

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

Marina Izabela

**Estudos com *SED Fitting* de aglomerados
estelares nas Nuvens de Magalhães
utilizando fotometria integrada do S-PLUS**

São Paulo

2024

Marina Izabela

**Estudos com *SED Fitting* de aglomerados
estelares nas Nuvens de Magalhães
utilizando fotometria integrada do S-PLUS**

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

Área de Concentração: Astronomia

Orientador(a): Prof^a. Dr^a. Claudia Mendes
de Oliveira

São Paulo

2024

À Carmilla, minha fiel companheira

Agradecimentos

Gostaria de expressar meus mais sinceros agradecimentos a todas as pessoas que contribuíram de maneira significativa para a realização deste trabalho.

Primeiramente, quero agradecer a minha orientadora, Prof^a. Dr^a. Claudia Mendes de Oliveira, pela oportunidade de trabalhar nesse impressionante projeto que é o SPLUS, e por suas orientações valiosas para o desenvolvimento desse trabalho. Agradeço profundamente também ao Ms. Gabriel Fabiano de Souza por todo guia, suporte e tempo despendido durante este projeto - sem o seu apoio nada disso teria sido possível.

À minha família e amigos, digo meu mais profundo obrigada. O apoio constante, encorajamento e compreensão que recebi foram indispensáveis para eu chegar até aqui, entregando este de trabalho de conclusão de Curso.

Às instituições e pessoas que colaboraram fornecendo recursos, dados ou permitindo acesso a informações cruciais, meu sincero agradecimento. Suas contribuições foram fundamentais para a qualidade deste estudo.

Por fim, expresso minha gratidão a todos aqueles que, de alguma forma, contribuíram para este trabalho, mesmo que não estejam mencionados aqui. Cada palavra de incentivo, cada conversa construtiva e cada gesto amigável não passaram despercebidos.

*“Da minha aldeia vejo quanto da terra se pode ver no Universo...
Por isso a minha aldeia é tão grande como outra terra qualquer
Porque eu sou do tamanho do que vejo
E não do tamanho da minha altura...
”*

Alberto Caeiro

Resumo

As Nuvens de Magalhães são galáxias irregulares anãs e estão entre as maiores e mais próximas da Via Láctea. Elas são uma região bem conhecida pelos astrônomos, tornando-se um laboratório importante para validação de métodos relacionados aos processos de formação e evolução de populações estelares, que posteriormente podem ser aplicados à galáxias mais distantes. Neste trabalho, utilizamos o raio de meia-luz (do inglês, *half-light radius*) para obtermos a fotometria de aglomerados estelares presentes na Pequena e na Grande Nuvem de Magalhães, utilizando dados do S-PLUS (Southern Photometric Local Universe). Com essa fotometria, utilizamos o software BAGPIPES, para extrairmos o *SED fitting* - do inglês, *Spectral Energy Distribution fitting*, ou ajuste da Distribuição Espectral de Energia. O BAGPIPES desenvolve ajustes de espectro levando em consideração os modelos de história de formação estelar e de taxa de formação estelar, massa inicial e avermelhamento desses aglomerados e com isso nos retorna as idades e metalicidades desses objetos. Com esses valores de idades e metalicidades pudemos observar o que é esperado pela teoria e apresentado em outros trabalhos sobre a evolução química das Nuvens de Magalhães, porém com as devidas limitações da nossa amostra - dado que a maioria dos aglomerados possui idades e metalicidades médias, sem dados suficientes em casos extremos.

Abstract

The Magellanic Clouds are irregular dwarf galaxies and are among the largest and closest to the Milky Way. They are well-known regions for astronomers, serving as important laboratories for validating methods related to the formation and evolution of stellar populations, which can subsequently be applied to more distant galaxies. In this study, we used the half-light radius to obtain photometry of star clusters present in the Small and Large Magellanic Clouds, using data from S-PLUS (Southern Photometric Local Universe). With this photometry, we employed the BAGPIPES software to perform Spectral Energy Distribution (SED) fitting. BAGPIPES adjusts spectra considering models of stellar formation history, star formation rate, initial mass, and reddening of these clusters, thereby providing us with ages and metallicities of these objects. Using these values of ages and metallicities, we observed trends expected by theory and reported in other studies regarding the chemical evolution of the Magellanic Clouds, although with the limitations of our sample – most clusters having average ages and metallicities, lacking sufficient data at the extreme ends.

Lista de Figuras

2.1	No gráfico central podemos ver as curvas de transmissão 12 filtros ópticos do S-PLUS, com suas respectivas posições no espectro eletromagnético. Nas figuras acima e à direita do gráfico estão as imagens do aglomerado globular NGC121, em cada uma das bandas do S-PLUS. As cores são fícticias. Fonte: de Souza (2022).	22
3.1	Ajuste do perfil de King ao Brilho Superficial do aglomerado HW5, obtido a partir da fotometria da banda 'r' do S-PLUS. O método de obtenção da fotometria utilizado nesta figura foi com a biblioteca em Python <i>Pyproffit</i> , uma biblioteca com método próprio e dedicada à análise de fotometria de aglomerados.	29
3.2	Ajuste do perfil de King ao Brilho Superficial do aglomerado HW5, obtido a partir da fotometria da banda 'r' do S-PLUS. Nesta Figura, temos os valores de fotometria obtidos a partir da função <i>Radial Profile</i> , da biblioteca em Python <i>Photutils</i> . Tal função obtém a fotometria utilizando aberturas concêntricas, partindo das coordenadas do aglomerado. Calcula o fluxo médio azimutal nas aberturas dos anéis circulares em função do raio. . . .	30
3.3	Ajuste do perfil de King ao Brilho Superficial do aglomerado HW5, obtido a partir da fotometria da banda 'r' do S-PLUS. O dados fotométricos desta figura foram obtidos com um método próprio desenvolvido utilizando também a biblioteca em Python <i>Photutils</i> , porém fazendo a construção manual de anéis para obtenção dos fluxos.	30

4.1	Histograma de Metalicidades ($[Fe/H]$) dos aglomerados da nossa amostra, separados pelas suas respectivas Nuvens.	38
4.2	Histograma de Idades, em Ga, dos aglomerados da nossa amostra, separados pelas suas respectivas Nuvens de origem.	38
4.3	Relação entre Idade (Ga) e Metalicidade $[Fe/H]$ para os aglomerados da nossa amostra, separados pelas suas respectivas Nuvens de origem.	39
4.4	Distribuição espacial dos aglomerados estelares na SMC (losangos) e LMC (circulos), coloridos com suas respectivas Idades.	40
4.5	Distribuição espacial dos aglomerados estelares na SMC (losangos) e LMC (circulos), coloridos com suas respectivas Metalicidades $[Fe/H]$	41

Lista de Tabelas

2.1	Dados utilizados dos aglomerados estelares da Pequena Nuvem de Magalhães, extraídos do artigo Santos et al. (2020).	23
2.2	Dados utilizados dos aglomerados estelares da Grande Nuvem de Magalhães, extraídos do artigo Santos et al. (2020).	24
3.1	Tabela com os aglomerados estelares da SMC estudados para obtenção dos parâmetros estruturais.	28
3.2	Comprimentos de onda de cada filtro do S-PLUS, conjuntamente com seus coeficientes de extinção.	32
3.3	Lista de parâmetros livres e fixos utilizados no ajuste com o BAGPIPES. Na coluna da esquerda, temos os livres, onde M_{formed} é a massa estelar formada, age é a idade da população estelar (com limite superior igual a 15 Ganos), Z é a metalicidade e z o <i>redshift</i> , o A_V é o parâmetro relacionado à extinção. O parâmetro fixado na coluna da direita é: o parâmetro η , relacionado à modelagem da atenuação por poeira, utilizando a lei de atenuação de Calzetti et al. (2000).	34

Sumário

1. <i>Introdução</i>	19
2. <i>Dados</i>	21
2.1 S-PLUS - Southern Photometric Local Universe Survey (S-PLUS)	21
2.2 VISCACHA - Visible Soar photometry of star Clusters in tapii and Coxi Hugua	22
3. <i>Métodos</i>	27
3.1 Parâmetros Estruturais de Aglomerados da Pequena Nuvem de Magalhães	27
3.2 Fotometrias com S-PLUS	31
3.3 SED Fitting e BAGPIPES	33
4. <i>Resultados e Discussão</i>	37
4.1 Resultados de Idade e Metalicidade	37
5. <i>Conclusões</i>	43
<i>Referências</i>	45

Introdução

A primeira observação documentada de um aglomerado estelar data de 1665, e foi feita pelo astrônomo alemão Abraham Ihle – o objeto observado por Ihle foi inserido no catálogo de Messier em 1774 como M22, na categoria de objetos similares a cometas e descrito como uma nebulosidade circular, sem nenhuma estrela (Messier, 1774).

Apenas mais a frente no Século XVIII tal objeto teve sua verdadeira natureza descrita por William Herschel - um conjunto arredondado e compacto de estrelas, tal qual identificamos, de maneira geral, os aglomerados estelares atualmente. Porém, apesar da melhor compreensão do que poderia ser um aglomerado estelar e da vasta catalogação feita por Herschel, foi apenas no século XX que estes objetos passaram a ser observados como peças-chaves para o estudo de Galáxias, de Evolução Estelar, e conseqüentemente para a história do Universo.

Apenas com o avanço da Astronomia moderna e seus instrumentos de observação, a realização de estudos sobre idade, metalicidade, composição química e parâmetros estruturais de aglomerados puderam ser melhor desenvolvidos, visto que as técnicas para obtenção desses parâmetros e características requerem análises fotométricas e espectroscópicas, cujos avanços surgiram ao final do século XIX e começo do século XX.

Como exemplos dos avanços desta ciência, temos a obtenção de idades para estes objetos a partir de diagramas de cor-magnitude, construídos a partir da fotometria individual de estrelas pertencentes ao aglomerado estelar. Por outro lado, para metalicidades, é possível usar de espectroscopia de gigantes vermelhas e analisar linhas Cálcio a fim de entender sua composição química. De maneira geral, estes métodos ficam limitados a objetos próximos, para os quais é possível obter fotometrias confiáveis das estrelas individuais para utilizar em nossos estudos. Porém, se o objeto de estudo se encontra distante, é necessária a utilização

de métodos alternativos, como fotometria e espectroscopia integrada. Isso porque, para objetos mais distantes é impossível termos suas estrelas resolvidas, o que nos faz recorrer a estes métodos integrados.

Com isso, o objetivo desse trabalho é utilizar a fotometria integrada do Southern Photometric Local Universe Survey (S-PLUS, Mendes de Oliveira, 2019) em aglomerados estelares oriundos da Pequena e Grande Nuvens de Magalhães (SMC e LMC, do inglês Small and Large Magellanic Cloud). O S-PLUS é um mapeamento astronômico do hemisfério sul, que cobrirá cerca de 9300 graus quadrados do céu. Seu sistema Javalambre possui 12 filtros ópticos, sendo cinco largos e sete estreitos - tal combinação é muito oportuna para caracterizar os aglomerados estelares das Nuvens de Magalhães (de Souza, 2022).

As doze magnitudes integradas foram aqui utilizadas para o SED fitting – do inglês, *Spectral Energy Distribution*, ou ajuste da Distribuição Espectral de Energia, com a biblioteca BAGPIPES (Carnall et al., 2018), o que nos traz como resultado as idades e metalicidades desses aglomerados, que são parâmetros fundamentais para melhor entendermos esses objetos, e também entendermos mais sobre as próprias Nuvens de Magalhães – suas épocas de formação estelar em cada região, interações mútuas e com a Via Láctea.

Dados

2.1 S-PLUS - Southern Photometric Local Universe Survey (S-PLUS)

O S-PLUS é um mapeamento astronômico do hemisfério sul, que imageará até seu fim cerca de 9300 graus quadrados do céu, utilizando um telescópio robótico dedicado de 0.8m, o T80-South, no Observatório Interamericano de Cerro Tololo, no Chile.

O Survey utiliza o sistema de filtros Javalambre (Marín-Franch et al., 2012), com 12 filtros ópticos, sendo cinco largos (u, g, r, i e z) e sete estreitos (J0378, J0395, J0410, J0430, J0515, J0660, J0861). Na Figura 2.1 temos um exemplo das curvas de transmissão do S-PLUS (painel central), e do aglomerado NGC 121, pertencente à SMC, representado nos 12 filtros.

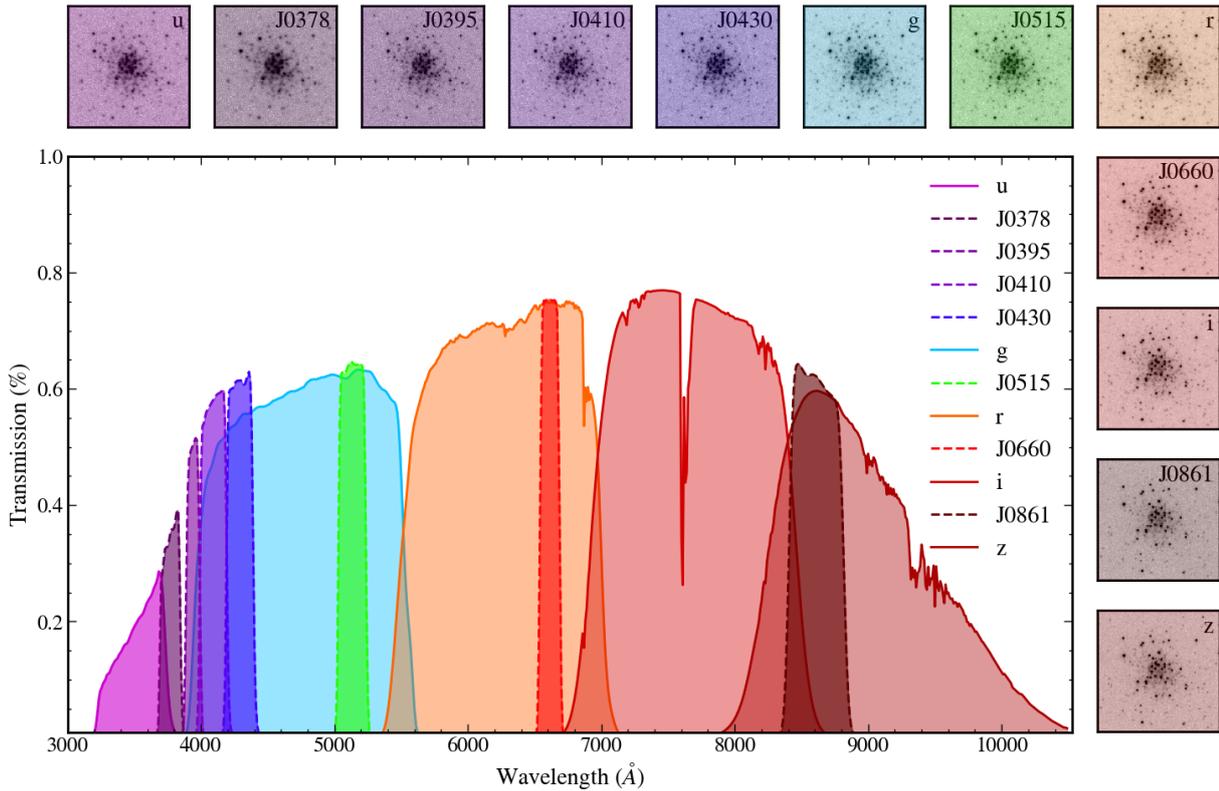


Figura 2.1: No gráfico central podemos ver as curvas de transmissão 12 filtros ópticos do S-PLUS, com suas respectivas posições no espectro eletromagnético. Nas figuras acima e à direita do gráfico estão as imagens do aglomerado globular NGC121, em cada uma das bandas do S-PLUS. As cores são fictícias. Fonte: de Souza (2022).

Para este trabalho, aplicamos a fotometria integrada do S-PLUS, disponibilizada na biblioteca em *Python* - *splusdata*, em todos os aglomerados estelares apresentados na Seção 2.2, para todas as 12 bandas do S-PLUS.

2.2 VISCACHA - Visible Soar photometry of star Clusters in *tapii* and *Coxi Huguá*

O projeto de pesquisa VISCACHA - *Visible Soar photometry of star Clusters in tapii and Coxi Huguá* é um levantamento fotométrico especificamente projetado para aglomerados estelares nas Nuvens de Magalhães, tanto a Pequena quanto a Grande. As observações fotométricas profundas de aglomerados estelares das Nuvens de Magalhães foram coletadas usando o telescópio Southern Astrophysical Research (SOAR) juntamente com o SOAR Adaptive Module Imager Aime et al. (2004). Suas observações foram iniciadas em 2015 e a partir de então foram utilizadas mais de 120h de telescópio para observações de aglomere-

rados presentes desde as partes mais externas das Nuvens, até suas regiões mais internas e a parte intermediária da dupla, conhecida como ponte. Para este trabalho foram utilizados os dados dos aglomerados presentes em Santos et al. (2020), localizados tanto na Pequena quanto na Grande Nuvem de Magalhães, dispostos com suas coordenadas, raios de meia-luz, e coeficiente E(B-V) nas Tabelas 2.1 e 2.2.

Tabela 2.1 - Dados utilizados dos aglomerados estelares da Pequena Nuvem de Magalhães, extraídos do artigo Santos et al. (2020).

Aglomerado	Ascensão reta - α (h:m:s)	Declinação - δ (h:m:s)	rh (arcsecs)	erro_rh (arcsecs)	E(B-V)	err_E(B-V)
B1	00:19:20	-74:06:24	5.64795	2.7384	0.033	0.001
K6	00:25:27	-74:04:30	8.5575	2.22495	0.04	0.001
K7	00:27:45	-72:46:53	16.25925	2.56725	0.028	0.001
HW5	00:31:01	-72:20:30	7.5306	1.54035	0.026	0.001
K9	00:30:00	-73:22:40	16.25925	4.4499	0.033	0.004
HW20	00:44:48	-74:21:47	8.72865	2.22495	0.053	0.002
L32	00:47:24	-68:55:12	10.6113	2.56725	0.02	0.001
HW33	00:57:23	-70:48:36	7.1883	2.56725	0.025	0.001
K37	00:57:49	-74:19:32	11.9805	3.423	0.039	0.001
B94	00:58:17	-74:36:28	8.38635	3.93645	0.043	0.001
HW38	00:59:25	-73:49:01	15.91695	4.4499	0.054	0.003
L73	01:04:25	-70:20:42	11.2959	3.93645	0.023	0.001
K55	01:07:33	-73:07:17	10.6113	4.1076	0.096	0.008
K57	01:08:14	-73:15:27	11.46705	4.4499	0.091	0.022
HW56	01:07:41	-70:56:04	6.1614	1.54035	0.026	0.001
HW67	01:13:02	-70:57:47	9.2421	3.59415	0.03	0.001
NGC422	01:09:25	-71:45:59	5.8191	2.0538	0.067	0.012
IC1641	01:09:40	-71:46:03	6.846	3.25185	0.064	0.01
HW71NW	01:15:30	-72:22:36	8.5575	3.7653	0.051	0.004
L100	01:18:16	-72:00:06	8.38635	2.0538	0.039	0.001
HW77	01:20:10	-72:37:12	14.0343	2.56725	0.035	0.002
BS95-187	01:31:01	-72:50:48	8.72865	5.64795	0.035	0.001
IC1708	01:24:56	-71:11:00	8.72865	1.19805	0.038	0.002
B168	01:26:43	-70:46:48	8.38635	2.7384	0.026	0.001
L112	01:36:01	-75:27:30	6.33255	1.7115	0.061	0.001
L114	01:50:19	-74:21:24	5.4768	2.7384	0.038	0.001
HW85	01:42:28	-71:16:48	5.8191	1.88265	0.028	0.001
NGC796	01:56:44	-74:13:12	6.1614	1.19805	0.04	0.001

Tabela 2.2 - Dados utilizados dos aglomerados estelares da Grande Nuvem de Magalhães, extraídos do artigo Santos et al. (2020).

Agglomerado	Ascensão reta - α (h:m:s)	Declinação - δ (h:m:s)	rh (arcsecs)	erro_rh (arcsecs)	E(B-V)	err_E(B-V)
LW15	69.6083	-74.4633	18.3589	9.4889	0.075	0.002
SL28	71.1667	-74.2600	17.1212	5.5696	0.086	0.002
SL29	71.3042	-75.1167	14.0270	12.1705	0.100	0.004
SL36	71.5375	-74.8883	6.1884	0.8251	0.098	0.004
LW62	71.5750	-74.1600	5.7758	3.9193	0.080	0.002
SL53	72.4750	-75.6283	10.9328	3.9193	0.096	0.005
SL61	72.6875	-75.5333	18.9778	4.3319	0.108	0.007
SL74	73.0042	-74.8450	10.5203	2.4754	0.096	0.004
SL80	73.0917	-74.8900	10.1077	4.3319	0.098	0.005
OHSC1	73.1708	-75.2767	11.3454	5.5696	0.116	0.002
SL84	73.1875	-75.0750	11.5517	3.0942	0.106	0.007
KMHK228	73.2333	-74.0161	11.5517	8.2512	0.082	0.001
OHSC2	73.2917	-74.6817	6.6010	1.8565	0.087	0.001
SL118	73.8833	-74.6767	9.6952	2.4754	0.082	0.003
KMHK343	73.9792	-75.1383	9.2826	3.9193	0.088	0.005
OHSC3	74.1500	-75.2414	4.1256	2.2691	0.096	0.007
SL13	69.9250	-74.0167	10.3140	8.8700	0.077	0.002
OHSC4	74.8083	-75.1328	8.2512	4.9507	0.080	0.002
SL192	75.6125	-74.8642	14.4396	4.7444	0.078	0.001
LW141	76.8917	-74.6350	8.6638	2.8879	0.073	0.002
SL295	77.5375	-75.5433	11.3454	3.9193	0.074	0.001
SL576	83.3042	-74.3689	13.6145	2.6816	0.078	0.004
SL647	84.8958	-75.2083	9.6952	3.3005	0.082	0.002
SL703	86.2250	-74.8483	15.4710	4.9507	0.092	0.002
SL783	88.6625	-74.6053	10.7266	1.8565	0.118	0.001
IC2161	89.3542	-75.1397	14.4396	4.1256	0.089	0.006
SL828	90.5542	-74.1900	13.4082	2.0628	0.114	0.006
SL835	91.2000	-75.1025	7.0135	0.4126	0.090	0.001
SL882	94.7667	-72.3858	8.2512	4.3319	0.070	0.002
LW460	94.8125	-71.7267	8.8700	6.8072	0.080	0.003
LW470	95.6000	-72.2372	10.1077	3.3005	0.076	0.002
LW459	94.8208	-68.3275	7.8386	4.5382	0.049	0.001
SL883	94.9792	-68.2525	7.2198	4.5382	0.050	0.002
NGC2241	95.7208	-68.9250	9.9014	2.0628	0.070	0.002
LW472	95.7958	-68.3189	5.3633	1.6502	0.062	0.001
SL889	95.8708	-68.9972	7.2198	1.6502	0.076	0.003
KMHK1732	94.9458	-69.7911	9.4889	5.3633	0.083	0.001
SL886	95.3542	-69.2989	10.5203	4.5382	0.078	0.001
KMHK1739	95.2625	-71.0336	8.6638	3.9193	0.072	0.002
SL890	95.7625	-71.6864	6.8072	2.8879	0.074	0.001
LW475	95.8458	-70.5539	9.9014	2.8879	0.085	0.002
SL891	96.2042	-71.6589	9.4889	1.8565	0.073	0.002

Os dados dispostos aqui foram modificados de seu formato original: os raios de meia-luz foram convertidos de parsec para segundos de arco e as coordenadas, ascensão reta e declinação, respectivamente - para graus. A conversão de parsec para segundos de arco foi feita utilizando uma distância de 50 kpc para a Grande Nuvem de Magalhães, e 60kpc

para a Pequena Nuvem de Magalhães.

Métodos

Neste trabalho, iremos determinar idades e metalicidades de aglomerados presentes tanto na Pequena quanto na Grande Nuvem, a partir da sua reconstrução espectral com o método de *SED Fitting*, disponível no pacote em Python, BAGPIPES (**B**ayesian **A**nalysis of **G**alaxies for **P**hysical **I**nference and **P**arameter **E**stimation, Carnall et al. 2018). Tal método foi aplicado sobre o fluxo total dos aglomerados presentes na amostra descrita na Seção 2.2.

Para isso, foi necessário primeiro obter os raios de meia-luz a partir da fotometria do S-PLUS e, em seguida, obter sua fotometria integrada. O uso da fotometria a partir do raio de meia-luz é crucial em casos desse tipo, nos quais temos campos densamente populados de estrelas, e por isso estamos sujeitos a possíveis contaminações caso utilizemos uma abertura circular muito grande ao aplicarmos a fotometria integrada em um aglomerado. Portanto, para resolver este problema, determinamos o raio que contém metade da luz do aglomerado e dobramos o valor do fluxo obtido para termos a magnitude total do objeto. Na Seção 3.1 detalhamos como foi feito o processo de determinação deste raio de meia-luz.

3.1 Parâmetros Estruturais de Aglomerados da Pequena Nuvem de Magalhães

Iniciamos a análise das Nuvens de Magalhães a partir de 8 aglomerados estelares da SMC presentes tanto em Bica et al. (2020a) quanto no Santos et al. (2020). Foi feita tal escolha para posteriormente podermos comparar os nossos resultados com os apresentados nesses trabalhos. Os aglomerados escolhidos estão presentes na Tabela 3.1, com suas coordenadas espaciais.

Tabela 3.1 - Tabela com os aglomerados estelares da SMC estudados para obtenção dos parâmetros estruturais.

Aglomerado	Ascensão reta – α (h:m:s)	Declinação δ – (h:m:s)
NGC422	01:09:25	-71:45:59
IC1641	01:09:40	-71:46:03
HW77	01:20:10	-72:37:12
HW5	00:31:01	-72:20:30
HW20	00:44:48	-74:21:47
L100	01:18:16	-72:00:06
HW71NW	01:15:30	-72:22:36
HW38	00:59:25	-73:49:01

Para esta amostra de 8 aglomerados, empregamos três métodos distintos para determinar suas fotometrias:

- Método manual de anéis: Envolve a determinação manual de anéis para obtenção do fluxo do aglomerado, construído com a biblioteca *Photutils* (Bradley et al., 2020) e semelhante ao método disposto em Santos et al. (2020);
- Função *radial profile* da biblioteca *Photutils*: Emprega um método de obtenção de fluxo utilizando aberturas concêntricas. Calcula o fluxo médio azimutal nas aberturas dos anéis circulares em função do raio;
- Biblioteca *Pyproffit*: Fornece uma ferramenta dedicada à análise de fotometria de aglomerados.

Todas as análises foram realizadas na banda r do S-PLUS, devido à sua melhor relação sinal-ruído. A escolha do método ideal depende das características específicas do aglomerado e dos objetivos da análise.

A partir dessas fotometrias, ajustamos suas curvas de Brilho Superficial ao chamado perfil de King: equações 3.1 e 3.2, um modelo empírico desenvolvido em 1962 pelo astrônomo Ivan R. King (King, 1962), para obtenção dos parâmetros estruturais de aglomerados estelares: o raio do núcleo (r_c), raio limite onde após ele a luminosidade do objeto decai pela metade, e o raio de maré (r_t), conhecido por ser o raio até a força gravitacional do aglomerado sob suas estrelas é maior do que a força de maré da galáxia.

$$\mu(r) = \mu'_0 - 5 \log \left(\sqrt{1 + \left(\frac{1}{r/r_c}\right)^2} - \sqrt{1 + \left(\frac{1}{r_t/r_c}\right)^2} \right) \quad (3.1)$$

na qual

$$\mu'_0 = \mu_0 + 5 \log \left(1 - \sqrt{1 + \left(\frac{1}{r_t/r_c}\right)^2} \right) \quad (3.2)$$

Nas Figuras 3.1, 3.2 e 3.3 temos os ajustes do perfil de King para cada um dos métodos de determinação de fotometria descritos, com os seus respectivos resultados de r_c e Brilho superficial do ponto zero, μ_0 .

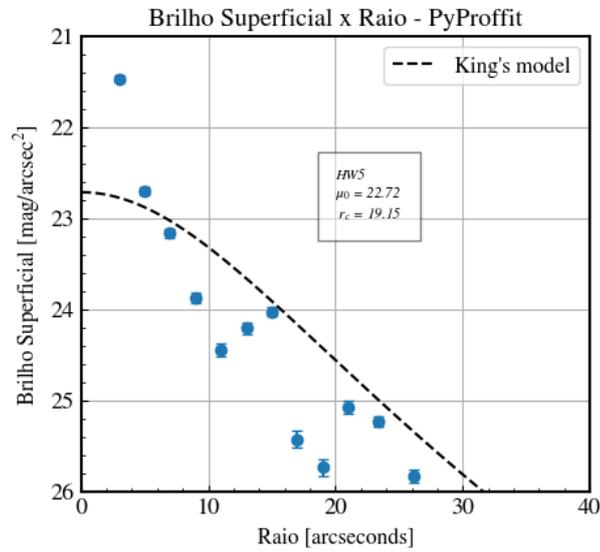


Figura 3.1: Ajuste do perfil de King ao Brilho Superficial do aglomerado HW5, obtido a partir da fotometria da banda 'r' do S-PLUS. O método de obtenção da fotometria utilizado nesta figura foi com a biblioteca em Python *Pyproffit*, uma biblioteca com método próprio e dedicada à análise de fotometria de aglomerados.

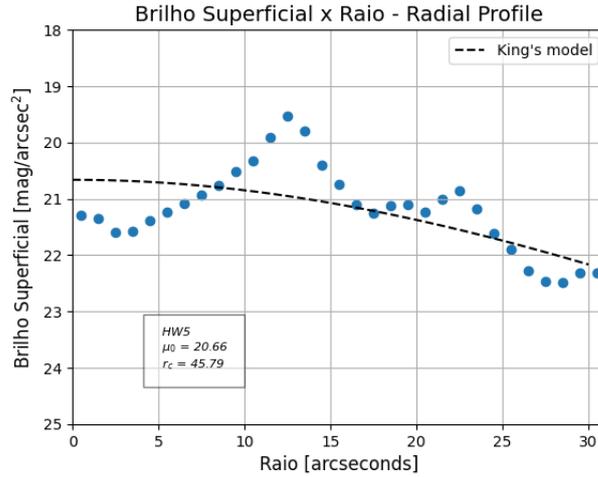


Figura 3.2: Ajuste do perfil de King ao Brilho Superficial do aglomerado HW5, obtido a partir da fotometria da banda 'r' do S-PLUS. Nesta Figura, temos os valores de fotometria obtidos a partir da função *Radial Profile*, da biblioteca em Python *Photutils*. Tal função obtém a fotometria utilizando aberturas concêntricas, partindo das coordenadas do aglomerado. Calcula o fluxo médio azimutal nas aberturas dos anéis circulares em função do raio.

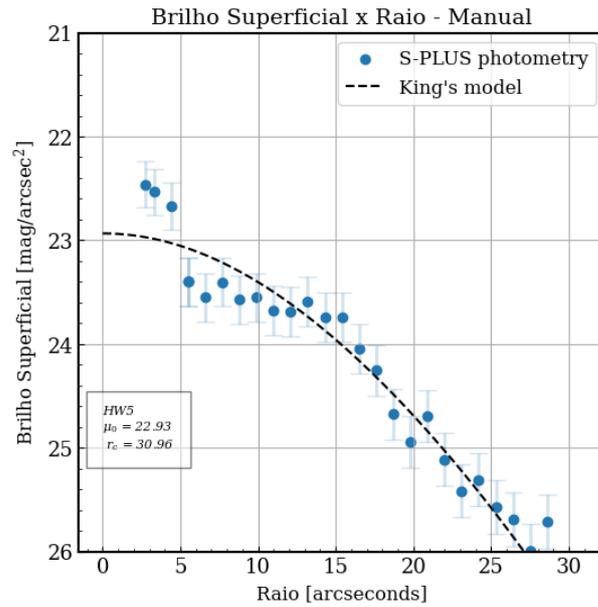


Figura 3.3: Ajuste do perfil de King ao Brilho Superficial do aglomerado HW5, obtido a partir da fotometria da banda 'r' do S-PLUS. O dados fotométricos desta figura foram obtidos com um método próprio desenvolvido utilizando também a biblioteca em Python *Photutils*, porém fazendo a construção manual de anéis para obtenção dos fluxos.

A partir desses raios, r_c e r_t , obtemos o raio de meia-luz (r_h), apresentado nas Equações 3.1 e 3.1, definido como o raio no qual fica contida metade da luminosidade total do aglomerado:

$$r_{hp} = r_c \exp\left(-\left(0.339 + 0.602c - 0.037c^2\right)\right) \quad (3.3)$$

$$r_h = 1.33(r_{hp}) \quad (3.4)$$

Utilizamos este raio para obter os fluxos fotométricos dos aglomerados, e com isso, recriar suas distribuições de energia espectral a partir do Software BAGPIPES (apresentado mais a fundo na seção 3.3).

O método que teve o melhor ajuste foi o método manual, Figura 3.3. Para o desenvolvimento desse trabalho, expandimos então a aplicação deste método manual de obtenção dos raios de meia-luz a todos os aglomerados dispostos na Seção 2.2.

3.2 Fotometrias com S-PLUS

Para iniciarmos o estudo mais aprofundado dos aglomerados selecionados das Nuvens de Magalhães, apresentados na seção 2.2, foi necessário primeiro realizarmos suas fotometrias nas 12 bandas disponíveis pelo S-PLUS. Dos 71 aglomerados apresentados, 68 estão presentes nos mapeamentos do S-PLUS. Importante destacar que utilizamos o catálogo mais atual do mapeamento, o DR4.

O processo de fotometria integrada consistiu em extrairmos o fluxo resultante da imagem dos aglomerados para cada uma das 12 bandas do S-PLUS. Para esse processo foi utilizado o `photutils`, o qual retorna os fluxos contidos em circunferências, centradas no aglomerado, até chegar em um raio máximo, colocado aqui como o raio de meia luz (r_h), obtidos a partir do método da seção 3.1.

A partir do fluxo resultante (F) para cada uma das bandas, pudemos então fazer a magnitude total do aglomerado (Equação 3.2) dobrando o fluxo obtido - dado que o raio de meia-luz é o raio em que metade do fluxo total do aglomerado está contido, e por isso, para obtermos o fluxo total, podemos apenas dobrar essa quantidade. O erro associado para cada magnitude foi obtido a partir da Equação 3.2.

$$M = -2.5 \log_{10}(2F) + ZP_{banda} \quad (3.5)$$

$$\sigma_M = 2.5 \sqrt{\frac{2F}{\log_{10}(2F)}} \quad (3.6)$$

A componente *zero-point* (ZP_{banda}) da magnitude foi obtida também a partir do catálogo DR-4 do S-PLUS (S-PLUS, 2022), visto que é uma medida de calibração e que varia para cada banda. Para extrairmos os valores de (ZP_{banda}) corretos para cada aglomerado, mapeamos o campo do S-PLUS em que cada um deles estava e buscamos os valores correspondentes.

Além disso, antes de partirmos para o uso das magnitudes, fizemos também o ajuste de avermelhamento, seguindo a Equação 3.7, com o coeficiente de extinção (k_{banda}), e avermelhamento ($E_{(B-V)}$), obtido a partir das tabelas 2.1, 2.2 e 2.3 (Santos et al. (2020)).

$$M_{banda} = -2.5 \times \log F + ZP - k_{banda} \times E_{(B-V)}, \quad (3.7)$$

Para a qual temos um coeficiente de extinção para cada banda, k_{banda} , apresentado na tabela 3.2, retirada do artigo Fabiano de Souza et al. (2024).

Tabela 3.2 - Comprimentos de onda de cada filtro do S-PLUS, conjuntamente com seus coeficientes de extinção.

Bandas	Pico do Comprimento de onda $\lambda_c[\text{Å}]$	Largura do Comprimento de $\Delta\lambda [\text{Å}]$	k_{bandas}
u	3563	352	4.90
J0378	3770	151	4.67
J0395	3940	103	4.48
J0410	4094	201	4.32
J0430	4292	201	4.11
g	4751	1545	3.67
J0515	5133	207	3.33
r	6258	1465	2.51
J0660	6614	147	2.30
i	7690	1506	1.80
J0861	8611	408	1.46
z	8831	1182	1.39

Com a biblioteca BAGPIPES, descrita na seção 3.3, utilizamos então essas magnitudes obtidas para recriarmos os espectros utilizando o método de *SED Fitting*. A partir desse

método conseguimos então obter as Idades e Metalicidades dos nossos aglomerados e com isso entendermos um pouco mais sobre nossa amostra.

3.3 SED Fitting e BAGPIPES

O método de *SED Fitting*, ou ajuste de distribuição de energia espectral, é uma técnica amplamente conhecida e utilizada dentro da Astronomia. Tal técnica nos permite classificar galáxias, construir a evolução química de suas estrelas, avaliar a taxa de formação de novas estrelas ao longo do tempo, entre muitas outras coisas - como podemos ver em Cappellari (2017); da Cunha et al. (2008); Cid Fernandes et al. (2005). Embora seja geralmente uma técnica empregada em galáxias, podemos utilizá-la para os nossos aglomerados, levando em consideração que são populações estelares mais simples.

Uma das ferramentas desenvolvidas para implementarmos o ajuste espectral é o BAGPIPES, um *software* em Python que nos permite aplicar a *SED Fittings* com base em modelos paramétricos de Histórias de Formação Estelar (SFHs), e também ajustar espectros e fotometria de casos com resolução suficiente.

Para isso, o BAGPIPES conta com uma série de modelos, baseados em inferência Bayesiana, e que levam em consideração uma variedade de aspectos como: o contínuo estelar e as linhas de emissão produzidas pelo gás ionizado das regiões de formação estelar, efeitos de atenuação devido ao meio interestelar e também efeitos de atenuação diferencial, o qual consistem em considerar linhas de emissão, por exemplo de estrelas jovens, que estão imersas em sua nuvem molecular progenitora, além de estarem atrás de uma cortina de poeira interestelar.

O espectro de uma galáxia é modelado pelo *software* a partir da Equação 3.8, na qual os parâmetros são um conjunto de *SSPs* (*Single Stellar Population*) - que consiste em populações estelares nascidas em um mesmo período, dependente do comprimento de onda λ , da idade a , da metalicidade Z e da função de massa inicial. Temos também a taxa de formação estelar (SFR, do inglês, *Star Formation Rate*), que é composta pela combinação de diferentes componentes da história de formação estelar (SFH, do inglês *Star Formation History*). Além disso, ao final da expressão temos as funções de transmissão do meio interestelar ionizado e neutro. Somado a todas essas grandezas estão os bins de idade.

$$L_\lambda = \sum_{j=1}^{N_c} \sum_{i=1}^{N_a} \text{SFR}_j(t_i) \text{SSP}(a_i; \lambda; Z_j) T^+(a_i; \lambda) T^0(a_i; \lambda) \Delta a_i \quad (3.8)$$

Calculada a Luminosidade, convertemos essa função para densidade de fluxo ($f_{\lambda, \text{obs}}$, Equação 3.9), usando a distância de luminosidade (D_L) e a função de transmissão do meio intergaláctico ($TIGM$).

$$f_{\lambda, \text{obs}}(\lambda_{\text{obs}}) = \frac{L_\lambda(\lambda)}{4\pi D_L(z_{\text{obs}})^2 (1 + z_{\text{obs}})} \text{TIGM}(\lambda; z_{\text{obs}}) \quad (3.9)$$

Dos parâmetros de Luminosidade, temos que as SSPs usadas são modeladas a partir de Bruzual e Charlot (2003), construídos com massa inicial de Kroupa e Boily (2002) e uma metalicidade Solar base de $Z = 0.02$. Para o parâmetro de SFH, como estamos modelando aglomerados estelares e não galáxias, assumimos que todas as estrelas do aglomerado foram formadas no mesmo período, e com a mesma metalicidade - tais condições caracterizam uma SFH de surto, chamada de *burst*. Para construção do modelo de *burst*, dado que ele utiliza inferência Bayesiana, temos como priores os dados dispostos na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 - Lista de parâmetros livres e fixos utilizados no ajuste com o BAGPIPES. Na coluna da esquerda, temos os livres, onde M_{formed} é a massa estelar formada, age é a idade da população estelar (com limite superior igual a 15 Ganos), Z é a metalicidade e z o *redshift*, o A_V é o parâmetro relacionado à extinção. O parâmetro fixado na coluna da direita é: o parâmetro η , relacionado à modelagem da atenuação por poeira, utilizando a lei de atenuação de Calzetti et al. (2000).

Parâmetro livre	Limites	Parâmetro fixo	Valor
$\log_{10}(M_{\text{formed}} / M_\odot)$	(0, 13)	η	0
age / Gyr	(0.01, 15)	A_V	0
Z / Z_\odot	(0, 1)		
z	(0, 0.001)		

Os limites utilizados para os parâmetros livres – Massa, Idade, Metalicidade e Redshift – foram baseados no trabalho de Fabiano de Souza et al. (2024), no qual temos como limite superior de idade a Idade do Universo, o intervalo de redshift está na ordem de grandeza do estipulado para SMC, e a faixa de Massa de 0 a 13 ($\log_{10}(M)/\log_{10}(M_\odot)$). Porém, os testes feitos durante o desenvolvimento deste estudo revelaram que a faixa de massa não tem impacto na determinação de metalicidades e idades. Isso ocorre porque a massa e a distância não alteram o formato do espectro e, conseqüentemente, não afetam

os parâmetros derivados porém, não é indicado fixá-los em zero, dessa forma mantemos o intervalo de valores apresentado na tabela.

Os parâmetros fixos, relacionados a poeira interestelar e ao avermelhamento foram definidos como 0, visto que as imagens já haviam passado por um processo de desvermelhamento. Os parâmetros posteriores são amostrados a partir do Método de Monte Carlo, utilizando Cadeia de Markov.

Resultados e Discussão

4.1 Resultados de Idade e Metalicidade

A análise da distribuição de idades, apresentada na Figura 4.2, revela algumas características importantes dos aglomerados estelares observados nas Nuvens de Magalhães. Primeiramente, nota-se que os aglomerados da amostra estão predominantemente deslocados para a direita no gráfico de idades. Esse deslocamento indica a presença de um número significativo de aglomerados mais velhos, tanto na Pequena Nuvem de Magalhães (SMC) quanto na Grande Nuvem de Magalhães (LMC).

Embora nossa distribuição possua aglomerados mais antigos sabemos que ambas as nuvens exibem uma intensa atividade de formação de estrelas, especialmente em suas regiões centrais e na região de ponte que conecta as duas galáxias. Esta atividade é intensificada pela interação mútua entre as duas galáxias, que desencadeia processos de formação estelar. Tal característica das nuvens é evidenciada também a partir das figuras 4.4 e 4.5.

Podemos observar um pico correspondente a populações estelares mais antigas, mas também observamos uma concentração de aglomerados em faixas mais jovens - entre 9.0 e 8.25 Ganos, que é consistente com as expectativas para a evolução de galáxias. As populações mais velhas refletem períodos de formação estelar passados, enquanto as populações mais jovens indicam episódios mais recentes de formação de estrelas. A presença desta diferença é um aspecto esperado e importante na análise da história de formação estelar e evolução das Nuvens de Magalhães como um todo.

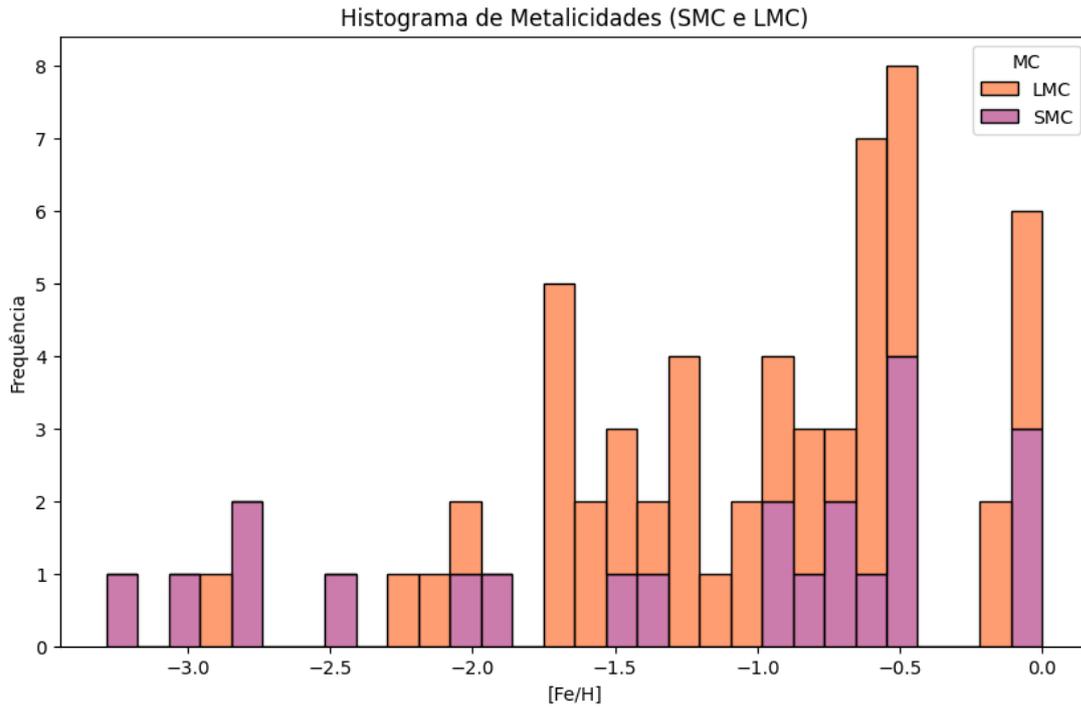


Figura 4.1: Histograma de Metalicidades ($[\text{Fe}/\text{H}]$) dos aglomerados da nossa amostra, separados pelas suas respectivas Nuvens.

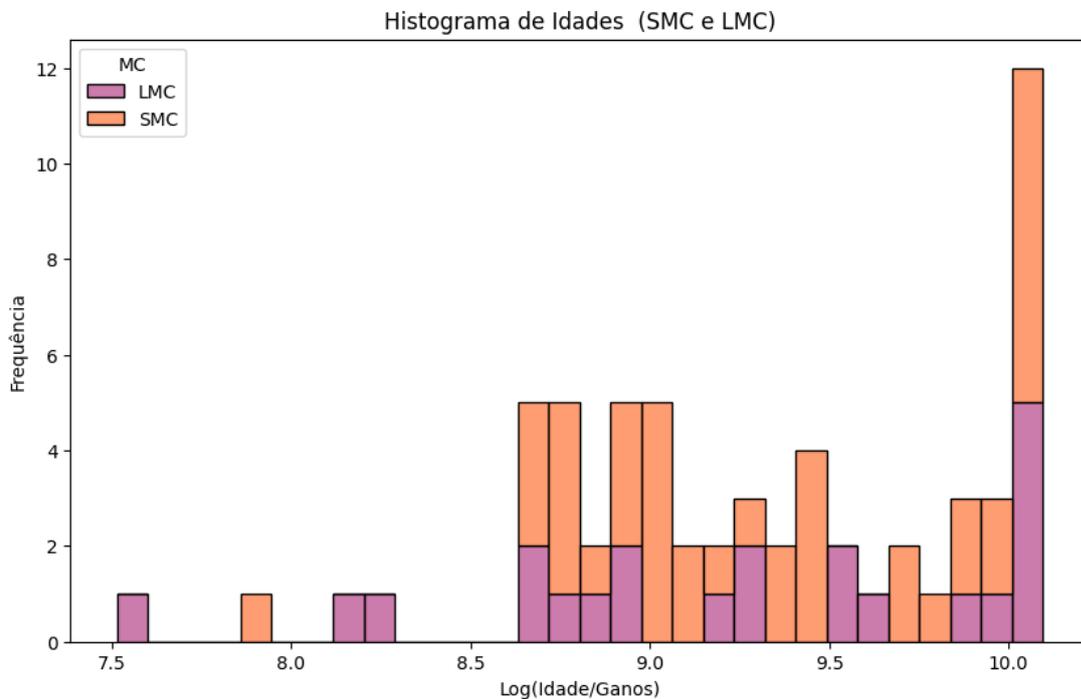


Figura 4.2: Histograma de Idades, em Ga, dos aglomerados da nossa amostra, separados pelas suas respectivas Nuvens de origem.

Para complementarmos a nossa informação sobre as Idades, estudamos também a dis-

tribuição de Metalicidade para as duas Nuvens, apresentada na Figura 4.1. Observamos uma grande tendência para aglomerados nas faixas mais intermediárias de metalicidade, o que é o esperado nesse caso, levando em consideração ao que pudemos constatar para as idades obtidas - já que estamos vendo aglomerados com idades mais medianas.

Dessa forma, ainda relacionando as Idades e Metalicidades, fizemos o gráfico de Idade x Metalicidade, Figura 4.3. A partir deste gráfico, podemos observar que os valores que obtivemos estão dentro do esperado, isto porque, estamos conseguindo observar a relação usual entre Idade e Metalicidade, ou seja aglomerados mais ricos em metal são mais jovens e aglomerados mais pobres em metais são mais velhos.

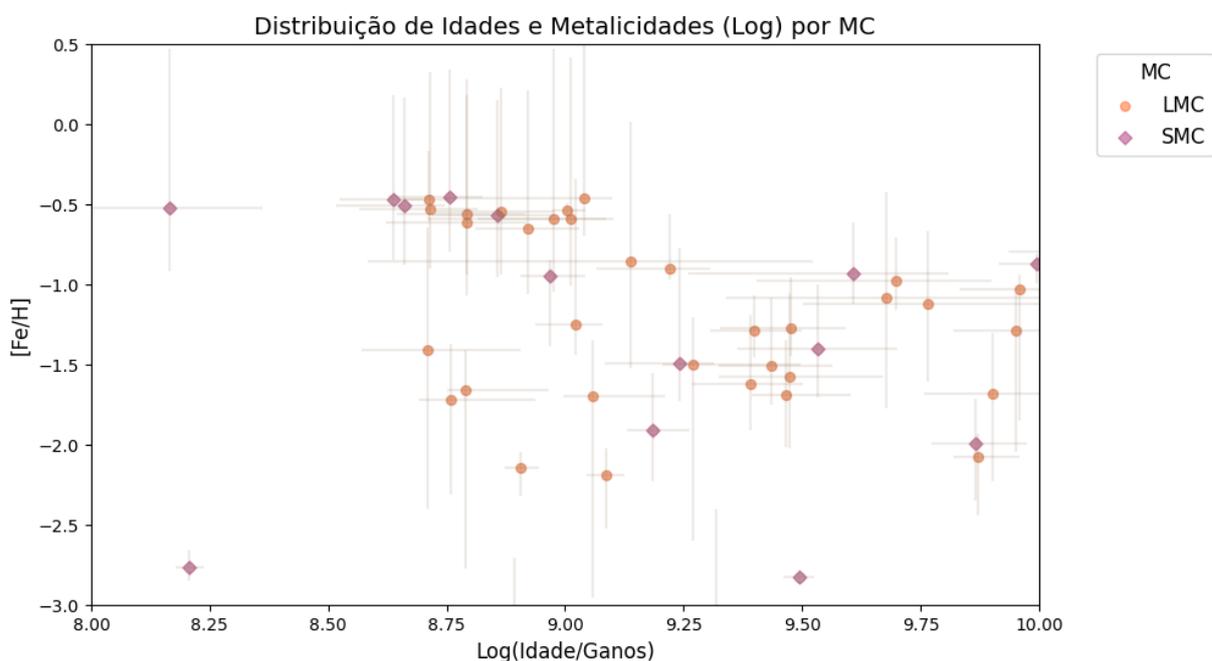


Figura 4.3: Relação entre Idade (Ga) e Metalicidade $[Fe/H]$ para os aglomerados da nossa amostra, separados pelas suas respectivas Nuvens de origem.

Ademais, podemos observar a partir da nossa relação idade-metalicidade, que os aglomerados mais jovens, com idades entre 8.0Ga e 9.25 Ga, tendem a ter maior metalicidade, enquanto os aglomerados mais antigos, com idades maiores, apresentam uma maior variação de metalicidade, com tendência a valores mais baixos. Na LMC, os aglomerados se concentram em idades entre 8.75 Ga e 9.75 Ga e metalicidades entre -0.5 e -1.5. Na SMC, os aglomerados também se concentram entre 8.75 Ga e 9.75 Ga em termos de idade, mas há maior dispersão. Tal comportamento, tanto para aglomerados da LMC quanto para SMC é esperado, como é observado na literatura, a exemplo de Dias, B. et al. (2010),

e em Bica et al. (2020b) para a SMC.

A relação entre idade e metalicidade reflete a história de formação e evolução estelar das galáxias. Populações estelares mais antigas se formaram com menos elementos pesados, resultando em menor metalicidade. Com o tempo, a metalicidade aumenta devido à nucleossíntese. A distribuição de metalicidades sugere que LMC e SMC tiveram processos de formação estelar e enriquecimento químico semelhantes, mas a maior dispersão em idades da SMC pode indicar diferenças nos episódios de formação estelar Bekki e Chiba (2005).

Para entendermos mais a fundo de como nossos aglomerados estão dispostos dentro das Nuvens de Magalhães, e como as Idades e Metalicidades se comportam estruturalmente nas Galáxias obtivemos também gráficos de distribuição espacial, coloridos a partir das respectivas Idades, Figura 4.4, e Metalicidades, Figura 4.5, dos aglomerados.

Distribuição espacial dos aglomerados estelares na SMC (losangos) e LMC (círculos), por Idades.

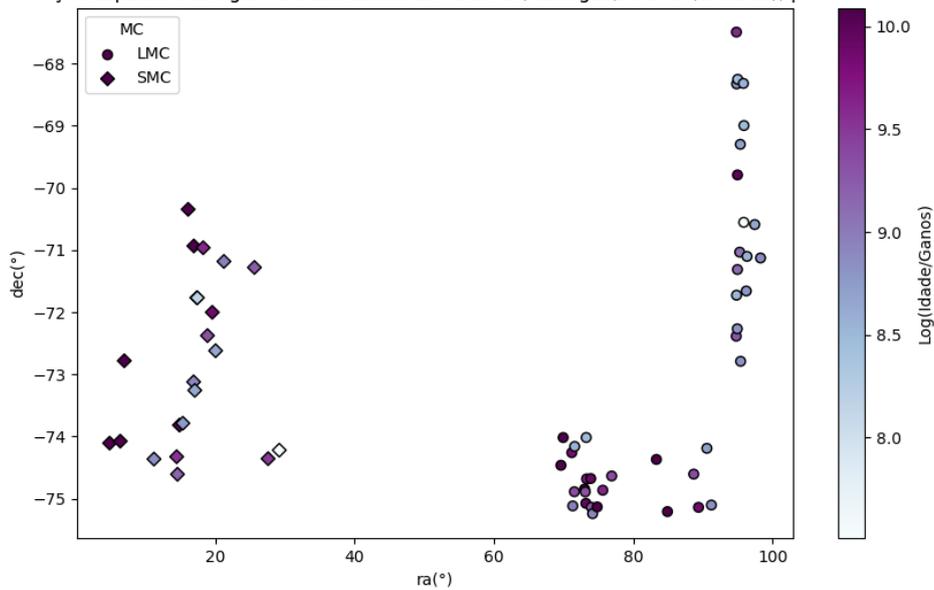


Figura 4.4: Distribuição espacial dos aglomerados estelares na SMC (losangos) e LMC (círculos), coloridos com suas respectivas Idades.

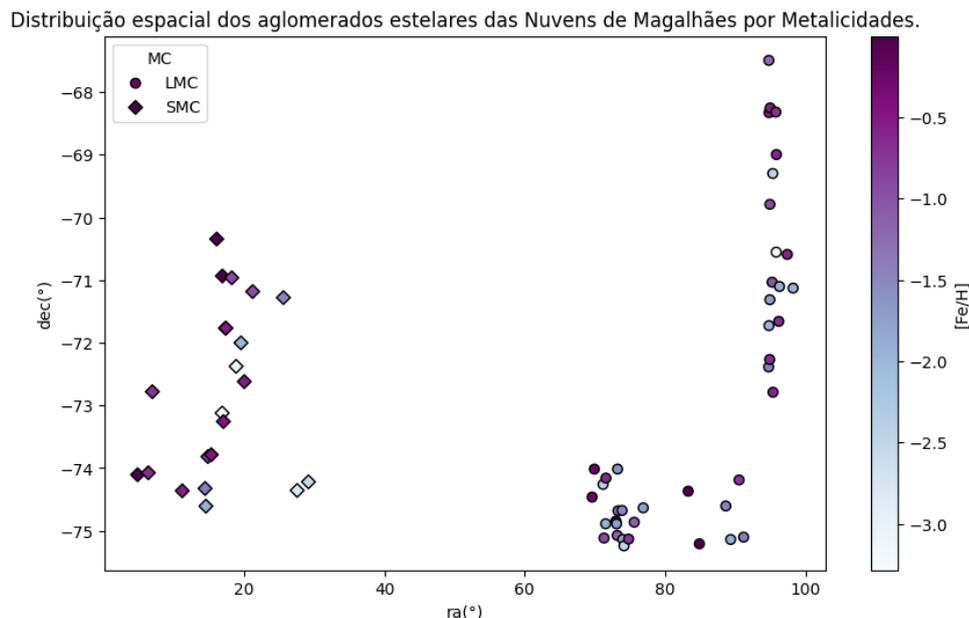


Figura 4.5: Distribuição espacial dos aglomerados estelares na SMC (losangos) e LMC (círculos), coloridos com suas respectivas Metalicidades $[Fe/H]$.

De Fabiano de Souza et al. (2024), temos como o esperado que regiões mais centrais de Galáxias possuam processos de formações mais intensos acontecendo e, dessa forma, teríamos aglomerados mais jovens e mais ricos em Metais mais ao centro. Outra região conhecida por ser rica em processos de formação estelar, é a região de interação – ou região de ponte entre as duas Nuvens, mas que nesse caso não temos aglomerados.

Analisando as nossas Figuras 4.4 e 4.5, podemos ver que as distribuições de idade estão aderentes ao esperado: dado que para a SMC temos aglomerados mais velhos nas regiões externas e aglomerados um pouco mais jovens na região interna, no intervalo de declinação de -72° a -74° , com ascensão reta em 20° . Para a LMC, podemos ver que temos populações estelares com idades menos avançadas na região central, onde também é esperado que isso acontecesse, por volta de declinação de -70° e ascensão reta de 90° .

Conclusões

Este trabalho teve como objetivo principal a obtenção de Idades e Metalicidades de aglomerados presentes nas Nuvens de Magalhães, utilizando os raios de meia-luz construídos a partir do método exposto na seção 3.1, com a obtenção de fotometrias a partir dos dados do S-PLUS.

A partir dos histogramas de Idade e Metalicidade apresentados nas figuras 4.1 e 4.2, podemos concluir que nossa amostra não é ideal em cobertura de idade e metalicidade, pois fica claro que o que temos é uma amostra com idades e metalicidades intermediárias, em sua grande maioria, faltando objetos nos extremos destas distribuições. No entanto, os parâmetros medidos estão dentro da janela de valores esperados, como mostrado em estudos anteriores sobre o processo de formação de galáxias e observações em outros trabalhos, como Dias, B. et al. (2010) e Fabiano de Souza et al. (2024)

Em complemento a isso, a partir da relação de Idade e Metalicidade apresentada na Figura 4.3, podemos observar que os dados obtidos a partir do BAGPIPES estão em concordância com a teoria, ou seja, objetos mais velhos são menos ricos em metais, e objetos mais jovens são mais ricos em metais. Porém, podemos observar que os dados da SMC, por exemplo, estão muito espalhados, e se tivéssemos um número maior de aglomerados poderíamos ter mais certeza que os valores estão aderentes o suficiente a teoria. Além disso, os dados da LMC, que estão em maioria na amostra, estão concentrados nas regiões mais centrais do gráfico (Figura 4.3), o que nos evidencia também uma falta de uma amostra mais abrangente de aglomerados.

Com as distribuições espaciais de idades e metalicidades, nas figuras 4.4 e 4.1, respectivamente, podemos indicar que temos, de maneira geral, resultados mais coerentes para os valores em questão, como nas regiões mais centrais da SMC termos alguns aglomerados

mais jovens (Fabiano de Souza et al., 2024).

Com esses pontos em mente, podemos apontar os raios de meia-luz como um dos possíveis motivos para que os nossos resultados não estejam ideais, embora apresentem resultados dentro do esperado. Isso porque em sua obtenção (Seção 3.1) ainda é necessário revermos casos específicos e tratarmos melhor a determinação do background, por exemplo, o que afeta diretamente na nossa fotometria e para um *SED-Fitting* preciso, precisamos que a fotometria também, seja bem adequada e precisa, para mitigarmos a propagação de erros. Além disso, para uma melhor análise seria ideal termos uma amostra maior de aglomerados, dado que amostra utilizada é muito limitada em número de aglomerados, principalmente para SMC, e distribuída pouco uniformemente nas áreas das galáxias.

Para trabalhos futuros, portanto, é extremamente necessário complementarmos os resultados obtidos nesse trabalho com uma amostra mais rica em volumes de aglomerados nas Nuvens de Magalhães e também uma comparação com Idades e Metalicidades obtidas a partir de fotometrias feitas com outros valores de raios de meia-luz. Pois, assim, teremos insumos para uma análise mais profunda e rigorosa das Nuvens de Magalhães e suas características químicas, evolutivas e de interação.

Referências Bibliográficas

- Aime C., Soummer R., Thomas S., SAM - the SOAR Adaptive Module, European Astronomical Society Publications Series, 2004, vol. 12, p. 177–184
- Bekki K., Chiba M., Formation and evolution of the Magellanic Clouds – I. Origin of structural, kinematic and chemical properties of the Large Magellanic Cloud, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2005, vol. 356, p. 680
- Bica E., Westera P., Kerber L. d. O., Dias B., Maia F., Santos João F. C. J., Barbuy B., Oliveira R. A. P., An Updated Small Magellanic Cloud and Magellanic Bridge Catalog of Star Clusters, Associations, and Related Objects, AJ, 2020a, vol. 159, p. 82
- Bica E., Westera P., Kerber L. d. O., Dias B., Maia F., Santos João F. C. J., Barbuy B., Oliveira R. A. P., An Updated Small Magellanic Cloud and Magellanic Bridge Catalog of Star Clusters, Associations, and Related Objects, AJ, 2020b, vol. 159, p. 82
- Bradley L., Sipócz B., Robitaille T., Tollerud E., Vinícius Z., Deil C., Barbary K., Wilson T. J., Busko I., Günther H. M., Cara M., Conseil S., Bostroem A., Droettboom M., Bray E. M., Bratholm L. A., Lim P. L., Barentsen G., Craig M., Pascual S., Perren G., Greco J., Donath A., de Val-Borro M., Kerzendorf W., Bach Y. P., Weaver B. A., D'Eugenio F., Souchereau H., Ferreira L., , 2020 astropy/photutils: 1.0.0
- Bruzual G., Charlot S., Stellar population synthesis at the resolution of 2003, MNRAS, 2003, vol. 344, p. 1000
- Calzetti D., Armus L., Bohlin R. C., Kinney A. L., Koornneef J., Storchi-Bergmann T., The Dust Content and Opacity of Actively Star-forming Galaxies, ApJ, 2000, vol. 533, p. 682

- Cappellari M., Improving the full spectrum fitting method: accurate convolution with Gauss-Hermite functions, *MNRAS*, 2017, vol. 466, p. 798
- Carnall A. C., McLure R. J., Dunlop J. S., Davé R., Inferring the star-formation histories of massive quiescent galaxies with BAGPIPES: Evidence for multiple quenching mechanisms, *MNRAS*, 2018
- Cid Fernandes R., Mateus A., Sodr e L., Stasi nska G., Gomes J. M., Semi-empirical analysis of Sloan Digital Sky Survey galaxies - I. Spectral synthesis method, *MNRAS*, 2005, vol. 358, p. 363
- da Cunha E., Charlot S., Elbaz D., A simple model to interpret the ultraviolet, optical and infrared emission from galaxies, *MNRAS*, 2008, vol. 388, p. 1595
- de Souza G. F., , 2022 Idades e metalicidades de aglomerados estelares na Pequena Nuvem de Magalhães utilizando fotometria integrada do S-PLUS
- Dias, B. Coelho, P. Barbuy, B. Kerber, L. Idiart, T. Age and metallicity of star clusters in the Small Magellanic Cloud from integrated spectroscopy*, *AA*, 2010, vol. 520, p. A85
- Fabiano de Souza G., Westera P., Almeida-Fernandes F., Limberg G., Dias B., Hernandez-Jimenez J. A., Herpich F. R., Kerber L. O., Machado-Pereira E., Perottoni H. D., Guerco R., Li L., Sampedro L., Kanaan A., Ribeiro T., Schoenell W., Mendes de Oliveira C., Ages and metallicities of stellar clusters using S-PLUS narrow-band integrated photometry: the Small Magellanic Cloud, *MNRAS*, 2024, vol. 527, p. 1733
- King I. R., The structure of star clusters. I. an empirical density law", *journal*, 1962, vol. 67, p. 471
- Kroupa P., Boily C. M., On the mass function of star clusters, *MNRAS*, 2002, vol. 336, p. 1188
- Marín-Franch A., Chueca S., Moles M., Benitez N., Taylor K., Cepa J., Cenarro A. J., Cristobal-Hornillos D., Ederoclite A., Gruel N., Hernández-Fuertes J., López-Sainz A., Luis-Simoes R., Rueda-Teruel F., Rueda-Teruel S., Varela J., Yanes-Díaz A., Brauneck U., Danielou A., Dupke R., Fernández-Soto A., Mendes de Oliveira C., Sodr e L., Design

-
- of the J-PAS and J-PLUS filter systems. In *Modern Technologies in Space- and Ground-based Telescopes and Instrumentation II* , vol. 8450 of *Proc. SPIE*, 2012, p. 84503S
- Mendes de Oliveira C. e. a., The Southern Photometric Local Universe Survey (S-PLUS): improved SEDs, morphologies, and redshifts with 12 optical filters, *MNRAS*, 2019, vol. 489, p. 241
- Messier C., *Catalogue des Nébuleuses & des amas d'Étoiles, que l'on découvre parmi les Étoiles fixes sur l'horizon de Paris; observées à l'Observatoire de la Marine, avec differens instruments*, *Mémoires de l'Académie Royale des Sciences* for 1771, 1774
- S-PLUS, 2022 S-PLUS documentation DR4
- Santos João F C J., Maia F. F. S., Dias B., Kerber L. d. O., Piatti A. E., Bica E., Angelo M. S., Minniti D., Pérez-Villegas A., Roman-Lopes A., Westera P., Fraga L., Quint B., Sanmartim D., The VISCACHA survey – II. Structure of star clusters in the Magellanic Clouds periphery, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2020, vol. 498, p. 205