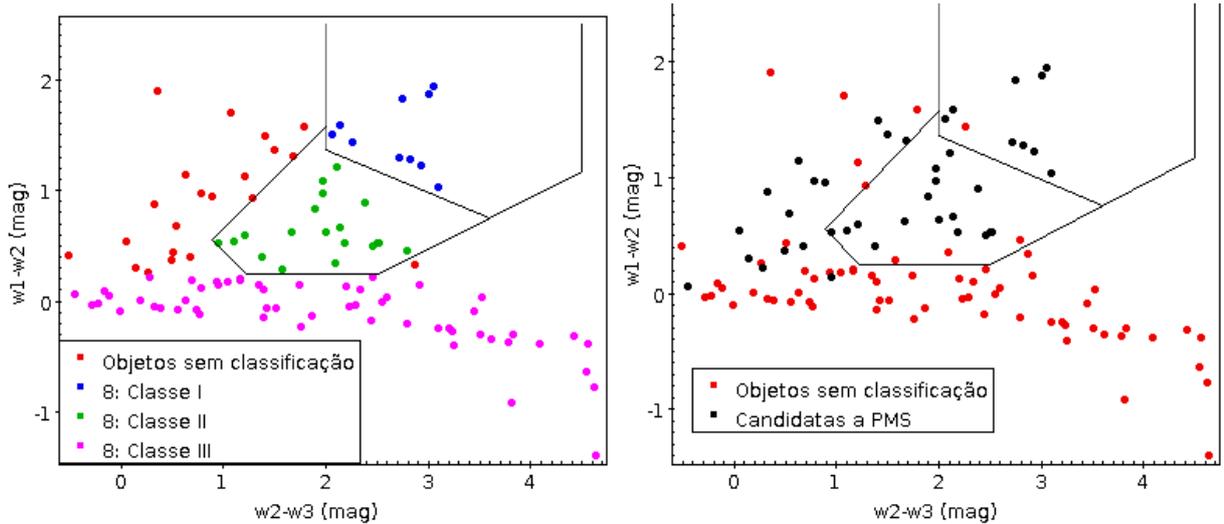


Figura 3.4: Diagrama cor-cor usando filtros do AllWISE. A imagem da esquerda mostra os objetos selecionados em Classe I e II usando os critérios de Koenig e Leisawitz (2014), e a imagem da direita mostra os objetos selecionados como candidatas a PMS na Figura 3.2.

No painel direito da Figura 3.4, são apresentados os mesmos objetos, mas destacando as candidatas a PMS selecionadas usando o critério de Cusano et al. (2011), mostradas como pontos pretos. Nota-se que, em sua grande maioria, as candidatas a PMS se situam na região das estrelas de Classe I e II, com apenas algumas poucas exceções aparecendo fora das áreas delimitadas. A recíproca também é válida, a maioria das estrelas situadas no interior das delimitações são as determinadas como candidatas a PMS.

A seleção final de estrelas candidatas a pré-sequência principal foi feita combinando as selecionadas nas Figuras 3.2, 3.3 e 3.4, obtendo-se um total de 64 fontes, e 19 destas tem correspondência no Gaia.

A Figura 3.5 apresenta o histograma dos valores do parâmetro *re-normalised unit weight error* (RUWE) para as contrapartidas Gaia-EDR3 das fontes de CMa04. Este parâmetro é fornecido pelo Gaia, e indica a qualidade astrométrica e fotométrica das detecções dos objetos no catálogo do Gaia. De acordo com a literatura, valores de $\text{RUWE} \leq 1.4$ representam uma boa solução astrométrica, enquanto valores muito altos indicam que a fonte é problemática para resolver, ou não é uma fonte única. No trabalho em questão, adotou-se o limite $\text{RUWE} \leq 1,4$ para, então, selecionar os membros mais prováveis de pertencerem ao aglomerado. Das 19 fontes com correspondência no Gaia, 15 têm valor de RUWE inferior a 1.4.

A partir da análise do movimento próprio das fontes da pré-sequência principal com

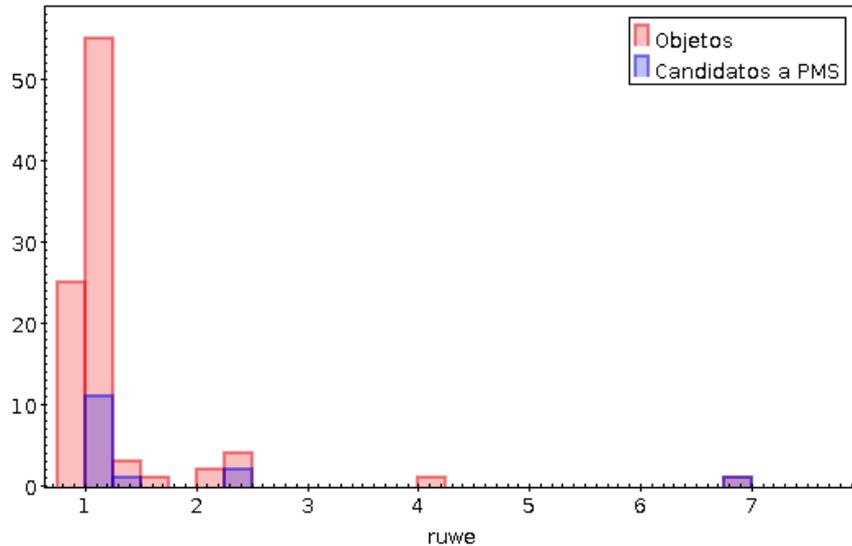


Figura 3.5: Histograma com os valores do RUWE da região de CMa04. Em azul, observa-se as estrelas selecionadas como PMS pelos critérios de [Cusano et al. \(2011\)](#), [Koenig e Leisawitz \(2014\)](#) e o da Figura 3.3

contrapartida no catálogo do Gaia-EDR3, pode-se tentar localizar mais membros do suposto aglomerado estelar jovem. As estrelas pertencentes a aglomerados abertos possuem valores parecidos de movimento próprio, pois vieram da mesma nuvem de gás e possuem uma ligação gravitacional que as mantém unidas. Essa ligação gravitacional entre os membros tende a se desgastar com o tempo devido a forças de maré originadas da Galáxia ou mesmo devido a própria interação gravitacional entre os membros do aglomerado. Na Figura 3.6, observa-se o movimento próprio dos objetos de CMa04, e em azul, vê-se os objetos identificados como fontes na PMS.

Conforme o esperado, a maioria dos objetos PMS estão agrupados numa região mais restrita do diagrama. Estes objetos e as estrelas próximas correspondem a possíveis candidatos a membros de um mesmo aglomerado. Por fim, para separar objetos pertencentes a um mesmo aglomerado, verifica-se a distância destes objetos, usando do parâmetro `rpgeo` obtido por [Bailer-Jones et al. \(2021\)](#).

A Figura 3.7 mostra um histograma com as distâncias dos objetos selecionados naquela região. Nota-se que há uma distribuição de objetos candidatos ao redor de 1 kpc, outra ao redor de 3kpc e outra, com poucos pontos, ao redor de 7 kpc. O menor número de objetos conforme aumenta-se a distância é esperado, pois correspondem a objetos mais distantes, conseqüentemente mais fracos e associados a medições mais imprecisas. A distribuição ao

redor de 1 kpc é esperada, devido à localização de CMA OB1/R1 e a sua forma levemente gaussiana indica fortemente a presença de um aglomerado nesta localização.

A distribuição de pontos de movimento próprio similar e distância de 1 kpc tem 17 membros, a que se encontra em 3 kpc tem 7 objetos e a que está a 7kpc tem apenas 4 objetos selecionados.

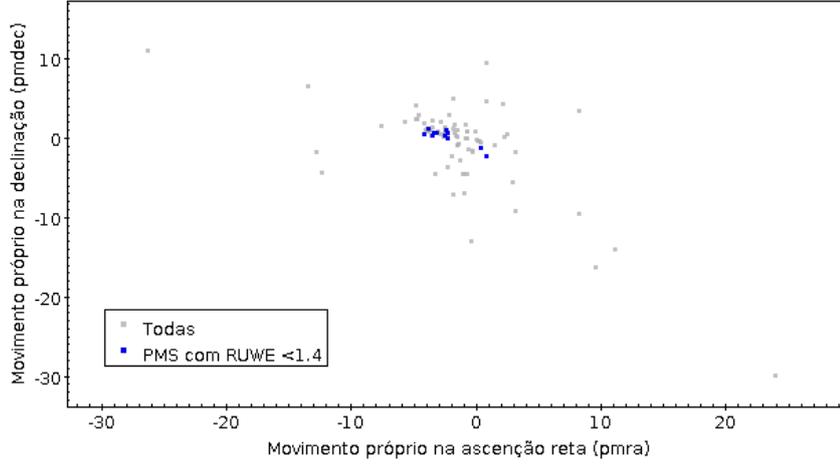


Figura 3.6: Movimento próprio dos objetos na direção de CMA04, com destaque para os objetos PMS. Os objetos situados próximos a essa região foram selecionados como possíveis membros do aglomerado.

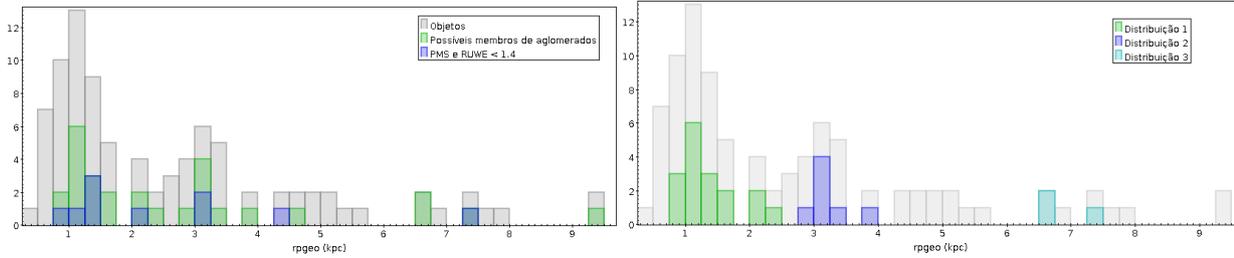


Figura 3.7: Histogramas da distância ($rpgeo$) em kiloparsecs. O histograma da esquerda mostra os objetos selecionados na Figura 3.6 e as PMS com valor adequado de RUWE. O histograma da direita destaca 3 intervalos de distância que apresentam diferentes populações de objetos jovens e, portanto, possíveis aglomerados.

Para determinar as idades dos membros deste aglomerado, realizou-se um ajuste de isócronas usando como base os dados obtidos pelo código PARSEC. A magnitude absoluta das estrelas num dado comprimento de onda λ (M_λ) foi calculada a partir do módulo de distância:

$$M_\lambda = m_\lambda - 5 \log_{10}(d) + 5, \quad (3.1)$$

onde m_λ corresponde à magnitude aparente medida no comprimento de onda λ e d a distância medida em parsecs. Após obtida a magnitude absoluta das estrelas usando-se a Equação (3.1), pode-se montar um diagrama cor-magnitude e ajustar as isócronas para observar qual representa a melhor idade para o aglomerado.

A Figura 3.8 apresenta o diagrama cor-magnitude sobreposto às isócronas com as idades de 1 milhão (vermelho), 5 milhões (amarelo), 10 milhões (verde), 50 milhões (azul) e 100 milhões de anos (preto). Verifica-se que grande parte dos objetos encontra-se deslocada para a direita das isócronas, apresentando elevados índices de avermelhamento.

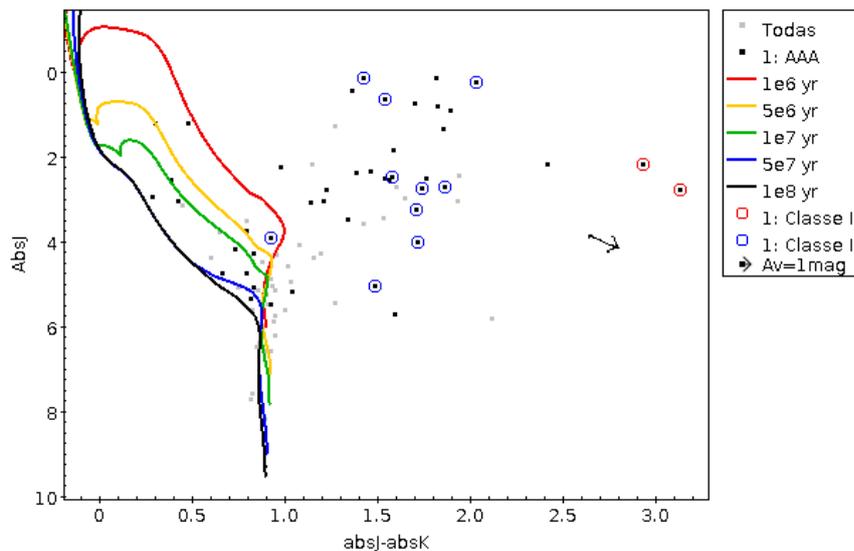


Figura 3.8: Diagrama cor-magnitude após o cálculo das magnitudes absolutas dos membros de CMa04. Os pontos escuros representam objetos com *flag* AAA no 2MASS, enquanto os cinzas claros representam os objetos restantes. Os círculos vermelhos e azuis destacam quais objetos foram tomados como Classe I e II respectivamente. As faixas representam as isócronas do PARSEC para os valores de 1 milhão de anos (vermelho), 5 milhões de anos (amarelo), 10 milhões de anos (verde), 50 milhões de anos (azul) e 100 milhões de anos (preto). A seta escura indica o vetor de avermelhamento fornecido pelo PARSEC.

Para verificar se os objetos à direita das isócronas não apresentam algum erro relacionado à qualidade da fotometria, as fontes com contrapartida no 2MASS e com *flags* de excelente qualidade fotométrica (AAA) são mostradas como pontos pretos no diagrama. Nota-se que mesmo alguns dados com *flag* AAA também são encontrados nesta região avermelhada. Também observa-se objetos de Classe I e grande parte dos objetos de Classe II nesta região, resultado esperado, pois se tratam de estrelas avermelhadas devido a extinção interestelar e a poeira que as cerca.

O mesmo diagrama é apresentado na Figura 3.9, evidenciando as distâncias individuais

das estrelas usando uma escala de cor baseada no valor da distância r_{pgeo} . Nesse caso, é possível ver que os pontos superiores direitos, localizados entre $J - K \in (1, 2)$ e $J \in (0, 2)$ correspondem a objetos muito avermelhados, associados a distâncias de ~ 7 kpc. Abaixo deste valor, os pontos localizados entre $J - K \in (1, 2)$ e $J \in (2, 4)$ se localizam a ~ 3 kpc. Estes 2 grupos de pontos estão muito distantes e díspares das isócronas, e são incompatíveis com objetos esperados para um aglomerado à distância de ~ 1 kpc, tal como esperado para CMa04.

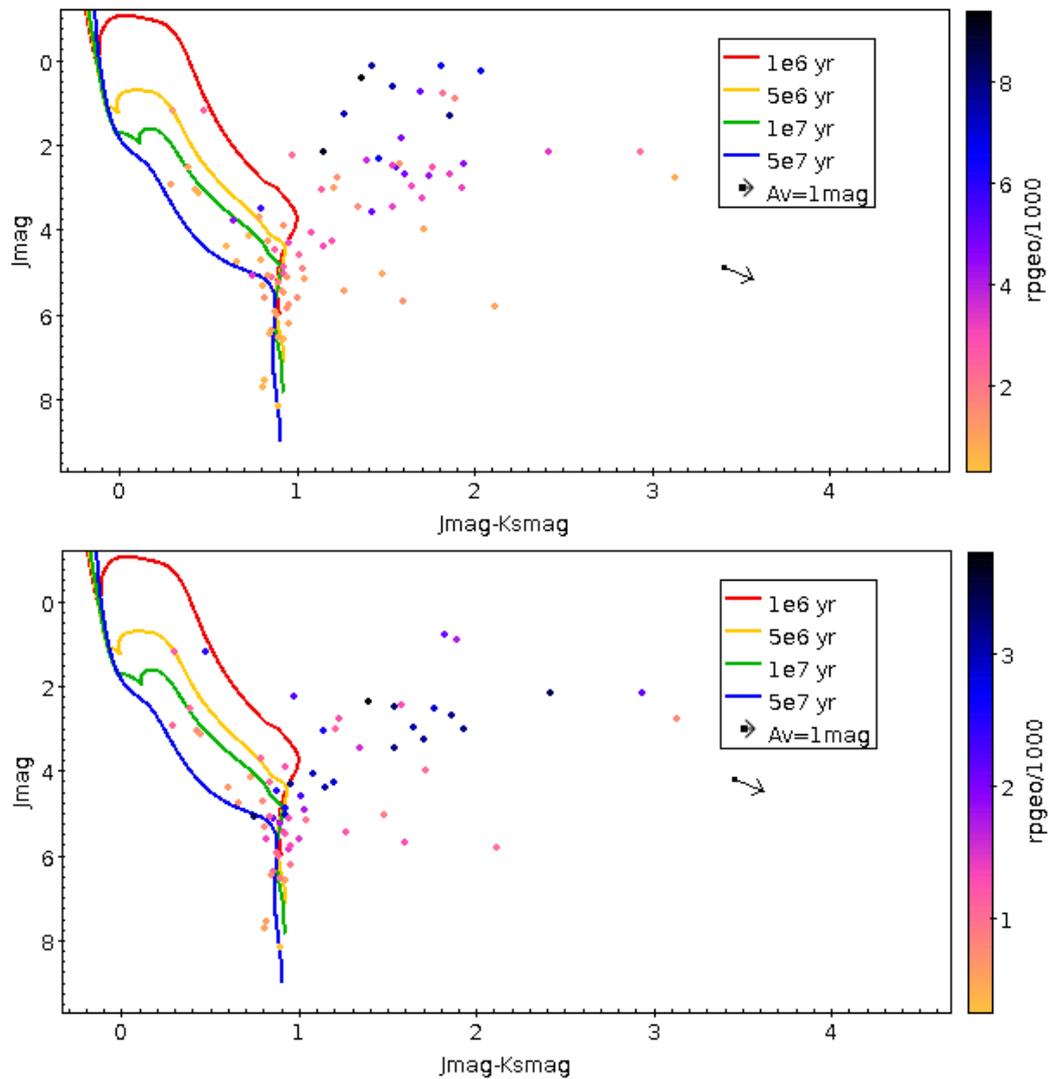


Figura 3.9: Ambas as figuras mostram o diagrama cor-magnitude da região de CMa04, colorindo os pontos de acordo com suas distâncias, mostradas em kpc a direita. A figura superior mostra todos os pontos e a figura inferior faz um corte em 4 kpc. As faixas representam as isócronas do PARSEC para os valores de 1 milhão de anos (vermelho), 5 milhões de anos (amarelo), 10 milhões de anos (verde), 50 milhões de anos (azul). A seta escura indica o vetor de avermelhamento.

Ao ilustrar nas isócronas apenas os pontos que foram selecionados na Figura 3.7, verifica-se essa distribuição mencionada acima, os pontos referentes a 3 kpc e a 7 kpc localizam-se em regiões próximas. Os pontos referentes a 1 kpc localizam-se distribuídos sobre as isócronas, ou bem dispersos a direita destas. A Figura 3.10 apresenta estes pontos. É possível verificar a existência de um ponto com $J \sim 1.2$ e $J-K \sim 0.3$ sobre a isócrona de 5 milhões de anos e com distância compatível com a região de CMa. Analogamente, verifica-se a existência de quatro objetos um pouco mais fracos distribuídos sobre a isócrona de 10 milhões de anos. Baseando-se nesse conjunto de objetos relativamente brilhantes (e portanto prováveis membros de maior massa do aglomerado), pode-se inferir um intervalo de idades entre 5 e 10 milhões de anos para o aglomerado associado a CMa04.

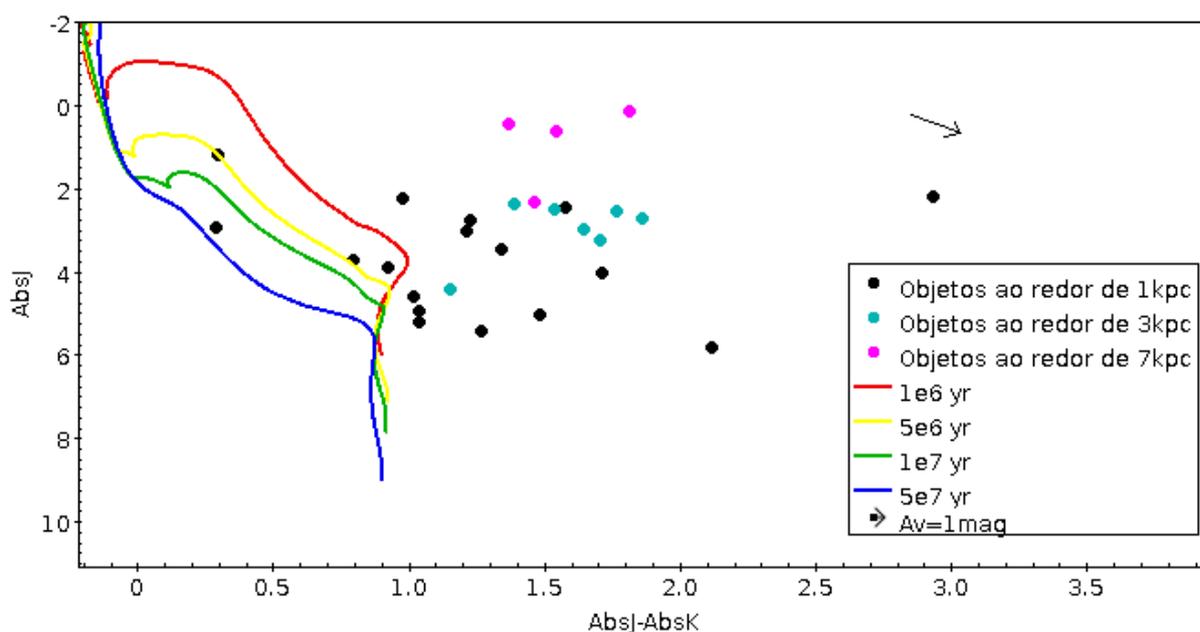


Figura 3.10: Diagrama cor-magnitude mostrando as 3 distribuições de pontos que indicam possíveis aglomerados. Os pontos pretos encontram-se situados na proximidade de 1kpc, os pontos azuis a 3 kpc e os pontos lilás a 7 kpc. As faixas representam as isócronas do PARSEC para os valores de 1 milhão de anos (vermelho), 5 milhões de anos (amarelo), 10 milhões de anos (verde), 50 milhões de anos (azul). A seta escura indica o vetor de avermelhamento.

3.2 CMa03

Para a análise da região de CMa03, fez um desenvolvimento análogo ao usado na análise de CMa04. Primeiramente comparou-se os resíduos com o 2MASS, para verificar a qualidade da calibração. O resultado é apresentado na Figura 3.11 e, tal como observado para CMa04, a distribuição dos pontos ao longo do eixo $y = 0$ indica uma boa qualidade da calibração fotométrica.

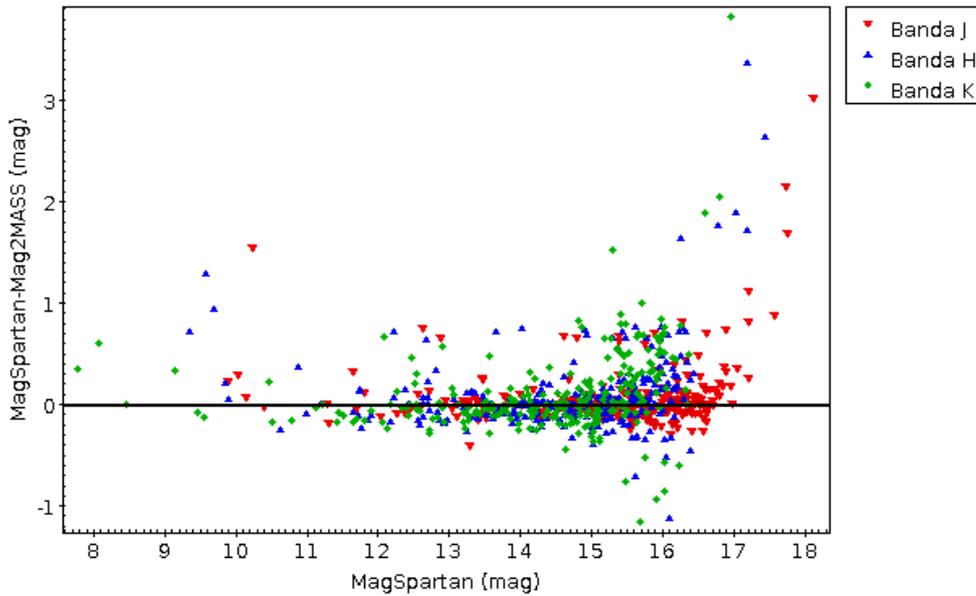


Figura 3.11: Distribuição da magnitude nos filtros J (vermelho), H (azul) e K (verde) dos dados SOAR *versus* os resíduos absolutos entre a magnitude Spartan e a 2MASS para o campo da região CMa03. A linha horizontal indica $y = 0$.

Em seguida identificou-se os objetos PMS usando dos critérios adotados por [Cusano et al. \(2011\)](#), [Koenig e Leisawitz \(2014\)](#) e o diagrama cor-cor que relaciona os valores de H-K *versus* J-H. As Figuras 3.12, 3.13 e a 3.14 ilustram quais objetos foram selecionados em cada critério. No total, obteve-se 14 objetos PMS. Das fontes com contrapartida no catálogo do AllWISE, nenhuma é compatível com objetos de Classe I e apenas 9 objetos candidatos a Classe II, além de 123 candidatos para a Classe III. Estes resultados mostram visivelmente uma menor fração de candidatas a PMS em CMa03 quando comparada à CMa04. Este é um indício que corrobora o cenário de terem ocorrido explosões recentes de supernova, pois a expansão do remanescente de supernova expulsaria a poeira que circunda as protoestrelas.

A distribuição do movimento próprio das fontes com contrapartida no catálogo do

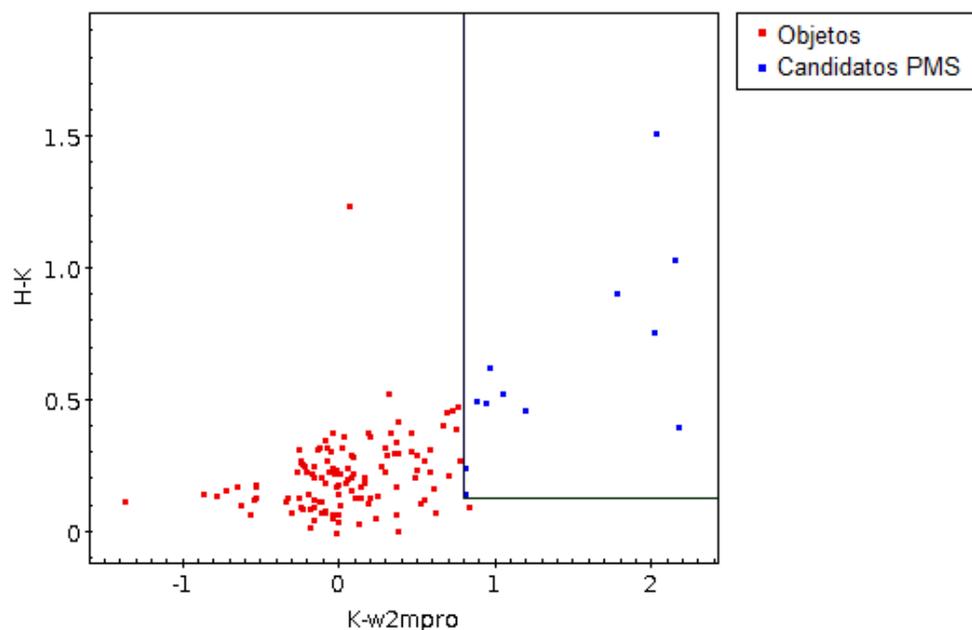


Figura 3.12: Diagrama cor-cor combinando dados fotométricos no infravermelho próximo (Spartan) e os dados fotométricos no infravermelho médio do catálogo AllWISE para a região de CMa03. As estrelas azuis foram selecionadas com base no critério de Cusano et al. (2011).

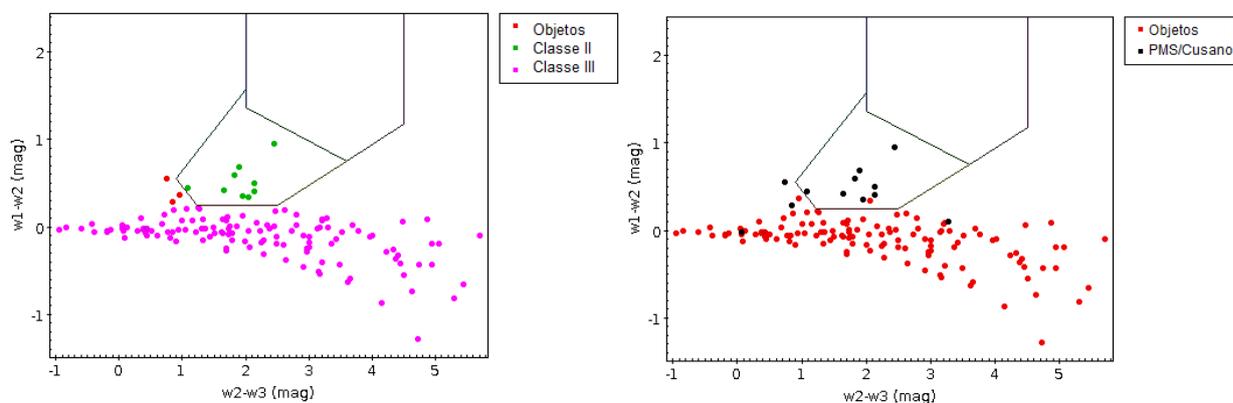


Figura 3.13: Diagrama cor-cor usando filtros do AllWISE para o campo da região CMa03. A imagem da esquerda mostra os objetos selecionados em Classe I e II usando os critérios de Koenig e Leisawitz (2014), e a imagem da direita mostra os objetos selecionados como candidatos a PMS na Figura 3.2.

Gaia-EDR3 é apresentada na Figura 3.15, destacando-se os candidatos a PMS no painel inferior à esquerda, e a região selecionada como possível aglomerado estelar em destaque no painel inferior à direita. A distribuição do movimento próprio apresenta uma concentração de pontos agrupados longe da origem (0,0). Este padrão está centrado em coordenadas aproximadas de -4 mas yr^{-1} no eixo de ascensão reta, e $+1 \text{ mas yr}^{-1}$ em declinação. Ao plotar os objetos PMS, nota-se que grande parte deles se situam nesta região em destaque,

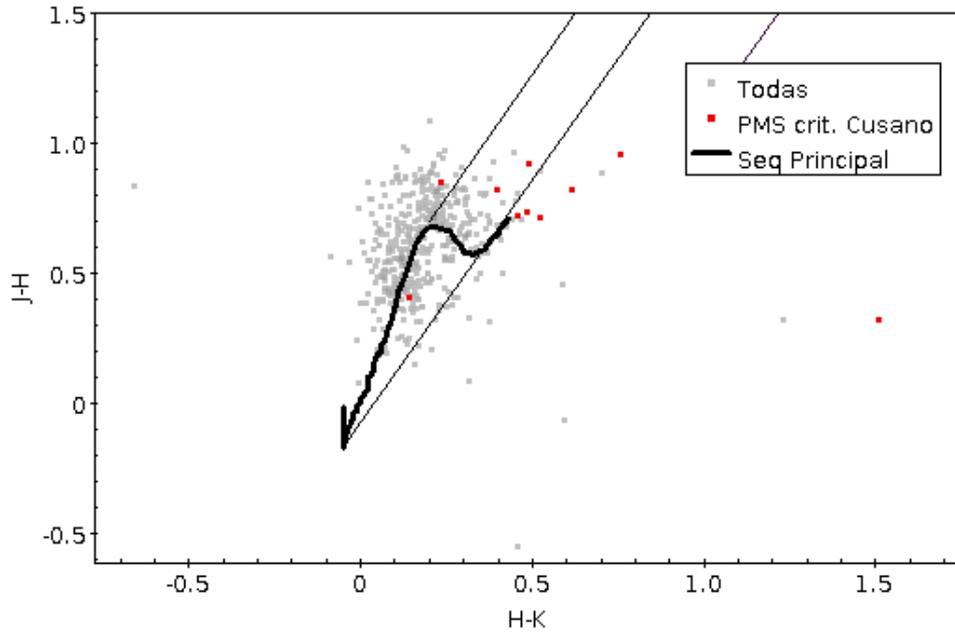


Figura 3.14: Diagrama cor-cor com os dados obtidos pela câmera Spartan para o campo da região CMa03. Os pontos vermelhos foram selecionados usando o critério de Cusano et al. (2011), os pontos cinzas ilustram todos os pontos da amostra e a faixa preta mostra a região aonde espera-se encontrar as estrelas da sequência principal. .

correspondendo ao movimento de um possível aglomerado, de forma análoga ao observado em CMa04.

Ao verificar os valores do rp_{geo} para a região selecionada como possível aglomerado estelar, mostrados na Figura 3.16, nota-se uma distribuição clara de pontos próximo de 1 kpc, que é o valor esperado para um aglomerado associado ao complexo de CMa. Dessa forma, selecionou-se os objetos com distância de até aproximadamente 1.7 kpc como possíveis membros do aglomerado, correspondendo a um total de 47 objetos.

A Figura 3.17 apresenta o diagramas cor-magnitude com as isócronas do PARSEC, utilizadas para realizar a determinação da idade dos objetos de CMa03. Nota-se que é uma região com valores de cor-magnitude mais consistentes com a posição das isócronas do que CMa04 (ver Figura 3.8). Vários objetos se encontram em localizações dentro das isócronas, e nenhum objeto com avermelhamento ultrapassando o valor de $M_J - M_K = 2$ mag. Os objetos de Classe II se encontram dispersos próximo da base das isócronas, o que é esperado devido ao avermelhamento que este objetos possuem.

Ao separar apenas os pontos que foram selecionados como membros do aglomerado estelar, conforme pode-se visualizar na figura 3.18, nota-se que eles se encontram princi-

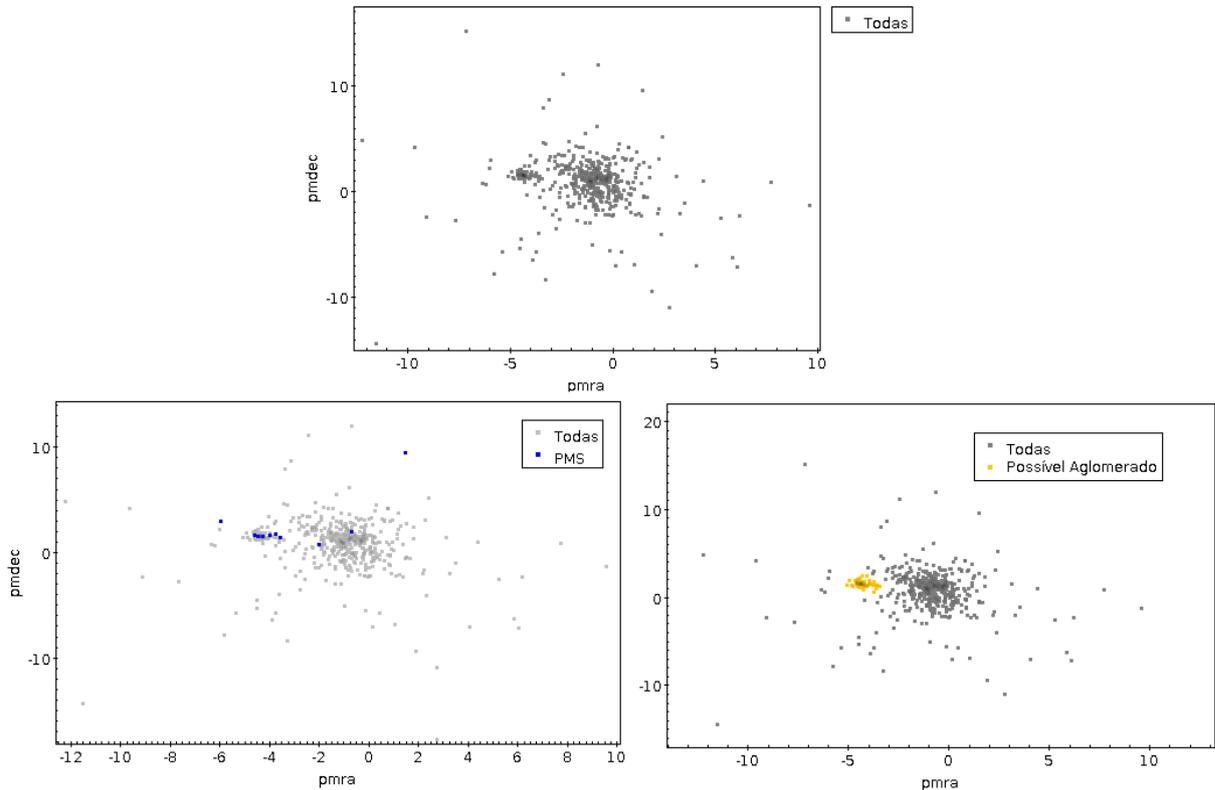


Figura 3.15: Movimento próprio dos membros de CMa03. O superior mostra a região sem destaques. O inferior esquerdo mostra os objetos da PMS e com $RUWE > 1.4$ selecionados. Nota-se um grupo de PMS bem destacado à esquerda da região de maior concentração, um claro indício de um aglomerado. O inferior direito mostra quais objetos foram selecionados com base no movimento próprio.

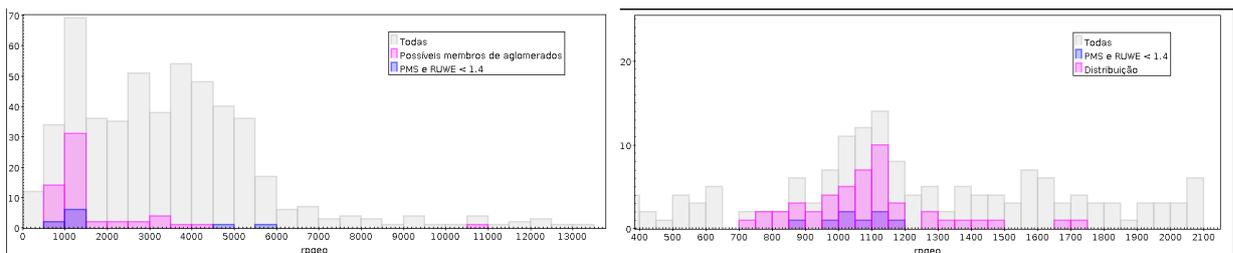


Figura 3.16: Histogramas da distância ($rpgeo$) em kiloparsecs. O histograma da esquerda mostra os objetos selecionados na Figura 3.15 e as PMS com $RUWE < 1.4$. O histograma da direita mostra melhor a região com os membros selecionados como fortes candidatos a membros do aglomerado.

palmente na região a direita da base das curvas de isócronas, e alguns pontos localizados ao redor da curva de 1 milhão de anos (vermelha) e de 5 milhões de anos (amarela). Estes são indícios de que se trata de um aglomerado estelar bem jovem, pois a maioria de suas estrelas apresentam índices de cor compatíveis com objetos bastante avermelhados, e os

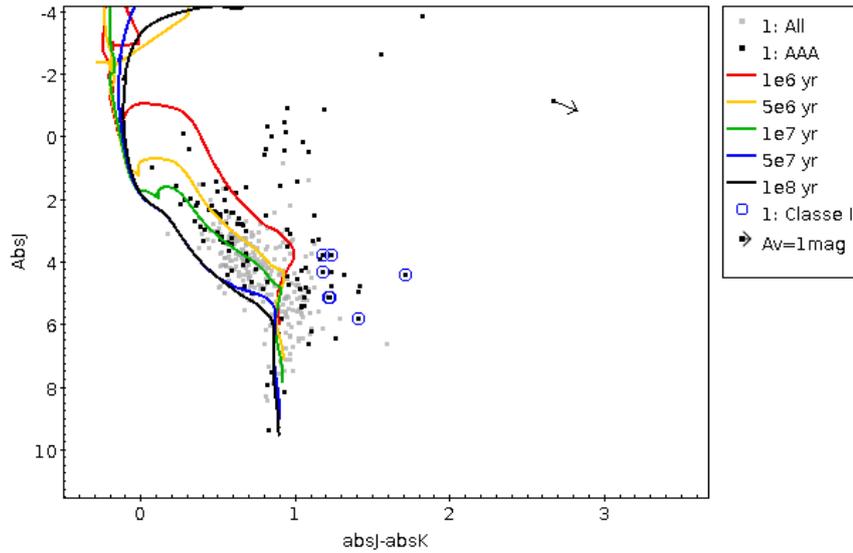


Figura 3.17: Diagrama cor-magnitude análogo ao da Figura 3.8 para CMa03.

objetos mais brilhantes (e portanto de maior massa) localizam-se numa faixa entre 1-5 milhões de anos, tomada como o intervalo de idades do aglomerado.

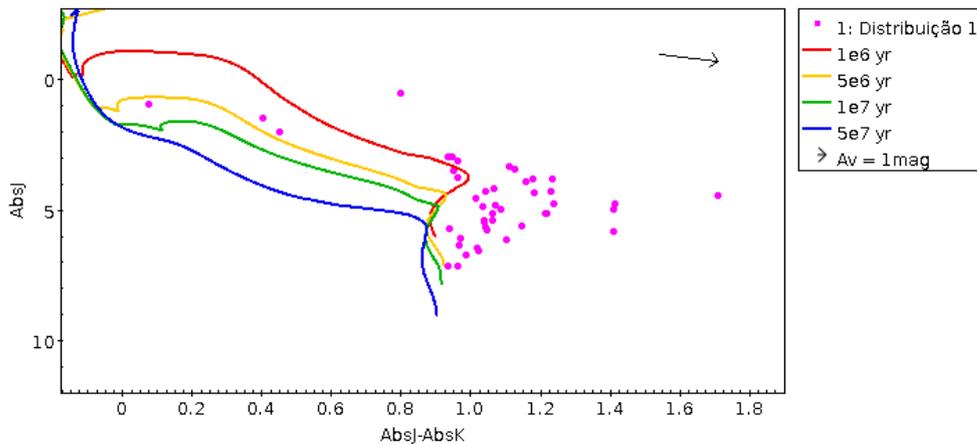


Figura 3.18: Diagrama cor-magnitude para CMa03, análogo ao da Figura 3.10. Os pontos em cor rosa representam os membros do aglomerado e a seta escura ilustra o vetor de avermelhamento.

Conclusões

A partir da análise da fotometria nos filtros J, H e K obtida com a câmera Spartan no SOAR e da correlação com os catálogos do 2MASS, AllWISE e Gaia, foi possível classificar as fontes infravermelhas em objetos na pré-sequência principal (Classes I, II e III), bem como verificar a associação desses objetos com as regiões de CMa04 e CMa03, pertencentes ao complexo de CMa OB1/R1.

Para CMa04, das 104 fontes com contrapartida no catálogo AllWISE, 10 foram identificadas como objetos de Classe I, 19 como Classe II e 58 como Classe III.

A partir da análise dos diagramas cor-cor no infravermelho próximo e médio e os critérios fotométricos de [Cusano et al. \(2011\)](#) e [Koenig e Leisawitz \(2014\)](#), obteve-se um total de 64 fontes candidatas a estrelas na pré-sequência principal (PMS). Destas fontes, 19 tem contrapartidas no Gaia-EDR3 com $RUWE < 1,4$.

A partir dos valores de movimento próprio destas fontes, encontrou-se uma região com uma concentração de objetos e, verificando suas distâncias, identificou-se possíveis membros de um mesmo aglomerado. Obteve-se uma concentração de objetos em distâncias de 1, 3 e 7 kpc, sendo o primeiro grupo de objetos compatíveis com a distância esperada para o complexo de CMa OB1/R1.

Usando o diagrama cor-magnitude no infravermelho próximo e através de um ajuste de isócronas, encontrou-se uma faixa de idade de 5-10 milhões de anos para os objetos a 1 kpc, pertencentes ao complexo CMa.

Para CMa03, não se identificou nenhuma estrela de Classe I, 9 objetos foram classificados como Classe II e 123 como Classe III. Usando os mesmos critérios fotométricos no infravermelho próximo e médio, identificou-se 14 objetos candidatos a estrelas na PMS. A partir da análise do movimento próprio destes objetos, verificou-se que os objetos na

PMS se encontram concentrados em uma região, consistente com o movimento próprio esperado para um possível aglomerado. Ao verificar a distância, notou-se uma concentração de pontos localizados a 1 kpc, correspondendo à distância esperada para o complexo CMa.

Através de um ajuste de isócronas similar ao usado em CMa04, estimou-se uma faixa de idades de 1-5 milhões de anos para o aglomerado localizado em CMa03.

Para uma região com dados de mais objetos, e um aglomerado mais jovem, CMa03 apresenta um número proporcionalmente bem reduzido de objetos de Classe II e uma ausência de objetos de Classe I, em relação a CMa04. Estes dados reforçam a ideia de formação induzida por supernovas nas proximidades de CMa03, pois espera-se encontrar mais objetos de Classe I em aglomerados mais jovens. Supõe-se que o vento do remanescente da supernova agiu expulsando o gás e poeira que circundam as protoestrelas desta região.

Referências Bibliográficas

- Bailer-Jones C. A. L., Rybizki J., Fouesneau M., Demleitner M., Andrae R., Estimating Distances from Parallaxes. V. Geometric and Photogeometric Distances to 1.47 Billion Stars in Gaia Early Data Release 3, *AJ*, 2021, vol. 161, p. 147
- Bressan A., Marigo P., Girardi L., Salasnich B., Dal Cero C., Rubele S., Nanni A., PARSEC: stellar tracks and isochrones with the PAdova and TRieste Stellar Evolution Code, *MNRAS*, 2012, vol. 427, p. 127
- Cusano F., Ripepi V., Alcalá J. M., Gandolfi D., Marconi M., Degl'Innocenti S., Palla F., Guenther E. W., Bernabei S., Covino E., Neiner C., Puga E., Hony S., Pre-main-sequence stars in the star-forming complex Sh 2-284, *MNRAS*, 2011, vol. 410, p. 227
- Fernandes B., Gregorio-Hetem J., Montmerle T., Rojas G., Spectroscopic characterization of X-ray emitting young stars associated with the Sh 2-296 nebula, *MNRAS*, 2015, vol. 448, p. 119
- Fernandes B., Montmerle T., Santos-Silva T., Gregorio-Hetem J., Runaways and shells around the CMa OB1 association, *A&A*, 2019, vol. 628, p. A44
- Koenig X. P., Leisawitz D. T., A Classification Scheme for Young Stellar Objects Using the Wide-field Infrared Survey Explorer AllWISE Catalog: Revealing Low-density Star Formation in the Outer Galaxy, *ApJ*, 2014, vol. 791, p. 131
- Navarete F., Daminieli A., Barbosa C. L., Blum R. D., A survey of extended H₂ emission from massive YSOs, *MNRAS*, 2015, vol. 450, p. 4364
- Navarete F. D. T., Procura de Estrelas de Alta Massa em Estágios Iniciais de Formação, Universidade de São Paulo, 2013, Dissertação de Mestrado

Taylor M., , 2011 TOPCAT: Tool for OPerations on Catalogues And Tables. Astrophysics Source Code Library, record ascl: 1101.010