



Observatório
Nacional

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

ESTUDO DE AGLOMERADOS ABERTOS NA PONTE MAGALHÃES:
NGC 456, NGC 460 E NGC 465

ANTONIS JEYSON LEON HUAMANI

RIO DE JANEIRO
2025

Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações
Observatório Nacional
Programa de Pós-Graduação

Dissertação de Mestrado

ESTUDO DE AGLOMERADOS ABERTOS NA PONTE MAGALHÃES:
NGC 456, NGC 460 E NGC 465

por

Antonis Jeyson Leon Huamani

Dissertação submetida ao Corpo Docente do Programa de Pós-graduação em Astronomia do Observatório Nacional, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Grau de Mestre em Astronomia.

Orientador: Dr. Francisco Ferreira Souza Maia

Rio de Janeiro, RJ – Brasil
Agosto de 2025

L864

Leon Huamani, Antonis Jeyson
estudo de aglomerados abertos na Ponte Magalhães:
NGC 456, NGC 460 e NGC 465 [Rio de Janeiro] 2025.
xviii, 70 p. 29,7 cm: graf. il. tab.

Dissertação (mestrado) - Observatório Nacional - Rio de Janeiro, 2025.

1. Ponte de Magalhães. 2. Aglomerados Abertos. 3. Isocrona. 4. Estrelas Membros. I. Observatório Nacional. II. Título.

CDU 000.000.000

“ESTUDO DE AGLOMERADOS ABERTOS NA PONTE MAGALHÃES:
NGC 456, NGC 460 E NGC 465”

ANTONIS JEYSON LEON HUAMANI

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ASTRONOMIA DO OBSERVATÓRIO NACIONAL COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ASTRONOMIA.

Aprovada por:

Dr. Francisco Ferreira Souza Maia – ON
(Orientador)

Dra. Simone Daflon dos Santos – ON

Dr. Mateus de Souza Angelo – CEFET/MG

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL
27 DE AGOSTO DE 2025

Agradecimentos

Quero expressar minha mais profunda gratidão à minha querida família. Aos meus pais, pelo esforço incansável e apoio incondicional ao longo de todo este tempo. Sua constante preocupação com o meu bem-estar, suas palavras de incentivo e aquelas chamadas cheias de afeto, nas quais me lembravam da importância da responsabilidade e do cuidado durante minha estadia no exterior, foram fundamentais para que eu me mantivesse firme nesta caminhada. Aos meus irmãos, que também considero como pais, agradeço sinceramente por estarem sempre atentos ao meu progresso, por me oferecerem apoio inabalável e por me motivarem nos momentos difíceis. A confiança que depositaram em mim foi uma fonte constante de inspiração e força.

Minha mais sincera gratidão ao Dr. Francisco Maia, meu orientador, por ter me acolhido como aluno nesta etapa de formação no Observatório Nacional. Sua constante disponibilidade para esclarecer minhas dúvidas, sua orientação precisa e sua paciência durante todo o processo foram essenciais para o meu desenvolvimento acadêmico e profissional. Foi um verdadeiro privilégio contar com sua orientação. Estendo meus agradecimentos à minha colega de grupo, Mariane, pelo apoio e colaboração ao longo dessa trajetória. Tanto ela quanto o Prof. Francisco tornaram essa etapa mais leve e enriquecedora, repleta de aprendizado e companheirismo.

Gostaria também de reconhecer o Dr. Julio C. Tello, que foi meu professor na graduação na Universidad Nacional de Ingeniería e, posteriormente, me incentivou e orientou a candidatar-me ao mestrado em Astronomia no Brasil. Sua influência foi decisiva em meu percurso acadêmico. Agradeço igualmente ao Dr. Armando Bernui, compatriota e colega no Observatório Nacional, por sua proximidade e amizade sincera, que foram extremamente importantes durante minha estadia no Brasil.

Minha gratidão ao Observatório Nacional do Brasil, no Rio de Janeiro, por me proporcionar a oportunidade de realizar este mestrado em Astronomia. A todos os professores da instituição, especialmente àqueles com quem cursei disciplinas, agradeço pela dedicação, exigência e compromisso com a formação de novos cientistas.

Aos meus colegas de mestrado e doutorado, especialmente à Eduarda, pela boa disposição e senso de humor ao aceitar provar meus pratos experimentais em sua maioria tentativas culinárias feitas pela primeira vez e nem sempre com os melhores resultados, que inevitavelmente nos renderam boas risadas e memórias especiais. Ao Jonatan, meu co-

lega de apartamento, pelos momentos de amizade e companheirismo que compartilhamos, tanto no ambiente acadêmico quanto fora dele.

Ao meu grupo de vôlei Ícaro, Raquel, Patrick, Bernardo, Elis, Alesandro, Efren e Débora , obrigado pelos encontros inesquecíveis nas praias de Copacabana, onde o jogo, as risadas e a amizade nos ajudavam a aliviar o estresse da vida acadêmica. Aos colegas da casa de hóspedes do Observatório Nacional durante o primeiro semestre Alesandro, Efren e Bernardo , agradeço pela convivência, pelas conversas e pelo companheirismo no dia a dia. Em especial, ao Alesandro, com quem compartilhei momentos agradáveis tomando uma cerveja "quando fazia muito calor". Ao Vinicius Bessa (Vini), meu colega de sala, agradeço pelos bons momentos compartilhados, pelas conversas, pela colaboração e pela boa disposição durante todo o mestrado.

Aos meus colegas e amigos no Perú, que de alguma forma me apoiaram ao longo do mestrado, expressei minha mais sincera gratidão. Em especial, à minha colega Pamela, pela valiosa colaboração na preparação dos ensaios para a defesa da minha dissertação; e à Olenka, minha melhor amiga, por estar sempre presente com seu apoio emocional e sua amizade incondicional.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo apoio financeiro concedido por meio de uma bolsa de pesquisa, que tornou possível a realização desses estudos. Por fim, agradeço a todos os membros da equipe administrativa do Observatório Nacional, cujo trabalho e dedicação contribuíram para que minha experiência acadêmica e pessoal fosse mais tranquila e proveitosa.

*As flores desabrocham e depois murcham.
As estrelas brilham e um dia se apagam.
A Terra, o Sol, as galáxias e até o próprio universo
um dia também desaparecerão.
Comparado a isso, a vida do homem não passa de
um piscar de olhos, um breve momento...
E, mesmo assim, nesse instante nascemos, rimos,
choramos, lutamos, sonhamos,
amamos e odiamos...
Tudo em um único instante.
E ainda assim, é nesse instante efêmero que reside
tudo o que somos.*

— *Shaka de Virgem, Os Cavaleiros do Zodíaco Saga
de Hades*

Antonis Jeyson Leon Huamani

ESTUDO DE AGLOMERADOS ABERTOS NA PONTE MAGALHÃES:
NGC 456, NGC 460 E NGC 465

RESUMO

Os aglomerados estelares constituem ferramentas fundamentais para o estudo da formação e evolução das galáxias. Em particular, aqueles localizados em estruturas de maré das Nuvens de Magalhães, como a Ponte de Magalhães uma estrutura de gás e estrelas que conecta a Grande Nuvem de Magalhães (LMC) e a Pequena Nuvem de Magalhães (SMC), oferecem pistas valiosas sobre a história, dinâmica e evolução química dessas regiões.

Esta dissertação tem como objetivo analisar as propriedades astrofísicas e estruturais dos aglomerados NGC 456, NGC 460 e NGC 465, localizados no extremo leste da Ponte de Magalhães, a partir de dados fotométricos do catálogo VISCACHA, complementados com informações da missão espacial GAIA. Para isso, aplicaram-se técnicas de descontaminação fotométrica, comparando-se a região do aglomerado com áreas de campo ao redor, o que permitiu identificar uma amostra confiável de membros prováveis.

Com essa amostra, foram realizados ajustes de isócronas nos diagramas cor-magnitude (CMDs), a fim de derivar parâmetros físicos como idade, distância, extinção e metalicidade. Além disso, estimaram-se parâmetros estruturais por meio do ajuste de perfis de King sobre perfis radiais de densidade estelar.

Nossos resultados indicam que os aglomerados analisados possuem idades entre 4 e 6 milhões de anos, apresentam metalicidades relativamente altas ($[Fe/H] \sim -0.4$ dex) em comparação com os valores típicos da SMC ($[Fe/H] \sim -0.9$ dex), e situam-se a distâncias heliocêntricas em torno de 58 kpc. A presença de poeira e gás e a ausência de estrelas evoluídas nos CMDs reforça o caráter jovem desses sistemas.

Em conjunto, suas propriedades espaciais e físicas sugerem uma origem comum, possivelmente a partir de uma mesma nuvem molecular gigante nas proximidades de NGC 465. Este aglomerado possivelmente ocupou uma posição privilegiada na nuvem, tendo se formado primeiro com a mais abundante população estelar. Isso o permitiu formar uma estrutura centralmente condensada longeva, diferentemente de NGC 456 e NGC 460, que podem não sobreviver ao processo de expulsão de gás e se dissolver nos próximos milhões de anos.

No contexto da Ponte de Magalhães, este estudo mostra que ela é uma região ativa de formação estelar, a partir de material possivelmente arrancado do corpo central da Pequena Nuvem de Magalhães em sua última interação com a Grande Nuvem.

Antonis Jeyson Leon Huamani

STUDY OF OPEN CLUSTERS IN THE MAGELLANIC BRIDGE:
NGC 456, NGC 460 E NGC 465

ABSTRACT

Star clusters are fundamental tools for studying the formation and evolution of galaxies. In particular, those located in tidal structures of the Magellanic Clouds, such as the Magellanic Bridge a structure of gas and stars connecting the Large Magellanic Clouds (LMC) and Small Magellanic Clouds (SMC), offer valuable clues about the history, dynamics, and chemical evolution of these regions.

This dissertation aims to analyze the astrophysical and structural properties of the clusters NGC 456, NGC 460, and NGC 465, located in the eastern end of the Magellanic Bridge, based on photometric data from the VISCACHA catalog and complemented with data from the Gaia space mission. To achieve this, photometric decontamination techniques were applied by comparing the cluster region with surrounding field areas, allowing the identification of a reliable sample of probable members. Using this sample, isochrone fitting was performed on color-magnitude diagrams (CMDs) to derive physical parameters such as age, distance, extinction, and metallicity. Additionally, structural parameters were estimated through King profile fitting to radial stellar density profiles.

Our results indicate that the analyzed clusters have ages between 4 and 6 million years, are relatively metal-rich ($[\text{Fe}/\text{H}] \approx 0.40$), and are located at heliocentric distances on the order of 58 kpc. The presence of dust and gas, along with the absence of evolved stars in the CMDs, reinforces the young nature of these systems. Taken together, their spatial and physical properties suggest a common origin, possibly from the same giant molecular cloud in the vicinity of NGC 465. This cluster likely occupied a privileged position within the cloud, having formed first with the most abundant stellar population. This allowed it to develop a long-lived, centrally condensed structure, unlike NGC 456 and NGC 460, which may not survive the gas expulsion process and could dissolve within the next few million years.

In the context of the Magellanic Bridge, this study shows that it is an active star-forming region, formed from chemically enriched gaseous material, possibly stripped from the central body of the Small Magellanic Cloud during its last interaction with the Large Magellanic Cloud.

Lista de Figuras

1.1	Sistema de Magalhães	3
1.2	Projeção ortográfica do catalogo Bica	5
1.3	Distribuição dos aglomerados observados por Oliveira	6
1.4	Imagem das Plêiades	8
2.1	Telescópio SOAR	10
2.2	Imagens Goodman	11
2.3	bandas fotométricas GAIA e VISCACHA	14
2.4	Isocronas PARSEC	16
3.1	Carta celeste dos aglomerados	19
3.2	Seleção de campo VISCACHA para NGC 456	21
3.3	CMDs para as diferentes regiões estelares de NGC 456.	22
3.4	Seleção de campo GAIA para NGC 456	23
3.5	Cortes preliminares sobre dados GAIA de NGC 456	24
3.6	Celulas de descontaminação VISCACHA	26
3.7	Comparação entre células original e modificada.	27
3.8	Células modificadas em tamanho e posição.	27
3.9	Células de descontaminação GAIA	28
3.10	Índices estatísticos do processo de descontaminação	31
3.11	Distribuição dos quatro principais valores estatísticos de VISCACHA	31
3.12	Distribuição dos quatro principais valores estatísticos de GAIA	32
3.13	Aspectos chave para o ajuste da isócrona	34
3.14	Diagrama cor magnitude de NGC 456	36
3.15	CMDs em diferentes bandas fotometricas para NGC 456	37
3.16	CMDs com faixas de incerteza associadas a cada isócrona	38
3.17	Anéis concêntricos usados para calcular o RDP	43
3.18	Perfil radial de NGC 456	43
4.1	Carta celeste Gaia NGC 460	46
4.2	Seleção de campo NGC 460	46
4.3	Regiões extraídas para NGC 460 de VISCACHA)	47

4.4	Regiões extraídas para NGC 460 de GAIA)	48
4.5	Indicadores estatísticos de NGC 460	49
4.6	CMDs em diferentes bandas fotométricas para NGC 460	50
4.7	CMDs com faixas de incerteza de NGC 460	50
4.8	Carta celeste GAIA NGC 465	51
4.9	Regiões extraídas para NGC 465	52
4.10	Índices estatísticos de NGC 465	53
4.11	Ajuste de isócrona para NGC 465	53
4.12	Anéis concêntricos usados para calcular o RDP	54
4.13	Perfil radial de NGC 465	55
4.14	Distribuição de idades e metalicidade	59

Lista de Tabelas

2.1	Informações observacionais do levantamento VISCACHA	11
2.2	Tabela das bandas fotométricas GAIA e Viscacha	14
3.1	Tamanho base das células para descontaminação de NGC 456 (VISCACHA)	25
3.2	Tamanho base das células para descontaminação de NGC 456 (GAIA) . . .	28
3.3	Número de estrelas membros de NGC 456	32
3.4	Coefficientes de extinção adotados	35
3.5	Valores dos parâmetros estruturais de 456	42
4.1	Tamanho das células para descontaminação de NGC 460	49
4.2	Número de estrelas membros de NGC 460	49
4.3	Tamanho base das células para descontaminação de NGC 465	52
4.4	Estrelas membros de NGC 465	53
4.5	Valores dos parâmetros estruturais de 465	55
4.6	Parâmetros astrofísicos	56
4.7	Parâmetros estruturais	56

Conteúdo

Lista de Figuras	xiii
Lista de Tabelas	xv
1 Introdução	1
1.1 As Nuvens de Magalhães	2
1.2 Ponte de Magalhães	4
1.3 Aglomerados abertos	7
2 Dados	9
2.1 VISCACHA Survey	9
2.2 GAIA Survey	12
2.3 Bandas fotométricas	13
2.4 Modelos de evolução estelar PARSEC	15
3 Metodologia	17
3.1 Seleção de campo	18
3.1.1 Seleção de campo VISCACHA	20
3.1.2 Seleção de campo GAIA	22
3.2 Descontaminação	24
3.2.1 Descontaminação VISCACHA	25
3.2.2 Descontaminação GAIA	28
3.3 Indicadores estatísticos	28
3.3.1 Indicadores estatísticos VISCACHA	30
3.3.2 Indicadores estatísticos GAIA	32
3.4 Ajuste da Isócrona	33
3.4.1 Extinção	38
3.4.2 Distância	38
3.4.3 Idade	39
3.4.4 Metalicidade	39
3.5 Perfil radial de densidade estelar	40

4	Resultados e discussões	45
4.1	NGC 460	45
4.1.1	Seleção de Campo	45
4.1.2	Descontaminação	48
4.1.3	Ajuste de Isócrona	49
4.2	NGC 465	50
4.2.1	Seleção de Campo	51
4.2.2	Descontaminação	51
4.2.3	Ajuste de Isócrona	53
4.2.4	Parâmetros estruturais	54
4.3	Resultados finais	55
4.4	Discussão	56
5	Conclusões e Perspectivas	61
	Bibliografia	63

Capítulo 1

Introdução

Os aglomerados estelares têm sido reconhecidos há muito tempo como laboratórios fundamentais para a pesquisa astrofísica. Seu estudo tem desempenhado um papel crucial no desenvolvimento da nossa compreensão do universo ([LADA e LADA, 2003](#)).

Em particular, a LMC e SMC, galáxias satélites da Via Láctea, encontram-se imersas em um processo de interação gravitacional mútua, bem como com a nossa galáxia. Essa interação tem provocado a perda de material estelar e gasoso, resultando na formação de estruturas estendidas, como a Ponte de Magalhães, a Corrente de Magalhães e o Braço Principal ([DÍAZ e BEKKI, 2012](#); [NIDEVER *et al.*, 2008](#)).

Neste contexto, os aglomerados estelares que habitam essas estruturas de maré representam ferramentas essenciais para sua caracterização, pois atuam como sondas galácticas que permitem reconstruir a história de formação estelar e o processo de enriquecimento químico dessas regiões. Essas estruturas não apenas refletem os efeitos dinâmicos da interação entre as galáxias, como também oferecem pistas fundamentais sobre a história orbital e a evolução química da LMC e da SMC ([BESLA *et al.*, 2012](#)).

Apesar dos avanços tanto teóricos quanto observacionais, a natureza, a origem e a evolução dessas estruturas continuam sendo questões em aberto e de grande interesse na comunidade científica, especialmente no contexto da formação de estruturas em grande escala e da dinâmica de galáxias satélites. Diversos estudos recentes têm contribuído de forma significativa para a caracterização de um número crescente de aglomerados estelares nessas regiões (e.g. [CHIOSI *et al.*, 2006](#); [MAIA *et al.*, 2014](#); [ZARITSKY *et al.*, 2004](#)). Um dos esforços mais relevantes e especializados em áreas como as Nuvens de Magalhães é o levantamento VISCACHA ([MAIA *et al.*, 2019](#)). No entanto, esse esforço ainda não é suficiente, pois ainda há uma quantidade considerável de objetos observados pelo levantamento que seguem não analisados.

O presente trabalho concentra-se no estudo dos aglomerados abertos NGC 456, NGC 460 e NGC 465, observados pelo levantamento VISCACHA, localizados na Ponte de Magalhães, estrutura que conecta a LMC e SMC. O principal objetivo é caracterizá-los, ou seja, determinar seus parâmetros astrofísicos e estruturais, e investigar se comparti-

llham características em comum, uma vez que, visualmente, encontram-se muito próximos no plano de observação.

Para isso, são utilizados dados fotométricos profundos obtidos do catálogo VISCACHA (VIsible Soar photometry of star Clusters in tApii and Coxi HuguA), complementados com informações fotométricas e astrométricas da missão espacial Gaia. A combinação desses dois conjuntos de dados permite realizar uma análise detalhada e robusta das propriedades astrofísicas dos aglomerados.

As metodologias empregadas incluem a construção de perfis de densidade radial para determinar os parâmetros estruturais dos aglomerados, a aplicação de critérios de *membership* fotométrico para selecionar as estrelas associadas a cada aglomerado, e o ajuste de isócronas teóricas nos CMDs para derivar idades, distâncias, metalicidades e extinções.

1.1 As Nuvens de Magalhães

As Nuvens de Magalhães, compostas pela LMC e SMC, são duas galáxias anãs irregulares que orbitam como satélites da Via Láctea. São visíveis a olho nu desde o hemisfério sul, localizando-se nas constelações de Dorado e Tucana, respectivamente. Embora sejam conhecidas desde tempos antigos, receberam seu nome em homenagem ao explorador Fernão de Magalhães, que as documentou durante sua expedição no século XVI.

Ambas as galáxias estão relativamente próximas da Via Láctea: a LMC a uma distância de aproximadamente 49,6 kpc (PIETRZYSKI *et al.*, 2019) e a SMC a cerca de 62,4 kpc (GRACZYK *et al.*, 2020), com uma separação mútua atual de cerca de 22 kpc (ZIVICK *et al.*, 2019). Apesar de serem classificadas como galáxias irregulares, apresentam estruturas distintas. A LMC compartilha características com galáxias espirais, como um disco plano, uma barra estelar deslocada e um único braço espiral (RUIZ-LARA *et al.*, 2020; VAN DER MAREL, 2001). Por outro lado, a SMC possui uma forma triaxial alongada, parecida com um cigarro, com uma profundidade notável ao longo da linha de visão, que alcança até 14 kpc em suas regiões internas (SUBRAMANIAN e SUBRAMANIAM, 2012) e cerca de 23 kpc em sua parte oriental (NIDEVER *et al.*, 2013).

Em conjunto também com a Via Láctea as Nuvens de Magalhães formam um sistema. Este sistema inclui não apenas as galáxias satélites LMC e SMC, mas também três estruturas gasosas bem definidas: duas compostas por gás neutro (HI): uma que se estende na direção da órbita do sistema, o Braço Avançado (*Leading Arm*), e outra na direção oposta, a Corrente de Magalhães (*Magellanic Stream*), além de uma terceira estrutura composta por gás e estrelas, que conecta ambas as galáxias, conhecida como a Ponte de Magalhães (*Magellanic Bridge*). O sistema das Nuvens de Magalhães é exibido na Figura 1.1, onde as estruturas gasosas (HI) mapeadas em rádio (NIDEVER *et al.*, 2010) são sobrepostas a um panorama visível da Via Láctea (MELLINGER, 2009).

Estudos de abundância química ao longo dos filamentos de gás no Braço Avançado e

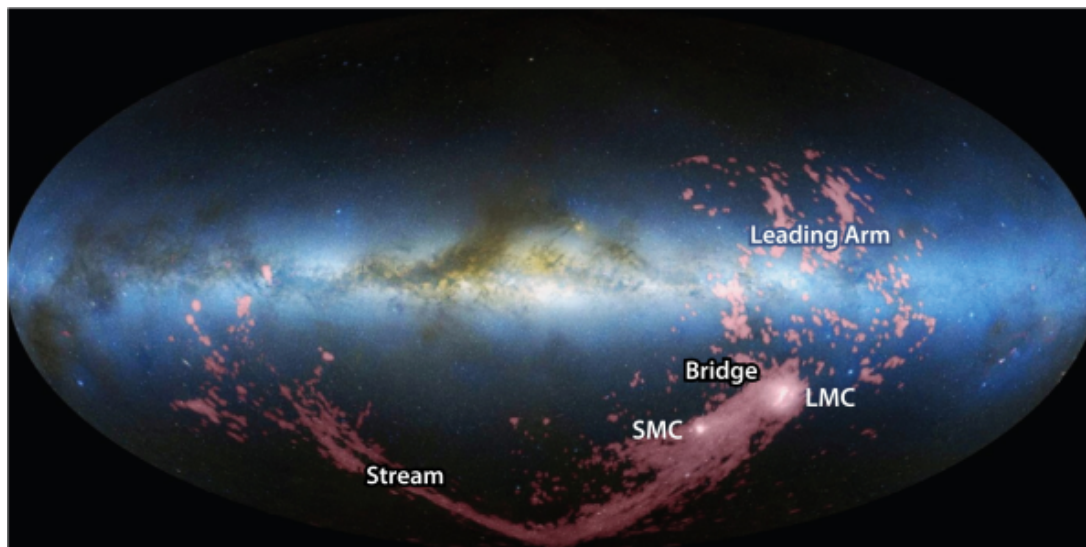


Figura 1.1: Projeção de Hammer-Aitoff, que mostra uma visão panorâmica completa do céu da Via Láctea, centrada no bojo galáctico, com observações em HI das Nuvens de Magalhães sobrepostas. Também são destacadas as principais estruturas do Sistema de Magalhães, que se estendem por mais de 200° no céu. (crédito: [NIDEVER *et al.* \(2010\)](#))

na Corrente de Magalhães confirmam que ambos se originam tanto na LMC quanto na SMC. Sua morfologia e cinemática sugerem que a interação dessas galáxias com a Via Láctea perdura há aproximadamente 2 bilhões de anos ([FOX *et al.*, 2013](#); [NIDEVER *et al.*, 2008](#)). No entanto, ainda estão em debate dois modelos principais que competem para explicar a origem e a evolução desse sistema.

No primeiro modelo (de múltiplas passagens), proposto por [DIAZ e BEKKI \(2011\)](#) e comumente conhecido como o cenário ligado (*bound scenario*), as Nuvens de Magalhães teriam sido inicialmente satélites independentes da Via Láctea. Durante sua aproximação ao halo galáctico, a LMC teria capturado gravitacionalmente a SMC há cerca de 2 bilhões de anos. Desde então, ambas teriam orbitado conjuntamente sob a influência gravitacional da Via Láctea, passando por pelo menos dois encontros próximos (há 1,2 bilhões e 250 milhões de anos). Esse modelo consegue reproduzir satisfatoriamente a estrutura dos dois filamentos gasosos e a composição da Corrente de Magalhães. No entanto, também prevê a existência de uma componente estelar significativa extraída da SMC por forças de maré, a qual ainda não foi confirmada observacionalmente.

O segundo modelo (de primeira passagem), desenvolvido por [BESLA *et al.* \(2012, 2007\)](#), também se refere a um cenário ligado, mas propõe que a LMC e a SMC constituem um sistema binário em interação desde épocas remotas, que teria realizado apenas sua primeira passagem perigaláctica pela Via Láctea nos últimos 2 bilhões de anos. Esse modelo sugere que uma colisão frontal recente (<500 milhões de anos) entre as duas galáxias alterou drasticamente a estrutura da SMC, removendo grandes quantidades de gás e originando, assim, a Ponte de Magalhães. Esse cenário consegue explicar a morfologia

geral e a cinemática interna do sistema a partir das interações mútuas entre as Nuvens, sem a necessidade de invocar uma participação significativa do potencial gravitacional da Via Láctea, o que é coerente com a baixa metalicidade observada na Corrente de Magalhães (D'ONGHIA e FOX, 2016). No entanto, subestima consideravelmente as densidades observadas de HI e HII, além de não reproduzir corretamente a composição química da Corrente, por não considerar a contribuição gasosa removida da LMC.

Nesse contexto, sabe-se que os distúrbios gravitacionais resultantes das interações entre a SMC, a LMC e a Via Láctea desencadearam episódios recentes de formação estelar ao longo dessas galáxias e de suas estruturas de maré (CASSETTI-DINESCU *et al.*, 2012). Esses eventos podem ser investigados por meio da análise detalhada de aglomerados abertos e associações estelares, que atuam como traçadores eficazes das condições físicas e da evolução dinâmica do sistema.

1.2 Ponte de Magalhães

A Ponte de Magalhães, que conecta a LMC e SMC, é uma estrutura rica em gás e estrelas jovens, cuja formação é atribuída a interações gravitacionais recentes entre ambas as galáxias satélites (D'ONGHIA e FOX, 2016).

Foi identificada uma região da SMC que se conecta diretamente com a Ponte de Magalhães, conhecida como Asa da SMC (SMC Wing). Essa estrutura alongada foi detectada pela primeira vez por (SHAPLEY, 1940) e representa um elo morfológico e dinâmico fundamental entre a SMC e a Ponte, sugerindo um histórico de interação e transferência de material entre ambos os componentes do Sistema de Magalhães. Além disso, a Ponte apresenta uma maior concentração de estrelas em sua parte ocidental, precisamente na região onde se conecta com a Asa da SMC, bem como outra concentração estelar situada aproximadamente no meio do caminho entre as Nuvens de Magalhães (SKOWRON *et al.*, 2014)

Os aglomerados analisados neste trabalho (NGC 456, NGC 460 e NGC 465) estão registrados no catálogo de BICA *et al.* (2008), o qual constitui uma referência fundamental para a identificação e classificação de aglomerados estelares, associações e outras estruturas nas Nuvens de Magalhães. Esse catálogo fornece informações básicas sobre as posições, dimensões angulares e características morfológicas dos objetos listados, que foram complementadas neste estudo por meio da análise de dados fotométricos profundos e da determinação de parâmetros astrofísicos e estruturais.

A Figura 1.2 apresenta a distribuição dos aglomerados e associações estelares listados no catálogo de BICA *et al.* (2008), em que as associações estão representadas em azul, os aglomerados em vermelho e o ponto marcado em verde indica a localização dos objetos analisados neste trabalho. Embora visualmente pareçam coincidir em uma única posição, essa superposição se deve à escala reduzida da imagem. Como pode ser observado, os

aglomerados estudados localizam-se em uma região periférica da Ponte de Magalhães, notavelmente mais próxima da Pequena Nuvem de Magalhães (SMC), especificamente no setor conhecido como Wing/Bridge, o que reforça seu caráter particular dentro dessa estrutura de maré.

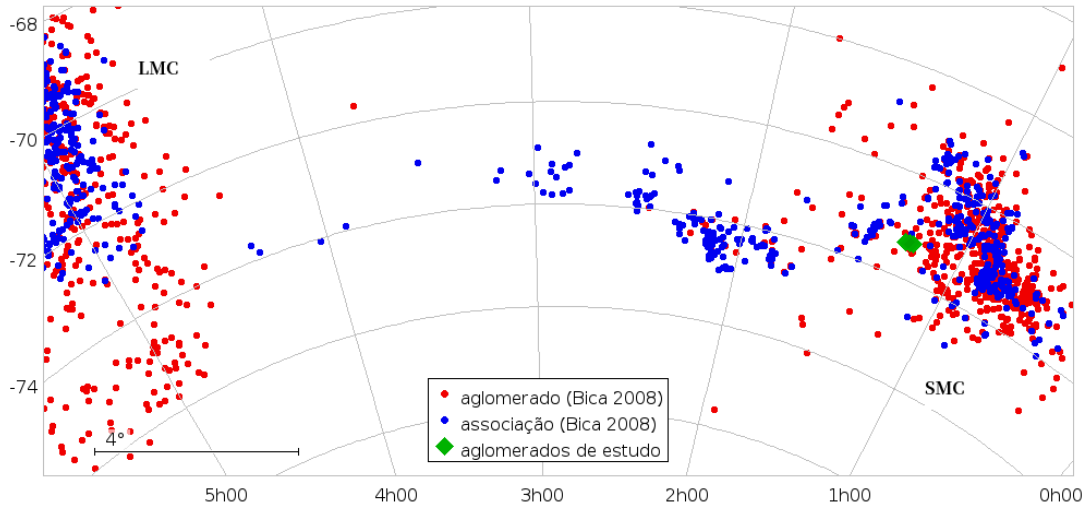


Figura 1.2: Distribuição projetada dos aglomerados estelares e associações listadas no catálogo de [BICA *et al.* \(2008\)](#). Os aglomerados estão representados por pontos vermelhos e as associações por pontos azuis. O losango verde indica a posição dos aglomerados analisados neste trabalho (NGC 456, NGC 460 e NGC 465), os quais aparecem sobrepostos devido à escala do mapa.

Um dos modelos mais destacados sobre a formação da Ponte de Magalhães é o proposto por [BESLA *et al.* \(2012\)](#), que sugere que essa estrutura se originou como resultado de uma colisão frontal entre a SMC e o centro da LMC ocorrida há aproximadamente 200300 milhões de anos. Segundo esse cenário, tal interação teria desencadeado episódios de formação estelar e deixado uma possível assinatura química na forma de um gradiente de metalicidade ao longo da Ponte, que nunca foi confirmado observacionalmente.

Visando preencher esta lacuna observacional, estudos mais recentes sobre a Ponte de Magalhães, como o de [OLIVEIRA *et al.* \(2023\)](#), analisam 33 aglomerados estelares nessa região. O estudo identifica duas populações claramente distintas, o que contribui significativamente para a compreensão da complexa história evolutiva dessa estrutura:

- **aglomerados jovens:** com idades inferiores a 200 Myr e metalicidade $[Fe/H] \approx -0.4$ dex, que muito provavelmente se formaram *in situ* na Ponte.
- **aglomerados antigos:** com idades entre 0.5 e 6.8 Gyr e metalicidade $[Fe/H] < -0.6$ dex, possivelmente desprendidos da SMC.

Na Figura 1.3 são apresentados os 33 aglomerados estelares estudados [OLIVEIRA *et al.* \(2023\)](#), distribuídos ao longo da Ponte de Magalhães e destacados em vermelho com contorno preto. O sistema de coordenadas é relativo ao centro da SMC (0h 52m

45s, $-72^{\circ}49'43''$; CROWL *et al.* 2001) Desses, 15 foram classificados como jovens e 13 como antigos, com os restantes pendentes de classificação ou com idades intermediárias incertas. Este trabalho visa complementar esta amostra fornecendo vínculos adicionais para decifrar a formação e conteúdo da Ponte de Magalhães.

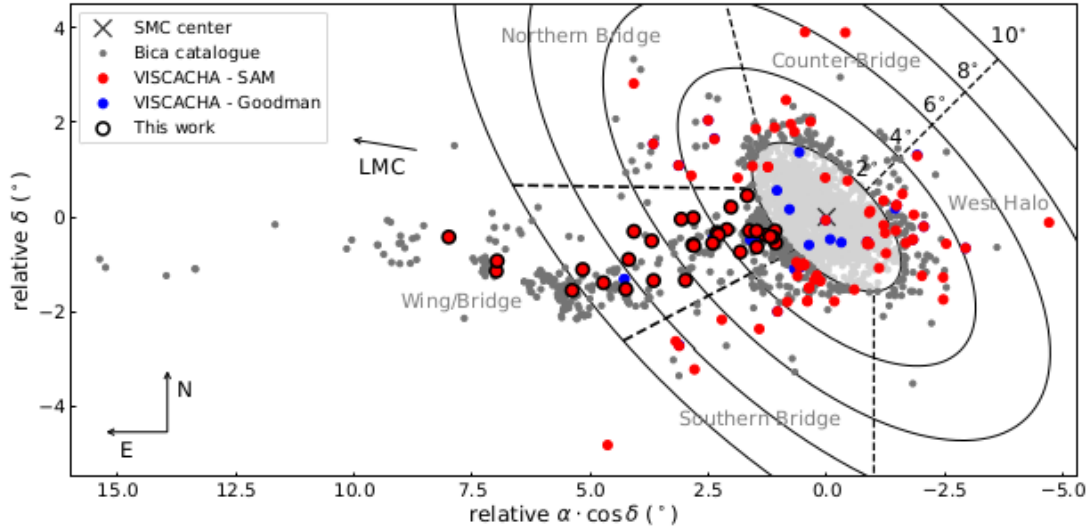


Figura 1.3: Distribuição projetada dos 2665 aglomerados estelares e associações do catálogo de BICA *et al.* (2020) (pontos em cinza). Essa subdivisão azimutal da SMC (Bridge, Counter-Bridge, West Halo, etc.) foi proposta por DIAS *et al.* (2014). Os objetos observados no projeto VISCACHA com os instrumentos SAM e Goodman estão marcados em vermelho e azul, respectivamente, e a amostra atual de 33 aglomerados na região Wing/Bridge está destacada com um contorno preto. A seta indica a direção do centro da LMC.

Simulações recentes de N-corpos sugerem que o gás e as estrelas foram extraídos da SMC por meio de interações de maré, e possivelmente também arrastados da LMC para a Ponte (BESLA *et al.*, 2012), durante o encontro mais recente entre as Nuvens de Magalhães, ocorrido há aproximadamente 100 a 300 milhões de anos (GARDINER e NOGUCHI, 1996). Ao analisar a cinemática do disco da LMC a partir dos movimentos próprios medidos pelo Gaia, juntamente com simulações de N-corpos, CHOI *et al.* (2022) concluíram que esse encontro foi direto, com um parâmetro de impacto menor que o raio do disco estelar da LMC, estimado entre 5 e 10 kpc, dependendo do momento exato do impacto. Esse intervalo temporal é consistente com as restrições independentes obtidas por meio de modelagens orbitais do sistema (ZIVICK *et al.*, 2018) e com as idades da população estelar jovem detectada na Ponte, que teria se formado *in situ*, reforçando a hipótese de que essa região é um sítio ativo de formação estelar.

1.3 Aglomerados abertos

Os aglomerados estelares são tradicionalmente classificados em duas categorias principais: aglomerados globulares e aglomerados abertos, embora hoje se reconheça a existência de outros tipos de agrupamentos estelares, como associações e aglomerados jovens massivos (KRUMHOLZ *et al.*, 2019; ZWART *et al.*, 2010).

Os aglomerados abertos são grupos homogêneos de estrelas com a mesma idade e a mesma composição química inicial, formados em um único evento a partir da mesma nuvem de gás e, portanto, constituem laboratórios ideais para o estudo da formação e evolução estelar (LADA e LADA, 2003). A maioria desses sistemas se dissolverá nos primeiros milhões de anos de existência, devido a mecanismos que possivelmente envolvem a perda de gás causada pela retroalimentação estelar (BRINKMANN *et al.*, 2017; MOECKEL e BATE, 2010), ou interações com nuvens moleculares gigantes (GIELES *et al.*, 2006). No entanto, uma fração desses aglomerados sobrevive à fase embebida e permanece gravitacionalmente ligada por escalas de tempo mais longas, como é o caso das famosas Plêiades (M45 - Fig. 1.4), localizadas na constelação de Touro. Acredita-se que o parâmetro chave para os aglomerados seja um tamanho mínimo da população estelar formada (~ 100 estrelas LADA e LADA, 2003).

Os aglomerados abertos possuem entre centenas e milhares de estrelas, têm idades entre milhões e 10 bilhões de anos, massas entre 10^2 e $10^4 M_{\odot}$, e estão localizados no disco da Galáxia (ou de sua galáxia hospedeira); (CANTAT-GAUDIN *et al.*, 2018; DIAS *et al.*, 2021). Eles se formam continuamente no disco galáctico, e a maioria dos que observamos na Via Láctea possui menos de 1 bilhão de anos. Aglomerados mais antigos são raros, pois a maioria foi dissolvida ao longo do tempo devido a interações gravitacionais e perturbações externas. É provável que grande parte das estrelas do disco Galáctico tenha se originado em aglomerados abertos que já desapareceram (BINNEY e MERRIFIELD, 1998).

Nas Nuvens de Magalhães, os aglomerados sobrevivem por mais tempo devido ao ambiente dinâmico menos hostil, enquanto na Via Láctea suas vidas são encurtadas pelas fortes forças de maré e pelas interações frequentes com nuvens moleculares gigantes. O catálogo de BICA *et al.* (2008) lista 256 aglomerados de estrelas na periferia da LMC, dos quais apenas 32 (12%) apresentavam algum tipo de estudo publicado. Adicionalmente, parâmetros estruturais e metalicidade são ainda mais raros, estando presente em apenas 9% dos sistemas presentes na SMC (BICA *et al.*, 2020). Assim, faz-se necessário uma caracterização detalhada destes objetos (i.e. parâmetros estruturais, metalicidade, distância e idade) para obtenção de uma descrição mais abrangente e homogênea dos sistemas estelares nas Nuvens de Magalhães.



Figura 1.4: A imagem colorida do aglomerado das Plêiades foi obtida com o telescópio Schmidt de 48 polegadas do Observatório Palomar, como parte da segunda pesquisa do céu do observatório e do Digitized Sky Survey. Foi criada a partir de três imagens capturadas com filtros vermelho, verde e azul.

Capítulo 2

Dados

Apresentamos os dois catálogos utilizados como base neste estudo, destacando suas principais características e diferenças. Além disso, discutimos a relevância de cada um deles para a análise dos aglomerados abertos localizados nas Nuvens de Magalhães, ressaltando sua importância na compreensão da formação estelar e da evolução química dessas galáxias satélites.

2.1 VISCACHA Survey

Historicamente, a equipe VISCACHA foi formada a partir da fusão de dois grupos brasileiros: um focado no estudo de aglomerados periféricos da LMC, com ênfase na análise de parâmetros estruturais, e outro voltado para os aglomerados da SMC, investigando a relação entre idade e metalicidade, bem como os gradientes radiais, utilizando o instrumento SOAR Optical Imager (SOI) desde 2006. Em 2015, com a incorporação do Módulo de Óptica Adaptativa (SAM), a colaboração foi formalizada como o projeto VISCACHA, ampliando a equipe para incluir pesquisadores do Brasil, Chile, Argentina, México e Colômbia.

O catálogo VISCACHA (*Visible Soar photometry of star Clusters in tApii and Coxí Huguá*), sendo que viscacha é também o nome de um pequeno roedor, da família das chinchilas, nativo da América do Sul (principalmente do deserto do Atacama), região onde está localizado o telescópio SOAR e de onde provém a maior parte dos membros da equipe VISCACHA ([VISCACHA COLLABORATION, 2025](#)).

O projeto VISCACHA realiza um estudo abrangente das regiões externas das Nuvens de Magalhães, por meio da obtenção de imagens profundas e de alta qualidade de seus aglomerados estelares, utilizando o telescópio SOAR de 4.1 m e sua câmera imageadora com óptica adaptativa (SAMI). Além disso, o VISCACHA inclui *follow-up* espectroscópico, utilizando o telescópio Gemini Sul, cujos dados não serão explorados nesta dissertação. Este levantamento, atualmente em andamento, é focado em aglomerados localizados na periferia das Nuvens e na Ponte de Magalhães, regiões que, comumente, não são cobertas



Figura 2.1: Telescópio SOAR sobre as montanhas do Cerro Pachón, Chile. Crédito: VISCACHA survey. Extraído de [VISCACHA COLLABORATION 2025](#).

pelos grandes levantamentos fotométricos.

Graças ao acesso privilegiado da comunidade brasileira ao telescópio SOAR (o Brasil tem 31% de participação), a equipe VISCACHA tem conseguido observar uma grande quantidade de aglomerados estelares no Sistema Magalhânico. Essa capacidade observacional, aliada à utilização de óptica adaptativa por meio do módulo SAM, tem permitido alcançar uma profundidade fotométrica e uma resolução espacial superiores às oferecidas pelos levantamentos de campo amplo. Como resultado, é possível construir CMDs de alta precisão, mesmo para aglomerados antigos, compactos e localizados em regiões densamente povoadas.

As observações realizadas pelo projeto VISCACHA incluem exposições curtas, com o objetivo de evitar a saturação das estrelas mais brilhantes ($V \approx 16$), e exposições profundas, destinadas a amostrar estrelas com $V \approx 24$ e uma razão sinal/ruído ($S/N \approx 10$). A calibração fotométrica das noites individuais foi realizada por meio da observação de padrões secundárias de [STETSON \(2000\)](#) e/ou de campos do Magellanic Clouds Photometric Survey (MCPS - [ZARITSKY *et al.*, 2002](#)), utilizando os filtros B , V e I ([MAIA *et al.*, 2019](#)).

Para alcançar uma fotometria profunda, tipicamente são realizadas exposições longas de 20 e 30 minutos (após a coadição) nos filtros B , V e I , respectivamente, combinadas com exposições curtas para amostrar as estrelas mais brilhantes. Esses procedimentos permitem a geração de CMDs de alta qualidade, especialmente para aglomerados antigos e compactos localizados em campos densos, o que geralmente não é possível com os levantamentos de campo amplo.

Neste trabalho, empregamos observações realizadas com o instrumento Goodman, realizadas em uma noite de excelente qualidade na data de 16/10/2021. Esta câmera possui um campo de visão circular de $7'$ de diâmetro, substancialmente maior que aquele apresentado pelo SAM, mas não possui correção de óptica adaptativa. Estas características a tornam ideais para observar objetos extensos e pouco densos, como as associações. A Tabela 2.1 resume as informações das observações realizadas pelo levantamento VISCACHA, no contexto deste trabalho.

Tabela 2.1: Informações observacionais do levantamento VISCACHA

Alvo	Filtro	Exposição	Massa de ar	FWHM	Data
NGC 456	B	$3 \times 200\text{s}$	1.38	$0.56''$	2021-10-16
NGC 456	V	$3 \times 200\text{s}$	1.38	$0.52''$	2021-10-16
NGC 456	R	$3 \times 60\text{s}$	1.37	$0.48''$	2021-10-16
NGC 456	I	$3 \times 300\text{s}$	1.37	$0.55''$	2021-10-16
NGC 456	H_α	$3 \times 60\text{s}$	1.39	$0.48''$	2021-10-16
NGC 460	B	$3 \times 200\text{s}$	1.38	$0.60''$	2021-10-16
NGC 460	V	$3 \times 200\text{s}$	1.38	$0.56''$	2021-10-16
NGC 460	R	$3 \times 60\text{s}$	1.37	$0.50''$	2021-10-16
NGC 460	I	$3 \times 300\text{s}$	1.39	$0.56''$	2021-10-16
NGC 460	H_α	$3 \times 60\text{s}$	1.37	$0.82''$	2021-10-16

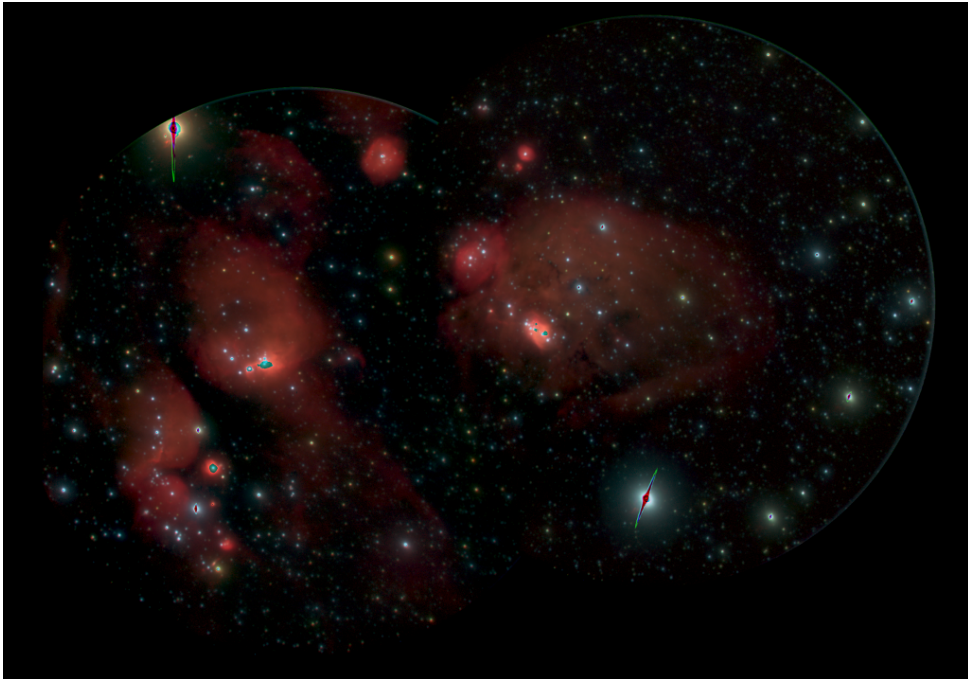


Figura 2.2: Imagem composta (B , V , H_α) de NGC 456 (direita) e NGC 460 (esquerda), estudados neste trabalho. Criada a partir da reprojeção e combinação de 6 exposições adjacentes por filtro, obtidas com a camera imageadora do Goodman (telescópio SOAR).

A Figura 2.2 mostra uma imagem composta com os filtros B , V , H_α , construída a partir de um mosaico (e.g. co-adição) das exposições longas processadas dos aglomerados

NGC 456 e NGC 460. É possível ver a presença abundante de gás no ambiente intra-aglomerado destes alvos, além de pequenas regiões HII, contendo maior concentração de hidrogênio ionizado.

O processamento destes dados foi inteiramente realizado pelo *pipeline* desenvolvido e utilizado pela colaboração VISCACHA, e inclui redução básica (i.e. correções de *overscan*, *bias*, *flat-field*), calibração astrométrica, remoção de raios cósmicos e co-adição das imagens. A realização e calibração da fotometria também foram realizadas por programas semi-automatizados da colaboração (MAIA *et al.*, 2019), produzindo catálogos fotométricos profundos nas bandas *B*, *V* e *I*, utilizados neste trabalho.

2.2 GAIA Survey

Gaia é uma missão espacial europeia que fornece astrometria, fotometria e espectroscopia de quase 2 bilhões de estrelas na Via Láctea, assim como amostras significativas de objetos extragalácticos e do Sistema Solar. O Arquivo Gaia da ESA contém posições, paralaxes, movimentos próprios, velocidades radiais e medições de brilho. São fornecidas informações complementares sobre multiplicidade, variabilidade fotométrica e parâmetros astrofísicos para uma grande fração das fontes (GAIA COLLABORATION *et al.*, 2021).

A missão fornece dados fotométricos em três bandas: banda G, com comprimento de onda variando entre 330 nm e 1050 nm, banda BP (azul), que observa na faixa de comprimento de onda de 330 nm a 680 nm, e banda RP (vermelha), que cobre a faixa de 630 nm a 1050 nm. Ela também conta com um espectrógrafo de baixa resolução (BROWN *et al.*, 2018).

A primeira liberação de dados (Gaia Data Release 1, GAIA DR1) ocorreu em 2016 (GAIA COLLABORATION *et al.*, 2016), onde os dados ainda apresentavam informações limitadas para alguns parâmetros. A segunda liberação de dados (Gaia Data Release 2, GAIA DR2) ocorreu em 2018 (GAIA COLLABORATION *et al.*, 2018), fornecendo dados astrométricos mais numerosos e completos em relação à primeira liberação. A liberação de dados mais recente, o Gaia Data Release 3 (GAIA DR3), ocorreu em 2021 (GAIA COLLABORATION *et al.*, 2021), fornecendo dados de posição e magnitude G para mais de 1,8 bilhão de estrelas, mais de 1,5 bilhão de valores de paralaxe e movimentos próprios, mais de 220 milhões de parâmetros atmosféricos estelares, como temperatura efetiva, extinção e avermelhamento para mais de 100 milhões de estrelas.

A fotometria e astrometria de alta precisão contida neste conjunto de dados permitiu a caracterização e a análise mais refinada dos aglomerados estelares, pois a disponibilidade de dados de paralaxe e movimento próprio permitem uma melhor separação das populações estelares dos aglomerados daquelas do campo e ainda permitem a busca por novos objetos por meio deste espaço de parâmetros.

Porém, a separação entre membros fiduciais de aglomerados abertos e estrelas de

campo, em uma região de alta densidade do disco galáctico, é uma tarefa desafiadora. Alguns grupos de pesquisa se dedicam a busca de novos objetos e para isso aplicam ferramentas automatizadas a partir de diferentes algoritmos aos dados do Gaia.

Por exemplo, [CANTAT-GAUDIN *et al.* \(2018\)](#) utilizaram um código de atribuição de associação não-supervisionado, UPMASK ([KRONE-MARTINS e MOITINHO, 2014](#)), para procurar por aglomerados abertos no espaço astrométrico a partir de dados do Gaia, obtendo parâmetros astrométricos médios e distâncias para mais de 1200 aglomerados abertos conhecidos e relatando a descoberta de 60 novos aglomerados abertos. ([CASTRO-GINARD *et al.*, 2019](#)) encontraram 53 novos aglomerados abertos usando um algoritmo de agrupamento não-supervisionado, baseado em densidade, DBSCAN. [LIU e PANG \(2019\)](#) detectaram 2443 candidatos a aglomerados de estrelas usando um algoritmo de agrupamento no espaço astrométrico 5-D ($\ell, b, \varpi, \mu_\alpha^*, \mu_\delta$), atribuindo 76 dos objetos encontrados como sendo de alta confiança e os demais como novos candidatos a aglomerados abertos. Mais recentemente, [CASTRO-GINARD *et al.* \(2020\)](#) descobriram 582 novos aglomerados abertos, aplicando um algoritmo de agrupamento não-supervisionado para encontrar sobredensidades no espaço astrométrico 5-D. Finalmente, [FERREIRA *et al.* \(2020, 2021\)](#) reportaram a descoberta de 60 novos aglomerados de baixo contraste em campos densos, na direção do bojo Galáctico, a partir de processos dedicados de filtragem de dados fotométricos e astrométricos para realçar a presença dos aglomerados no espaço de movimentos próprios.

Este movimento de descoberta e exploração de centenas de aglomerados na Via Láctea ainda não foi visto nas Nuvens de Magalhães. A dificuldade em utilizar os dados do Gaia para realizar a descontaminação de aglomerados das MCs está relacionada ao elevado grau de incerteza nos parâmetros astrométricos, bem como à ausência de contrastes bem definidos no espaço astrométrico entre os dados dos aglomerados e os do campo galáctico. Esses desafios são consequência da grande distância heliocêntrica dos alvos estudados. Para contornar tais limitações, é imprescindível aplicar procedimentos de descontaminação baseados em fotometria, como o algoritmo utilizado neste trabalho, que permite a separação eficiente da população estelar dos aglomerados e do campo galáctico.

2.3 Bandas fotométricas

Dentre os diferentes filtros disponíveis na instrumentação do telescópio SOAR, o projeto VISACACHA utiliza primariamente os filtros B, V e I do sistema Johnson-Cousins, pois possuem ampla utilização na literatura e permitem uma comparação significativa com as bandas do sistema GAIA (G, G_{BP}, G_{RP}). O sistema fotométrico Johnson, proposto por Johnson e Morgan na década de 1950, foi o primeiro sistema padronizado de fotometria estelar em banda larga. Originalmente projetado com os filtros U (ultravioleta), B (azul) e V (visual), esse sistema permitiu a comparação uniforme de observações

fotométricas realizadas em diferentes observatórios e épocas (JOHNSON e MORGAN, 1953). Posteriormente, o sistema foi ampliado por BESSELL (1990) através da adaptação e incorporação dos filtros R e I, centrados em comprimentos de onda no vermelho (COUSINS, 1976; KRON e SMITH, 1951), formando o sistema Johnson-Cousins UBVRI, amplamente utilizado em estudos de evolução estelar e aglomerados abertos.

Embora não sejam completamente equivalentes, os sistemas Gaia e JohnsonCousins abrangem faixas semelhantes do espectro óptico, o que facilita a análise conjunta de propriedades estelares fundamentais, como temperatura, idade e extinção interestelar. A Tabela 2.2 lista a cobertura espectral de cada um dos filtros fotométricos usados neste trabalho, também ilustrada visualmente na Figura 2.3.

Tabela 2.2: Bandas fotométricas utilizadas nos catálogos VISCACHA e GAIA.

Catálogo	Banda	Comprimento de onda (nm)
VISCACHA	B	380–500
	V	500–600
	I	750–900
GAIA	G_{BP}	330–680
	G_{RP}	630–1050
	G	330–1050

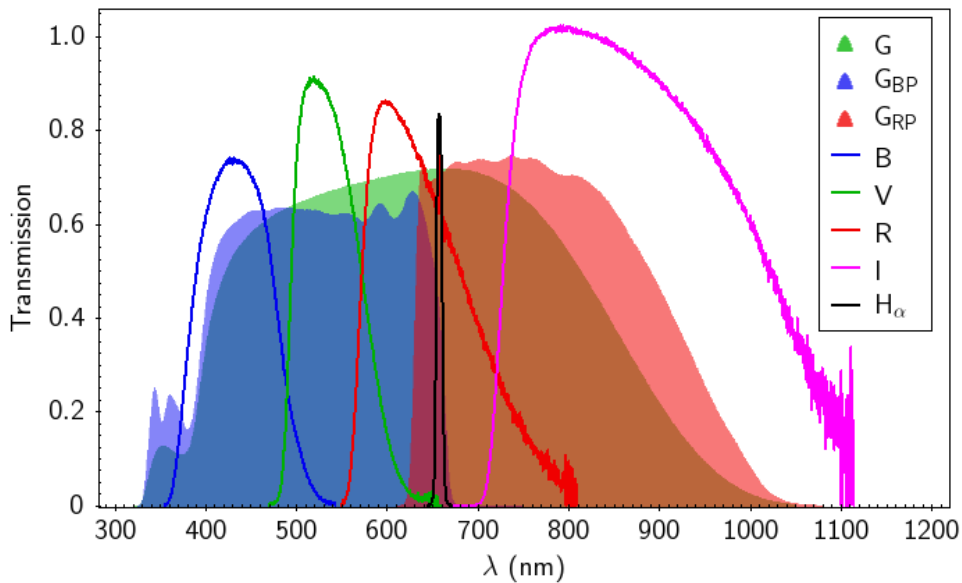


Figura 2.3: Bandas fotométricas do GAIA e do VISCACHA. Observa-se que as bandas do Gaia abrangem uma faixa espectral mais ampla em comparação com as bandas utilizadas no VISCACHA.

2.4 Modelos de evolução estelar PARSEC

Neste trabalho, utilizamos extensivamente os modelos de isócronas PARSEC (PAдова and TRIeste Stellar Evolution Code) com o intuito de ajustar as sequências evolutivas dos aglomerados e obter seus parâmetros astrofísicos fundamentais. O conjunto de modelos PARSEC constitui uma das bases mais atualizadas e robustas de trajetórias evolutivas e isócronas estelares disponíveis atualmente. Seu desenvolvimento, liderado pelo grupo de astrofísica de Pádua (Itália), representa uma evolução dos modelos clássicos dessa escola, integrando novos avanços na física estelar (BREISSAN *et al.*, 2012).

Os modelos PARSEC fornecem trajetórias evolutivas que abrangem desde a fase de pré-sequência principal (pre-MS) até a fase de queima de Hélio no ramo das gigantes vermelhas (RGB), incluindo também a fase do ramo assintótico das gigantes (AGB) em versões mais recentes. Os modelos cobrem uma ampla faixa de massas iniciais (de ~ 0.1 até mais de $12 M_{\odot}$), idades (de ~ 1 Myr até ~ 13.5 Gyr) e composições químicas, com frações de metais variando entre $Z = 0.0001$ e $Z = 0.06$.

Além disso, os modelos PARSEC incluem transformações para magnitudes observacionais em diferentes sistemas fotométricos (Johnson-Cousins, SDSS, Gaia, 2MASS, VISTA, etc.), o que os torna especialmente úteis para comparações diretas com levantamentos astronômicos atuais, assim como com dados observacionais obtidos em praticamente qualquer sistema de filtros.

Esses modelos têm sido amplamente utilizados para a determinação de idades, distâncias e metalicidades em estudos de aglomerados estelares, populações Galácticas e extragalácticas, evolução de galáxias e para a análise de dados astrométricos e fotométricos do Gaia (ANGELO *et al.*, 2025; FERREIRA *et al.*, 2025). Adicionalmente, o projeto VISCACHA tem utilizado sistematicamente esses modelos em suas análises de aglomerados das Nuvens de Magalhães (FERREIRA *et al.*, 2024; SAROON *et al.*, 2023), de modo que sua adoção no presente trabalho visa também manter a homogeneidade nesse aspecto.

Exemplos de isócronas no diagrama de Hertzsprung-Russell (HR) são apresentados na Fig. 2.4 para conjuntos com composição química escalada ao Sol, que seguem a relação $Y = 0.2485 + 1.78Z$, onde Y é a fração de Hélio.

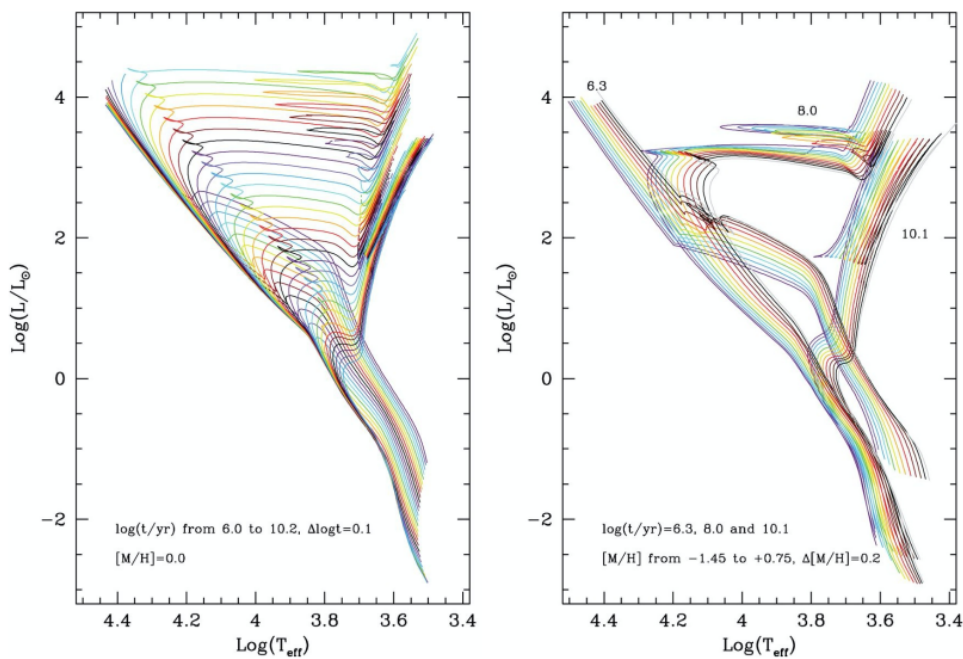


Figura 2.4: Isócronas teóricas no diagrama HR. Painel esquerdo: uma seqüência de isócronas com metalicidade solar para idades que vão desde $\log(t/\text{ano}) = 6$ até 10.2 , em intervalos igualmente espaçados de $\Delta \log t = 0.1$. Painel direito: três seqüências de isócronas para uma idade fixa e metalicidades variáveis. As idades são $\log(t/\text{ano}) = 6.3, 8.0$ e 10.1 . A seqüência de metalicidades vai de $[M/H] = -1.45$ até $+0.75$ em intervalos igualmente espaçados de $\Delta[M/H] = 0.2$.

Capítulo 3

Metodologia

As imagens astronômicas são geralmente compostas por uma grande variedade de objetos celestes projetados ao longo da linha de visada do detector. Quando maior a profundidade astrométrica da imagem, mais objetos celestes serão registrados. Assim, o primeiro passo na análise de aglomerados é geralmente o processo de seleção de membros, já que nem todos os objetos registrados nos catálogos fotométricos estarão, necessariamente, associados fisicamente ao sistema estelar de interesse.

Recentemente, com o advento da missão Gaia, foram desenvolvidos métodos mais precisos para realização de seleção de membros. Tais métodos se utilizam de parâmetros astrométricos, como movimento próprio e paralaxe, para selecionarem amostras com alta probabilidade de pertencimento ao aglomerado (e.g. [ANGELO *et al.*, 2019](#); [CANTAT-GAUDIN *et al.*, 2018](#); [FERREIRA *et al.*, 2020](#)). Entretanto, dada a grande distância das Nuvens de Magalhães, as medições astrométricas do Gaia apresentam erros significativos que limitam sua confiabilidade. De forma geral, apesar de os movimentos próprios conseguirem distinguir os movimentos globais de grande amplitude nas Nuvens de Magalhães, como rotação do disco da LMC e o movimento relativo entre LMC e SMC, eles não têm precisão suficiente para distinguir assinaturas mais sutis como o movimento relativo dos aglomerados estelares em relação ao campo galáctico, ou a cinemática interna dos aglomerados. A paralaxe é ainda mais limitada, sendo praticamente não informativa na escala de distância das Nuvens de Magalhães. Desta forma, os parâmetros astrométricos do Gaia não devem ser usados como referência no processo de determinação de membros, como frequentemente ocorre em aglomerados da Via Láctea. Assim precisamos recorrer a métodos fotométricos para determinar as probabilidades de adesão de membros.

Para a descontaminação de estrelas de campo e seleção de membros nos CMDs, utiliza-se um código baseado em informações fotométricas, desenvolvido inicialmente a partir do método proposto por [BONATTO e BICA \(2007\)](#) e posteriormente modificado por [MAIA *et al.* \(2010\)](#). Esse algoritmo combina a análise fotométrica com a distribuição espacial das estrelas, permitindo atribuir a cada estrela uma probabilidade de pertencimento ao aglomerado. Com o passar do tempo, a metodologia foi refinada, resultando em um aumento

significativo na precisão da identificação de membros genuínos e, conseqüentemente, na qualidade dos parâmetros astrofísicos obtidos.

Apresentamos o procedimento de descontaminação apenas para o aglomerado NGC 456, uma vez que o processo é bastante semelhante para os demais aglomerados analisados neste estudo. O processo foi realizado separadamente sobre os dados do levantamento VISCACHA e sobre os dados do catálogo Gaia. Os CMDs descontaminados (i.e. contendo majoritariamente membros do aglomerado) serão então analisados conjuntamente nos capítulos seguintes.

3.1 Seleção de campo

Os dados fotométricos extraídos do catálogo GAIA DR3 são apresentados na parte superior da Figura 3.1. O campo estelar abrange um raio de 15 min de arco, e as estrelas são representadas por círculos cinza cujo tamanho é proporcional ao seu brilho aparente, determinado a partir da magnitude G . A região delimitada por uma circunferência de raio igual a 3 min de arco indica aproximadamente o dobro do raio observado pelo telescópio SOAR (painel inferior da 3.1), no levantamento VISCACHA, onde se concentram as estrelas de NGC 456.

O painel superior 3.1 representa um mapa de distribuição estelar de uma região adjacente à SMC, caracterizada por uma alta densidade estelar. Além disso, foram sobrepostas as posições de objetos extraídos do catálogo de [BICA *et al.* \(2008\)](#), o que permite contextualizar melhor a localização dos aglomerados dentro de um ambiente estelar mais amplo e complexo. Também são identificados os aglomerados abertos NGC 456, NGC 460 e NGC 465, que aparecem visualmente próximos entre si, localizados nas proximidades do centro do campo. No entanto, essa proximidade aparente no plano do céu não implica, necessariamente, uma proximidade física real, uma vez que os aglomerados podem estar situados em diferentes profundidades ao longo da linha de visada, dentro da região conhecida como Ponte de Magalhães.

Na parte inferior da Fig. 3.1 é apresentado o campo estelar observado pelo projeto VISCACHA usando o imageador Goodman do telescópio SOAR, que cobre aproximadamente uma região de 7 minutos de arco de diâmetro. A circunferência traçada, com raio de 1.38 min de arco representa a área delimitada visualmente para o aglomerado NGC 456, onde sua densidade estelar se destaca do campo ao redor.

Para iniciar o método de descontaminação fotométrica, delimita-se primeiramente uma circunferência que engloba as estrelas mais representativas do aglomerado, buscando minimizar a inclusão de estrelas pertencentes a outros aglomerados ou associações estelares próximas. É importante destacar que essa região contém tanto membros genuínos do aglomerado quanto estrelas de campo; entretanto, para fins práticos, nos referiremos a essa seleção como região aglomerado.

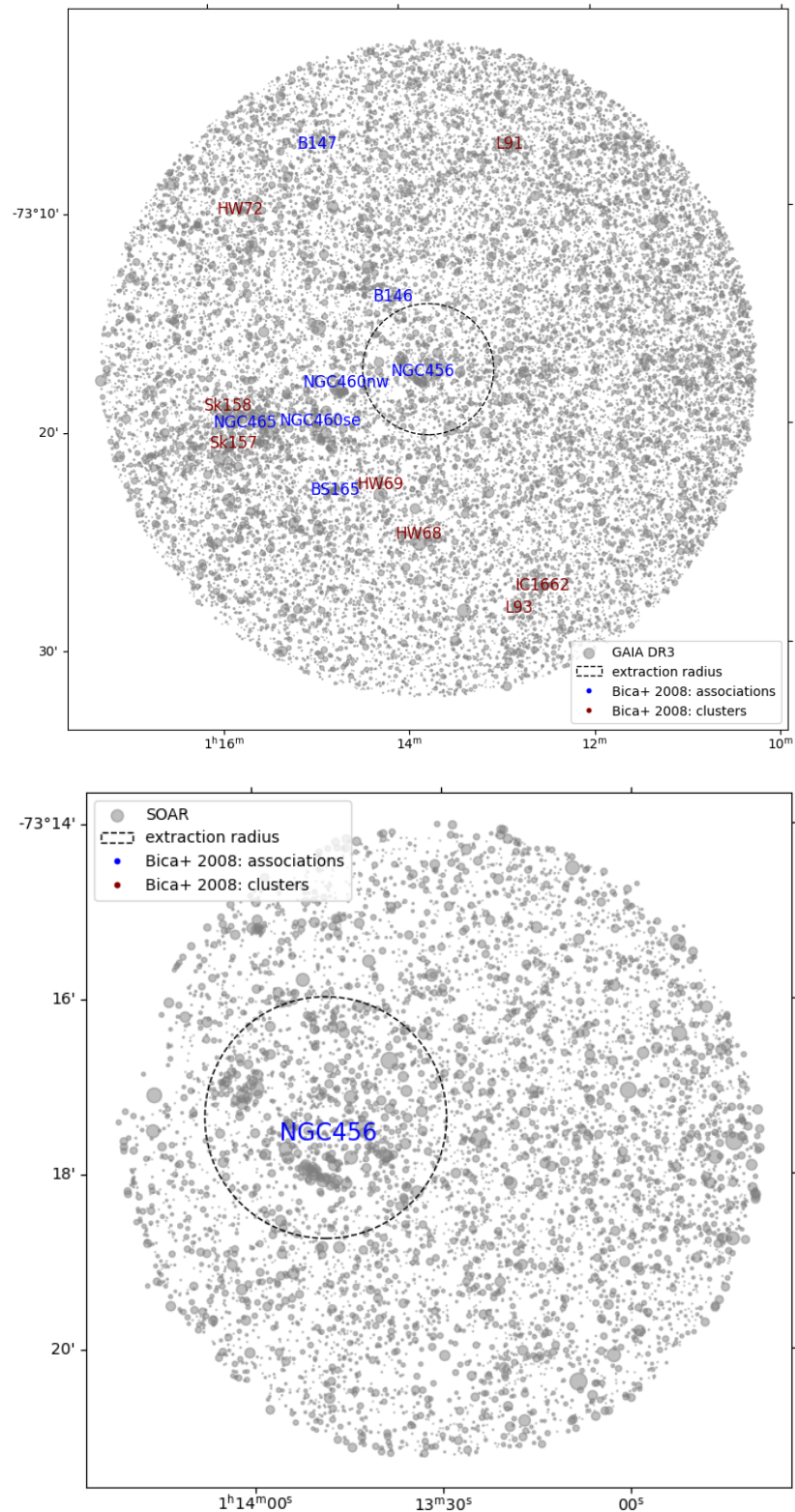


Figura 3.1: Acima: carta celeste do campo extraído do Gaia DR3. Próximo ao centro da imagem encontram-se os objetos de estudo NGC 456, NGC 460 e NGC 465. Outros aglomerados são representados em vermelho e as associações estelares em azul. A circunferência tracejada de 3 min de arco indica aproximadamente o dobro do raio observada pelo telescópio SOAR. Abaixo: carta celeste obtida a partir dos dados do SOAR, a circunferência de raio 1.38' assinala a região observada contendo as estrelas mais representativas do aglomerado (ver texto).

Da mesma forma, define-se uma segunda região, externa ao aglomerado, denominada região de campo, supostamente desprovida de estrelas do aglomerado. Esta funciona como referência comparativa em relação à região do aglomerado e sua escolha deve considerar condições semelhantes de densidade estelar de fundo e de avermelhamento interestelar, a fim de garantir uma comparação válida e representativa. A seleção cuidadosa dessa região é crucial, pois influencia diretamente a eficácia do processo de descontaminação estelar.

Considerando aspectos-chave para otimizar o processo, são apresentadas diversas estratégias para selecionar estrelas de campo que sirvam como referência na remoção de estrelas contaminantes na região do aglomerado:

- **Campos mais distantes:** Oferecem melhores estatísticas devido ao maior número de estrelas disponíveis, porém tendem a ser menos representativos do ambiente físico característico da região em que se encontra o aglomerado.
- **Campos mais próximos:** Representam melhor o ambiente local, pois compartilham condições físicas semelhantes. No entanto, a proximidade aumenta o risco de inclusão de membros reais na amostra de campo, o que pode comprometer a eficácia da descontaminação.

Além disso, o tamanho da região de campo também é um fator determinante: uma área muito grande pode incluir uma contaminação excessiva, enquanto uma região muito pequena, em comparação com o tamanho do aglomerado, pode não conter estrelas representativas suficientes do campo contaminante local.

Nesse contexto, é fundamental alcançar um equilíbrio: definir uma região de campo suficientemente extensa para fornecer uma estatística robusta, mas ao mesmo tempo suficientemente próxima e representativa do ambiente físico do aglomerado. O objetivo principal é maximizar a identificação dos membros genuínos do aglomerado, avaliados por meio da aplicação do algoritmo de descontaminação utilizando-se diferentes regiões do céu como amostras de campo.

3.1.1 Seleção de campo VISCACHA

A Fig. 3.2 compara a região do aglomerado ($1.38'$), selecionada visualmente a partir do centro catalogado e da densidade aparente de estrelas, com 3 campos de controle testados neste trabalho, apresentando diferentes tamanhos e proximidades à região do aglomerado. Devido ao limite do campo de visada do instrumento usado, outras configurações não puderam ser testadas.

As amostras correspondentes à região do aglomerado, assim como às diferentes regiões de campo, estão representadas nos CMDs da Figura 3.3, conforme as localizações indicadas na Figura 3.2. Na parte superior da Fig. 3.3, são exibidos os CMDs da região do aglomerado e do campo B (Fig.3.2), selecionado como melhor campo de controle. O

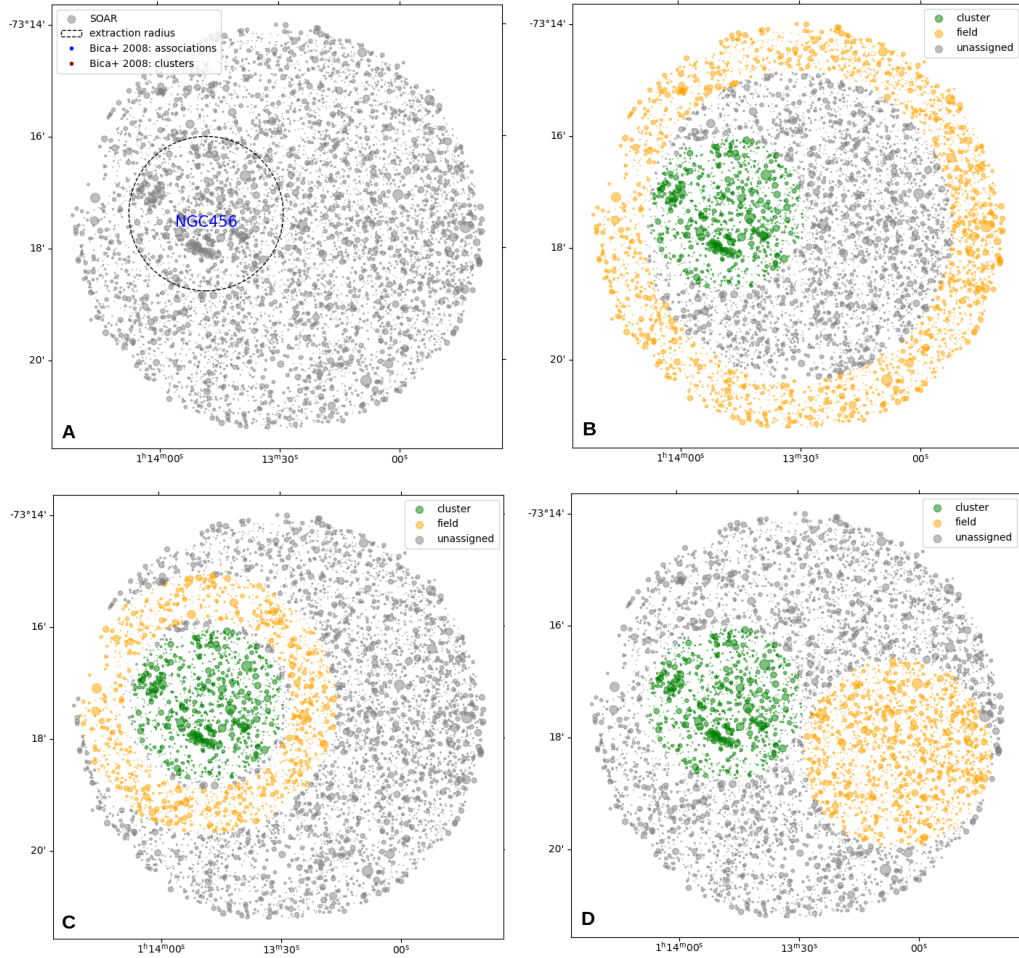


Figura 3.2: Painel superior esquerdo (A): mostra a circunferência que delimita a região do aglomerado NGC 456. Nos demais painéis (B, C e D): apresentam-se os diferentes tipos de regiões de campo (amarelo), usadas como áreas de comparação para o processo de descontaminação. Em todos os casos, a região do aglomerado (verde) também está incluída para referência visual.

primeiro painel apresenta todas as estrelas do catálogo fotométrico, incluindo aquelas que não pertencem nem ao aglomerado nem ao campo de controle. No segundo painel, é mostrada a amostra da região do aglomerado, delimitada por um raio de $1.38'$ em torno do centro catalogado. Nota-se que já é possível identificar claramente a sequência principal do aglomerado. O terceiro painel exibe o CMD da região de campo, que apresenta uma boa semelhança com o do aglomerado na parte inferior do diagrama, o que é crucial para uma boa descontaminação. Esta região cobre uma área 3,3 vezes maior que a do aglomerado, informação importante para a normalização das contagens estelares durante a aplicação do método de descontaminação. Na parte inferior da Fig. 3.3, são mostrados os CMDs da região do aglomerado e da região de campo D (Fig.3.2). Observa-se que o CMD do campo (terceiro painel) exibe uma sequência estelar semelhante à do aglomerado, com uma sobredensidade sobre a sequência principal. Isso pode levar à remoção equivocada de estrelas-membro durante o processo de descontaminação, resultando em

lacunas na sequência principal do CMD e dificultando o ajuste preciso da isócrona. Esse efeito evidencia a importância da escolha criteriosa da região de campo no processo de descontaminação fotométrica.

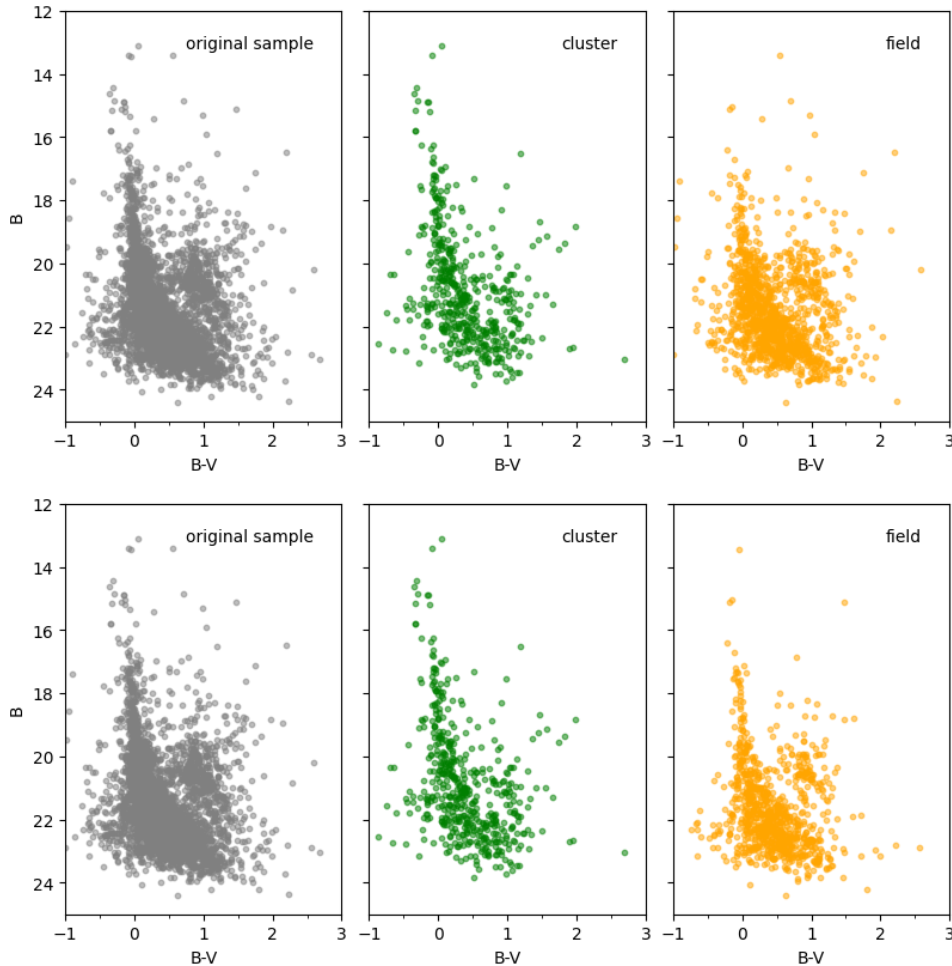


Figura 3.3: Painel superior: CMDs correspondentes ao aglomerado NGC 456. Da esquerda para a direita, são exibidos: a amostra completa, a região do aglomerado e a melhor região de campo identificada (região B da Figura 3.2). Painel inferior: CMDs correspondentes a outra região de campo, identificada como região D na Figura 3.2.

3.1.2 Seleção de campo GAIA

O campo estelar do aglomerado, conforme identificado nos dados do Gaia, é apresentado na Fig. 3.4. À esquerda, destaca-se a região central do aglomerado, delimitada por uma circunferência com raio de 3 min de arco. À direita, essa mesma área é realçada em verde, acompanhada da região de campo mais adequada selecionada para comparação, representada por um círculo com raio de 5,1 minutos de arco.

De forma a tentar minimizar a contaminação de campo inicial na região do aglomerado, aplicamos cortes preliminares no espaço fotométrico (CMD) e de movimentos próprios (VPD - *vector point diagram*), visando remover preventivamente contaminantes óbvios.

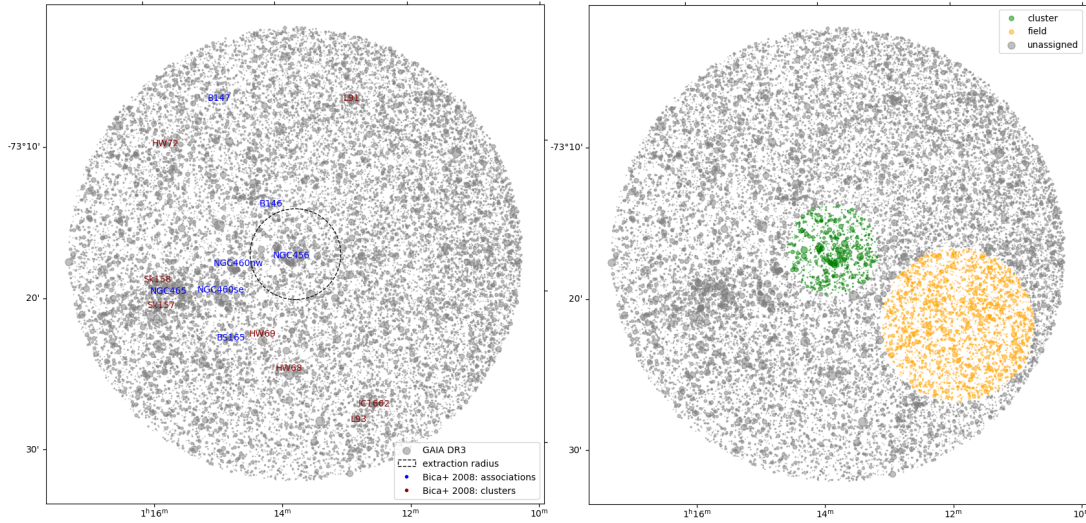


Figura 3.4: Seleção das regiões de aglomerado e campo para NGC 456 usando dados do GAIA. À esquerda é mostrada a região do aglomerado e à direita a região de campo selecionada (amarelo).

Isso garante uma menor fração de contaminação residual (i.e. *outliers*) na amostra final, além de proporcionar uma importante redução no tempo de execução do método.

O corte preliminar aplicado no CMD é demonstrado no painel superior da Figura 3.5, onde estrelas com $G > 20$ ou $G_{BP} - G_{RP} > 0.5$ foram rejeitados da amostra inicial. O corte em magnitude é um pouco mais generoso que o limite típico de completude adotado para dados do GAIA (i.e. $G < 19$), uma vez que buscamos revelar sequências evolutivas na baixa sequência principal, cruciais para o ajuste de isócronas. O corte em cor rejeita grande parte da população de gigantes vermelhas que compõem o campo galáctico, sem comprometer a população jovem dos aglomerados estudados.

O corte preliminar aplicado no VPD é demonstrado no painel inferior da Figura 3.5, onde estrelas fora do intervalo $-3 < \mu_{\alpha} < 5$ e $-5 < \mu_{\delta} < 3$, foram rejeitadas. Esses intervalos abrangem um regime muito mais amplo que o espalhamento típico das estrelas no VPD do aglomerado (painel do meio - note mudança na escala dos eixos) e serve apenas para remover estrelas com movimento radicalmente diferente daquelas nesta região. Nota-se também que, a menos de uma dispersão menor, não há diferença substancial no movimento médio das estrelas quando comparam-se aquelas na região do aglomerado com as do campo. Este comportamento já era esperado e faz com que os movimentos próprios não sejam muito eficientes por si só em uma análise de adesão de membros.

Na Fig. 3.5, as amostras resultantes para a região do aglomerado (painéis do meio) e para a região do campo (painéis da direita) são produto dos cortes preliminares aplicados sobre o CMD e VPD da amostra oriunda da seleção espacial mostrada na Fig. 3.4.

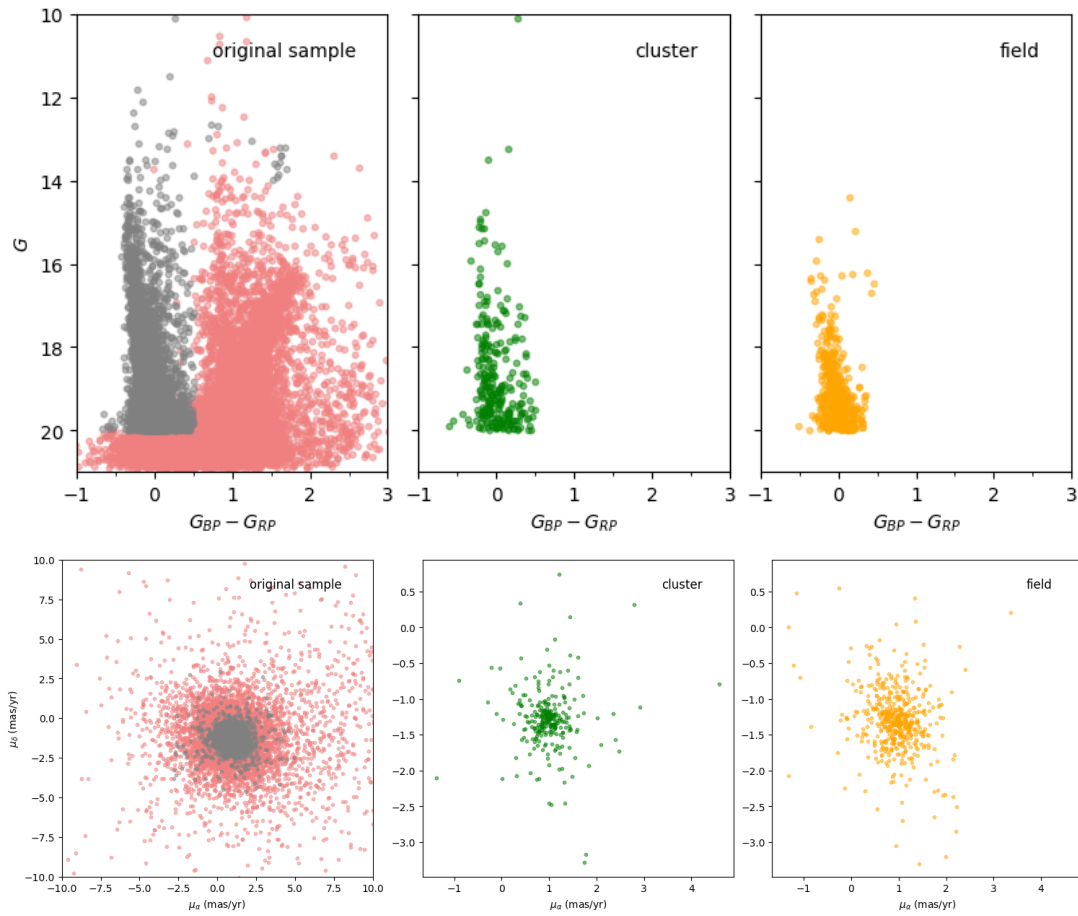


Figura 3.5: Acima: corte preliminar realizado no CMD (esquerda), comparando as amostras resultantes para o aglomerado (centro) e para o campo (direita). Abaixo: corte preliminar realizado sobre o VPD, comparando as amostras resultantes para a região do aglomerado (centro) e do campo (direita). Pontos vermelhos representam as estrelas rejeitadas por quaisquer cortes.

3.2 Descontaminação

O procedimento de descontaminação usado é uma versão atualizada e melhorada do método apresentado em [MAIA *et al.* \(2010\)](#). Os CMDs da região do aglomerado e da região do campo são divididos em pequenas células de tamanho igual, formando uma grade idêntica em ambos os CMDs. Essas dimensões devem ser suficientemente pequenas para captar variações locais na contaminação por estrelas de campo ao longo das diferentes sequências do CMD, mas também grandes o bastante para garantir uma amostra estatisticamente significativa de estrelas em cada célula. Tipicamente, tamanhos próximos ao desvio padrão das magnitudes e índices de cor nas regiões mais densas do CMD apresentam boa performance. Além disso, esses tamanhos devem ser pelo menos dez vezes maiores que as incertezas médias nas magnitudes e cores das estrelas, assegurando assim que os erros fotométricos tenham impacto mínimo ou nulo na posição das estrelas dentro da rede de células. Graças à alta qualidade da fotometria utilizada, essa condição foi

plenamente atendida em todos os catálogos empregados.

3.2.1 Descontaminação VISCACHA

A Tabela 3.1 lista os tamanhos base de células usados para descontaminação de NGC 456, determinados a partir da estatística MAD (*Median Absolute Deviation*) das cores e magnitudes. Conforme veremos mais adiante, o programa automaticamente altera estes valores durante sua execução, testando diferentes tamanhos de células. Assim, o resultado final não é fortemente dependente desta escolha, contanto que os valores iniciais sejam razoáveis.

Tabela 3.1: Tamanho base das células para descontaminação de NGC 456

Eixo	B	$B - V$	$V - I$
Tamanho	1.95	0.69	0.72

Para cada célula dos CMD, contabiliza-se o número de estrelas presentes tanto na região do aglomerado quanto na região de campo. É importante considerar que o CMD da região do aglomerado contém uma mistura de estrelas membros do aglomerado e contaminantes do campo ($N_{\text{clu+fld}}$), enquanto o CMD da região de campo de comparação inclui, majoritariamente, apenas estrelas de campo (N_{fld}). De modo a levar em conta as diferentes áreas amostrais do aglomerado e do campo, uma normalização é aplicada aos valores de N_{fld} . Ou seja, o número de estrelas de campo é corrigido pela razão entre as áreas.

Em seguida, compara-se cada célula do aglomerado com sua célula correspondente na região de campo, ou seja, aquela que ocupa a mesma posição no CMD. Com base nessa comparação, constrói-se uma amostra preliminar descontaminada, na qual é removido da amostra do aglomerado o número de estrela encontradas na amostra de campo. Durante esse processo, a remoção das estrelas em uma célula específica prioriza aquelas mais distantes do centro do aglomerado, partindo da suposição de que têm maior probabilidade de pertencer ao campo. Além disso, nas células onde se detecta uma sobredensidade de estrelas de campo em comparação com a região do aglomerado ($N_{\text{fld}} > N_{\text{clu+fld}}$), considera-se que todas as estrelas dessa célula são contaminantes e, portanto, são completamente eliminadas do CMD do aglomerado.

A Figura 3.6 exemplifica este processo para uma célula do CMD. Utiliza-se como exemplo a célula destacada em vermelho, que permite visualizar a comparação entre o número de estrelas presentes na região do aglomerado e na região de campo. Como parte deste procedimento, atribui-se também um valor preliminar de probabilidade de pertencimento a cada estrela contida em uma célula do CMD do aglomerado. É importante destacar que, mesmo as estrelas removidas do CMD recebem um valor preliminar de probabilidade fotométrica de pertencimento. Esse valor é estimado com base no grau de sobredensidade

de estrelas nessa célula em comparação com a célula equivalente no CMD da região de campo, conforme a relação:

$$P = \begin{cases} \frac{N_{\text{clu+fld}} - N_{\text{fld}}}{N_{\text{clu+fld}}}, & \text{se } N_{\text{clu+fld}} > N_{\text{fld}} \\ 0, & \text{se } N_{\text{clu+fld}} \leq N_{\text{fld}} \end{cases} \quad (3.1)$$

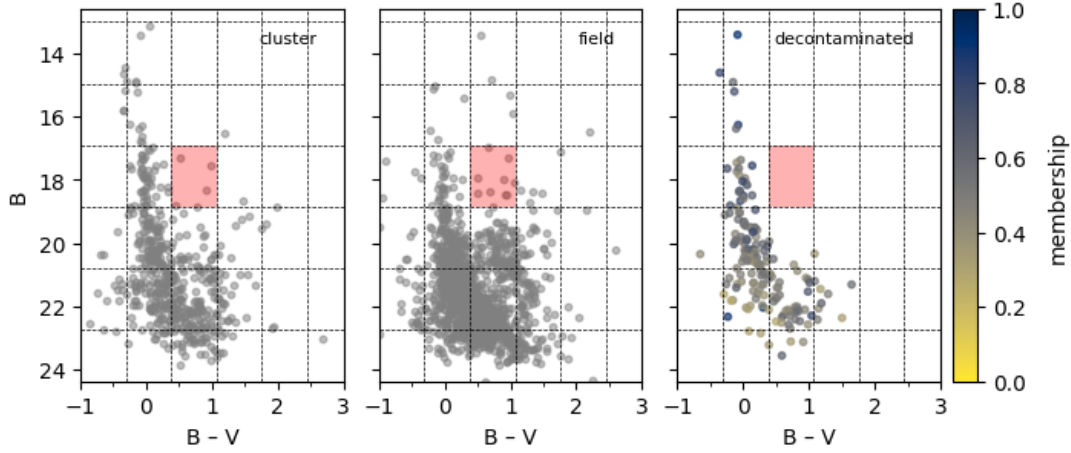


Figura 3.6: CMD que ilustra o processo de descontaminação: A célula destacada em vermelho, permite visualizar a comparação entre o número de estrelas presentes na região do aglomerado e na região de campo. Além disso, inclui-se uma barra de cores que representa a probabilidade de pertencimento atribuída a cada estrela na região do aglomerado.

Para minimizar os efeitos decorrentes da escolha dos parâmetros iniciais, o método é repetido diversas vezes, aplicando diferentes modificações à grade de células. Essas configurações alternativas são geradas a partir de três deslocamentos e três variações no tamanho das células, aplicados ao longo de cada eixo do espaço multidimensional. Assim, o número total de configurações avaliadas pelo método pode ser expresso por:

$$N_{\text{config}} = (N_{\text{deslocamento}} \times N_{\text{tamanho}})^{N_{\text{eixos}}} = 3^{2 \times N_{\text{eixos}}}$$

Dessa forma, para conjuntos dados com 3 eixos (e.g. B , $B - V$, $V - I$), 729 configurações serão geradas, enquanto para conjuntos de dados com 4 eixos (e.g. G , $G_{\text{BP}} - G_{\text{RP}}$, μ_{α} , μ_{δ}), 6561 diferentes configurações de grade são gerados, aumentando exponencialmente o tempo de execução com o número de eixos.

Portanto, são geradas diferentes grades, cada uma com características próprias, o que possibilita obter múltiplos conjuntos preliminares de probabilidades de pertencimento fotométrico, bem como distintas seleções de possíveis estrelas a serem excluídas do CMD do aglomerado. A Figura 3.7 mostra uma destas configurações alternativas da grade sobre os CMDs do aglomerado e do campo. A Figura 3.8 demonstra o processo de descontaminação em uma dada célula desta nova grade.

Assim, ao final do processo, cada estrela na região do aglomerado terá um conjunto de probabilidades atribuídas a ela e poderá ter sido excluída ou não do CMD do aglomerado em cada uma das configurações de grade de células. Estes valores serão usados para se construir índices estatísticos a partir dos quais iremos determinar se a estrela pertence ou não ao aglomerado.

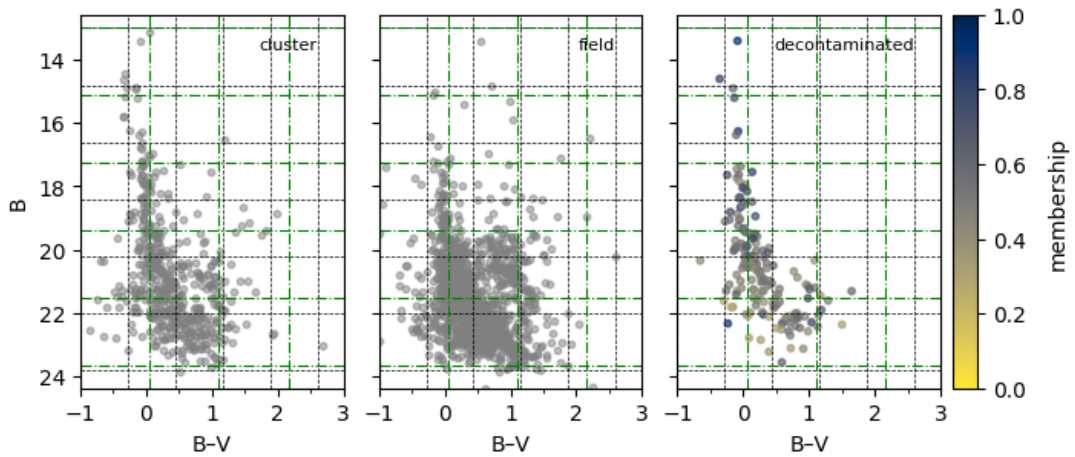


Figura 3.7: Compara-se a malha de células original (em cinza) com uma configuração modificada, na qual foram alterados tanto o tamanho quanto a posição das células (em verde).

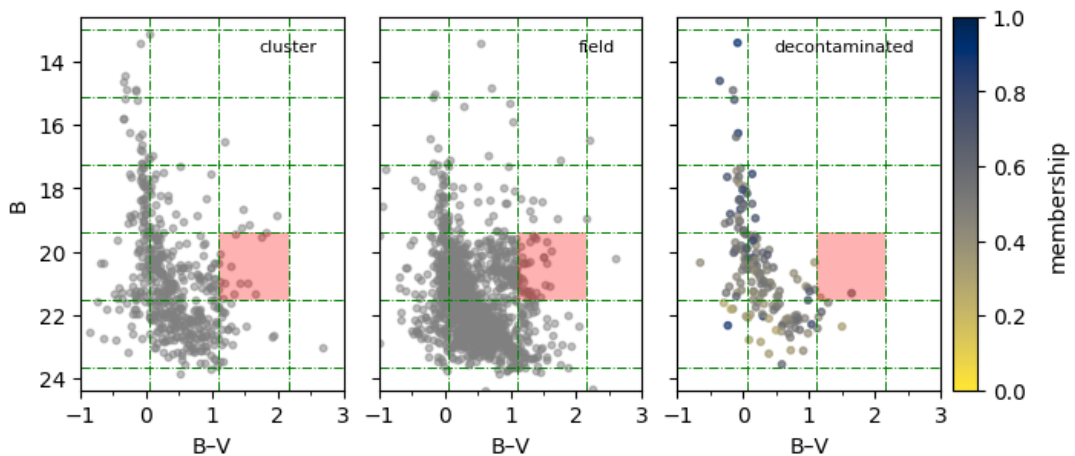


Figura 3.8: A célula destacada em vermelho exemplifica a modificação aplicada no tamanho e na posição das células para gerar uma nova configuração da malha no CMD.

A adição de outras características como paralaxe e/ou movimentos próprios como eixos adicionais neste espaço multidimensional melhora substancialmente a performance do método, quando disponíveis.

3.2.2 Descontaminação GAIA

No caso dos dados do Gaia, os eixos utilizados na descontaminação correspondem a todas as bandas fotométricas disponíveis. Optamos por não empregar as informações de paralaxe, pois estas não são suficientemente informativas para as distâncias das Nuvens de Magalhães, não permitindo distinguir de forma eficaz a população do aglomerado da população de campo. Já os dados de movimento próprio, embora inicialmente possam parecer pouco informativos, foram incorporados à análise por fornecerem um critério adicional de separação. Desta forma, os tamanhos das células obtidos para os dados do GAIA estão apresentados na Tabela 3.2.

Tabela 3.2: Tamanho base das células para descontaminação de NGC 456

Eixo	G	$G_{BP} - G_{RP}$	μ_α	μ_δ
Tamanho	1.50	0.25	1.0	1.0

A Figura 3.9 ilustra o procedimento de comparação entre os CMDs correspondentes ao campo estelar e ao aglomerado. A região destacada em vermelho indica a área analisada, cuja aplicação resulta no CMD final, descontaminado da contribuição de estrelas do campo.

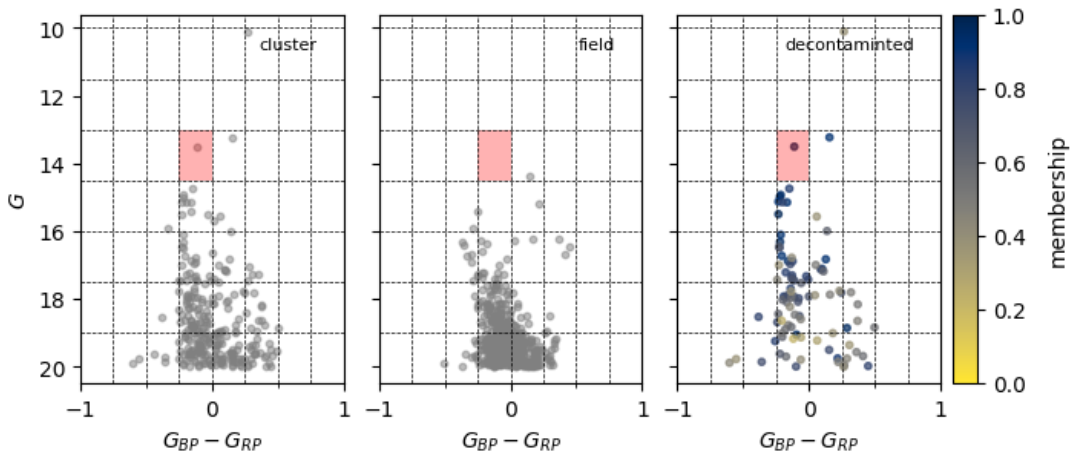


Figura 3.9: CMD que ilustra o processo de descontaminação: Utiliza-se como exemplo a célula destacada em vermelho, que permite visualizar a comparação entre o número de estrelas presentes na região do aglomerado e na região de campo.

Para ambos os processos de descontaminação, o tempo de execução do método depende fortemente do número de configurações de grade a serem testadas.

3.3 Indicadores estatísticos

O processo de descontaminação resulta, para cada estrela, em um conjunto de dados compostos por diferentes (e.g. 729) valores de probabilidade de pertinência e de eventos

onde a estrela foi ou não excluída do CMD, obtidos a partir das diferentes configurações de células aplicadas pelo método. A partir destes valores, focaremos em quatro indicadores estatísticos simples e particularmente relevantes: o índice de exclusão, a dispersão das probabilidades (outliers), a probabilidade máxima e a probabilidade mínima. Cada um deles permite avaliar, sob diferentes perspectivas, o grau de pertencimento de cada estrela ao aglomerado.

Índice de exclusão: é definido para cada estrela no CMD da região do aglomerado, contando o número de configurações nas quais essa estrela foi excluída do CMD do aglomerado durante os processos de descontaminação de campo, e em seguida é normalizado pelo número total de configurações.

$$I_{\text{exc}} = \frac{N_{\text{excluído}}}{N_{\text{total}}} \quad (3.2)$$

I_{exc} : Índice de exclusão de uma estrela específica.

N_{exc} : Número de configurações nas quais a estrela foi excluída.

N_{tot} : Número total de configurações analisadas.

Este índice varia entre 0 e 1, e serve como critério para filtrar estrelas que não pertencem ao aglomerado: aquelas com elevado índice de exclusão (i.e. maior que um determinado limite de corte) são descartadas da amostra final. Dado que em cada passo do processo as estrelas são excluídas das células de acordo com sua distância ao centro do aglomerado, este filtro tende a remover as estrelas periféricas do aglomerado.

Outlier (dispersão): É um indicador que quantifica o quão dispersa é a distribuição de probabilidades de uma dada estrela ao longo de todas as configurações usadas.

A maioria das estrelas verdadeiramente associadas ao aglomerado apresentará valores consistentes e similares das probabilidades obtidas em diferentes configurações. No entanto, para algumas estrelas, o deslocamento ou mudança no tamanho das células altera significativamente a probabilidade obtida, levando a elevadas dispersões. Estas estrelas tipicamente se encontram afastadas das densas sequências evolutivas no CMD, sendo frequentemente consideradas outliers da amostra (e.g. estrelas mais avermelhadas que as demais).

- Um outlier alto significa que essa estrela apresenta um comportamento inconsistente, possivelmente porque não pertence realmente ao aglomerado ou porque é um caso especial (como uma estrela variável ou muito avermelhada).
- Um outlier baixo indica que a estrela se comporta como a maioria, com uma posição estável e coerente no CMD, sendo portanto mais provável que seja um membro real do aglomerado.

Para a seleção final de membros, tipicamente rejeitamos estrelas com valor de dispersão mais elevado que um certo valor de corte, removendo, tipicamente, estrelas mais isoladas (i.e. outliers) nos CMDs.

Probabilidade máxima: Para cada estrela i , a probabilidade máxima de pertinência $P_{\max,i}$ é definida como o valor máximo entre as probabilidades de pertinência obtidas nas diferentes configurações. Onde $P_{i,j}$ é a probabilidade de pertinência da estrela i na configuração j .

$$P_{\max,i} = \max_{1 \leq j \leq N} P_{i,j} \quad (3.3)$$

Para seleção final de membros, tipicamente rejeitamos estrelas com probabilidade máxima inferior a um determinado valor de corte. Este índice é mais efetivo na remoção de estrelas de campo mais brilhantes, como no clump de gigantes ou RGB. Entretanto, como nossa amostra é composta principalmente de objetos jovens, com poucas ou nenhuma estrela, este índice não foi utilizado.

Probabilidade mínima: Para cada estrela i , a probabilidade mínima de pertinência $P_{\min,i}$ é definida como o valor mínimo entre as probabilidades preliminares de pertinência obtidas nas diferentes configurações. Onde $P_{i,j}$ é a probabilidade de pertinência da estrela i na configuração j .

$$P_{\min,i} = \min_{1 \leq j \leq N} P_{i,j} \quad (3.4)$$

Para a seleção final de membros, tipicamente rejeitamos estrelas com probabilidade mínima nula ou menor que um dado valor de corte. Este índice é mais eficiente em remover estrelas de campo nas regiões mais densas do CMD, como a baixa sequência principal.

A probabilidade de pertinência final de cada estrela é tomada como a média de todas as probabilidades preliminares obtidas. Valores mais robustos como a mediana também podem ser empregados, mas não apresentaram diferenças significativas. A amostra final de membros, entretanto, não é determinada por estes valores, mas por cortes segundo os 4 índices estatísticos discutidos anteriormente.

3.3.1 Indicadores estatísticos VISCACHA

Na Fig. 3.10 é apresentada a distribuição destes quatro indicadores (exibidos na parte superior de cada coluna), calculados para todas as estrelas na região do aglomerado (dados VISCACHA). Também são apresentados possíveis correlações entre estes valores estatísticos. A Fig. 3.11 mostra apenas a distribuição dos índices estatísticos, omitindo as

correlações, uma vez que esses índices são mais úteis no momento de aplicar os cortes para determinação de membros e determinar se cada estrela pertence ou não ao aglomerado.

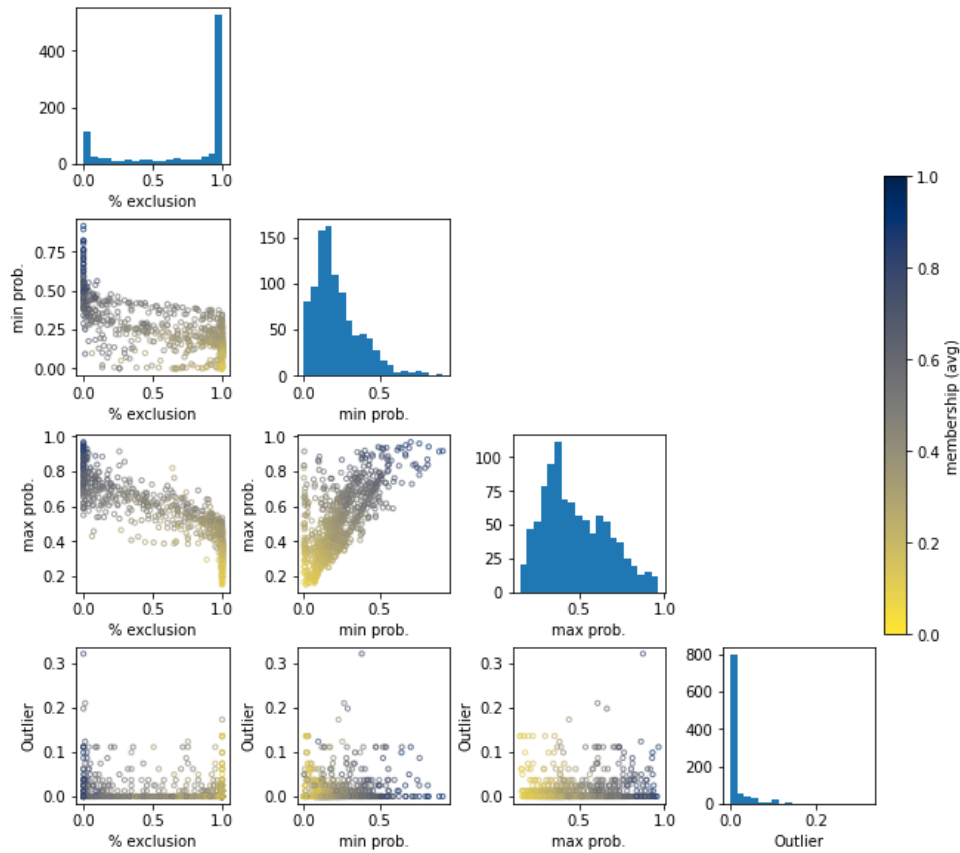


Figura 3.10: Distribuição (histograma superior) e correlação (painéis inferiores) dos índices estatísticos definidos para cada estrela na região de NGC 456. A barra de cor representa a probabilidade de pertinência final de cada estrela.

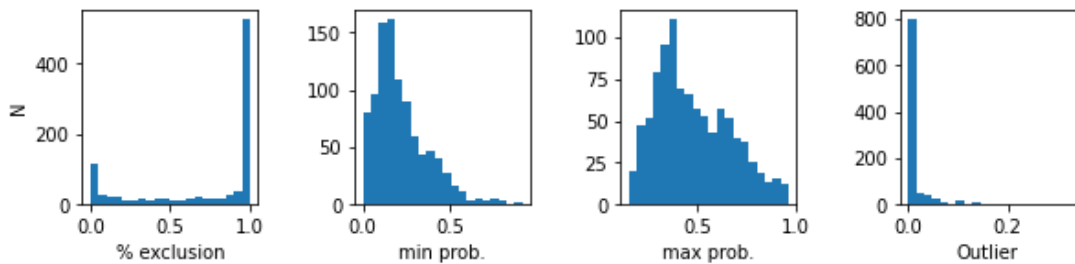


Figura 3.11: Distribuição dos quatro principais valores estatísticos obtidos durante o processo de descontaminação. Os cortes para determinação de membros são realizados sobre estas distribuições.

Em conjunto, esses valores estatísticos constituem a base para a identificação final das estrelas membros do aglomerado. Nesta análise, foram aplicados os seguintes critérios de seleção: um índice de exclusão ≤ 0.95 , uma probabilidade mínima ≥ 0.15 e um valor de outlier ≤ 0.02 . Não foi estabelecido um limite específico para a probabilidade máxima,

pois este índice não se mostrou particularmente efetivo na remoção das estrelas de campo, uma vez que praticamente todas as estrelas apresentaram valores superiores a 20%.

Os valores resumidos podem ser consultados na Tabela 3.3, onde são apresentados os totais de estrelas identificadas como membros neste catálogo. Como resultado, foram identificadas 289 estrelas membros no catálogo VISCACHA, o que corresponde a aproximadamente 30% da amostra original do aglomerado.

3.3.2 Indicadores estatísticos GAIA

A Figura 3.12 apresenta a distribuição dos quatro indicadores estatísticos calculados para todas as estrelas localizadas na região do aglomerado.

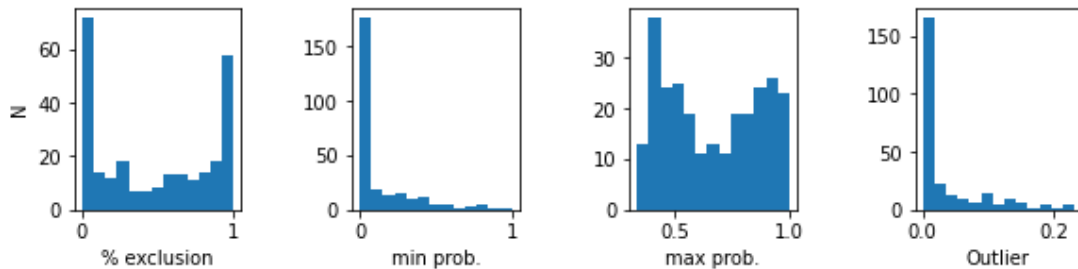


Figura 3.12: Distribuição dos quatro principais valores estatísticos obtidos durante o processo de descontaminação. Os cortes para determinação de membros são realizados sobre estas distribuições.

Nesta análise, foram aplicados os seguintes critérios de seleção: um índice de exclusão ≤ 0.95 , uma probabilidade mínima ≥ 0.01 e um valor de outlier ≤ 0.125 . Novamente, não foi estabelecido um limite específico para a probabilidade máxima, pois este índice não se mostrou particularmente efetivo na remoção das estrelas de campo, uma vez que praticamente todas as estrelas apresentaram valores superiores a 25%.

Os valores resumidos podem ser consultados na Tabela 3.3, onde foram obtidos 93 membros a partir dos dados do Gaia, representando aproximadamente 35% da amostra total. Esta porcentagem não leva em consideração estrelas rejeitadas pelos cortes preliminares aplicados aos dados do Gaia ($\sim 60\%$), de forma que o percentual final de membros oriundos do catálogo Gaia é ainda menor.

Por fim, são apresentados os membros estelares identificados a partir do processo de descontaminação aplicado a ambos os catálogos.

Tabela 3.3: Número de estrelas membros identificadas em ambos catálogos

Catálogo	Nº Membros	Total	Percentual (%)
VISCACHA	289	962	30.04
GAIA	93	265	35.09

3.4 Ajuste da Isócrona

Isócronas são um dos produtos dos modelos de evolução estelar, compondo um conjunto de pontos ou uma sequência no diagrama Hertzsprung-Russell, que representa uma população de estrelas de diferentes massas, mas de mesma idade e composição química. Sua transformação para o espaço observacional, normalmente realizada pelos próprios modelos para uma série de filtros, permite sua representação nos CMDs em diferentes sistemas fotométricos.

Neste sentido, isócronas podem ser facilmente usadas para caracterizar os aglomerados estelares, compostos por estrelas nascidas de um mesmo evento de formação estelar, apresentando idade e composição química similar, mas diferentes massas. Seus parâmetros físicos (i.e. distância, idade, avermelhamento interestelar) e químicos (i.e. metalicidade) podem ser determinados a partir do ajuste de isócronas sobre as estrelas previamente identificadas como membros no CMD.

Para a caracterização dos aglomerados estudados neste trabalho, foram utilizadas isócronas da grade de modelos do grupo PARSEC (BREISSAN *et al.*, 2012), transformadas especificamente para os filtros Johnson-Cousins, empregados pelo levantamento VISCA-CHA, e para os filtros utilizados pela Missão Gaia (curvas de transmissão fotométrica disponíveis no site da ESA/GAIA).

Alguns dos parâmetros iniciais necessários para o ajuste da isócrona como idade, metalicidade, avermelhamento e módulo de distância geralmente são obtidos a partir de estudos prévios realizados na mesma região. Por exemplo, a distância média da Pequena Nuvem de Magalhães é de aproximadamente 62 kpc (módulo de distância 19.0 GRACZYK *et al.*, 2020) e sua metalicidade média é de aproximadamente $[Fe/H] = -1.0$ dex (CHOUDHURY *et al.*, 2018). Embora esses valores não sejam totalmente representativos da distância e metalicidade dos aglomerados, eles fornecem uma estimativa inicial útil do intervalo em que os parâmetros do ajuste devem se situar. Utilizar essas referências é altamente vantajoso, pois permite iniciar o processo com uma base sólida e direcionada. Caso contrário, o ajuste se torna mais complexo e demorado, exigindo múltiplas tentativas sem uma orientação clara. Quanto mais informações forem consideradas previamente ao ajuste, melhor será o resultado. Esses vínculos iniciais reduzem a degenerescência das soluções.

O estudo de OLIVEIRA *et al.* (2023) foi particularmente relevante, pois analisou e caracterizou 33 aglomerados abertos localizados nessa mesma região do céu. Seu trabalho identificou aglomerados jovens, com idades inferiores a 200 milhões de anos, metalicidades variando entre 0.5 e 0.1 dex, e módulos de distância no intervalo de 18.6 a 18.9. Além disso, pesquisas anteriores, como as de PIATTI *et al.* (2015) e BICA *et al.* (2015), serviram de base para essa análise, apresentando parâmetros em intervalos similares. Em conjunto, esses estudos oferecem uma visão ampla e coerente das condições físicas e químicas dos aglomerados estelares nessa região da Ponte de Magalhães. Entretanto, nenhum destes

trabalhos prévios analisou especificamente a região ou os alvos abordados neste trabalho.

Durante o ajuste da isócrona, é fundamental que ela represente adequadamente os membros estelares, de modo que atravesse regiões ou estrelas-chave do aglomerado e siga a distribuição de seus membros no CMD. Entre os pontos essenciais que a isócrona deve reproduzir, destacam-se:

1. Estrelas no *turn-on*.
2. A sequência principal do aglomerado.
3. Estrelas no *turn-off*.
4. O ramo das gigantes vermelhas (RGB), em particular o RGB clump.
5. O ramo assintótico de gigantes. (AGB).

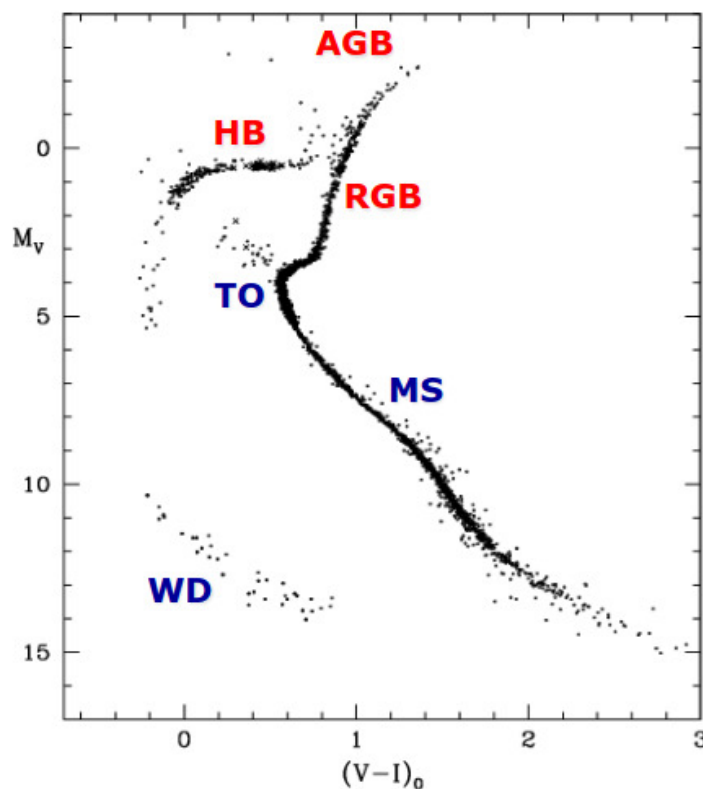


Figura 3.13: Sequência evolutiva estelar que evidencia os pontos fundamentais que a isócrona deve reproduzir para assegurar um ajuste preciso. Extraído de INAF - Astronomical Observatory of Teramo, Italy.

Para um CMD deslocamos a isócrona ao longo do eixo vertical mediante atribuição de sucessivos valores ao módulo de distância, utiliza-se o módulo de distância aparente $(m - M)_{\lambda_1}$, que pode ser transformado em módulo de distância absoluto por meio da equação:

$$(m - M)_0 = (m - M)_{\lambda_1} - \frac{A_{\lambda_1}}{A_V} \cdot R_V \cdot E(B - V). \quad (3.5)$$

onde A_{λ_1}/A_V representa o coeficiente de extinção para o filtro λ_1

Para as bandas fotométricas usadas neste trabalho, os coeficientes de extinção adotados foram retirados da lei de extinção de [CARDELLI *et al.* \(1989\)](#) e estão apresentados na Tabela 3.4. O coeficiente de extinção total para seletiva (R_V), adotado como 3.1, pode ser uma possível fonte de incerteza para a extinção obtida. Na Via Láctea ele pode apresentar valores entre 2.0 e 5.5, sendo 3.1 o seu valor típico ([GEMINALE e POPOWSKI, 2004](#)). Porém, é sabido que em regiões de formação estelar R_V apresenta valores reduzidos, devido às diferentes condições dos grãos de poeira nestas regiões ([ZHANG *et al.*, 2023](#)). Como sua determinação é complexa, necessitando de observações espectroscópicas ou polarimétricas, nos limitaremos a adotar seu valor típico neste trabalho.

Tabela 3.4: Coeficientes de extinção adotados

	Banda fotométrica (λ)					
	<i>B</i>	<i>V</i>	<i>I</i>	<i>G</i>	<i>G_{BP}</i>	<i>G_{RP}</i>
$\frac{A_\lambda}{A_V}$	1.32616	1.00096	0.59893	0.83627	1.08337	0.63439

O deslocamento horizontal (para a direita ou esquerda) é determinado pelo avermelhamento $E(\lambda_2 - \lambda_3)$, o qual se relaciona com $E(B - V)$ da seguinte forma:

$$E(\lambda_2 - \lambda_3) = R_V \cdot E(B - V) \cdot \left(\frac{A_{\lambda_2}}{A_V} - \frac{A_{\lambda_3}}{A_V} \right). \quad (3.6)$$

A melhor combinação de parâmetros astrofísicos idade, metalicidade, módulo de distância e avermelhamento que reproduza de forma coerente a distribuição das estrelas membros no CMD define o melhor ajuste que representa as propriedades físicas e evolutivas do aglomerado.

Nem sempre é possível identificar estrelas em todas as fases evolutivas esperadas de um aglomerado, o que pode limitar a análise detalhada de sua população estelar. Um exemplo dessa limitação é o aglomerado NGC 456, ilustrado na Fig. 3.14, onde se observa a ausência ou escassez de estrelas em estágios evolutivos mais avançados no CMD. Este CMD é o resultado do processo de descontaminação de campo e atribuição de pertinência às estrelas na região do aglomerado, representando assim nossa melhor estimativa do seu conteúdo estelar.

Na imagem, é apresentado o melhor ajuste obtido para a isócrona, representada pela curva laranja. Embora o aglomerado não apresente estrelas significativamente evoluídas, o ajuste foi realizado com base no ponto de *turn-on* das estrelas pré-sequência principal,

localizado na parte inferior da isócrona. Essa região, marcada por uma mudança de inclinação bem pronunciada, apresenta uma sobredensidade de estrelas, o que oferece uma boa referência para posicionar a isócrona de forma mais confiável. À direita da isócrona são indicados os parâmetros físicos correspondentes ao ajuste (como idade, distância, avermelhamento e metalicidade), enquanto a barra de cores representa a probabilidade de pertinência estimado para cada estrela individual.

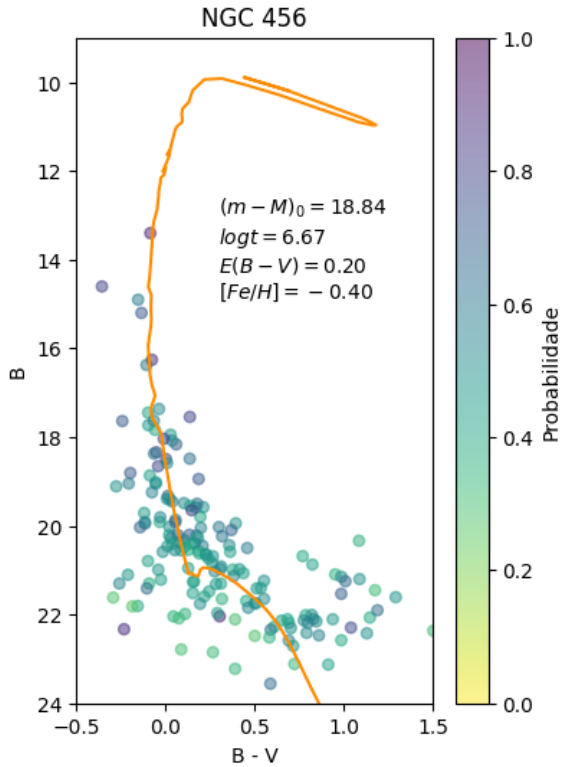


Figura 3.14: Diagrama cor-magnitude (B vs $B-V$) com as estrelas membros de NGC 456. A isócrona, representada na cor laranja, indica o melhor ajuste obtido. Além disso, são apresentados os valores dos parâmetros astrofísicos que melhor descrevem essa população estelar.

Embora o ajuste da isócrona tenha sido satisfatório, a ausência de estrelas na região superior evoluídas no CMD limita a capacidade de determinar sua idade com precisão. Essa falta de restrições nas fases evolutivas mais avançadas permite a existência de múltiplas soluções igualmente plausíveis, ou seja, isócronas com conjunto de parâmetros diferentes, mas que também se ajustam adequadamente aos dados disponíveis. Por isso, é recomendável complementar a análise com a incorporação de informações fotométricas em outras bandas, o que contribui para refinar o ajuste e reduzir as ambiguidades na estimativa dos parâmetros astrofísicos.

Para esse fim, foram utilizados diagramas cor-magnitude adicionais, construídos a partir dos dados do Gaia (G vs. $G_{BP} - G_{RP}$) e do VISCACHA (B vs. $V - I$), os quais foram avaliados em conjunto com o CMD previamente apresentado (B vs. $B - V$). Essa análise fotométrica multi-bandas permite realizar um ajuste mais preciso e robusto da isócrona, ao explorar diferentes características espectrais da população estelar e, conseqüentemente, fornecer melhores vínculos sobre os parâmetros astrofísicos, como ilustrado na Fig. 3.15.

Vale destacar que, em alguns casos, determinadas estrelas não são detectadas em

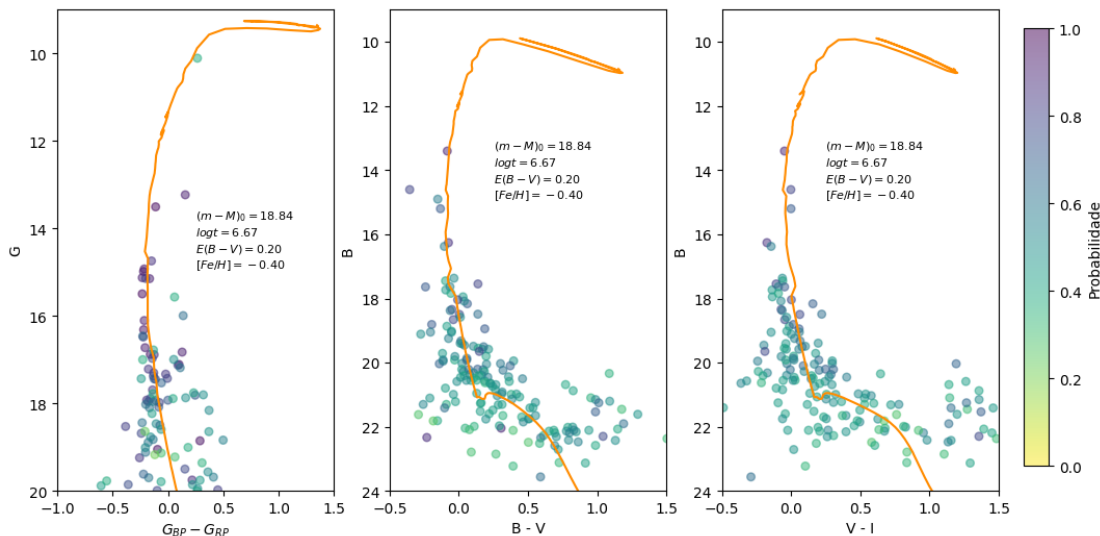


Figura 3.15: CMDs em diferentes bandas fotométricas de NGC 456, com ajustes de isócronas que resultam em parâmetros consistentes de idade, distância e metalicidade.

todos os CMDs, devido às restrições impostas pela delimitação da região do aglomerado ou pela profundidade dos dados analisados. Esse é o caso do CMD do Gaia, que revela a presença de uma estrela brilhante próxima ao ponto de *turn-off* uma característica que não é observável nos diagramas do VISCACHA. Essa estrela, por ser a única claramente mais evoluída e classificada como membro do aglomerado, exerce um papel crucial no ajuste da isócrona, pois a curva teórica deve necessariamente passar por esse ponto.

Assim, ao combinar todas as restrições fornecidas pelos diferentes diagramas cormagnitude, foi possível obter um ajuste mais confiável e representativo para o aglomerado em estudo.

As incertezas associadas aos parâmetros astrofísicos são estimadas a partir da variação máxima admissível em torno dos valores ótimos, dentro da qual o ajuste da isócrona ainda é considerado aceitável. Essa avaliação foca especialmente em regiões-chave do CMD, como o *turn-off*, o *turn-on* e topo da sequência principal, por serem as mais sensíveis e decisivas para uma caracterização precisa do aglomerado. Os limites superior e inferior definidos por essas incertezas são representados pelas isócronas traçadas em vermelho, que delimitam a faixa aceitável do ajuste, conforme mostrado na Fig. 3.16. Vale destacar que essas margens não apenas abrangem adequadamente as regiões evolutivas mais relevantes, mas também compreendem a maioria das estrelas que compõem a sequência principal.

Embora a metodologia empregada para estimar as incertezas neste trabalho seja relativamente simples e prática, ela se mostrou suficientemente adequada para os objetivos propostos. Existem, no entanto, métodos mais robustos e sofisticados, como a análise bayesiana por meio de cadeias de Markov (MCMC), o ajuste por máxima verossimilhança ou técnicas de reamostragem, como o bootstrap, que permitem uma caracterização estatística mais detalhada e rigorosa.

Neste estudo, optou-se por uma estimativa direta, baseada na inspeção visual dos CMDs com base em princípios físicos, devido à sua eficácia em termos de interpretação visual e simplicidade computacional.

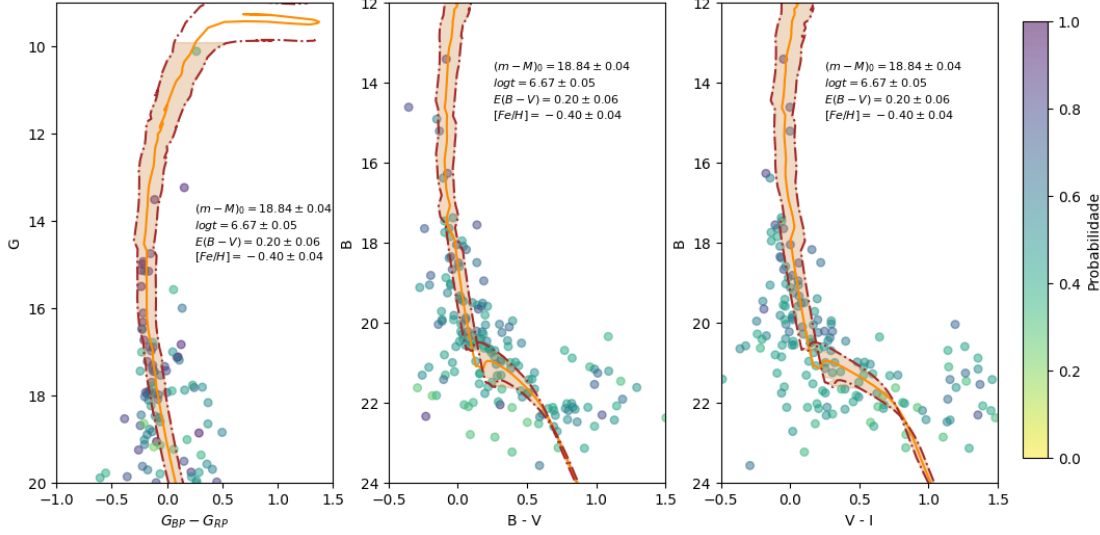


Figura 3.16: CMDs com faixas de incerteza associadas a cada isócrona, as quais abrangem de maneira satisfatória as regiões mais representativas do aglomerado NGC 456.

3.4.1 Extinção

A extinção em uma dada banda fotométrica (λ) pode ser calculada a partir da seguinte equação:

$$A_\lambda = \frac{A_\lambda}{A_V} \cdot R_V \cdot E(B - V). \quad (3.7)$$

onde:

A_V é a extinção na banda V , definida como: $A_V = R_V \cdot E(B - V)$;

R_V é o coeficiente de extinção total para seletiva, adotado como 3.1;

A_λ/A_V é dado pela lei de extinção adotada (coeficiente de extinção, Tabela 3.4);

$E(B - V)$ é o excesso de cor, obtido via ajuste de isócrona.

3.4.2 Distância

A definição do módulo de distância é:

$$(m - M)_0 = 5 \log_{10}(d[\text{pc}]) - 5$$

de onde pode-se obter a distância física correspondente d :

$$d[\text{pc}] = 10^{\left(\frac{(m-M)_0+5}{5}\right)}. \quad (3.8)$$

Com a determinação da distância física do aglomerado, torna-se possível converter suas dimensões aparentes (em coordenadas angulares) para dimensões físicas (em parsecs). No contexto astronômico, onde as distâncias são enormes e as dimensões aparentes pequenas, pode-se usar a aproximação de pequenos ângulos com excelente precisão para determinação das dimensões físicas:

$$L[pc] = d[pc] \cdot \theta[rad]. \quad (3.9)$$

onde:

θ é uma dimensão aparente (e.g. raio de maré) expressa em radianos;

d é a distância física do aglomerado;

L é a dimensão física correspondente.

3.4.3 Idade

Como os aglomerados estelares, especialmente os globulares, podem viver por bilhões de anos, tornou-se comum expressar suas idades em escala logarítmica. Se o valor de $\log t$ for conhecido, basta aplicar a função exponencial para obter a idade real:

$$\text{idade} = 10^{\log t} (\text{anos})$$

3.4.4 Metalicidade

Os modelos de evolução estelar frequentemente expressam a composição química das estrelas a partir da fração de massa do Hidrogênio (X), da fração de massa do Hélio (Y) e da fração de massa dos demais elementos, chamados metais, (Z), de forma que: $X + Y + Z = 1$. Se a massa total do sistema for definida como M , as frações de massa ficam definidas como:

$$X \equiv \frac{m_H}{M} \quad ; \quad Y \equiv \frac{m_{He}}{M} \quad ; \quad Z = \frac{m_Z}{M} = 1 - X - Y \quad ; \quad m_Z = \sum_{e>He} m_e$$

Assim, a composição química dos modelos usados é determinada pela seleção destas frações de massa. Para a grade de modelos de PARSEC, usada neste trabalho, a composição química é selecionada por meio da fração de metais Z ; as frações de He e H são então ajustadas automaticamente pelo modelo segundo as relações: $Y = 0.2485 + 1.78 Z$ e $X = 0.7515 - 2.78 Z$.

A metalicidade, ou abundância de metais, é tipicamente definida por uma notação de colchetes, que compara a incidência de átomos metálicos em relação aos átomos de hidrogênio da estrela investigada (*), com a mesma incidência relativa no Sol (\odot):

$$\left[\frac{M}{H} \right] = \log_{10} \left(\frac{N_Z}{N_H} \right)_* - \log_{10} \left(\frac{N_Z}{N_H} \right)_\odot$$

Ao considerarmos que o peso molecular médio dos elementos metálicos é semelhante nas estrelas e no Sol ($\mu_{Z*} \approx \mu_{Z\odot}$) e que o peso molecular médio do hidrogênio é 1 ($\mu_H = 1$), podemos aproximar a metalicidade por:

$$\left[\frac{M}{H} \right] = \log_{10} \left(\frac{m_Z/\mu_Z}{m_H/\mu_H} \right)_* - \log_{10} \left(\frac{m_Z/\mu_Z}{m_H/\mu_H} \right)_\odot \approx \log_{10} \left(\frac{Z}{X} \right)_* - \log_{10} \left(\frac{Z}{X} \right)_\odot$$

Particularmente, para a grade de modelos de PARSEC, os autores sugerem o uso desta aproximação para cálculo da metalicidade de suas isócronas, usado $X = 0.7515 - 2.78 Z$ e $(Z/X)_\odot = 0.0207$:

$$\left[\frac{M}{H} \right] = \log_{10} \left(\frac{Z}{0.75 - 2.78 Z} \right) - \log_{10}(0.0207) \quad (3.10)$$

Dada as dificuldades observacionais de se medir abundâncias de todos os metais na atmosfera estelar, a metalicidade $[M/H]$ tem sido historicamente aproximada pela abundância do elemento Ferro, expressa pela razão $[Fe/H]$. Por ser um elemento extremamente abundante dentre os metais ele pode, de fato, fornecer uma boa aproximação para a abundância de metais. Convenientemente, o Fe é também um elemento de fácil medição na atmosfera estelar, apresentando uma grande família de linhas espectrais, sendo várias delas no espectro visível. Desta forma, ainda que as isócronas usadas forneçam a metalicidade $[M/H]$, neste trabalho adotamos a nomenclatura $[Fe/H]$ para nos referirmos a metalicidade estelar obtida.

3.5 Perfil radial de densidade estelar

Os perfis radiais de densidade estelar (*radial density profiles* - RDPs) de aglomerados estelares são geralmente modelados com funções analíticas que estão ligados a parâmetros estruturais do aglomerado, como raio de truncamento e parâmetro de concentração. Um dos modelos mais utilizados é o perfil de KING (1962), um modelo empírico que descreve a distribuição de estrelas ao redor do centro do aglomerado. Embora tenha sido originalmente desenvolvido para aglomerados globulares, o perfil de King também é amplamente aplicado no estudo de aglomerados abertos, desde que suas limitações e as particularidades desses sistemas sejam devidamente consideradas. Este perfil é expresso pela seguinte função:

$$f(r) = \sigma_0 \left[\frac{1}{\sqrt{1 + (r/r_c)^2}} - \frac{1}{\sqrt{1 + (r_t/r_c)^2}} \right]^2 + \sigma_{bg} \quad (3.11)$$

onde:

$f(r)$: densidade esperada de estrelas no raio r ;

σ_0 : densidade central de estrelas;

r_c : raio de núcleo;

r_t : raio de maré;

σ_{bg} : densidade do fundo estelar.

Os parâmetros estruturais do aglomerado investigado (σ_0 , r_c , r_t , σ_{bg}) podem ser obtidos ajustando esta função ao perfil radial de densidade estelar, construído a partir da distribuição espacial observada das estrelas.

As incertezas associadas à função de King (Δf) são determinadas a partir das incertezas obtidas para cada um dos parâmetros estruturais ajustados ($\Delta\sigma_0$, Δr_c , Δr_t , $\Delta\sigma_{bg}$) por meio da seguinte equação de propagação de erros:

$$\Delta f(r)^2 = \left(\frac{\partial f}{\partial \sigma_0} \right)^2 \Delta \sigma_0^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial r_c} \right)^2 \Delta r_c^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial r_t} \right)^2 \Delta r_t^2 + \Delta \sigma_{bg}^2$$

$$\Delta^2 f(r) = \left[f(r) \frac{\Delta \sigma_0}{\sigma_0} \right]^2 + \left[\frac{2}{r_c^2} \sqrt{f(r)} \sigma_0 \left(\frac{r^2}{[1 + (r/r_c)^2]^{3/2}} - \frac{r_t^2}{[1 + (r_t/r_c)^2]^{3/2}} \right) \frac{\Delta r_c}{r_c} \right]^2 + \left[\frac{2}{r_c^2} \sqrt{f(r)} \sigma_0 \left(\frac{r_t^2}{[1 + (r_t/r_c)^2]^{3/2}} \right) \frac{\Delta r_t}{r_t} \right]^2 + \Delta \sigma_{bg}^2$$

O perfil radial de densidade estelar é construído a partir da divisão da região do aglomerado em anéis concêntricos de largura uniforme, centrados na posição estimada do centro do aglomerado, conforme ilustrado na Fig. 3.17. Em cada anel (representado em preto), contabiliza-se o número de estrelas contidas em seu interior e calcula-se a densidade superficial, dividindo esse número pela área correspondente do anel.

Além disso, em nossa análise foram construídos perfis adicionais utilizando anéis concêntricos deslocados radialmente pela metade da largura dos anéis originais, representados em azul. Essa estratégia permite uma amostragem mais realista e contínua, abrangendo de forma mais completa toda a região do aglomerado. Dessa forma, facilita-se a detecção de pequenas flutuações na densidade estelar, o que contribui para a obtenção de um perfil mais suave, robusto e representativo da estrutura do aglomerado.

Observa-se, contudo, que em alguns casos há sobredensidades localizadas fora da região central do aglomerado. Essas estruturas secundárias podem impactar negativamente

na estimativa das incertezas dos parâmetros estruturais, além de comprometer a interpretação do perfil radial. Ademais, nem sempre será possível obter um perfil radial confiável, especialmente em aglomerados com distribuição estelar muito fragmentada, como é frequentemente o caso dos objetos jovens. Nesses casos, diversas subestruturas podem situar-se fora da concentração central de estrelas, o que dificulta ou até inviabiliza o ajuste da função de King sobre o perfil observado.

O perfil radial de densidade obtido para NGC 456 é apresentado na Fig. 3.18, onde são mostradas as densidades calculadas para cada anel concêntrico, com suas respectivas incertezas, estimadas através da raiz quadrada do número de contagens (i.e. estatística de Poisson). A maioria dos valores de densidade encontra-se dentro da margem de incerteza definida pelo modelo de King (linhas pretas tracejadas). De forma semelhante, a curva de melhor ajuste (em vermelho) sobrepõe-se à maioria dos pontos de densidade ou permanece dentro de suas margens de erro.

Esse comportamento é consistente tanto para os anéis concêntricos originais quanto para os deslocados. A curva de ajuste (em vermelho) reproduz com especial precisão a distribuição de densidade nas regiões centrais do aglomerado, onde a concentração estelar é maior. Em contraste, na parte inferior da curva observam-se leves flutuações de sobredensidade e baixa densidade que correspondem às regiões mais afastadas do centro do aglomerado. Essas variações abruptas podem refletir a presença de outros objetos próximos ou de sub-estruturas na distribuição estelar do aglomerado, gerando incertezas significativas em seus parâmetros, como mostrado na Tabela 3.5.

Os parâmetros obtidos a partir do ajuste do perfil radial são apresentados na Tabela 3.5. É importante destacar que os erros relativos associados são consideravelmente altos, o que pode dever-se principalmente à morfologia do aglomerado e a possíveis irregularidades, como sobredensidades, na sua distribuição estelar.

Tabela 3.5: Parâmetros estruturais determinados para NGC 456.

	σ_0 (arcmin ⁻²)	r_c (arcsec)	r_t (arcsec)	σ_{bg} (arcmin ⁻²)
	77 ± 31	31 ± 15	181 ± 162	27 ± 1
erro relativo	40.58%	47.18%	89.89%	3.92%

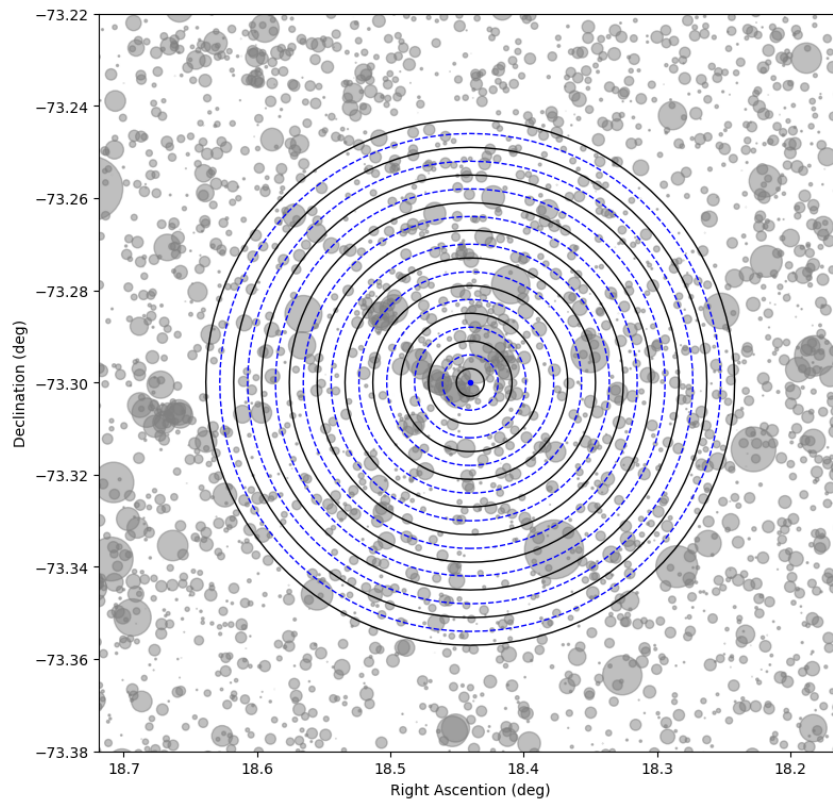


Figura 3.17: Anéis concêntricos usados para calcular o perfil radial de densidade estelar de NGC 456. Os anéis pretos estão deslocados radialmente pela metade da largura dos anéis azuis, o que melhora a resolução do perfil.

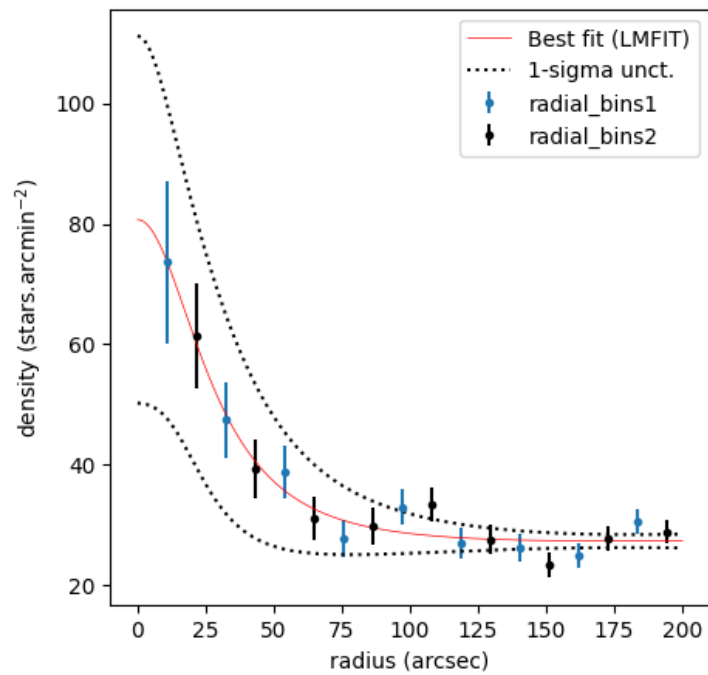


Figura 3.18: Perfil radial de NGC 456 obtido por meio de anéis concêntricos. A curva de ajuste (em vermelho) reproduz a densidade estelar observada, especialmente nas regiões próximas ao centro do aglomerado.

Capítulo 4

Resultados e discussões

Neste capítulo, são apresentados os resultados obtidos para os parâmetros astrofísicos e estruturais dos outros dois aglomerados analisados neste trabalho: NGC 460 e NGC 465. Embora a abordagem metodológica aplicada seja, em essência, a mesma descrita no capítulo anterior, observaram-se diferenças relevantes entre eles, principalmente em relação às características das regiões de campo e à viabilidade de construir perfis de densidade radial. Em alguns casos, a dispersão estelar ou a presença de subestruturas dificultou a obtenção de um perfil confiável.

Ao final desta seção, é apresentada uma tabela compilatória com todos os parâmetros determinados para os aglomerados estudados. Além disso, discutem-se e destacam-se certos aspectos particulares que, dependendo do caso, representaram desafios ou contribuíram positivamente para o processo de ajuste e análise. Finalmente, os resultados obtidos para os aglomerados serão contextualizados no cenário mais amplo da Ponte de Magalhães, o que permite uma compreensão mais profunda tanto do ambiente estelar ao qual pertencem quanto do meio em que se formaram.

4.1 NGC 460

4.1.1 Seleção de Campo

A região delimitada por uma circunferência de 2.88 minutos de arco na Fig. 4.1 corresponde à área do aglomerado estudado, identificada visualmente sobre os dados do Gaia. Observa-se que esse aglomerado é composto por duas sub-componentes estruturais ligeiramente separadas, mas que pertencem ao mesmo sistema. O catálogo de [BICA *et al.* \(2008\)](#) lista estas duas estruturas como NGC 460nw e NGC 460se. Elas foram analisadas individualmente (com os dados do VISCACHA), onde pudemos verificar que ambas apresentam sequências evolutivas praticamente idênticas no CMD. O campo foi selecionado como um anel localizado a 12.67 min de arco de distância do centro do aglomerado, provendo significância estatística e mantendo-se livre de outros objetos catalogados.

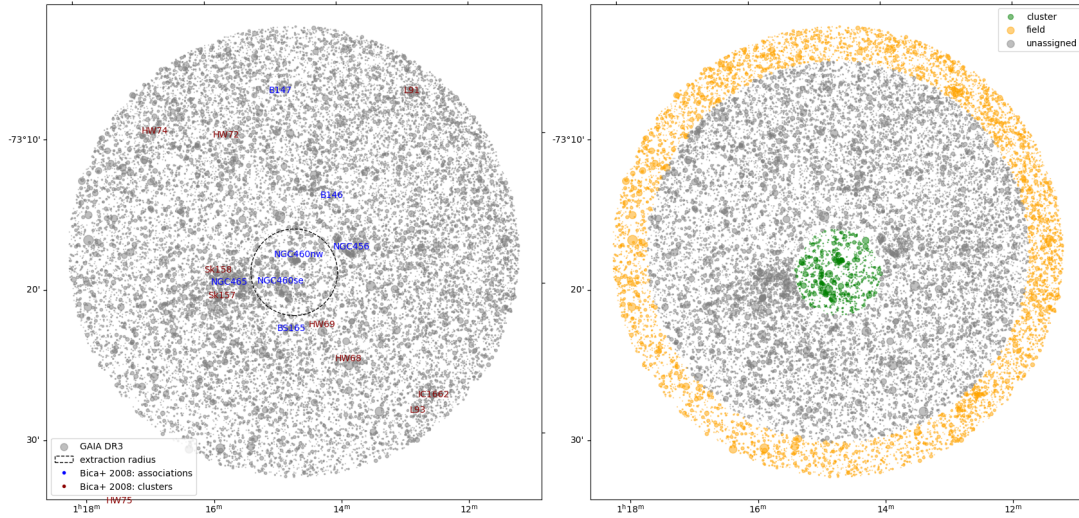


Figura 4.1: Seleção das regiões de aglomerado e campo para NGC 460, nos dados do GAIA. A imagem à esquerda mostra a região que delimita o aglomerado, enquanto a imagem à direita distingue a região do aglomerado (em verde) e a região selecionada para o campo (em amarelo).

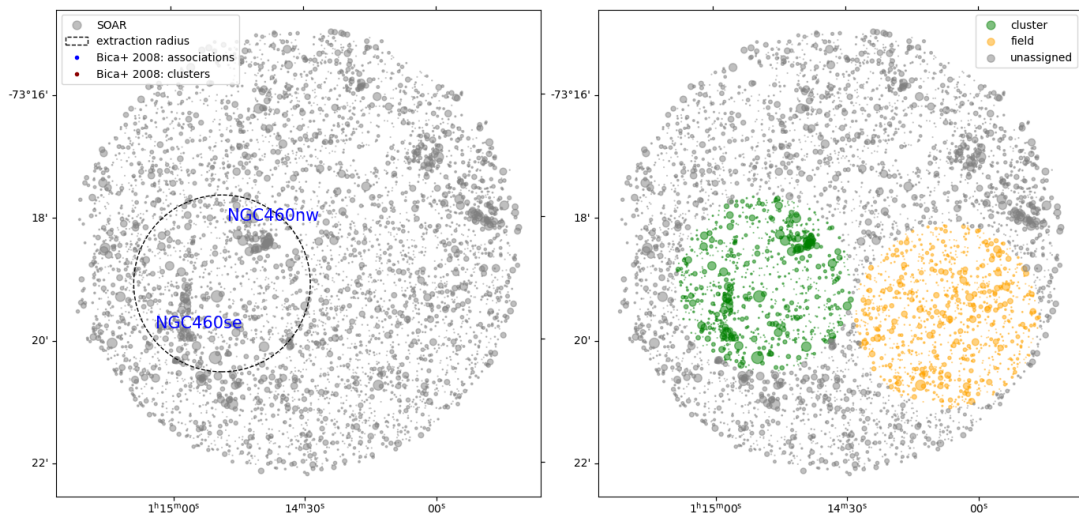


Figura 4.2: Seleção das regiões de aglomerado e campo para NGC 460, nos dados do VISCACHA. A imagem à esquerda mostra a região que delimita o aglomerado, enquanto a imagem à direita distingue a região do aglomerado (em verde) e a região selecionada para o campo (em amarelo).

O campo estelar observado pelo VISCACHA é apresentado na Fig. 4.2. A região correspondente ao aglomerado está delimitada por uma circunferência (à esquerda) e destacada em verde (à direita), abrangendo uma área de aproximadamente 1.44 min de arco. Esta região foi escolhida de forma a englobar as duas sub-estruturas do aglomerado, e representa metade da área definida para o aglomerado nos dados do Gaia. A melhor região selecionada para o campo também está representada, correspondendo a uma região circular adjacente (1.50 min de arco de raio).

Similarmente ao realizado para NGC 456, cortes preliminares também foram realizados sobre os dados do catálogo Gaia na região de NGC 460. Estes cortes removem estrelas com movimentos próprios muito discrepantes e estrelas gigantes vermelhas pertencentes ao campo da SMC. Os cortes aplicados no CMD e VPD foram os mesmos realizados para NGC 456 (ver Sect. 3.1.2). As amostras resultantes, correspondentes à região do aglomerado, à região de campo e à amostra original são apresentadas no CMD da Fig. 4.3, correspondentes aos dados VISCACHA, e na Fig. 4.4, para os dados do Gaia. É possível identificar nos CMDs as estrelas da sequência principal do aglomerado, além de uma população de baixa massa mais avermelhada, que pode corresponder a estrelas pré-sequência principal.

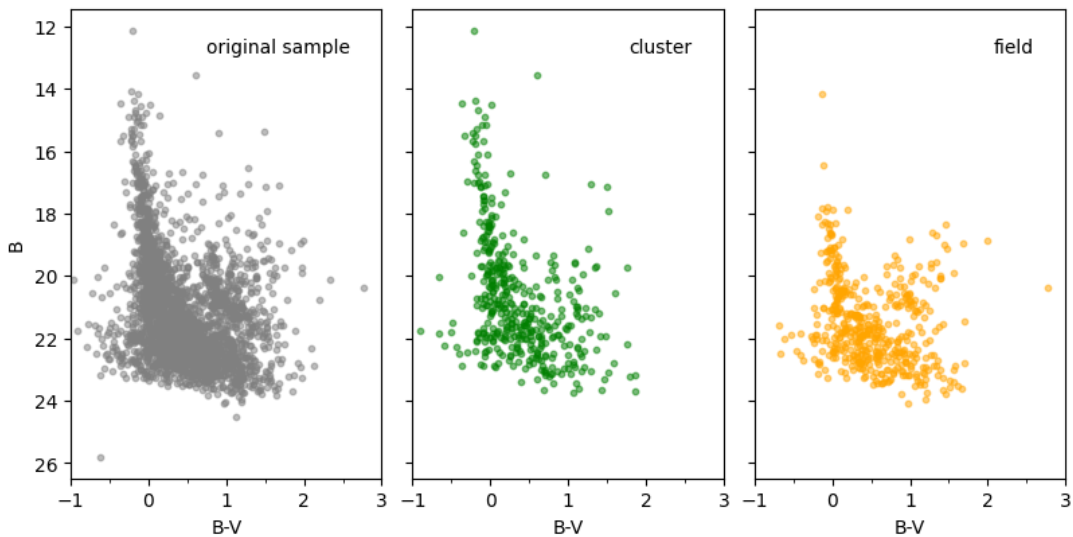


Figura 4.3: CMDs das regiões extraídas para NGC 460 (VISCACHA): à esquerda, o conjunto de todas as estrelas na região estudada; ao centro, a região correspondente ao aglomerado; e à direita, o CMD da região de campo.

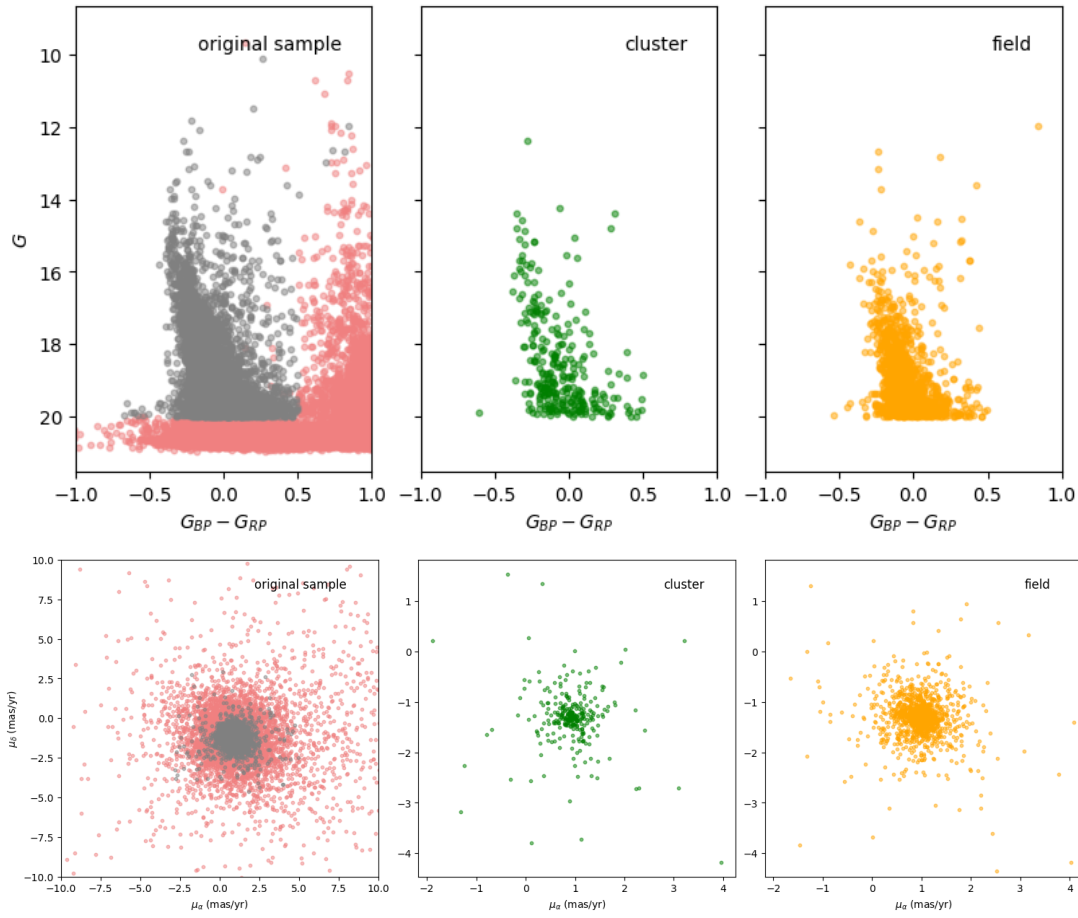


Figura 4.4: Acima: corte preliminar realizado no CMD de NGC 460 GAIA (esquerda), comparando as amostras resultantes para o aglomerado (centro) e para o campo (direita). Abaixo: corte preliminar realizado sobre o VPD, comparando as amostras resultantes para a região do aglomerado (centro) e do campo (direita). Pontos vermelhos representam as estrelas rejeitadas por quaisquer cortes.

4.1.2 Descontaminação

A remoção de estrelas de campo de NGC 460 foi realizado usando exatamente os mesmos procedimentos descritos anteriormente para NGC 456. Os tamanhos de células obtidos para cada um dos eixos usados no processo estão apresentados na Tabela 4.1, tanto para os dados do VISCACHA (à esquerda) quanto para os dados do Gaia (à direita), e correspondem a aproximadamente $2\text{-}\sigma$ da dispersão dos dados no referido eixo.

O processo de descontaminação gera uma distribuição de probabilidades para as estrelas, a partir da qual derivamos quatro indicadores estatísticos. Esses indicadores são apresentados na Fig. 4.5, para os dados do Gaia (painel superior) e do VISCACHA (painel inferior). A partir da análise desses gráficos, estabelecemos os seguintes critérios de corte para determinação dos membros de NGC 460: $P_{\min} > 0.02$, $I_{\text{excl}} < 0.95$ e $I_{\text{outlier}} < 0.10$ para os dados do GAIA e $P_{\min} > 0.03$, $I_{\text{excl}} < 0.95$ e $I_{\text{outlier}} < 0.10$ para os dados do VISCACHA.

Tabela 4.1: Tamanho das células usadas na descontaminação de NGC 460.

Banda	Tamanho	Banda	Tamanho
B	2.16	G	1.50
B–V	0.73	$G_{BP}-G_{RP}$	0.25
V–I	0.81	μ_α	1.00
		μ_δ	1.00

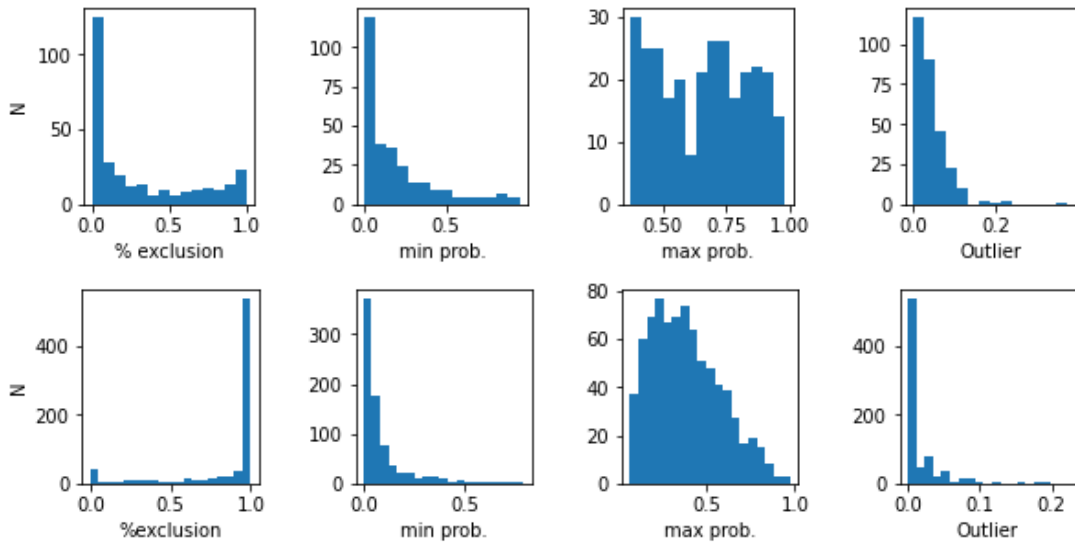


Figura 4.5: Distribuição dos indicadores estatísticos de NGC 460 para as estrelas da amostra do GAIA (painel superior) e do VISCACHA (painel inferior).

Finalmente, obtém-se o número de estrelas membros em cada um dos catálogos utilizados, assim como a porcentagem que esses membros representam em relação ao total de estrelas na região selecionada do aglomerado, conforme apresentado na Tabela 4.2.

Tabela 4.2: Número de estrelas membros identificadas em NGC 460.

Catálogo	Nº Membros	Total	Percentual (%)
VISCACHA	188	788	23,86
GAIA	181	293	61,77

4.1.3 Ajuste de Isócrona

A Figura 4.6 mostra os CMDs resultantes do processo de descontaminação, contendo os membros mais prováveis de NGC 460. Sobre estes diagramas foram realizados ajustes de isócronas simultâneos, i.e. visando obter um conjunto auto-consistente de parâmetros ao longo de todos os diagramas, procedimento que é mais robusto do que o ajuste individual realizado sobre um único diagrama. O ajuste ótimo está representado nos diagramas, bem como os parâmetros obtidos.

As incertezas associadas aos parâmetros astrofísicos são estimadas com base nas variações máximas admissíveis em torno dos valores ótimos, dentro das quais o ajuste da isócrona ainda é considerado satisfatório, conforme ilustrado na Fig. 4.7.

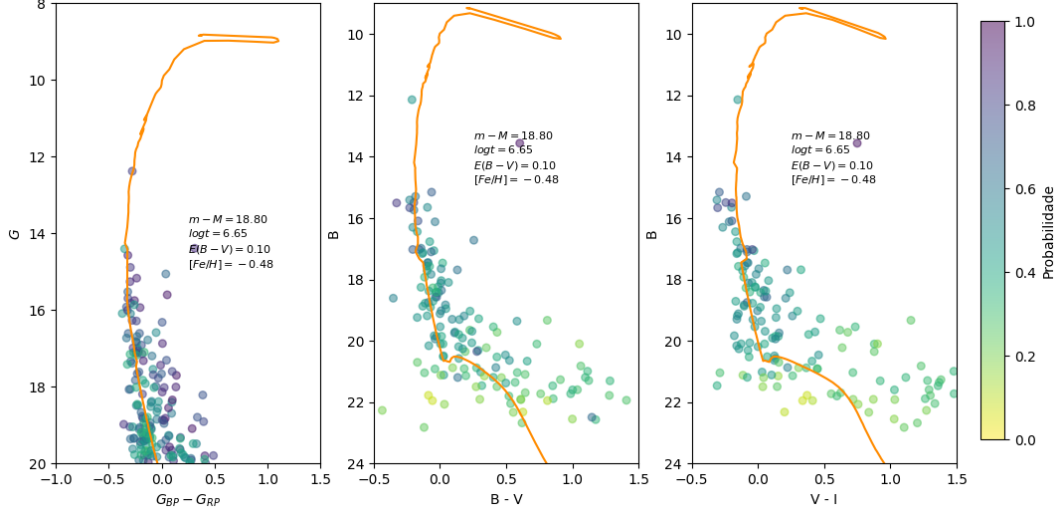


Figura 4.6: CMDs em diferentes bandas fotométricas para NGC 460, com ajustes de isócronas que resultam em parâmetros consistentes de idade, distância e metalicidade.

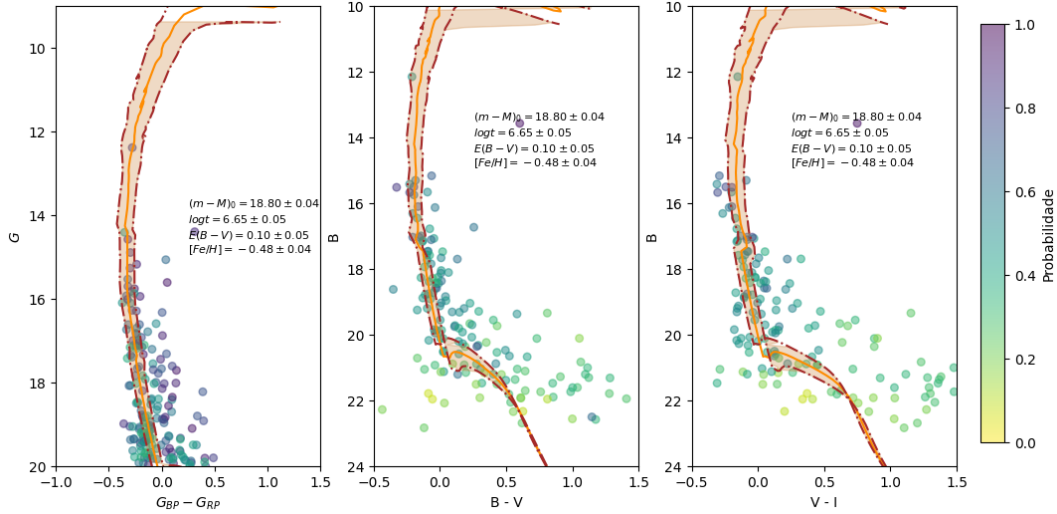


Figura 4.7: CMDs com faixas de incerteza associadas a cada isócrona, as quais abrangem de maneira satisfatória as regiões mais representativas do aglomerado NGC 460.

4.2 NGC 465

Diferentemente dos demais aglomerados investigados, NGC 465 ainda não foi observado pelo projeto VISCACHA. Como ele também integra a região de formação estelar estudada neste trabalho, sua investigação é de extrema importância para uma melhor compreensão da região. Desta forma, seu procedimento de análise será realizado exclusivamente com os dados do GAIA.

4.2.1 Seleção de Campo

O campo estelar do aglomerado é mostrado na Fig. 4.8. À esquerda, observa-se a região do aglomerado, delimitada por uma circunferência com raio de 2.7 min de arco, enquanto à direita é apresentada essa mesma região destacada em verde, juntamente com a região de campo selecionada, representada por um anel marcado em amarelo, localizado 12.42 min de arco afastado do centro do aglomerado.

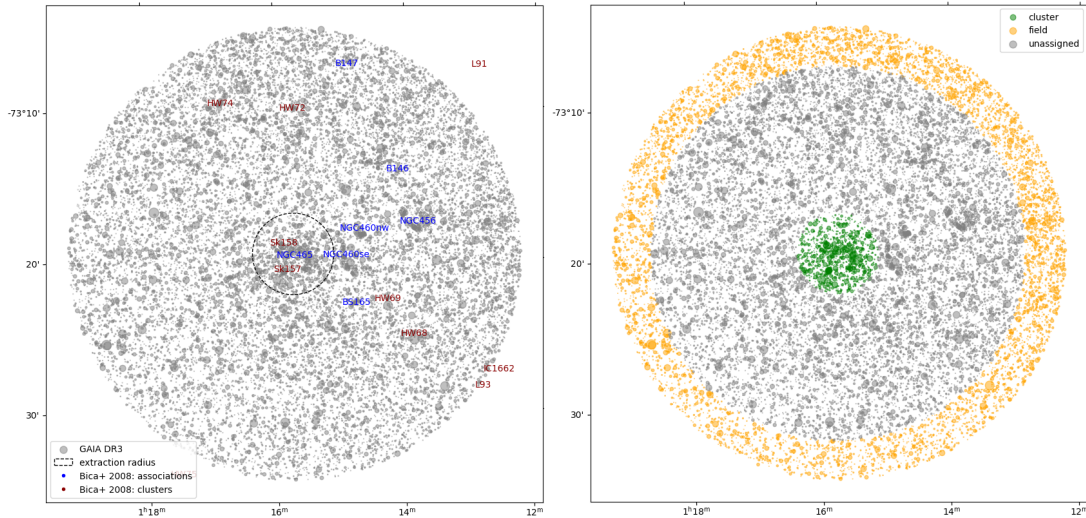


Figura 4.8: Seleção das regiões de aglomerado e campo para NGC 465. À esquerda é mostrada a região do aglomerado e à direita a região de campo selecionada (amarelo).

Corte preliminares também foram realizados sobre os movimentos próprios e magnitudes G dos dados GAIA de NGC 465, usando os mesmos procedimentos e valores descritos na Sect. 3.1.2, com o objetivo de excluir objetos que claramente não correspondem às características esperadas da população do aglomerado. A ação destes cortes sobre a amostra original dos dados é exibida na Figura 4.9, onde as amostras resultantes para o aglomerado e para o campo são comparadas no CMD (painéis superiores) e no VPD (painéis inferiores).

O CMD do aglomerado apresenta uma sequência principal bem definida e populada, contendo um número substancialmente maior de estrelas quando comparada aos outros dois aglomerados analisados. Além disso, não se nota a presença extensiva de estrelas avermelhadas, em especial no regime de baixas massas, como foi o caso dos outros casos estudados. Estes fatores indicam que pode-se tratar de um sistema mais massivo e mais evoluído.

4.2.2 Descontaminação

As amostras definidas para a região do aglomerado e do campo foram empregadas no processo de descontaminação descrito anteriormente. A Tabela 4.3 apresenta os tamanhos

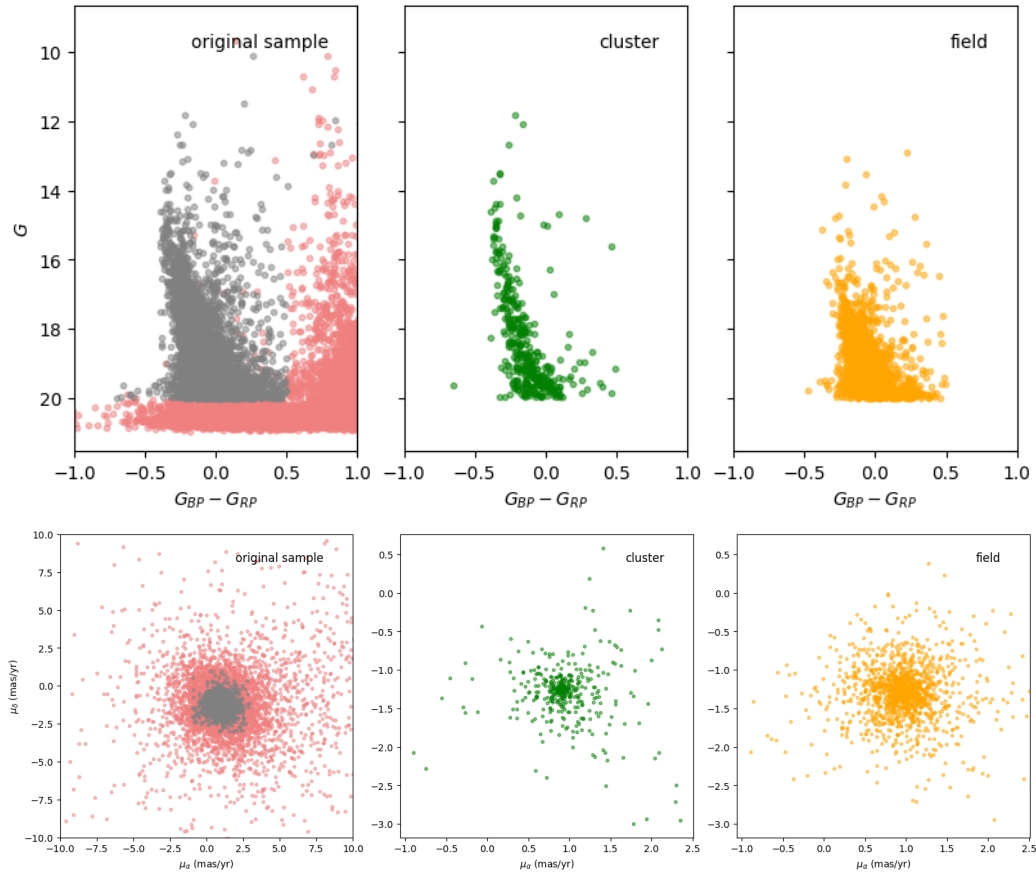


Figura 4.9: Acima: corte preliminar realizado no CMD de NGC 465 (esquerda), comparando as amostras resultantes para o aglomerado (centro) e para o campo (direita). Abaixo: corte preliminar realizado sobre o VPD, comparando as amostras resultantes para a região do aglomerado (centro) e do campo (direita). Pontos vermelhos representam as estrelas rejeitadas por quaisquer cortes.

base para as células de cada eixo empregado no processo, correspondentes a aproximadamente $2\text{-}\sigma$ da distribuição de dados do respectivo eixo.

Tabela 4.3: Tamanho base das células para descontaminação de NGC 465

Eixo	G	$G_{BP} - G_{RP}$	μ_α	μ_δ
Tamanho	1.50	0.25	1.0	1.0

Os índices estatísticos obtidos a partir do processo de descontaminação são apresentados na Fig. 4.10. Com base na análise da distribuição destes índices, foram definidos os seguintes critérios de corte para determinação da amostra de membros: $P_{\min} > 0.01$, $I_{\text{excl}} < 0.95$ e $I_{\text{outlier}} < 0.12$. A porcentagem de membros atribuídos a NGC 465 a partir destes cortes é apresentada na Tabela 4.4.

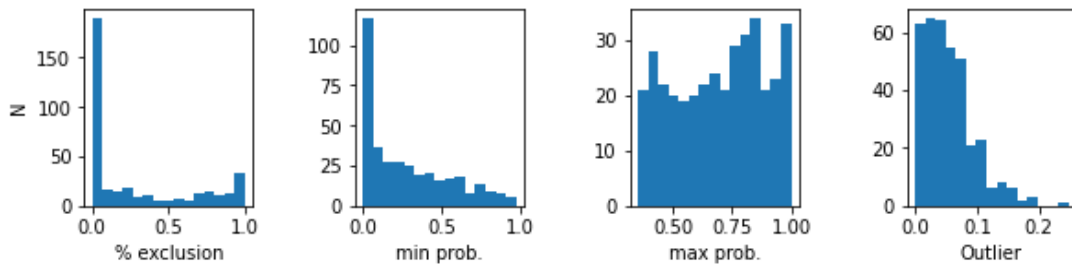


Figura 4.10: Distribuição dos indicadores estatísticos para as estrelas de NGC 465

Tabela 4.4: Número de estrelas membros identificadas para NGC 465.

Catálogo	Nº Membros	Total	Percentual (%)
GAIA	245	368	66,58

4.2.3 Ajuste de Isócrona

Para o nosso aglomerado NGC 465, o ajuste da isócrona é apresentado no painel esquerdo da Figura 4.11. Observa-se que, diferentemente dos ajustes anteriores, a sequência principal apresenta-se mais estreita. Esse comportamento resulta do menor valor de extinção interestelar na direção do objeto, proporcionando um ajuste da isócrona mais preciso e consistente. As incertezas associadas aos parâmetros astrofísicos, apresentadas no painel direito da figura, são estimadas com base nas variações máximas admissíveis em torno dos valores ótimos, dentro das quais o ajuste da isócrona ainda é considerado aceitável.

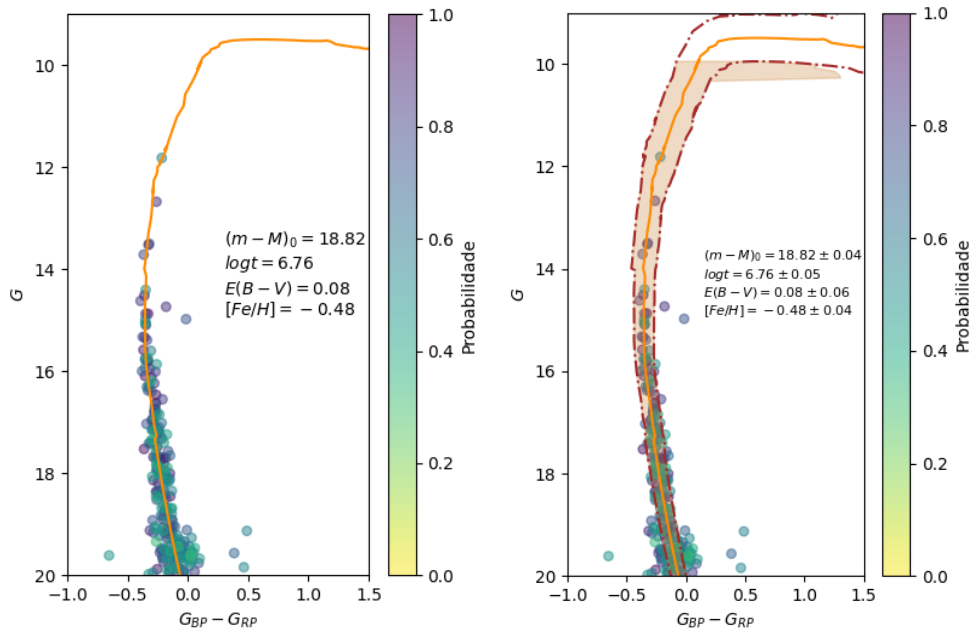


Figura 4.11: Ajuste de isócrona sobre as estrelas membro de NGC 465 (linha sólida), no CMD G vs $G_{BP} - G_{RP}$ com as estrelas membros de NGC 465. As incertezas associadas estão representadas pela linha ponto-tracejada, marcadas pela região sombreada.

4.2.4 Parâmetros estruturais

Os parâmetros estruturais para NGC 465 foram obtidos a partir do ajuste da função de King sobre o perfil radial de densidade construído a partir dos dados do Gaia, de maneira análoga ao que foi feito para NGC 456.

Os anéis construídos para calcular a densidade estelar em função do raio são apresentados na Fig. 4.12. Dois conjuntos de anéis foram usados para contruir o RDP, com largura fixa de 0.48 min de arco, mas deslocados radialmente de metade deste valor.

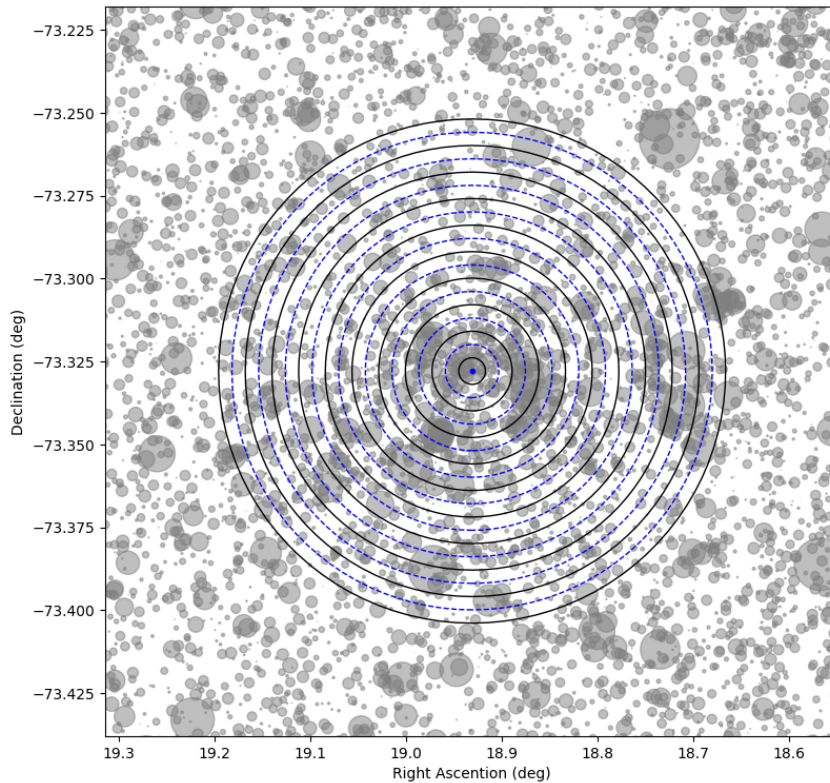


Figura 4.12: Anéis concêntricos usados para construir o perfil radial de densidade estelar de NGC 465. Os anéis pretos estão deslocados radialmente pela metade da largura dos anéis azuis, o que melhora a resolução do perfil.

O perfil radial obtido, apresentado na Fig. 4.13, descreve adequadamente o aglomerado, uma vez que a maior parte dos pontos de densidade encontra-se dentro da faixa de incerteza da função de King, apresentando apenas pequenas variações nas regiões mais distantes do centro. Os parâmetros estruturais obtidos, que descrevem as características do aglomerado, estão apresentados na Tabela 4.5 a seguir.

Nota-se que os parâmetros obtidos apresentam incertezas consideravelmente menores que aquelas obtidas para NGC 456. Isto se deve ao fato de ser uma população mais rica em termos de conteúdo estelar e, aparentemente, mais evoluída, apresentando uma distribuição mais centralmente condensada, que apresenta um contraste mais claro em relação ao fundo do céu.

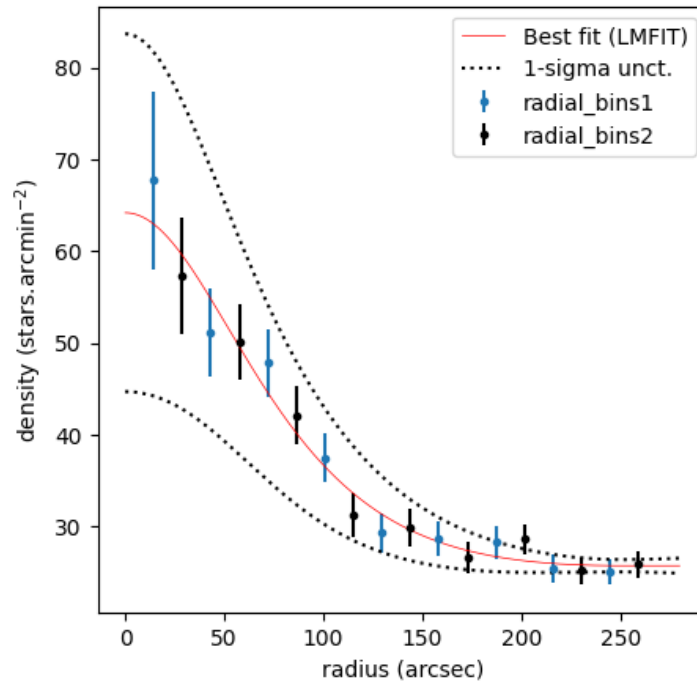


Figura 4.13: Perfil radial de NGC 465 obtido por meio de anéis concêntricos. A linha vermelha representa o melhor ajuste ao perfil radial de densidade; as linhas tracejadas representam a incerteza do ajuste.

Tabela 4.5: Parâmetros estruturais determinados para NGC 465.

	σ_0 (arcmin ⁻²)	r_c (arcsec)	r_t (arcsec)	σ_{bg} (arcmin ⁻²)
	97 ± 37	100 ± 24	251 ± 58	26 ± 1
erro relativo	38.13%	23.68%	22.95%	2.6%

4.3 Resultados finais

Na Tabela 4.6 são apresentados os parâmetros astrofísicos derivados para os aglomerados NGC 456, NGC 460 e NGC 465. Esses parâmetros incluem o excesso de cor $E(B-V)$, a extinção visual A_V , o módulo de distância $(m-M)_0$, a distância d , a idade (expressa como $\log t$ e em milhões de anos), bem como a metalicidade $[Fe/H]$. Esses valores foram obtidos por meio do ajuste de isócronas aos CMDs descontaminados, utilizando fotometria profunda do catálogo Gaia e do projeto VISCACHA.

Por outro lado, a Tabela 4.7 apresenta os parâmetros estruturais obtidos a partir do ajuste do perfil de densidade estelar utilizando uma função de King. Estão incluídos as coordenadas equatoriais (RA e DEC), o raio central r_c e o raio de maré r_t , ambos expressos em parsecs. Esses valores permitem caracterizar a distribuição espacial das estrelas dentro de cada aglomerado e são fundamentais para compreender seu estado dinâmico atual.

Tabela 4.6: Parâmetros astrofísicos dos aglomerados NGC 456, NGC 460 e NGC 465.

Aglomerado	NGC 456	NGC 460	NGC 465
$E(B - V)$	0.20 ± 0.06	0.10 ± 0.05	0.08 ± 0.06
A_V	0.62 ± 0.19	0.31 ± 0.16	0.25 ± 0.19
$(m - M)_0$	18.84 ± 0.04	18.80 ± 0.04	18.82 ± 0.04
d (kpc)	58.6 ± 1.1	57.5 ± 1.1	58.1 ± 1.1
$\log t$	6.67 ± 0.05	6.65 ± 0.05	6.76 ± 0.05
idade (Myr)	4.68 ± 0.54	4.47 ± 0.51	5.75 ± 0.66
[Fe/H]	-0.40 ± 0.04	-0.48 ± 0.04	-0.48 ± 0.04

Tabela 4.7: Parâmetros estruturais dos aglomerados NGC 456, NGC 460 e NGC 465.

Aglomerado	NGC 456	NGC 460	NGC 465
RA (h:m:s)	01:13:45.6	01:14:41.5	01:15:43.2
DEC ($^{\circ}$: $'$: $''$)	-73:18:00	-73:19:12	-73:19:12
r_c (pc)	8.8 ± 4.3	–	28.2 ± 6.9
r_t (pc)	51 ± 46	–	71 ± 16

4.4 Discussão

Foi possível determinar os parâmetros estruturais de 2 dos 3 aglomerados estudados neste trabalho: NGC 456 e NGC 465. NGC 460 apresenta uma distribuição espacial sub-estruturada em dois núcleos próximos, o que impediu um ajuste estatisticamente significativo do perfil de King. De fato, este objeto está catalogado como uma associação estelar com presença de nebulosidade no catálogo de [BICA *et al.* \(2008\)](#), apresentando duas componentes: NGC 460nw e NGC 460se. A presença de nebulosidade e poeira é claramente visível nas imagens obtidas pelo survey VISCACHA e a presença de gás é confirmada pela emissão no filtro H_{α} , conforme pode ser visto na Figura 2.2. A ausência de uma estrutura compacta para NGC 460, implica que ele provavelmente não será capaz de manter uma estrutura gravitacionalmente ligada após a expulsão do gás remanescente, uma vez que é justamente a massa gasosa que deve estar contribuindo para manter o sistema marginalmente ligado.

Os parâmetros estruturais obtidos para NGC 456, apesar das grandes incertezas, estão de acordo com os raios do núcleo e raios de maré reportados por [SANTOS *et al.* \(2020\)](#), para aglomerados da SMC. Os raios encontrados são maiores que os valores médios reportados no trabalho mencionado, mas ainda encontram-se dentro da faixa de valores apresentados. As grandes incertezas associadas aos parâmetros obtidos indicam que possivelmente a distribuição de estrelas não assumiu uma estrutura descrita pelo perfil de King. Isto pode significar que as estrelas mais massivas deste aglomerado ainda não tiveram tempo de migrar completamente do seu local de formação para o centro do potencial gravitacional do sistema e estabelecer uma estrutura centralmente concentrada. Se essa configuração estrutural não for atingida antes da expulsão do gás remanescente, é possí-

vel que o aglomerado não sobreviva e seja destruído conforme o gás escapa de seu meio. Entretanto, o cenário para NGC 456 não é claro.

Sendo o objeto mais populoso dentre os investigados, NGC 465 apresentou um bom ajuste da função de King. Seus parâmetros estruturais apresentaram incertezas moderadas, resultando em um raio do núcleo aproximadamente 10x maior que os valores típicos reportados ($\sim 2-3$ pc) para aglomerados da SMC investigados em [SANTOS *et al.* \(2020\)](#) e raio de maré aproximadamente 3x maiores que os valores típicos reportados (~ 25 pc). Acreditamos que isto significa que o aglomerado está em processo de contração, reajustando sua estrutura após ter sobrevivido ao processo de expulsão do gás remanescente. Isto significa que nos próximos milhões de anos ele deve contrair sua distribuição estelar até atingir as dimensões típicas observadas para os demais aglomerados da SMC.

Na determinação dos parâmetros astrofísicos, conforme mencionado na seção 3.4, a falta de restrições nas etapas evolutivas mais avançadas permite a obtenção de múltiplas soluções igualmente plausíveis ao ajustar isócronas. Uma estratégia para mitigar essa degenerescência consiste no uso de diferentes diagramas cor-magnitude (CMD), em particular aqueles construídos a partir de dados do satélite Gaia (G vs. $G_{BP} - G_{RP}$) e do projeto VISCACHA (V vs. $V - I$ e B vs. $B - V$). A comparação simultânea entre essas distintas combinações fotométricas permite identificar sequências evolutivas que, em um único catálogo, poderiam não prover vínculos suficientes.

No caso específico do VISCACHA, algumas estrelas em fases mais evoluídas podem estar fora da região definida para o aglomerado, devido a limitações de cobertura ou podem estar saturadas. Por outro lado, os dados do Gaia, por cobrirem regiões mais amplas e apresentar um amplo regime de detecção, permitem detectar essas mesmas estrelas, facilitando sua inclusão na análise. Essa complementaridade reforça a importância de utilizar múltiplos CMDs na caracterização astrofísica do aglomerado, possibilitando uma representação mais completa e uma determinação mais confiável de seus parâmetros físicos.

Os resultados obtidos indicam que os três aglomerados estelares analisados apresentam idades relativamente baixas, o que confirma que se tratam de sistemas jovens. Essa hipótese já havia sido considerada desde as primeiras observações, uma vez que alguns desses aglomerados, como NGC 456 e NGC 460, encontram-se imersos em regiões ricas em gás e poeira interestelar característica típica de ambientes de formação estelar recente.

Outra evidência que reforça a juventude desses sistemas é a ausência de estrelas próximas ao ponto de inflexão (turn-off) ou mesmo na ramo assintótico das gigantes (AGB). Essa ausência sugere que ainda não se passou tempo suficiente para que estrelas mais massivas tenham alcançado essas fases, o que é coerente com a baixa idade estimada.

Entre os três aglomerados, o NGC 456 parece ser ligeiramente mais antigo. Sua idade estimada indica que já consumiu e expulsou a maior parte do gás residual remanescente de sua formação, o que explicaria a escassez de material gasoso em suas proximidades,

em contraste com o que se observa em NGC 460 e NGC 465.

As metalicidades encontradas para estes aglomerados são significativamente maiores do que os valores típicos das regiões externas da SMC, indicando que o gás de sua nuvem progenitora sofreu enriquecimento. Este comportamento também foi encontrado por estudos anteriores de aglomerados na Ponte de Magalhães (e.g. OLIVEIRA *et al.*, 2023). O gás poderia ter sido removido das regiões centrais da SMC durante a última colisão entre as Nuvens de Magalhães, aproximadamente 300 Myr atrás. Similarmente, ele poderia ter origem na LMC, que apresenta metalicidade superior à encontrada na SMC, e removido para a atual posição durante a última interação entre as Nuvens. O cenário mais provável, entretanto, é que o gás na Ponte é uma mistura, com componentes oriundas tanto da LMC quanto da SMC, como observado na Corrente de Magalhães (FOX *et al.*, 2013).

A proximidade espacial e a semelhança nas idades sugerem que esses aglomerados provavelmente se originaram a partir de uma mesma nuvem molecular gigante, compartilhando, portanto, uma origem comum. Nesse contexto, o NGC 465 teria atuado como o núcleo principal do processo de formação, acumulando uma maior quantidade de massa gasosa, o que teria favorecido uma evolução mais rápida em comparação aos demais aglomerados do entorno. A semelhança entre as metalicidades e distâncias encontradas para os 3 alvos reforça essa idéia.

Da mesma forma, a presença de outras associações estelares e aglomerados (não abordados neste trabalho) nas proximidades de NGC 465 possivelmente remanescentes da mesma região de formação reforça a hipótese de uma origem coletiva e hierárquica para esses sistemas. É plausível que os aglomerados e associações estelares próximos a NGC 465, que ainda não foram observados ou estudados em profundidade, também tenham se formado a partir da mesma nuvem progenitora.

Esse cenário é compatível com o que se observa em regiões ativas de formação estelar, nas quais uma geração de estrelas pode induzir diretamente o nascimento de novas estrelas e estruturas associadas. Esse processo ocorre por meio de mecanismos de retroalimentação, como a radiação ionizante, os ventos estelares ou as explosões de supernovas, que alteram significativamente as condições físicas do meio interestelar circundante, induzindo a formação estelar mediante o colapso gravitacional de porções adjacentes da nuvem molecular.

Os resultados obtidos para os aglomerados analisados neste trabalho são apresentados a seguir, juntamente com aqueles reportados no estudo mais recente de OLIVEIRA *et al.* (2023), conforme ilustrado na Figura 4.14. Essa representação permite comparar as propriedades derivadas para os objetos investigados com as previamente reportadas para outras populações estelares da região, fornecendo um contexto consistente para a interpretação de suas idades e metalicidades.

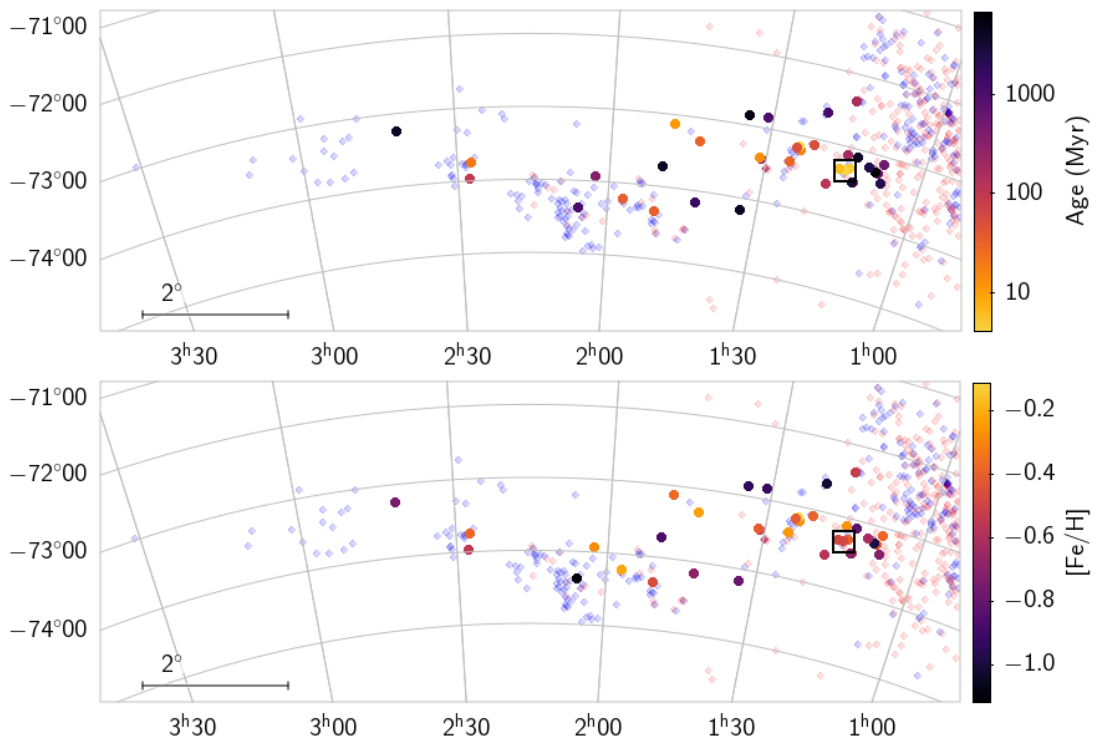


Figura 4.14: Distribuição de idades (acima) e metalicidade (abaixo) dos aglomerados estudados pelo VISCACHA na Ponte. O quadrado preto indica os alvos estudados neste trabalho. Os demais resultados são do trabalho de [OLIVEIRA *et al.* \(2023\)](#). Pontos vermelhos e azuis representam outros aglomerados e associações do catálogo de [BICA *et al.* \(2008\)](#).

Capítulo 5

Conclusões e Perspectivas

Neste trabalho caracterizaram-se os aglomerados estelares NGC 456, NGC 460 e NGC 465, localizados em uma região da Ponte de Magalhães próxima à SMC, através da determinação de seus parâmetros estruturais e fundamentais (idade, distância, metalicidade e extinção interestelar) a partir de dados fotométricos do projeto VISCACHA e da missão espacial GAIA. As análises realizadas levaram aos seguintes resultados principais:

- Os três aglomerados analisados são sistemas jovens, com idades compreendidas entre 4.6 e 5.8 milhões de anos. Notadamente, os aglomerados NGC 456 e NGC 460 ainda se encontram imersos em regiões com presença abundante de gás e poeira interestelar, indicando que a dispersão completa do meio interestelar ao seu redor ainda está em curso. Esse fato é compatível com sistemas em estágios iniciais de evolução dinâmica.
- Os resultados obtidos também mostram que os aglomerados estão espacialmente muito próximos, com distâncias heliocêntricas médias em torno de 58 kpc. Essa proximidade, observada tanto no plano do céu quanto ao longo da linha de visada, sugere uma possível associação física entre os sistemas.
- Suas propriedades estruturais, juntamente com a ausência de estrelas evoluídas nos diagramas cor-magnitude e as estimativas de idade e distância, sugerem uma origem comum para os três aglomerados, possivelmente a partir da fragmentação de uma mesma nuvem molecular gigante. Esse processo teria dado origem à formação quase simultânea dos sistemas, embora com diferenças sutis em seus estágios evolutivos.
- Em particular, o aglomerado NGC 465 apresenta indícios de uma evolução ligeiramente mais avançada e evidências de que já consumiu ou dispersou completamente o material interestelar ao seu redor. Isso pode indicar que ele atuou como o núcleo principal do evento de formação estelar, acumulando uma maior concentração de massa gasosa e, conseqüentemente, evoluindo mais rapidamente em comparação

aos demais aglomerados. Suas propriedades estruturais parecem comprovar este cenário.

- É possível que outros aglomerados e associações estelares localizados nas proximidades de NGC 465, ainda não observados ou estudados em detalhe, também tenham se originado a partir da mesma nuvem molecular progenitora. A investigação futura dessas estruturas poderá fornecer evidências adicionais sobre episódios de formação dos aglomerados.
- Os ajustes dos perfis de densidade estelar permitiram estimar os parâmetros estruturais dos aglomerados NGC 456 e NGC 465. Foram obtidos os valores de raio de núcleo (r_c) de 8.81 ± 4.27 pc e 28.16 ± 6.78 pc, e raios de maré (r_t) de 51.43 ± 46.06 pc e 70.68 ± 16.38 pc, respectivamente. Suas distribuições espaciais parecem sugerir que NGC 465 de fato já constitui um sistema estelar coeso, em fase de contração, após a expulsão de seu gás progenitor, ao ponto que NGC 456 e NGC 460 podem não sobreviver ao processo de expulsão de gás, dissolvendo-se no processo.
- O estudo de aglomerados estelares pode se tornar mais complexo em casos nos quais a morfologia do sistema apresenta irregularidades ou estruturas pouco definidas, dificultando ou até mesmo impossibilitando a determinação de seus parâmetros estruturais por meio do ajuste de um perfil analítico, como o perfil de King. Nesses casos, tais modelos podem não representar adequadamente a distribuição estelar, o que limita sua aplicabilidade e exige a consideração de abordagens alternativas para a análise estrutural.

Este trabalho constitui uma contribuição importante para o conhecimento dos aglomerados estelares presentes na Ponte de Magalhães e pode ser ampliado em investigações futuras que incluam uma amostra mais abrangente dos aglomerados distribuídos ao longo de toda essa estrutura. A extensão da análise para outras regiões da ponte permitirá estabelecer um panorama mais amplo e detalhado sobre os processos de formação e evolução dos aglomerados na região da Ponte de Magalhães.

Bibliografia

- ANGELO, M. S., SANTOS, J. F. C., CORRADI, W. J. B., et al., 2019, “Star clusters in the Magellanic Clouds: structural and dynamical parameters from VISCA-CHA”, *Astronomy & Astrophysics*, v. 624, pp. A8. doi: 10.1051/0004-6361/201834938.
- ANGELO, M. S., SANTOS, J. F. C., CORRADI, W. J. B., et al., 2025, “Exploring the dynamical state of Galactic open clusters using Gaia DR3 and observational parameters”, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, v. 539, n. 3 (maio), pp. 2513–2536. doi: 10.1093/mnras/staf584.
- BESLA, G., KALLIVAYALIL, N., HERNQUIST, L., et al., 2012, “The Role of Dwarf Galaxy Interactions in Shaping the Magellanic System and Implications for Magellanic Irregulars”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 421, pp. 2109–2138. doi: 10.1111/j.1365-2966.2011.20363.x.
- BESLA, G., KALLIVAYALIL, N., HERNQUIST, L., et al., 2007, “Are the Magellanic Clouds on Their First Passage about the Milky Way?” *The Astrophysical Journal*, v. 668, pp. 949–967. doi: 10.1086/521027.
- BESSELL, M. S., 1990, “UBVRI passbands”, *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, v. 102, pp. 1181–1199. doi: 10.1086/132749.
- BICA, E., BONATTO, C., DUTRA, C. M., et al., 2008, “A general catalogue of extended objects in the Magellanic System”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 389, pp. 678–686. doi: 10.1111/j.1365-2966.2008.13624.x.
- BICA, E., SANTIAGO, B., BONATTO, C., et al., 2015, “Bridge over troubled gas: clusters and associations under the SMC and LMC tidal stresses”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 453, pp. 3190–3202. doi: 10.1093/mnras/stv1790.
- BICA, E., WESTERA, P., KERBER, L. D. O., et al., 2020, “An Updated Small Magellanic Cloud and Magellanic Bridge Catalog of Star Clusters, Associations, and Related Objects”, *The Astronomical Journal*, v. 159, pp. 82. doi: 10.3847/1538-3881/ab6e83.

- BINNEY, J., MERRIFIELD, M., 1998, *Galactic Astronomy*. Princeton Series in Astrophysics. 2nd ed. Princeton, NJ, Princeton University Press. ISBN: 978-0691025650.
- BONATTO, C., BICA, E., 2007, “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”, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, v. 377, n. 3 (maio), pp. 1301–1323. doi: 10.1111/j.1365-2966.2007.11691.x.
- BRESSAN, A., MARIGO, P., GIRARDI, L., et al., 2012, “PARSEC: stellar tracks and isochrones with the PAdova and TRieste Stellar Evolution Code”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 427, n. 1, pp. 127–145.
- BRESSAN, A., MARIGO, P., GIRARDI, L., et al., 2012, “PARSEC: stellar tracks and isochrones with the PAdova and TRieste Stellar Evolution Code”, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, v. 427, n. 1 (nov.), pp. 127–145. doi: 10.1111/j.1365-2966.2012.21948.x.
- BRINKMANN, N., BANERJEE, S., MOTWANI, B., et al., 2017, “The bound fraction of young star clusters”, *Astronomy & Astrophysics*, v. 600, pp. A49. doi: 10.1051/0004-6361/201629312.
- BROWN, A. G. A., VALLENARI, A., PRUSTI, T., et al., 2018, “Gaia Data Release 2. Summary of the contents and survey properties”, *Astronomy & Astrophysics*, v. 616, pp. A1. doi: 10.1051/0004-6361/201833051.
- CANTAT-GAUDIN, T., JORDI, C., VALLENARI, A., et al., 2018, “A Gaia DR2 view of the open cluster population in the Milky Way”, *Astronomy & Astrophysics*, v. 618, pp. A93. doi: 10.1051/0004-6361/201833476.
- CARDELLI, J. A., CLAYTON, G. C., MATHIS, J. S., 1989, “The Relationship between Infrared, Optical, and Ultraviolet Extinction”, *Astrophys. J.*, v. 345 (out.), pp. 245. doi: 10.1086/167900.
- CASSETTI-DINESCU, D. I., VIEIRA, K., GIRARD, T. M., et al., 2012, “Kinematics of the Magellanic Bridge Based on Proper Motions from the Southern Proper Motion Program”, *The Astrophysical Journal*, v. 753, n. 2, pp. 123. doi: 10.1088/0004-637X/753/2/123.
- CASTRO-GINARD, A., JORDI, C., LURI, X., et al., 2019, “Hunting for open clusters in Gaia DR2: the Galactic anticentre”, *Astronomy & Astrophysics*, v. 627 (July), pp. A35. doi: 10.1051/0004-6361/201935390.

- CASTRO-GINARD, A., JORDI, C., LURI, X., et al., 2020, “Hunting for open clusters in Gaia DR2: 582 new open clusters in the Galactic disc”, *Astronomy & Astrophysics*, v. 635 (March), pp. A45. doi: 10.1051/0004-6361/201937386.
- CHIOSI, E., VALLENARI, A., HELD, E. V., et al., 2006, “Age distribution of young clusters and field stars in the Small Magellanic Cloud”, *Astron. Astrophys.*, v. 452, n. 1 (jun.), pp. 179–193. doi: 10.1051/0004-6361:20054559.
- CHOI, Y., OLSEN, K. A. G., BESLA, G., et al., 2022, “The Recent LMC-SMC Collision: Timing and Impact Parameter Constraints from Comparison of Gaia LMC Disk Kinematics and N-body Simulations”, *The Astrophysical Journal*, v. 927, n. 2, pp. 153. doi: 10.3847/1538-4357/ac4e14.
- CHOUDHURY, S., SUBRAMANIAM, A., COLE, A. A., et al., 2018, “Photometric metallicity map of the Small Magellanic Cloud”, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, v. 475, n. 4 (abr.), pp. 4279–4297. doi: 10.1093/mnras/sty087.
- COUSINS, A. W. J., 1976, “VRI standards in the E regions”, *Mem. Roy. Astron. Soc.*, v. 81 (jan.), pp. 25.
- CROWL, H. H., SARAJEDINI, A., PIATTI, A. E., et al., 2001, “The Line-of-Sight Depth of Populous Clusters in the Small Magellanic Cloud”, *The Astronomical Journal*, v. 122, pp. 220–235. doi: 10.1086/321141.
- DIAS, B., KERBER, L. O., BARBUY, B., et al., 2014, “Self-consistent physical parameters for five intermediate-age SMC stellar clusters from CMD modelling”, *A&A*, v. 561, pp. A106. doi: 10.1051/0004-6361/201322092.
- DIAS, W. S., MONTEIRO, H., MOITINHO, A., et al., 2021, “Updated parameters of 1743 open clusters based on Gaia DR2”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 504, n. 1 (June), pp. 356–371. doi: 10.1093/mnras/stab732.
- DIAZ, J. D., BEKKI, K., 2011, “The dynamics of the Magellanic Clouds: a new bound scenario”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 413, pp. 2015–2026. doi: 10.1111/j.1365-2966.2011.18276.x.
- D’ONGHIA, E., FOX, A. J., 2016, “The Magellanic Stream: Circumnavigating the Galaxy”, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, v. 54, pp. 363–400. doi: 10.1146/annurev-astro-081815-120527. Disponível em: <<https://doi.org/10.1146/annurev-astro-081815-120527>>.
- DÍAZ, J. D., BEKKI, K., 2012, “The Magellanic Stream: Circumnavigation of the Galaxy”, *The Astrophysical Journal*, v. 750, n. 1, pp. 36. doi: 10.1088/0004-637X/750/1/36.

- FERREIRA, B. P. L., SANTOS, JR., J. F. C., DIAS, B., et al., 2024, “The VISCACHA Survey - XI. Benchmarking SIESTA: a new synthetic CMD fitting code”, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, v. 533, n. 4 (out.), pp. 4210–4233. doi: 10.1093/mnras/stae2055.
- FERREIRA, F. A., CORRADI, W. J. B., MAIA, F. F. S., et al., 2020, “Discovery and astrophysical properties of Galactic open clusters in dense stellar fields using Gaia DR2”, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, v. 496, n. 2 (ago.), pp. 2021–2038. doi: 10.1093/mnras/staa1684.
- FERREIRA, F. A., CORRADI, W. J. B., MAIA, F. F. S., et al., 2021, “New star clusters discovered towards the Galactic bulge direction using Gaia DR2”, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, v. 502, n. 1 (mar.), pp. L90–L94. doi: 10.1093/mnrasl/slab011.
- FERREIRA, F. A., SANTOS, J. F. C., CORRADI, W. J. B., et al., 2025, “Open cluster age calibration from colour-magnitude morphological indices using Gaia DR3 data”, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, v. 539, n. 1 (maio), pp. 265–281. doi: 10.1093/mnras/staf509.
- FOX, A. J., RICHTER, P., WAKKER, B. P., et al., 2013, “On the Metallicity and Origin of the Magellanic Stream”, *The Astrophysical Journal*, v. 772, n. 2, pp. 110. doi: 10.1088/0004-637X/772/2/110.
- FOX, A. J., RICHTER, P., WAKKER, B. P., et al., 2013, “The COS/UVES Absorption Survey of the Magellanic Stream. I. One-tenth Solar Abundances along the Body of the Stream”, *Astrophys. J.*, 772(2):110. doi: 10.1088/0004-637X/772/2/110.
- GAIA COLLABORATION, BROWN, A. G. A., VALLENARI, A., et al., 2016, “Gaia Data Release 1: Summary of the astrometric, photometric, and survey properties”, *Astronomy & Astrophysics*, v. 595, pp. A2. doi: 10.1051/0004-6361/201629512.
- GAIA COLLABORATION, BROWN, A. G. A., VALLENARI, A., et al., 2018, “Gaia Data Release 2: Summary of the contents and survey properties”, *Astronomy & Astrophysics*, v. 616, pp. A1. doi: 10.1051/0004-6361/201833051.
- GAIA COLLABORATION, BROWN, A. G. A., VALLENARI, A., et al., 2021, “Gaia Early Data Release 3. Summary of the contents and survey properties”, *Astronomy & Astrophysics*, v. 649, pp. A1. doi: 10.1051/0004-6361/202039657.

- GARDINER, L. T., NOGUCHI, M., 1996, “N-body simulations of the Small Magellanic Cloud and the Magellanic Stream”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 278, pp. 191–208. doi: 10.1093/mnras/278.1.191.
- GEMINALE, A., POPOWSKI, P., 2004, “Total to Selective Extinction Ratios and Visual Extinctions from Ultraviolet Data”, *Acta Astron.*, v. 54 (dez.), pp. 375–390. doi: 10.48550/arXiv.astro-ph/0409509.
- GIELES, M., PORTEGIES ZWART, S. F., BAUMGARDT, H., et al., 2006, “Star cluster disruption by giant molecular clouds”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 371, n. 2, pp. 793–801. doi: 10.1111/j.1365-2966.2006.10627.x.
- GRACZYK, D., PIETRZYSKI, G., THOMPSON, I. B., et al., 2020, “A Distance Determination to the Small Magellanic Cloud with an Accuracy of Better than Two Percent Based on Late-type Eclipsing Binary Stars”, *The Astrophysical Journal*, v. 904, n. 1, pp. 13. doi: 10.3847/1538-4357/abb9b9.
- GRACZYK, D., PIETRZYŃSKI, G., THOMPSON, I. B., et al., 2020, “A Distance Determination to the Small Magellanic Cloud with an Accuracy of Better than Two Percent Based on Late-type Eclipsing Binary Stars”, *Astrophys. J.*, 904 (1):13. doi: 10.3847/1538-4357/abbb2b.
- JOHNSON, H. L., MORGAN, W. W., 1953, “Fundamental stellar photometry for standards of spectral type on the revised system of the Yerkes spectral atlas”, *The Astrophysical Journal*, v. 117, pp. 313. doi: 10.1086/145697.
- KING, I., 1962, “The structure of star clusters. I. an empirical density law”, *Astron. J.*, v. 67 (out.), pp. 471. doi: 10.1086/108756.
- KRON, G. E., SMITH, J. L., 1951, “Red and infrared magnitudes for 125 stars in ten areas.” *Astrophys. J.*, v. 113 (mar.), pp. 324. doi: 10.1086/145403.
- KRONE-MARTINS, A., MOITINHO, A., 2014, “UPMASK: Unsupervised Photometric Membership Assignment in Stellar Clusters”, *A&A*, v. 561, pp. A57. doi: 10.1051/0004-6361/201321143.
- KRUMHOLZ, M. R., MCKEE, C. F., BLAND-HAWTHORN, J., 2019, “Star Clusters Across Cosmic Time”, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, v. 57, n. 1, pp. 227–303. doi: 10.1146/annurev-astro-091918-104430.
- LADA, C. J., LADA, E. A., 2003, “Embedded Clusters in Molecular Clouds”, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, v. 41, pp. 57–115. doi: 10.1146/annurev.astro.41.011802.094844.

- LIU, L., PANG, X., 2019, “A Catalog of Newly Identified Star Clusters in Gaia DR2”, *The Astrophysical Journal Supplement Series*, v. 245, n. 2 (December), pp. 32. doi: 10.3847/1538-4365/ab5363.
- MAIA, F. F. S., CORRADI, W. J. B., SANTOS, J. F. C. J., 2010, “Characterization and photometric membership of the open cluster NGC 1981”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 407, n. 3, pp. 1875–1886. doi: 10.1111/j.1365-2966.2010.17034.x.
- MAIA, F. F. S., PIATTI, A. E., SANTOS, J. F. C., 2014, “Mass distribution and structural parameters of Small Magellanic Cloud star clusters”, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, v. 437, n. 2 (jan.), pp. 2005–2016. doi: 10.1093/mnras/stt2039.
- MAIA, F. F. S., DIAS, B., SANTOS, J. F. C., et al., 2019, “The VISCACHA survey - I. Overview and first results”, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, v. 484, n. 4 (abr.), pp. 5702–5722. doi: 10.1093/mnras/stz369.
- MELLINGER, A., 2009, “A Color All-Sky Panorama Image of the Milky Way”, *Publ. Astron. Soc. Pacific*, v. 121, n. 885 (nov.), pp. 1180. doi: 10.1086/648480.
- MOECKEL, N., BATE, M. R., 2010, “Clustered star formation as a natural consequence of supersonic turbulence”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 404, pp. 721–737. doi: 10.1111/j.1365-2966.2010.16238.x.
- NIDEVER, D. L., MONACHESI, A., BELL, E. F., et al., 2013, “A Tidally Stripped Stellar Component of the Magellanic Bridge”, *The Astrophysical Journal*, v. 779, pp. 145. doi: 10.1088/0004-637X/779/2/145.
- NIDEVER, D. L., MAJEWSKI, S. R., BURTON, W. B., 2008, “The Origin of the Magellanic Stream and the Possibility of a Stellar Counterpart”, *The Astrophysical Journal*, v. 679, n. 1, pp. 432–457. doi: 10.1086/587045.
- NIDEVER, D. L., MAJEWSKI, S. R., BUTLER BURTON, W., et al., 2010, “The 200° Long Magellanic Stream System”, *Astrophys. J.*, v. 723, n. 2 (nov.), pp. 1618–1631. doi: 10.1088/0004-637X/723/2/1618.
- OLIVEIRA, R. A. P., MAIA, F. F. S., BARBUY, B., et al., 2023, “The VISCACHA survey VII. Assembly history of the Magellanic Bridge and SMC Wing from star clusters”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 519, n. 1, pp. 1500–1520. doi: 10.1093/mnras/stac3900.
- PIATTI, A. E., DE GRIJS, R., RUBELE, S., et al., 2015, “The VMC survey - XV. The Small Magellanic Cloud-Bridge connection history as traced by their star

- cluster populations”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 450, pp. 552–563. doi: 10.1093/mnras/stv610.
- PIETRZYSKI, G., GRACZYK, D., GIEREN, W., et al., 2019, “A distance to the Large Magellanic Cloud that is accurate to two per cent”, *Nature*, v. 567, n. 7747, pp. 200–203. doi: 10.1038/s41586-019-0999-4.
- RUIZ-LARA, T., GALLART, C., BERNARD, E. J., et al., 2020, “The early star formation histories of the Milky Ways dwarf galaxies: self-similarity and synchronized evolution”, *Astronomy & Astrophysics*, v. 639, pp. L3. doi: 10.1051/0004-6361/202038482.
- SANTOS, JR., J. F. C., MAIA, F. F. S., DIAS, B., et al., 2020, “The VISCACHA survey - II. Structure of star clusters in the Magellanic Clouds periphery”, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, v. 498, n. 1 (out.), pp. 205–222. doi: 10.1093/mnras/staa2425.
- SAROON, S., DIAS, B., TSUJIMOTO, T., et al., 2023, “The VISCACHA survey. VIII. Chemical evolution history of the Small Magellanic Cloud west halo clusters”, *Astron. Astrophys.*, 677:A35. doi: 10.1051/0004-6361/202346648.
- SHAPLEY, H., 1940, “An Extension of the Small Magellanic Cloud”, *Harvard College Observatory Bulletin*, v. 914 (dez.), pp. 8–9.
- SKOWRON, D. M., WYRZYKOWSKI, Ł., KOZŁOWSKI, S., et al., 2014, “The OGLE View of the Magellanic System. III. RR Lyrae Stars in the Magellanic Bridge”, *The Astrophysical Journal*, v. 795, n. 2, pp. 108. doi: 10.1088/0004-637X/795/2/108.
- STETSON, P. B., 2000, “Homogeneous Photometry for Star Clusters and Resolved Galaxies. II. Photometric Standard Stars”, *Publ. Astron. Soc. Pacific*, v. 112, n. 773 (jul.), pp. 925–931. doi: 10.1086/316595.
- SUBRAMANIAN, S., SUBRAMANIAM, A., 2012, “The Three-dimensional Structure of the Small Magellanic Cloud”, *The Astrophysical Journal*, v. 744, pp. 128. doi: 10.1088/0004-637X/744/2/128.
- VAN DER MAREL, R. P., 2001, “Magellanic Cloud Structure from Near-Infrared Surveys: The Viewing Angles of the LMC”, *The Astronomical Journal*, v. 122, n. 4, pp. 1827–1846.
- VISCACHA COLLABORATION, 2025. “VISCACHA Survey Official Website”. Disponível em: <<http://www.astro.iag.usp.br/~viscacha/>>.

- ZARITSKY, D., HARRIS, J., THOMPSON, I. B., et al., 2002, “The Magellanic Clouds Photometric Survey: The Small Magellanic Cloud Stellar Catalog and Extinction Map”, *Astron. J.*, v. 123, n. 2 (fev.), pp. 855–872. doi: 10.1086/338437.
- ZARITSKY, D., HARRIS, J., THOMPSON, I. B., et al., 2004, “The Magellanic Clouds Photometric Survey: The Large Magellanic Cloud Stellar Catalog and Extinction Map”, *The Astronomical Journal*, v. 128, n. 4 (oct), pp. 1606. doi: 10.1086/423910. Disponível em: <<https://dx.doi.org/10.1086/423910>>.
- ZHANG, R., YUAN, H., CHEN, B., 2023, “An R_V Map of the Milky Way Revealed by LAMOST”, *Astrophys. J. Suppl.*, 269(1):6. doi: 10.3847/1538-4365/acf764.
- ZIVICK, P., KALLIVAYALIL, N., VAN DER MAREL, R. P., et al., 2018, “The Proper Motion Field of the Small Magellanic Cloud: Kinematic Evidence for Its Tidal Disruption”, *The Astrophysical Journal*, v. 864, n. 1, pp. 55. doi: 10.3847/1538-4357/aad512.
- ZIVICK, P., KALLIVAYALIL, N., VAN DER MAREL, R. P., et al., 2019, “The Dynamics of the Magellanic Clouds: A New Proper Motion Study and Implications for the Magellanic Group”, *The Astrophysical Journal*, v. 874, n. 1, pp. 78. doi: 10.3847/1538-4357/ab07b5.
- ZWART, S. F. P., MCMILLAN, S. L. W., GIELES, M., 2010, “Young massive star clusters”, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, v. 48, n. 1, pp. 431–493. doi: 10.1146/annurev-astro-081309-130834.