



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS  
INSTITUTO DE FÍSICA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FÍSICA

FRANKLIN TYERRY SILVA SAMPAIO

**Identificação de estrelas do tipo A na  
base de dados do S-PLUS e  
estimativas de seus parâmetros  
atmosféricos**

GOIÂNIA  
2025



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS  
INSTITUTO DE FÍSICA

## TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO (TECA) PARA DISPONIBILIZAR VERSÕES ELETRÔNICAS DE TESES

### E DISSERTAÇÕES NA BIBLIOTECA DIGITAL DA UFG

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Goiás (UFG) a disponibilizar, gratuitamente, por meio da Biblioteca Digital de Teses e Dissertações (BDTD/UFG), regulamentada pela Resolução CEPEC nº 832/2007, sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a [Lei 9.610/98](#), o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou download, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

O conteúdo das Teses e Dissertações disponibilizado na BDTD/UFG é de responsabilidade exclusiva do autor. Ao encaminhar o produto final, o autor(a) e o(a) orientador(a) firmam o compromisso de que o trabalho não contém nenhuma violação de quaisquer direitos autorais ou outro direito de terceiros.

#### 1. Identificação do material bibliográfico

Dissertação     Tese     Outro\*: \_\_\_\_\_

\*No caso de mestrado/doutorado profissional, indique o formato do Trabalho de Conclusão de Curso, permitido no documento de área, correspondente ao programa de pós-graduação, orientado pela legislação vigente da CAPES.

**Exemplos:** Estudo de caso ou Revisão sistemática ou outros formatos.

#### 2. Nome completo do autor

Franklin Tyerry Silva Sampaio

#### 3. Título do trabalho

Identificação de estrelas do tipo A na base de dados do S-PLUS e estimativas de seus parâmetros atmosféricos

#### 4. Informações de acesso ao documento (este campo deve ser preenchido pelo orientador)

Concorda com a liberação total do documento  SIM     NÃO<sup>1</sup>

[1] Neste caso o documento será embargado por até um ano a partir da data de defesa. Após esse período, a possível disponibilização ocorrerá apenas mediante:

a) consulta ao(a) autor(a) e ao(a) orientador(a);

b) novo Termo de Ciência e de Autorização (TECA) assinado e inserido no arquivo da tese ou dissertação.

O documento não será disponibilizado durante o período de embargo.

Casos de embargo:

- Solicitação de registro de patente;
- Submissão de artigo em revista científica;
- Publicação como capítulo de livro;
- Publicação da dissertação/tese em livro.

**Obs. Este termo deverá ser assinado no SEI pelo orientador e pelo autor.**



Documento assinado eletronicamente por **Franklin Tyerry Silva Sampaio, Discente**, em 28/03/2025, às 11:44, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Rafael Miloni Santucci, Professor do Magistério Superior**, em 02/04/2025, às 21:18, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://sei.ufg.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **5270999** e o código CRC **03EB6C2B**.

FRANKLIN TYERRY SILVA SAMPAIO

**Identificação de estrelas do tipo A na base  
de dados do S-PLUS e estimativas de seus  
parâmetros atmosféricos**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Física, do Instituto de Física, da Universidade Federal de Goiás (UFG), como requisito para obtenção do título de Mestre em Física.

Área de concentração: Física

Linha de pesquisa: Astrofísica Estelar

Orientador: Prof. Dr. Rafael Miloni Santucci

GOIÂNIA

2025

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UFG.

Sampaio, Franklin Tyerry Silva  
Identificação de estrelas do tipo A na base de dados do S-PLUS e estimativas de seus parâmetros atmosféricos [manuscrito] / Franklin Tyerry Silva Sampaio. - 2025.  
70 f.: il.

Orientador: Prof. Dr. Rafael Miloni Santucci.  
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Goiás, Instituto de Física (IF), Programa de Pós-Graduação em Física, Goiânia, 2025.  
Bibliografia.  
Inclui gráfico, tabelas, lista de figuras, lista de tabelas.

1. Estrelas. 2. S-PLUS. 3. Fotometria. I. Santucci, Rafael Miloni, orient. II. Título.



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS

INSTITUTO DE FÍSICA

### ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO

Ata nº 224 da sessão de Defesa de Dissertação de Franklin Tyerry Silva Sampaio, que confere o título de Mestre em Física, na área de concentração em Física.

Aos 12 dias do mês de março de 2025, a partir das 13h00min, por meio de videoconferência, realizou-se a sessão pública de Defesa de Dissertação intitulada “Identificação de estrelas do tipo A na base de dados do S-PLUS e estimativas de seus parâmetros atmosféricos”. Os trabalhos foram instalados pelo Orientador, Professor Doutor Rafael Miloni Santucci (IESA/UFG), com a participação dos demais membros da Banca Examinadora: Professor Doutor Vinicius Moris Placco (NSF-NOIRLab/EUA), membro titular externo; e Professor Doutor Hélio Dotto Perotoni (LNA/MCTI), membro titular interno. Durante a arguição, os membros da banca não fizeram sugestão de alteração do título do trabalho. A Banca Examinadora reuniu-se em sessão secreta a fim de concluir o julgamento da Dissertação, tendo sido o candidato aprovado pelos seus membros. Proclamados os resultados pelo Professor Doutor Rafael Miloni Santucci, Presidente da Banca Examinadora, foram encerrados os trabalhos e, para constar, lavrou-se a presente ata que é assinada pelos membros da Banca Examinadora, aos 12 dias do mês de março de 2025.

TÍTULO SUGERIDO PELA BANCA



Documento assinado eletronicamente por **Vinicius Moris Placco, Usuário Externo**, em 12/03/2025, às 16:28, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Hélio Dotto Perotoni, Usuário Externo**, em 12/03/2025, às 17:50, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Rafael Miloni Santucci, Professor do Magistério Superior**, em 12/03/2025, às 19:15, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://sei.ufg.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **5115045** e o código CRC **D2FEE978**.



# Agradecimentos

Ao meu orientador, Prof. Dr. Rafael Miloni Santucci, expresso minha sincera gratidão. Sua orientação foi fundamental para o desenvolvimento desta dissertação, mas o que realmente se destacou foi sua abordagem única no meio acadêmico. Demonstrou compreensão e empatia excepcionais, indo além das expectativas convencionais de um orientador. Em um ambiente frequentemente caracterizado por pressões intensas, sua atitude compassiva e compreensiva criou um espaço propício para o aprendizado e o crescimento. Sou profundamente grato por sua orientação, que equilibrou rigor científico com genuína preocupação pelo bem-estar de seus orientandos, uma combinação rara e valiosa na academia.

Aos meus pais, Katya Kely Monteiro da Silva e José Jéferson Sampaio, pilares incondicionais desta jornada, dedico um agradecimento especial. Como jardineiros pacientes de sonhos improváveis, vocês nunca podaram as asas da minha imaginação, mesmo quando meus objetivos pareciam tão distantes quanto as estrelas que hoje estudo. Obrigado por serem o ponto de partida seguro para minhas jornadas mais ousadas e o farol que sempre me guia de volta para casa.

Aos amigos que fiz no caminho, dedico um agradecimento caloroso. Nossas conversas, que iam muito além das salas de aula, não apenas enriqueceram minha formação acadêmica, mas também moldaram quem sou hoje.

À UFG e ao Instituto de Física, agradeço pelo ambiente intelectual estimulante, pela infraestrutura essencial e pelas oportunidades que moldaram minha trajetória acadêmica, fornecendo as bases sólidas para o desenvolvimento desta pesquisa.

À CAPES, pelo apoio financeiro, que possibilitou a dedicação integral a esta pesquisa e contribuiu significativamente para a realização deste trabalho e para meu desenvolvimento acadêmico.



*“So once you do know what the question actually is, you’ll know what the answer means.”*

Douglas Adams - The Hitchhiker’s Guide to the Galaxy



# Resumo

Este trabalho tem o objetivo de identificar candidatas a estrelas do tipo A na base de dados do *Southern Photometric Local Universe Survey* (S-PLUS). Os dados deste levantamento, puramente fotométrico, foram cruzados com outras bases para reunir informações espectroscópicas e astrométricas de referência. Através destas comparações, foram definidos os limites para a seleção de estrelas do tipo A usando a fotometria do S-PLUS. Com o auxílio de uma ferramenta estatística robusta, o *Gaussian Mixture Model* (GMM), foram definidos critérios para distinguir entre estrelas azuis do ramo horizontal (BHB) e estrelas da sequência principal em uma amostra de estrelas do tipo A do S-PLUS. Os principais parâmetros atmosféricos, como  $T_{\text{eff}}$ ,  $\log g$  e  $[\text{Fe}/\text{H}]$ , foram determinados para milhares de estrelas de tipo A com a ajuda de um software de regressão simbólica. Por fim, as estrelas BHB identificadas tiveram distâncias estimadas através de uma calibração de magnitude absoluta.

**Palavras-chave:** Estrelas, S-PLUS, Fotometria.



# Abstract

This work aims to identify candidate A-type stars within the *Southern Photometric Local Universe Survey* (S-PLUS) database. The data from this purely photometric survey were cross-matched with other databases to gather reference spectroscopic and astrometric information. Through comparisons, limits were defined for the selection of A-type stars using S-PLUS photometry. With the aid of a robust statistical tool, the *Gaussian Mixture Model* (GMM), criteria were established to distinguish between blue horizontal branch (BHB) stars and main sequence stars in a sample of A-type stars from S-PLUS. The main atmospheric parameters, like  $T_{\text{eff}}$ ,  $\log g$  and  $[\text{Fe}/\text{H}]$ , were determined for thousands of A-type stars using a symbolic regression software. Finally, the distance were estimated through an absolute magnitude calibration for the selected BHB stars.

**Keywords:** Stars, S-PLUS, Photometry.



# Lista de Figuras

1.1	Diagrama HR de estrelas do aglomerado NGC 5904. . . . .	18
1.2	Espectros normalizados para estrelas de cada tipo espectral. . . . .	19
1.3	Espectro de uma estrela do tipo A. . . . .	20
1.4	Diagrama HR do aglomerado globular M55. . . . .	22
1.5	Diagrama cor vs cor de estrelas classificadas espectroscopicamente pelo SDSS. . . . .	24
1.6	Espectros normalizados de uma estrela BHB e uma estrela BS. . . . .	24
2.1	Telescópio brasileiro T80S. . . . .	27
2.2	Campos observados pelo S-PLUS DR4 em coordenadas equatoriais. . . . .	28
2.3	Sistema <i>Javalambre</i> de 12 filtros presente no S-PLUS. . . . .	29
3.1	Diagrama ( $u_{\text{JAVA}}-g$ ) x ( $g-r$ ) do S-PLUS para estrelas do tipo A selecionadas. . . . .	34
3.2	Distribuição dos valores de LOGG_ADOP do SSPP para as estrelas do tipo A selecionadas. . . . .	35
3.3	Análise exploratória de cores do S-PLUS para separação entre estrelas BHB e estrelas BS. . . . .	37
3.4	Diagrama ( $u_{\text{JAVA}}-J0378$ ) x ( $u_{\text{JAVA}}-J0395$ ) para estrelas do tipo A selecionadas. . . . .	38
3.5	Diagrama ( $u_{\text{JAVA}}-J0378$ ) vs ( $u_{\text{JAVA}}-J0395$ ) para as estrelas selecionadas, utilizando critérios para selecionar estrelas do tipo A, no S-PLUS DR4. . . . .	39
3.6	Diagramas ( $u_{\text{JAVA}}-J0378$ ) vs ( $u_{\text{JAVA}}-J0395$ ) com valores de $T_{\text{eff}}$ e BP-RP do <i>Gaia</i> DR3. . . . .	40
3.7	Diagramas cor-cor que melhor separam estrelas do tipo A e estrelas mais frias no S-PLUS. . . . .	40

4.1	Diagrama cor-cor (J0410-J0515) x (J0430-J0861) mostrando a distribuição de estrelas do tipo A e estrelas mais frias com curvas de nível obtidas via GMM para classificação espectral. . . . .	44
4.2	Diagrama ( $u_{\text{JAVA}}-J0378$ ) vs ( $u_{\text{JAVA}}-J0395$ ) para estrelas do tipo A no S-PLUS, como curvas de nível obtidas via GMM para agrupamento e separação de estrelas BHB e BS. . . . .	46
5.1	Complexidade x MAE para soluções de <code>Teff_SPLUS</code> . . . . .	51
5.2	Análise de resíduos para <code>Teff_SPLUS</code> . . . . .	52
5.3	<code>TEFF_ADOP</code> x ( $g-z$ ), com ajuste para <code>Teff_SPLUS</code> . . . . .	52
5.4	Complexidade x MAE para soluções de <code>logg_SPLUS</code> . . . . .	53
5.5	<code>LOGG_ADOP</code> x ( $u_{\text{JAVA}}-J0378$ ), com ajuste para <code>logg_SPLUS</code> . . . . .	54
5.6	Análise de resíduos para <code>logg_SPLUS</code> . . . . .	54
5.7	Complexidade x MAE para soluções de <code>FEH_SPLUS</code> . . . . .	55
5.8	Complexidade x <code>CV_error</code> para soluções de <code>FEH_SPLUS</code> . . . . .	56
5.9	Análise de resíduos para <code>FEH_SPLUS</code> . . . . .	57
6.1	Comparação entre índices de cor ( $u-r$ ) do SDSS e S-PLUS. . . . .	60
6.2	Comparação entre distâncias calculadas por <a href="#">Barbosa et al. (2022)</a> ( $D_{\text{SDSS}}$ ) e as distâncias obtidas usando o índice de cor corrigido do S-PLUS ( $D_{\text{SPLUS}}$ ). . . . .	61
6.3	Distribuição espacial de estrelas BHB do S-PLUS na Galáxia em coordenadas cartesianas. . . . .	61

# Lista de Tabelas

2.1	Filtros estreitos do S-PLUS e as principais linhas de absorção localizadas na janela de transmissão de cada filtro ( <a href="#">Perottoni et al., 2024</a> ) . . . . .	29
-----	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----



# Sumário

1. <i>Introdução</i> . . . . .	17
1.1 <i>Classificação espectral das estrelas</i> . . . . .	19
1.2 <i>Estrelas pobres em metais</i> . . . . .	20
1.2.1 <i>Estrelas azuis tardias</i> . . . . .	21
1.2.2 <i>Estrelas azuis de ramo horizontal</i> . . . . .	23
1.3 <i>Objetivos</i> . . . . .	25
2. <i>Base de dados</i> . . . . .	27
2.1 <i>Southern Photometric Local Universe Survey - S-PLUS</i> . . . . .	27
2.1.1 <i>Características do sistema fotométrico do S-PLUS</i> . . . . .	28
2.2 <i>Sloan Digital Sky Survey - SDSS</i> . . . . .	30
2.2.1 <i>Amostra de estrelas do tipo A</i> . . . . .	30
2.3 <i>Gaia</i> . . . . .	31
3. <i>Identificação de estrelas do tipo A</i> . . . . .	33
3.1 <i>Estrelas do tipo A no diagrama cor-cor do S-PLUS</i> . . . . .	33
3.2 <i>Estrelas da sequência principal e estrelas do ramo horizontal</i> . . . . .	35
3.3 <i>Amostra de estrelas do tipo A no S-PLUS</i> . . . . .	38
3.3.1 <i>Contaminação por estrelas mais frias</i> . . . . .	39
4. <i>Distinção fotométrica entre estrelas BHB e estrelas da sequência principal</i> . . . . .	43
4.1 <i>Gaussian Mixture Model (GMM)</i> . . . . .	43
4.2 <i>Definindo estrelas do tipo A usando o GMM</i> . . . . .	44
4.3 <i>Separando estrelas BHB e estrelas da sequência principal usando o GMM</i> . . . . .	45

5. <i>Estimativas de parâmetros atmosféricos</i> . . . . .	49
5.1 Estimativas de temperatura efetiva (Teff_SPLUS) . . . . .	50
5.2 Estimativas de gravidade superficial (logg_SPLUS) . . . . .	53
5.3 Estimativa de metalicidade (FEH_SPLUS) . . . . .	55
6. <i>Magnitudes absolutas e distâncias de estrelas BHB</i> . . . . .	59
7. <i>Considerações finais e perspectivas</i> . . . . .	63
<i>Referências</i> . . . . .	65

## Introdução

Há muito tempo sabe-se que estrelas se formam a partir do colapso gravitacional de grandes nuvens de gás (Bok e Reilly, 1947; Klessen, 2011). Essas nuvens são compostas principalmente de Hidrogênio (H) e Hélio (He) e, portanto, as estrelas formadas por elas ou através delas são compostas, inicialmente, quase totalmente por esses dois elementos. Entretanto, ao atingir estágios avançados de sua evolução, algumas estrelas mais massivas podem explodir como supernovas, enquanto outras, através de ventos estelares ou pela formação de nebulosas planetárias, também devolvem ao meio interestelar os elementos que fundiram ao longo do tempo. Assim, as nuvens de gás interestelares se tornam cada vez mais enriquecidas em elementos mais pesados, que na Astronomia são genericamente chamados de metais, e darão origem a novas gerações (populações) de estrelas cada vez mais ricas em metais (Beers e Christlieb, 2005).

Uma ferramenta extremamente importante no estudo de evolução estelar é o diagrama Hertzsprung-Russell<sup>1</sup>, ou diagrama HR, que nos permite agrupar e organizar as estrelas de acordo com seus estágios evolutivos, utilizando suas temperaturas (ou índices de cor) e magnitudes (ou luminosidades). Na Figura 1.1 podemos ver um exemplo de diagrama HR para estrelas no aglomerado globular M5 (NGC 5904). Nele é possível observar que essas estrelas se organizam em regiões bem definidas. Essas regiões no diagrama definem os diferentes estágios evolutivos das estrelas nesse aglomerado. Dois destes estágios são particularmente importantes para o entendimento deste trabalho, são eles: as estrelas de sequência principal (indicadas pelos pontos roxos para  $M_v > \sim 18$ ) e as estrelas de ramo horizontal (representadas pelos pontos amarelos).

---

<sup>1</sup> O diagrama HR recebeu o nome dos dois pesquisadores que o descobriram de forma independente, o dinamarquês Ejnar Hertzsprung, em 1911, e o norte-americano Henry Norris Russell, em 1913.

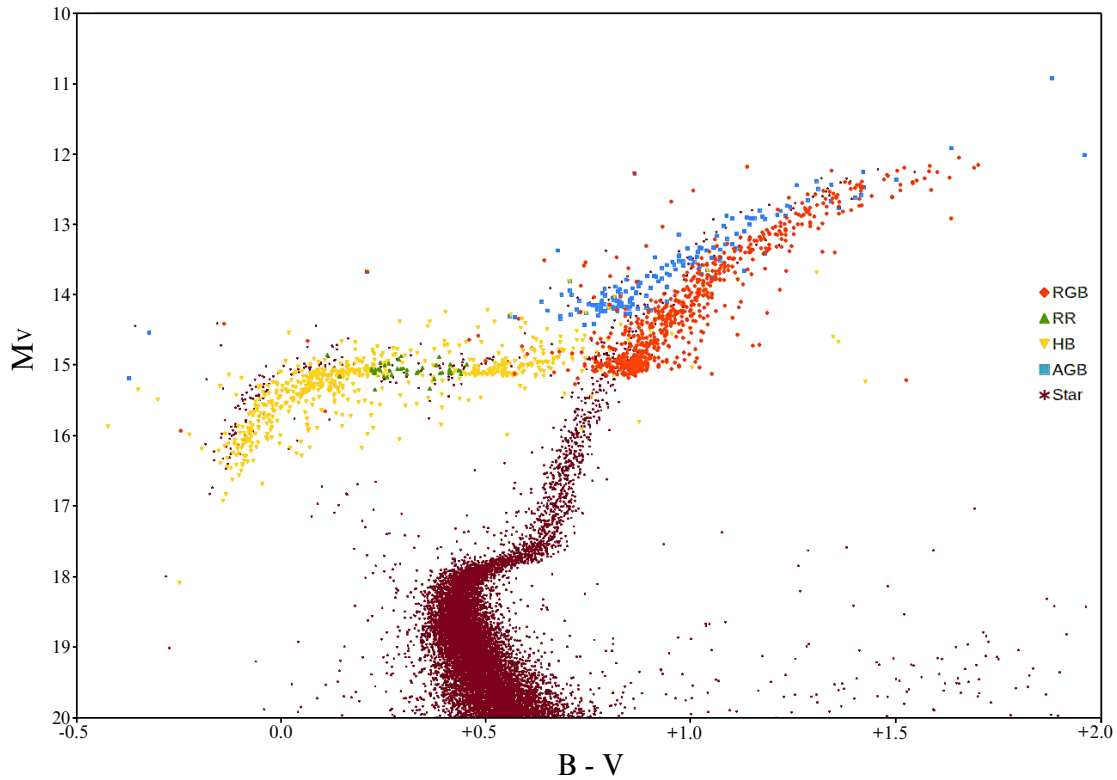


Figura 1.1: Diagrama Hertzsprung-Russell de estrelas no aglomerado globular M5. Esse diagrama compara a cor B-V e magnitude absoluta ( $M_V$ ) das estrelas. Os pontos em vermelho representam estrelas no ramo das gigantes vermelhas (RGB, do inglês *Red-Giant Branch*), em verde as estrelas variáveis RR Lyrae, em amarelo as estrelas do ramo horizontal (HB, do inglês *Horizontal-Branch*) e, por fim, em azul as estrelas do ramo assintótico das gigantes (AGB, do inglês *Asymptotic Giant Branch*) (Lithopsian, 2017).

No estágio inicial de sua evolução, uma estrela é mais luminosa quanto maior for sua massa. Esse estágio, conhecido como sequência principal, é caracterizado pela queima estável de H em He no núcleo estelar. A sequência principal representa a fase mais duradoura da evolução estelar, durante a qual a estrela passa aproximadamente 90% de sua existência (McKee e Ostriker, 2007).

Os estágios evolutivos que sucedem a fase da sequência principal dependem da massa inicial e da composição química da estrela. Estrelas com massa inicial entre  $0.4 M_{\odot}^2$  e  $1.4 M_{\odot}$  passam posteriormente pelo estágio evolutivo conhecido como ramo horizontal, uma das fases em que as estrelas ficam gigantes, como mostram os pontos amarelos na Figura 1.1. O nome ramo horizontal faz referência à disposição dessas estrelas no diagrama HR, que formam uma faixa quase horizontal de luminosidade constante. Estrelas nessa fase passam a queimar, de forma estável, suas reservas de He em Carbono em seus núcleos

<sup>2</sup>  $M_{\odot}$  se refere a unidade de massa solar, que é de aproximadamente  $1.9 \times 10^{30}$  kg.

(Catelan, 2009).

## 1.1 Classificação espectral das estrelas

Além dos estágios evolutivos, as estrelas também podem ser classificadas quanto ao seu tipo espectral, pois a temperatura superficial da estrela possui influência direta no aparecimento e intensidade de linhas de absorção no seu espectro. Em estrelas muito quentes, com  $T_{\text{eff}} > 10000$  K, por exemplo, o He é ionizado e, portanto, seus espectros possuem linhas de absorção dos íons de He que não são vistas em estrelas mais frias. Atualmente, os tipos espectrais seguem uma classificação por letras em ordem diferente do alfabeto, são elas: O, B, A, F, G, K e M, onde as estrelas de tipo O são mais quentes e as de tipo M as mais frias (Morgan e Keenan, 1973). Na Figura 1.2 temos os espectros normalizados de estrelas de cada tipo espectral.

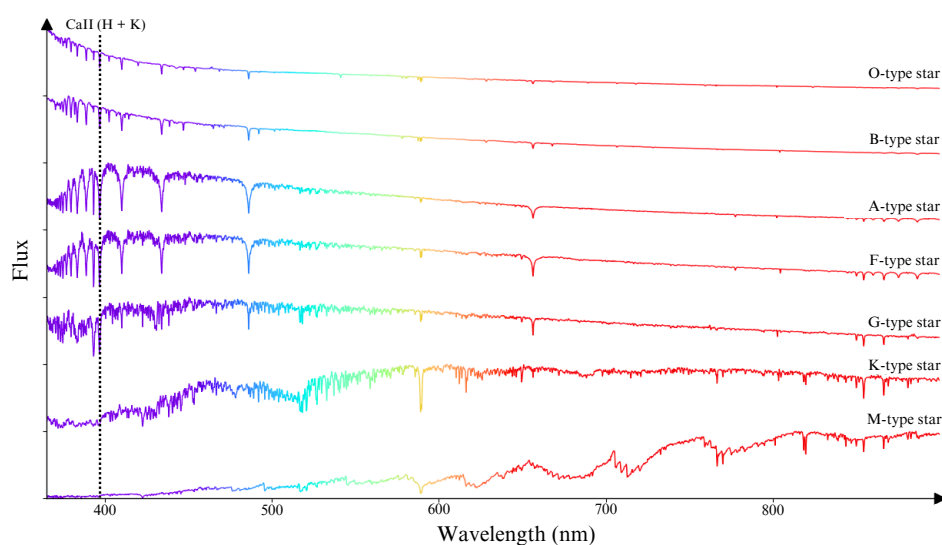


Figura 1.2: Espectros normalizados para estrelas de cada tipo espectral, com a posição das linhas CaII(H+K) pela linha pontilhada vertical. Créditos: IAU OAE/SDSS/Niall Deacon. Link: <https://www.astro4edu.org/pt-pt/resources/diagram/Tt35DR10iI63/>.

Este trabalho dá foco às estrelas do tipo espectral A. Elas são consideradas estrelas quentes, de cor aparente branca, com temperatura superficial entre 7500 K e 10000 K, sendo que a principal característica espectral desse tipo são as suas fortes linhas de absorção de H (Morgan e Keenan, 1973). A presença tão evidente dessas linhas de H neste tipo espectral acontece devido a sua faixa de temperatura efetiva, permitindo que o H na sua atmosfera

seja excitado sem ficar ionizado. Essa característica é evidente no espectro da estrela BD-11 1212, visto na Figura 1.3, que destaca as linhas de absorção do H com linhas verticais pontilhadas.

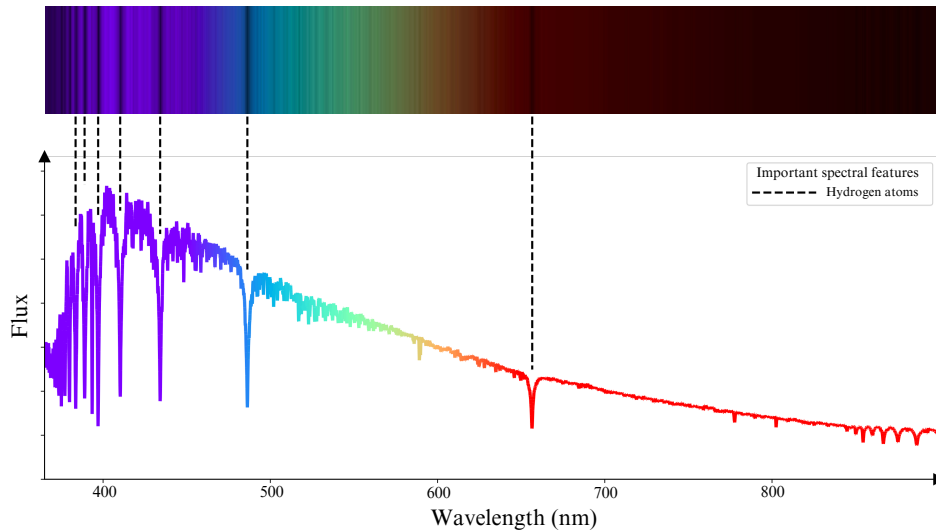


Figura 1.3: Espectro da estrela de tipo A BD-11 1212. As linhas pontilhadas destacam linhas de absorção do Hidrogênio. Créditos: IAU OAE/SDSS/Niall Deacon. Link: <https://www.astro4edu.org/resources/diagram/2149RS77wy92/>.

Ainda dentro das estrelas do tipo espectral A, podemos identificar diferentes tipos de objetos através de suas propriedades químicas e estágios evolutivos. Por exemplo, dentre as estrelas do tipo A pobres em metais, encontramos estrelas na sequência principal, as estrelas azuis tardias e estrelas azuis no ramo horizontal.

## 1.2 Estrelas pobres em metais

Durante os primeiros minutos do Universo, quando era quente e denso, a nucleossíntese primordial formou basicamente (e quase que somente) os elementos mais simples e leves da tabela periódica: o H e o He. As estrelas são responsáveis por fundir e transformar os elementos químicos em espécimes mais complexos. Portanto, conhecer e caracterizar estrelas que possuam abundâncias químicas com poucos elementos mais pesados que o H e He é importante se quisermos obter informações indiretas a respeito de um passado mais remoto da história da nossa Galáxia e do Universo (Beers e Christlieb, 2005).

Estrelas pobres em metais são astros que possuem pouca abundância de elementos mais

pesados que o H e o He em sua composição. Isso acontece devido às suas condições de formação, que ocorreram em um universo mais jovem e com pouca presença de metais (Beers e Christlieb, 2005).

A metalicidade ( $[Fe/H]$ ) é dada em escala logarítmica e diz respeito à abundância química de elementos mais pesados da estrela, em comparação com a mesma razão logarítmica de elementos presentes no Sol, da seguinte forma:

$$[Fe/H] = \log_{10}(N_{Fe}/N_H)_{estrela} - \log_{10}(N_{Fe}/N_H)_{Sol},$$

onde  $N_{Fe}$  e  $N_H$  são o número de átomos de Ferro e Hidrogênio por unidade de volume, respectivamente. Dizemos que uma estrela é pobre em metais quando  $[Fe/H] < -1.0$ , ou seja, a estrela possui ao menos dez vezes menos Ferro que o Sol (Beers e Christlieb, 2005).

Essa classificação de metalicidade possui diferentes nomenclaturas. Estrelas muito pobres em metais possuem  $[Fe/H] < -2.0$ , extremamente pobres em metais:  $[Fe/H] < -3.0$ , ultra pobres em metais:  $[Fe/H] < -4.0$ , hiper pobres em metais:  $[Fe/H] < -5.0$  e mega pobres em metais:  $[Fe/H] < -6.0$ . Estrelas com essas características são mais comumente encontradas no halo galáctico, onde as estrelas são predominantemente velhas e não há nuvens de gás realizando formação estelar (Beers e Christlieb, 2005).

As estrelas pobres em metais são muito úteis para estudos a respeito da estrutura e composição química da Galáxia. Em especial, as estrelas do tipo A são particularmente interessantes por serem muito luminosas e facilmente distinguíveis de outros tipos espectrais.

### 1.2.1 Estrelas azuis tardias

As estrelas azuis tardias (BS - do inglês *Blue Straggler*) são estrelas da sequência principal que aparentam ser mais jovens do que outras estrelas em suas vizinhanças. Elas foram observadas pela primeira vez por Sandage (1953).

As estrelas BS não são necessariamente estrelas azuis, mas chamaram a atenção de astrônomos pois são estrelas da sequência principal que se encontram em uma região mais azul que o ponto de desligamento da sequência principal (do inglês *main sequence turnoff*<sup>3</sup> *point*) do aglomerado (ou região) de que fazem parte, como exemplificado na Figura 1.4,

<sup>3</sup> Posição no diagrama HR que marca a saída da sequência principal. A posição do ponto de *turnoff* pode indicar a idade daquele aglomerado ou grupo de estrelas.

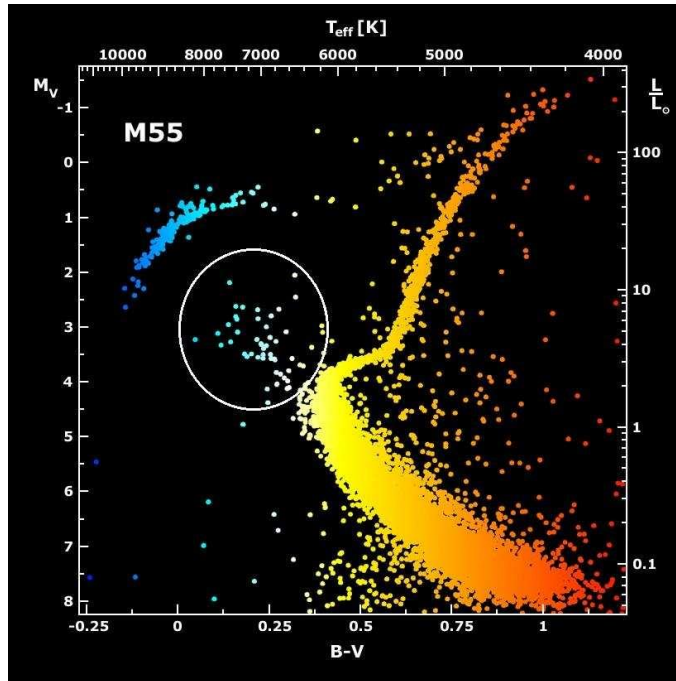


Figura 1.4: Diagrama HR do aglomerado globular M55. As estrelas BS se encontram no prolongamento da faixa da sequência principal, delimitadas pelo círculo branco, após o ponto de *turnoff*. Figura criada por B.J. Mochejska e J. Kaluzny do “*Nicolaus Copernicus Astronomical Center of the Polish Academy of Sciences*”, com o Telescópio Swope (2001), e adaptado por Santucci (2016).

dentro do círculo branco. Além dos aglomerados, elas também são facilmente encontradas em galáxias próximas, por conta das suas posições nos diagramas HR destes ambientes (Momany et al., 2007), mas para estrelas do campo, simplesmente adota-se um corte em metalicidade para se caracterizar uma estrela BS ( $[Fe/H] < -1$ ), pois as estrelas tipo A pobres em metais na sequência principal certamente não compartilham a mesma origem das estrelas do tipo A com metalicidade solar oriundas do disco galáctico (Carney et al., 2005).

Várias hipóteses foram levantadas para explicar a natureza dessas estrelas e o motivo de seu aparente atraso evolutivo que deu origem ao seu nome. Hills e Day (1976) afirmam que estas estrelas são objetos resultantes da colisão de duas estrelas. Entretanto, a proposta mais aceita e com maior número de confirmações observacionais é que sua origem pode ocorrer por conta da transferência de massa entre estrelas em sistemas binários onde as componentes estão próximas entre si (McCrea, 1964; Preston et al., 1991; Preston e Sneden, 2000; Boffin et al., 2015).

Por conta dessa natureza, as estrelas BS são estrelas importantes e que podem ser usadas como indicadoras de binaridade de populações estelares (Rain et al., 2024). Além

disso, são estrelas razoavelmente brilhantes e que podem ser usadas como traçadoras de distâncias no halo galáctico (Preston e Sneden, 2000; Deason et al., 2011; Santucci et al., 2015).

### 1.2.2 Estrelas azuis de ramo horizontal

As estrelas de ramo horizontal (BH - do inglês *Horizontal Branch*) são estrelas que saíram da sequência principal, deixaram de queimar Hidrogênio em Hélio e passaram a queimar Hélio em Carbono de forma estável em seus núcleos. As estrelas do ramo horizontal podem ser chamadas de azuis ou vermelhas, tendo como referência a faixa de instabilidade das estrelas RR Lyrae (pontos verdes da Figura 1.1). Estrelas do ramo horizontal à esquerda da faixa de instabilidade são mais azuis, enquanto que as estrelas do ramo horizontal à direita da faixa de instabilidade são mais vermelhas. Para uma mesma massa, quanto menor a abundância química de elementos mais pesados que o He na estrela, mais azul será a sua posição no ramo horizontal (Barbosa et al., 2022). As estrelas BHB também são estrelas do tipo A e podem ser vistas no ramo horizontal do diagrama HR na Figura 1.4, acima das BSs (com  $M_v \sim 1$ ).

Dentre as estrelas do tipo, as BHBs certamente são os objetos mais usados para o estudo da estrutura e cinemática do halo Galáctico. Apesar de serem menos numerosas que as estrelas BS (Momany et al., 2007; Santucci et al., 2015), elas são traçadoras de distâncias ainda melhores devido às suas magnitudes absolutas praticamente constantes, razão pela qual são comumente chamadas de velas padrão (Sirko et al., 2004). Além disso, estas estrelas também se mostraram eficientes na demonstração do gradiente radial de idade do halo da Galáxia, que nos ajudou a entender o seu processo de formação (Preston et al., 1991; Santucci et al., 2015; Carollo et al., 2016).

A distinção fotométrica entre estrelas BHB e BS é um desafio devido à sobreposição de suas propriedades em filtros fotometricamente largos. No SDSS, como exemplificado na Figura 1.5, ambas ocupam a mesma região no diagrama cor-cor ( $u-g$ ) vs ( $g-r$ ), impossibilitando uma distinção clara destes tipos estelares (Yanny et al., 2009; Santucci et al., 2015).

A Figura 1.6 mostra a diferença espectroscópica fundamental entre esses dois astros. Devido às suas diferentes propriedades físicas, no caso, suas diferentes gravidades superfi-

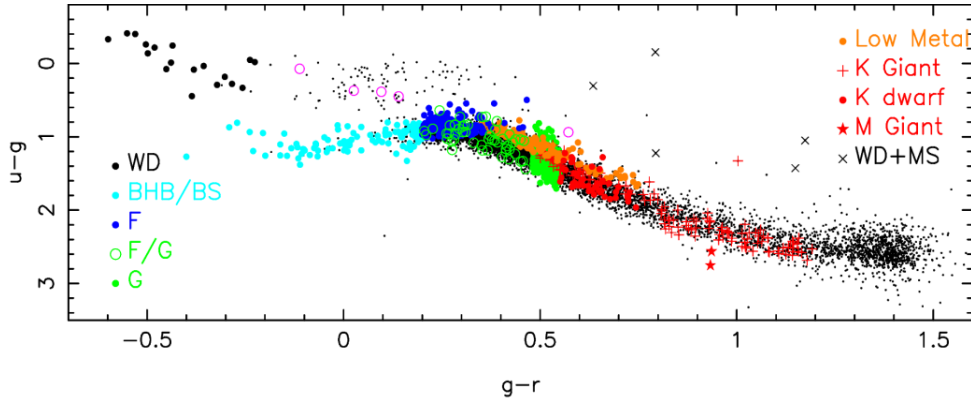


Figura 1.5: Diagrama cor vs cor de estrelas classificadas espectroscopicamente com dados do *Sloan Digital Sky Survey* (SDSS). As estrelas azuis tardias (BS) e azuis de ramo horizontal (BHB) ocupam a mesma região no diagrama, representadas por pontos azuis-claros. Figura criada por [Yanny et al. \(2009\)](#).

ciais<sup>4</sup>, nota-se que as asas das linhas de Hidrogênio da estrela BHB são mais estreitas que as asas das linhas das estrelas BS ([Santucci et al., 2015](#)).

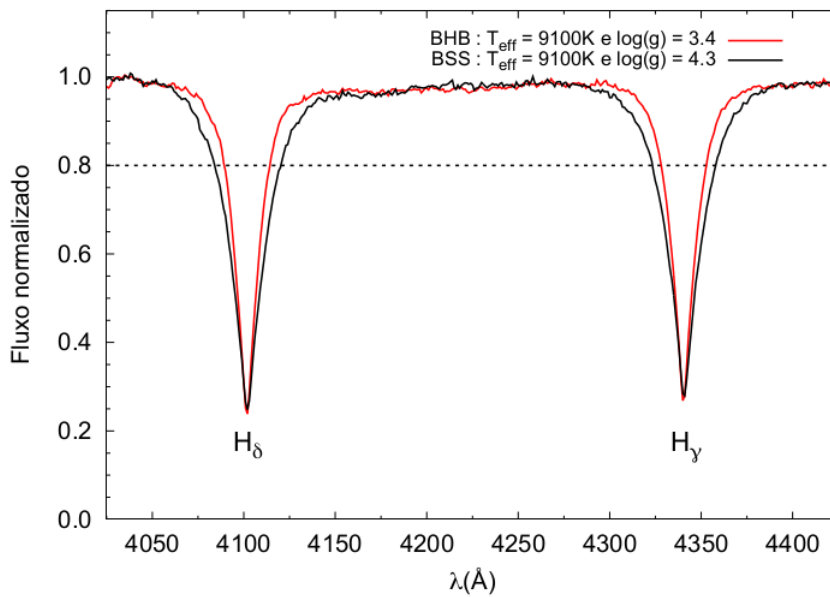


Figura 1.6: Espectros normalizados de uma estrela azul de ramo horizontal (linha vermelha) e de uma estrela azul tardia (linha preta), ambas com a mesma temperatura superficial (9100K). A linha preta tracejada indica o valor de 80% do fluxo e destaca a diferença na largura das asas das linhas de Hidrogênio ( $H\delta$  e  $H\gamma$  da série de Balmer) para os dois tipos de estrelas ([Santucci et al., 2015](#)). BSs possuem linhas de absorção com asas mais largas que as estrelas BHB.

Mesmo que a espectroscopia seja a melhor forma de diferenciar estes tipos estelares, uma fotometria precisa, com filtros estreitos especialmente desenhados para observar as

<sup>4</sup> A gravidade superficial de uma estrela é geralmente fornecida em logaritmo -  $\log g$ , no sistema de unidades cgs. O logaritmo da gravidade superficial do Sol é  $\log g = 4.43$ .

---

linhas de Balmer do Hidrogênio, onde as diferenças nas larguras das linhas de  $H\delta$  e  $H\gamma$  refletem variações em  $\log g$ , poderia ser capaz de distinguir estes astros.

### 1.3 Objetivos

O principal objetivo deste trabalho é desenvolver métodos para selecionar candidatas a estrelas do tipo A pobres em metais - estrelas azuis de ramo horizontal (BHB) e azuis tardias (BS), utilizando a base de dados do *Southern Photometric Local Universe Survey* (S-PLUS), que conta com um sistema fotométrico com 5 filtros largos e 7 filtros estreitos. Além disso, através de suas informações fotométricas, estimar os seus principais parâmetros atmosféricos, como  $T_{\text{eff}}$ ,  $\log g$  e metalicidade.

Para isso, a dissertação está organizada da seguinte forma: No Capítulo 2 são descritas as bases de dados utilizadas ao longo do trabalho. No Capítulo 3, é descrito o método utilizado para selecionar estrelas do tipo A na base de dados do S-PLUS, e os índices de cor que melhor distinguem estrelas BHB e estrelas da sequência principal. No Capítulo 4 é descrita a seleção das amostras de estrelas BHB e estrelas da sequência principal usando o *Gaussian Mixture Model* (GMM). As estimativas encontradas para  $T_{\text{eff}}$ ,  $\log g$  e metalicidade são apresentadas no Capítulo 5. No Capítulo 6 os valores de magnitude absoluta e distância são calculados para estrelas BHB do S-PLUS a partir de calibrações descritas por [Barbosa et al. \(2022\)](#). E por fim, no Capítulo 7 são apresentadas as conclusões finais e perspectivas futuras.



### Base de dados

#### 2.1 *Southern Photometric Local Universe Survey - S-PLUS*

O S-PLUS é um levantamento fotométrico de dados astronômicos feito com o telescópio brasileiro T80-*South* (T80S). O T80S, como podemos ver na Figura 2.1, fica localizado em Cerro Tololo, no Chile, a aproximadamente 2100 metros de altitude. O projeto, que inclui a base de dados fotométrica e o telescópio T80S, foi feito em parceria entre a FAPESP, ON, UFS e UFSC, além da contribuição de outros institutos no Brasil e de outros países da América do Sul ([Mendes de Oliveira et al., 2019](#)).



*Figura 2.1:* Telescópio brasileiro T80-*South* (o mais à esquerda na foto esquerda), localizado em Cerro Tololo, no Chile. A esquerda temos uma visão ampla do complexo de telescópios, e a direita temos o T80S e sua câmera imageadora ([Mendes de Oliveira et al., 2019](#)).

O T80S utiliza o sistema fotométrico *Javalambre*, que tem 12 filtros, sendo 5 deles filtros largos ( $u_{\text{JAVA}}$ ,  $g$ ,  $r$ ,  $i$  e  $z$ ) e 7 filtros estreitos (J0378, J0395, J0410, J0430, J0515, J0660 e J0861). Comparado aos levantamentos fotométricos tradicionais com poucas bandas, como o SDSS, o S-PLUS apresenta uma vantagem significativa devido ao seu maior número de

filtros. Contando com 7 bandas estreitas, o S-PLUS permite uma classificação estelar com maior precisão. Isso possibilita uma caracterização mais detalhada das propriedades estelares e melhora a identificação de características espectrais específicas (Cenarro et al., 2019).

Neste trabalho, utilizamos o *Data Release 4* (DR4), que é a versão pública mais recente dos dados do S-PLUS, disponibilizada para colaboradores em janeiro de 2024 e conta com dados fotométricos para cerca de 12.7 milhões de estrelas. O DR4 cobre uma área do céu de cerca de  $3000 \text{ deg}^2$ , que abrange regiões do céu que foram também cobertas por outros levantamentos importantes, como o *Sloan Digital Sky Survey* (SDSS) e a missão espacial *Gaia*. No DR4 houve a adição de campos observados no disco da Galáxia e na região das nuvens de Magalhães, representados na Figura 2.2 por pontos cinzas e marrons, respectivamente.

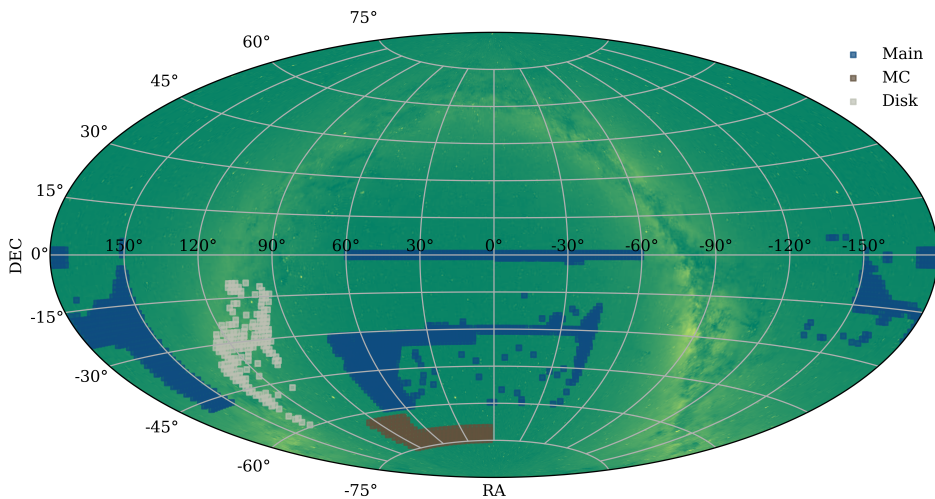


Figura 2.2: Campos observados pelo S-PLUS DR4. Em azul temos a campo principal de observação do mapeamento (*main survey*), em bege temos campos do disco da nossa galáxia (*disk*) e em marrom os campos na região das nuvens de Magalhães (MC).

### 2.1.1 Características do sistema fotométrico do S-PLUS

O S-PLUS utiliza filtros largos que seguem o padrão *ugriz*, também presente no SDSS, com exceção do filtro *u*. No S-PLUS o filtro *u* é chamado de filtro *u Javalambre* ( $u_{\text{JAVA}}$ ), pois é o mesmo filtro *u* desenvolvido pelo levantamento de dados *Javalambre Photometric Local Universe Survey* (J-PLUS; Cenarro et al., 2019) e possui uma transmissão diferente

(mais eficiente) que o filtro  $u$  presente no SDSS. Os filtros largos  $u_{\text{JAVA}}$ ,  $g$ ,  $r$ ,  $i$  e  $z$  possuem, respectivamente, aberturas de 352 Å, 1545 Å, 1465 Å, 1506 Å e 1182 Å.

Já os filtros estreitos possuem janelas de passagem de luz de cerca de 200 Å e localizadas em intervalos estratégicos do espectro, onde localizamos importantes linhas de absorção, como: OII (3771 Å), CaII ( $H + K$ ) e  $H\epsilon$  ( $\sim 3941$  Å),  $H\delta$  (4094 Å), banda-G do Carbono e  $H\gamma$  ( $\sim 4292$  Å), o tripleto de Magnésio e  $H\beta$  ( $\sim 5133$  Å),  $H\alpha$  (6614 Å) e o tripleto de Cálcio ( $\sim 8611$  Å) (Mendes de Oliveira et al., 2019). A Figura 2.3 mostra as janelas de transmissão para os filtros largos e estreitos do S-PLUS, enquanto a Tabela 2.1 mostra os filtros estreitos e linhas de absorção importantes onde estão localizados.

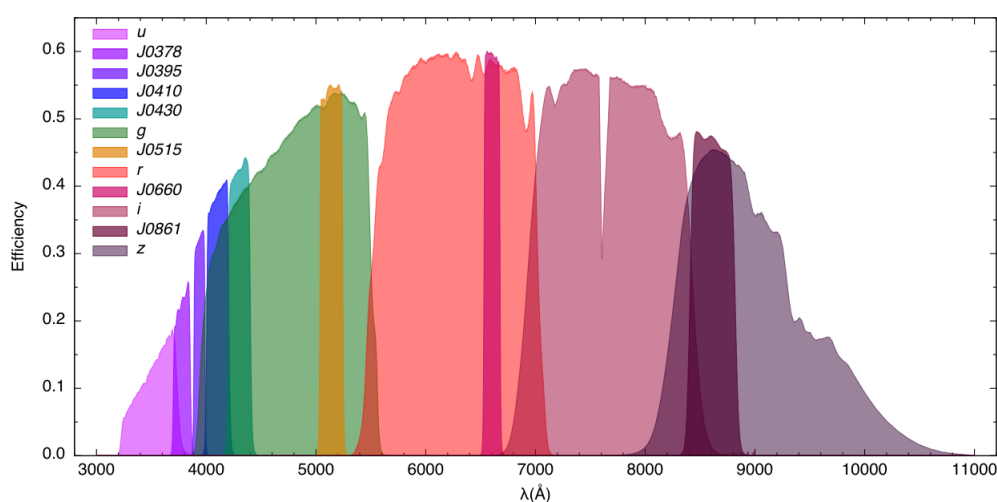


Figura 2.3: Sistema de filtros *Javalambre* presente no S-PLUS, composto por 12 filtros (5 filtros de banda larga:  $u_{\text{JAVA}}$ ,  $g$ ,  $r$ ,  $i$ ,  $z$  e 7 filtros de banda estreita: J0378, J0395, J0410, J0430, J0515, J0660, J0861). O eixo  $y$  representa a eficiência de transmissão dos filtros, enquanto o eixo  $x$  indica os comprimentos de onda em angstroms (Å). Adaptado de Cenarro et al. (2019).

Filtro	Comprimento de onda central (nm)	Linhas de absorção
J0378	377.3	OII
J0395	394.0	CaII ( $H + K$ ) e $H\epsilon$
J0410	409.5	$H\delta$
J0430	429.2	banda-G do Carbono e $H\gamma$
J0515	513.3	Mgb <i>triplet</i> e $H\beta$
J0660	661.3	$H\alpha$
J0861	860.7	Ca <i>triplet</i>

Tabela 2.1 - Filtros estreitos do S-PLUS e as principais linhas de absorção localizadas na janela de transmissão de cada filtro (Perottoni et al., 2024).

Esses filtros estreitos, desenhados especialmente sobre linhas de absorção importantes

do espectro, podem ser ferramentas úteis para a separação de diferentes tipos de estrelas de tipo A usando apenas a fotometria, pois estão localizados justamente nas posições das linhas de Balmer do Hidrogênio, onde a espectroscopia é capaz de separar os distintos estágios evolutivos ao analisar a forma das linhas.

## 2.2 Sloan Digital Sky Survey - SDSS

O *Sloan Digital Sky Survey* (SDSS; York et al., 2000) é um levantamento astronômico em grande escala que utiliza um telescópio de 2.5 metros localizado no Observatório Apache Point, no Novo México, EUA. O SDSS conta com um sistema fotométrico de cinco filtros largos (u, g, r, i e z), e gera catálogos fotométricos amplamente utilizados em estudos que envolvem desde a formação de galáxias até cosmologia (Shimasaku et al., 2001; Meert et al., 2015; Hoeneisen et al., 2017).

A escolha do SDSS neste trabalho justifica-se por sua abrangência, precisão fotométrica e a disponibilidade de dados espectroscópicos complementares, essenciais para validar critérios de seleção de estrelas do tipo A. O SDSS não apenas fornece fotometria em cinco filtros largos praticamente iguais ao S-PLUS, mas também inclui o subprojeto *Sloan Extension for Galactic Understanding and Exploration* (SEGUE; Yanny et al., 2009), dedicado ao estudo da estrutura da Galáxia. Os espectros do SEGUE, processados pelo *SEGUE Stellar Parameters Pipeline* (SSPP; Lee et al., 2008), oferecem parâmetros atmosféricos, como gravidade superficial, temperatura efetiva e metalicidade, que serão úteis para comparações e calibrações dos dados do S-PLUS que são puramente fotométricas.

Por exemplo, a região do diagrama (u-g) vs (g-r) para estrelas A no SDSS, bem estabelecida na literatura (Xue et al., 2008; Yanny et al., 2009; Deason et al., 2011), serviu como referência para encontrarmos a mesma região fotométrica destas estrelas nos dados do S-PLUS. Ao cruzar as amostras do SDSS/SSPP com o S-PLUS, foi possível validar a seleção fotométrica de estrelas A e estabelecer limites confiáveis para minimizar contaminações.

### 2.2.1 Amostra de estrelas do tipo A

Neste trabalho foi utilizada uma amostra de referência de estrelas do tipo A, selecionadas com dados do SDSS DR12, com informações de parâmetros atmosféricos estimados

pelo SSPP. Nesta base de dados, a região cor vs cor onde as estrelas do tipo A são comumente encontradas está definida pelos seguintes intervalos:  $0.8 < (u-g) < 1.4$  e  $-0.30 < (g-r) < 0.0$  (Xue et al., 2008; Deason et al., 2011). Para incluir um número maior de candidatas a estrelas BS, que se encontram por volta de  $(g-r) \sim 0$  (Deason et al., 2011), foi adotado um intervalo maior para essa cor, ficando com  $0.8 < (u-g) < 1.4$  e  $-0.30 < (g-r) < 0.05$  (Santucci et al., 2015). É importante pontuar que essa mudança no intervalo de cor  $(g-r)$  pode aumentar também a contaminação por estrelas de tipos espectrais mais frios.

Além das restrições de cor, foi adotada também uma qualidade mínima de sinal/ruído dos espectros ( $SNR > 10$ ), o que garante qualidade suficiente para identificar uma separação espectroscópica de estrelas em diferentes estágios evolutivos (Deason et al., 2011). Além disso, considerou-se um intervalo de temperatura efetiva de  $7500 < TEFF\_ADOP(K) < 10000$ , para excluir a presença de estrelas mais frias na amostra. Após estes cortes, obtém-se uma amostra de  $\sim 16400$  estrelas desse tipo espectral no SDSS/SSPP.

## 2.3 Gaia

O *Gaia* é uma missão espacial da *European Spacial Agency* (ESA), lançada em dezembro de 2013 com o principal objetivo de mapear posição e velocidade em 3 dimensões para cerca de um bilhão de objetos celestes (Gaia Collaboration et al., 2016). Seu catálogo, na versão mais atualizada (*Data Release 3 - DR3*), disponibilizada em junho de 2022, contém informações astrométricas e fotométricas para mais de 1.4 bilhão de objetos, e espectroscópicas para cerca de 470 milhões de objetos. Além de posições e velocidades, o *Gaia* fornece magnitudes nas bandas G, BP e RP, juntamente com parâmetros atmosféricos – como temperatura efetiva, gravidade superficial e metalicidade (Vallenari et al., 2023).

A utilização dos dados do DR3 do *Gaia* neste trabalho é fundamental para complementar e validar as informações fotométricas do S-PLUS.



## Identificação de estrelas do tipo A

Neste capítulo estão descritos os processos utilizados para a obtenção de uma amostra de estrelas do tipo A no DR4 do S-PLUS, assim como a definição de um critério fotométrico de separação para estrelas BHB e estrelas da sequência principal. Na seção 3.1 é apresentada a região cor-cor para estrelas do tipo A na base de dados do S-PLUS. Na seção 3.2 é feita uma análise exploratória para a definição de índices de cor do S-PLUS que melhor separam estrelas azuis do ramo horizontal e estrelas da sequência principal. Por fim, na seção 3.3 é feita uma descrição da amostra de estrelas do tipo A no S-PLUS e a definição de um critério fotométrico para restringir a contaminação por estrelas mais frias.

### 3.1 Estrelas do tipo A no diagrama cor-cor do S-PLUS

Para definir uma amostra de estrelas do tipo A na base de dados do S-PLUS, é preciso primeiro definir uma região no diagrama cor-cor que corresponde a esse tipo de estrela. Como citado na Seção 2.2, essa região é bem conhecida para esse tipo de estrela no SDSS.

A amostra de estrelas do tipo A do SDSS/SSPP foi cruzada com o DR4 do S-PLUS, assim é possível comparar diretamente os dados fotométricos, corrigidos de extinção, do S-PLUS com as informações espectroscópicas fornecidas pelo SSPP. Além disso, foram adotados alguns critérios de qualidade nos dados do S-PLUS: alvos com a `FLAGS_SEX_DET`  $> 0$  foram excluídos. Trata-se de um marcador que indica algum problema na detecção do objeto. Também foi definido um valor mínimo de sinal-ruído (`s2n_DET_auto`  $> 30$ ). Esse valor foi definido a partir de análises anteriores feitas usando o *i*DR3 do S-PLUS, no qual o sinal-ruído era avaliado individualmente para cada filtro. Seguiu-se o critério mais restritivo adotado no *i*DR3, considerando o filtro `u_JAVA` (`s2n_u`  $> 30$ ) como referência.

Essa restrição exclui grande parte das estrelas pouco brilhantes e com erros elevados nas magnitudes dos filtros. Restrições para os erros nos filtros mais azuis ( $e_{u\_PStotal} < 0.1$ ,  $e_{J0378\_PStotal} < 0.09$  e  $e_{J0395\_PStotal} < 0.09$ ) também foram aplicadas.

Cerca de 566 objetos satisfazem os cortes de qualidade adotados e, ao mesmo tempo, possuem informações em comum com a base de dados do SDSS para realizar as comparações entre os parâmetros. Na Figura 3.1 temos a amostra em um diagrama cor-cor para os filtros largos do S-PLUS. Pode-se notar que essas estrelas se distribuem como uma combinação de gaussianas para as cores ( $u_{JAVA}-g$ ) e ( $g-r$ ) do S-PLUS. Então, para definir um intervalo confiável para essas cores que selecione estrelas do tipo A na base de dados do S-PLUS, foi adotado um intervalo de 3 desvios absolutos da mediana para as cores ( $u_{JAVA}-g$ ) e ( $g-r$ ), que resultou nos seguintes limites:  $1.0 < (u_{JAVA}-g) < 1.6$  e  $-0.3 < (g-r) < 0.1$ . Esta é a região cor-cor adotada para estrelas do tipo A na base de dados do S-PLUS.

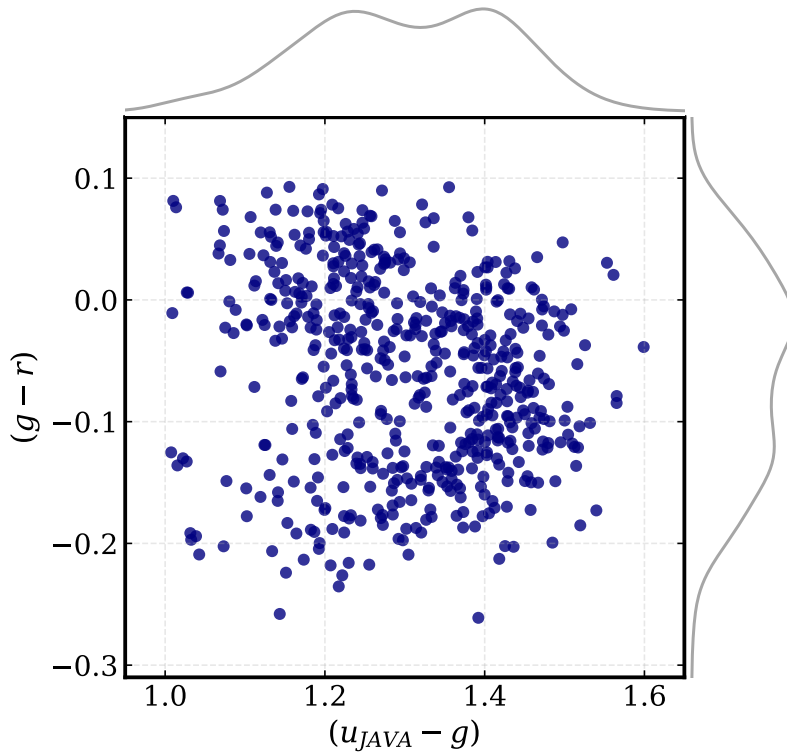


Figura 3.1: Estrelas do tipo A selecionadas distribuídas no diagrama cor-cor com as cores ( $u_{JAVA}-g$ ) e ( $g-r$ ) do S-PLUS.

Percebe-se que a região cor-cor definida para o S-PLUS difere levemente da região utilizada no SDSS. A diferença para a cor ( $u_{JAVA}-g$ ) pode ser explicada pela diferença entre os filtros  $u_{JAVA}$  do S-PLUS e  $u$  do SDSS, sendo o  $u_{JAVA}$  mais estreito e preciso (López-

Sanjuan et al., 2019). Já para a cor  $(g-r)$ , onde os filtros  $g$  e  $r$  são essencialmente iguais para as duas bases de dados, o intervalo no S-PLUS também possui uma contaminação maior de estrelas de tipo espectral mais frio por volta de  $(g-r) \sim 0.1$ , da mesma maneira que a fotometria do SDSS.

### 3.2 Estrelas da sequência principal e estrelas do ramo horizontal

Como visto anteriormente, na região cor-cor onde estão as estrelas de tipo A, as estrelas azuis de ramo horizontal e algumas estrelas da sequência principal, como as estrelas azuis tardias, se confundem (Yanny et al., 2009), são estrelas em fases evolutivas diferentes, mas fotometricamente indistinguíveis usando fotometria de filtros largos.

Porém, como dito anteriormente, características espectroscópicas diferenciam facilmente essas estrelas, como a largura das asas das linhas de Hidrogênio ( $H\delta$  e  $H\gamma$ , vistas na Figura 1.6). A largura dessas linhas de absorção está diretamente relacionada à densidade da fotosfera dessa estrela, e, portanto, à sua gravidade superficial (Foley, 1946). Santucci et al. (2015) mostraram que a gravidade superficial é um parâmetro eficiente para distinguir entre estrelas azuis do ramo horizontal e estrelas da sequência principal no SDSS.

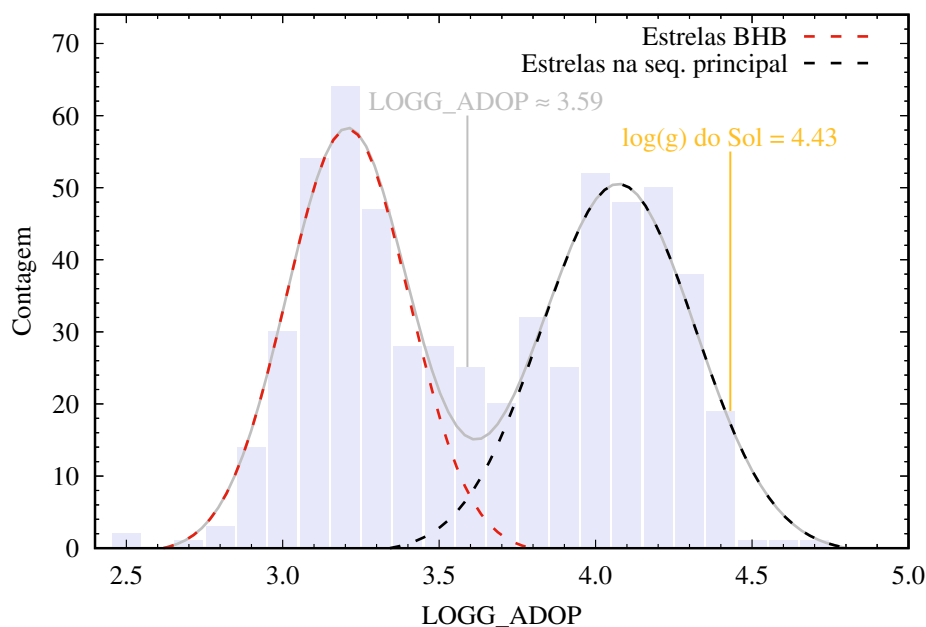


Figura 3.2: Distribuição dos valores de LOGG\_ADOP do SSPP para as estrelas do tipo A selecionadas. Gaussianas foram ajustadas para caracterizar o grupo de estrelas azuis do ramo horizontal (BHB) e estrelas da sequência principal (incluindo estrelas BS).

Na Figura 3.2 temos a distribuição dos valores de `LOGG_ADOP` para a amostra de estrelas do tipo A selecionada. O parâmetro `LOGG_ADOP` é a estimativa adotada pelo SSPP como a mais adequada para a gravidade superficial. Convém ressaltar que o SSPP estima os parâmetros atmosféricos através de muitos métodos diferentes e, para qualquer um destes parâmetros, sempre é adotada a estimativa “ADOP”, considerada pelo *pipeline* como a melhor para aquele objeto analisado. É evidente que estrelas em estágios evolutivos diferentes se distribuem em dois picos bem distintos. As estrelas BHB se encontram no pico com valor de `LOGG_ADOP`  $\sim 3.21$  e as estrelas da sequência principal em no pico com valor de `LOGG_ADOP`  $\sim 4.07$ .

Percebe-se que os dois grupos se separam por volta de `LOGG_ADOP`  $\sim 3.59$ . Sabendo que é possível distingui-los com a informação de gravidade superficial, esse parâmetro foi adotado de forma auxiliar para analisar o comportamento das estrelas BHB e estrelas da sequência principal com as cores usando os filtros estreitos do S-PLUS.

Utilizando a informação espectroscópica de `LOGG_ADOP` para distinguir esses objetos no SDSS, podemos comparar as cores usando os filtros do S-PLUS e identificar quais combinações desses filtros podem distinguir estrelas BHB e estrelas na sequência principal.

Um índice de cor é definido pela diferença da magnitude entre dois filtros, sendo sempre a diferença entre a magnitude de um filtro mais azul e um filtro mais vermelho. Na Figura 3.3 temos exemplos de índices de cor com filtros do S-PLUS, onde fica perceptível que a combinação entre filtros mais azuis se mostra mais eficiente para separar esses objetos, em especial as cores  $(u_{\text{JAVA}}-J0378)$  e  $(u_{\text{JAVA}}-J0395)$ , vistas nos painéis (a) e (b), respectivamente.

Era esperado que cores que combinassem filtros mais azuis do S-PLUS obtivessem bons resultados, já que são filtros que captam a luz da estrela em um intervalo de comprimento de onda mais próximos de onde localizamos muitas linhas de absorção do Hidrogênio, que são linhas bem evidentes nesse tipo espectral.

Combinações de cores que contenham somente filtros estreitos não se mostraram eficientes para fazer essa distinção, como é possível ver para a cor  $(J0378-J0430)$  no painel (e) da Figura 3.3. Índices de cor usando filtros mais vermelhos também não obtiveram sucesso, ver exemplo no painel (f).

Na Figura 3.4 temos as cores  $(u_{\text{JAVA}}-J0378)$  (eixo x) e  $(u_{\text{JAVA}}-J0395)$  (eixo y) em destaque, onde podemos observar a clara separação entre os dois grupos. Essa separação é

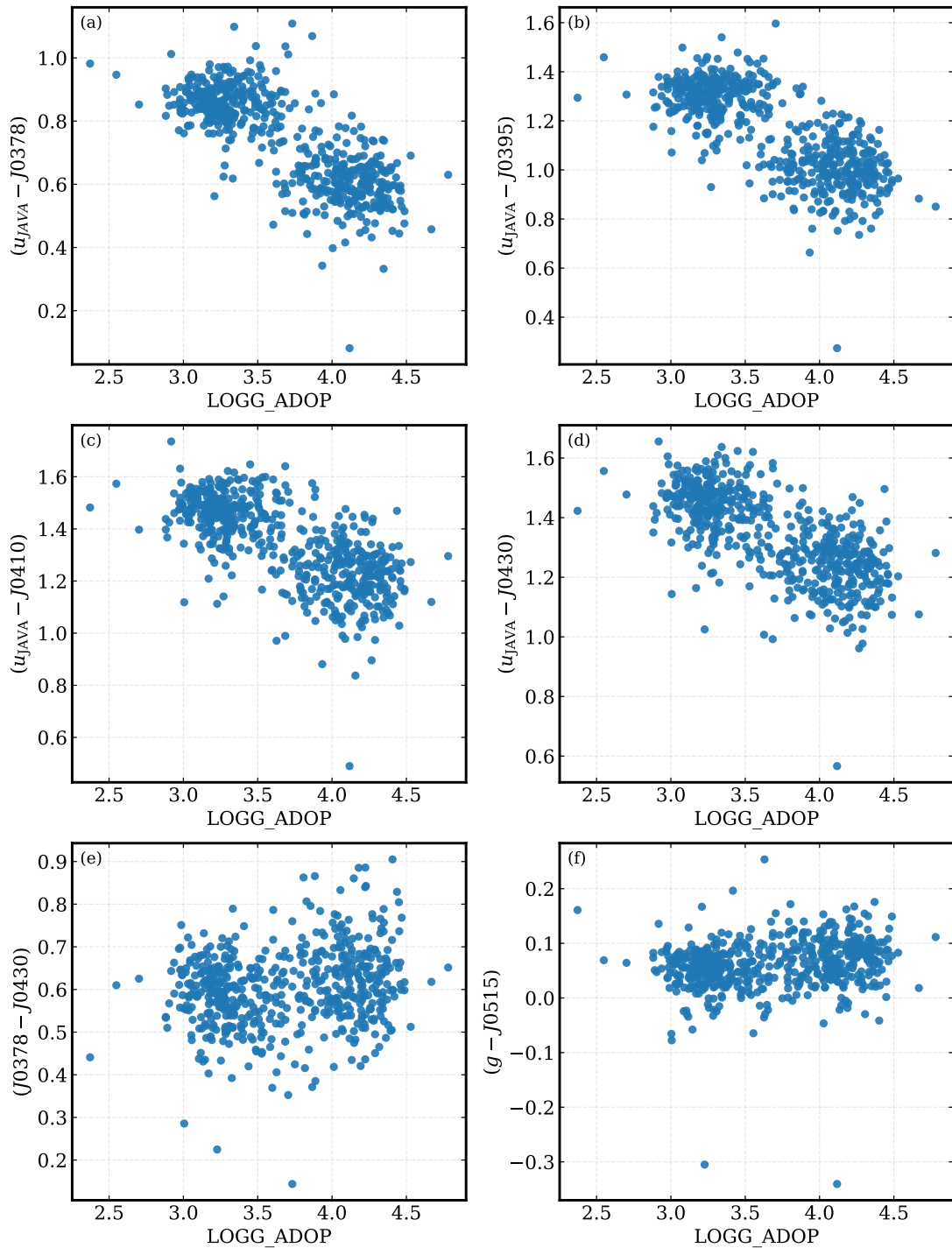


Figura 3.3: Comportamento das estrelas do tipo A selecionadas para diferentes combinações de cores com filtros do S-PLUS (eixo y). No eixo x temos  $\text{LOGG\_ADOP}$ , que é o logaritmo da gravidade superficial, usado para para distinguir estrelas BHB e estrelas da sequência principal. Nos painéis de (a) a (d) temos combinações usando o filtro largo  $u_{\text{JAVA}}$  e os filtros estreitos J0378, J0395, J0410 e J0430, respectivamente. No painel (e) foi utilizado a combinação de dois filtros estreitos: J0378 e J0430. Por fim, no painel (f) temos a combinação de filtros mais vermelhos:  $g$  e J0515.

evidenciada pela distribuição dos dados nos eixos x e y, onde foi ajustada uma combinação de gaussianas com dois picos bem evidentes. Os pontos estão coloridos de acordo com seus valores de gravidade superficial ( $\text{LOGG\_ADOP}$ ). As estrelas do ramo horizontal (pontos mais escuros) possuem valores de gravidade superficial menores do que as estrelas da sequência principal (pontos mais claros).

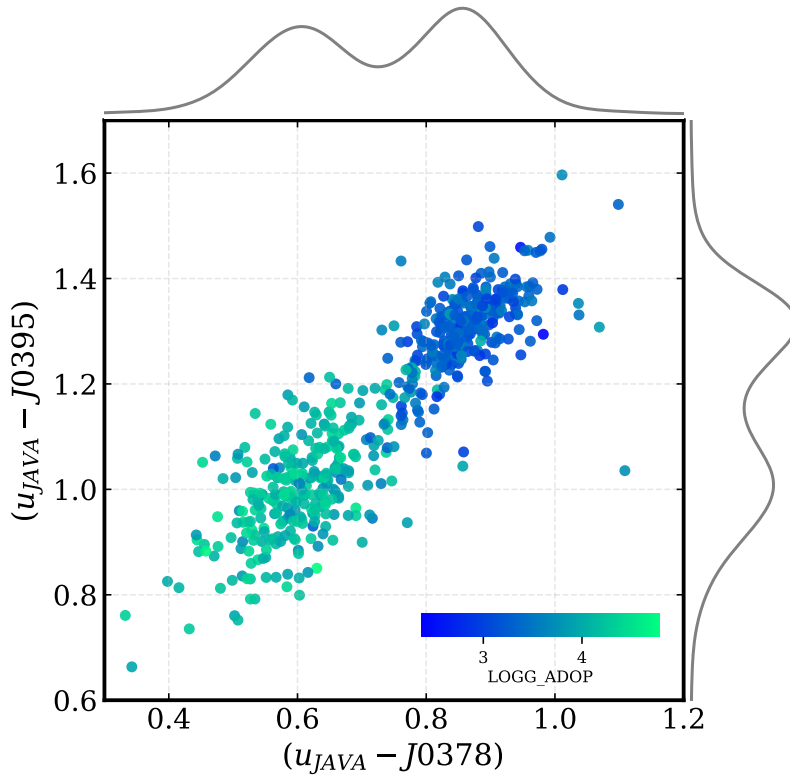


Figura 3.4: Estrelas do tipo A selecionadas distribuídas no diagrama cor-cor com as cores  $(u_{\text{JAVA}} - J0378)$  e  $(u_{\text{JAVA}} - J0395)$ . Os pontos são de acordo com valores de  $\text{LOGG\_ADOP}$ , onde estrelas BHB possuem valores menores de gravidade superficial (pontos mais escuros) que estrelas da sequência principal (pontos mais claros).

### 3.3 Amostra de estrelas do tipo A no S-PLUS

Aplicando os limites fotométricos na região cor-cor definida para estrelas do tipo A no S-PLUS e os critérios de qualidade descritos acima diretamente nos dados do DR4, obtêm-se uma amostra expressiva com cerca de  $\sim 10800$  objetos, entre estrelas BHB e estrelas da sequência principal.

Na Figura 3.5 temos um diagrama  $(u_{\text{JAVA}} - J0378)$  vs  $(u_{\text{JAVA}} - J0395)$  com as estrelas selecionadas diretamente na base de dados do S-PLUS, a partir dos critérios adotados

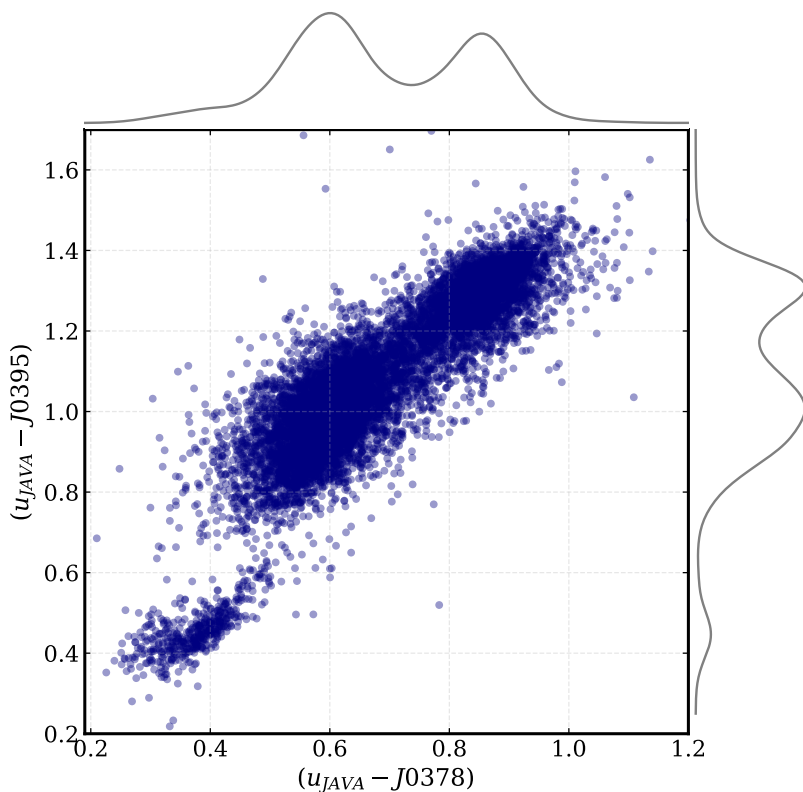


Figura 3.5: Distribuição de estrelas selecionadas pelos critérios que selecionam estrelas do tipo A no diagrama  $(u_{\text{JAVA}} - J0378) \times (u_{\text{JAVA}} - J0395)$  do S-PLUS.

para selecionar estrelas do tipo A. Nota-se que, neste diagrama, as estrelas se distribuem formando 3 picos bem distintos, evidentes para a cor  $(u_{\text{JAVA}} - J0395)$  (eixo y). O pico por volta de  $(u_{\text{JAVA}} - J0395) \sim 0.45$ , até então inesperado, representa uma possível contaminação por estrelas mais frias.

### 3.3.1 Contaminação por estrelas mais frias

A amostra de estrelas selecionada a partir de critérios fotométricos exclusivamente do S-PLUS foi cruzada com o DR3 do *Gaia*. Os parâmetros atmosféricos e fotométricos presentes no *Gaia* permitem investigar a natureza das estrelas presentes nessa amostra utilizando uma nova fonte de informações.

Na Figura 3.6, os pontos da amostra são coloridos de acordo com a temperatura efetiva ( $T_{\text{eff}}$ ), no painel (a), e pelo índice de cor BP-RP do *Gaia*, no painel (b). No painel (a) é possível observar que o grupo mais azul é oriundo de algum tipo de contaminação nos dados do S-PLUS, pois a temperatura fornecida pelo *Gaia* demonstra que são estrelas mais frias, entre 5000 K e 7000 K. O painel (b) mostra que o índice de cor BP-RP também

distingue com eficiência essas estrelas mais frias.

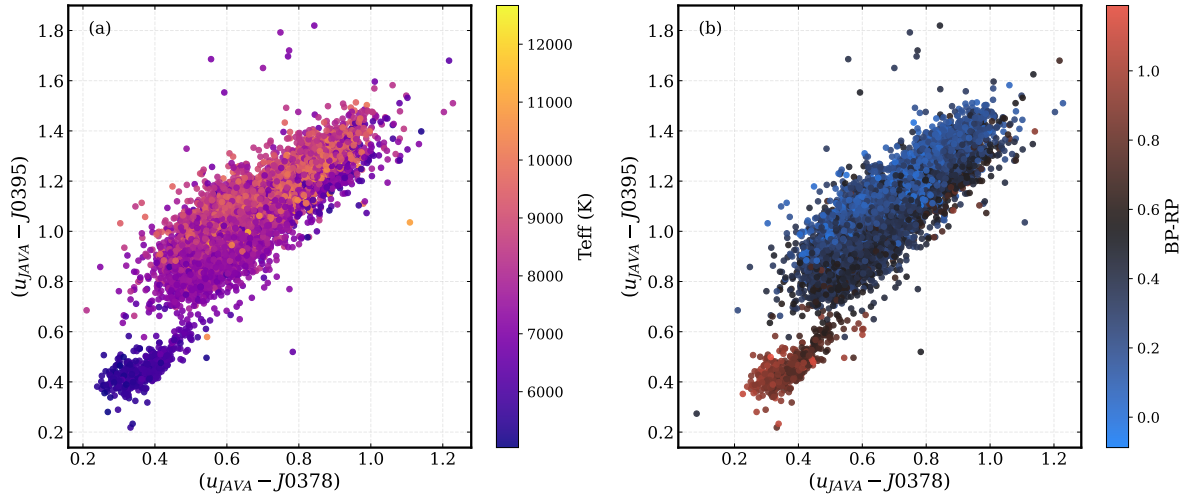


Figura 3.6: Diagrama de cor  $(u_{JAVA}-J0378) \times (u_{JAVA}-J0395)$ . No painel (a) os pontos estão coloridos de acordo com valores de  $T_{eff}$  do *Gaia* DR3, e no painel (b) de acordo com o índice de cor BP-RP do *Gaia*.

A presença de estrelas mais frias pode indicar algum problema com as informações fotométricas dessas na base de dados do S-PLUS, talvez na calibração de alguns campos do mapeamento ou na falta de aplicação de alguma *flag*. Esta questão foi apresentada em uma reunião do S-PLUS para que os membros da colaboração tivessem ciência do comportamento dos dados.

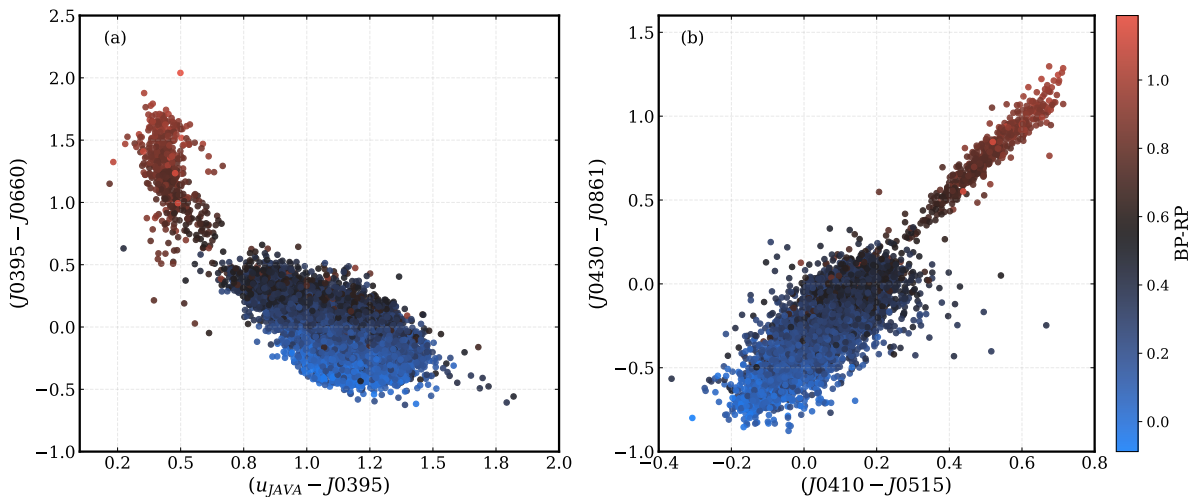


Figura 3.7: Diagramas de cor com os índices de cor mais eficientes em diferenciar as estrelas do tipo A e estrelas mais frias:  $(u_{JAVA}-J0395)$  vs  $(J0395-J0660)$ , no painel (a), e  $(J0410-J0515)$  vs  $(J0430-J0861)$ , no painel (b). Os pontos são coloridos de acordo com os valores de BP-RP do *Gaia*, onde os pontos mais avermelhados representam as estrelas mais frias que contaminam a amostra.

Portanto, para evitar essa contaminação que sobrevive às restrições aplicadas no dia-

grama cor-cor com filtros largos do S-PLUS, é necessário usar a informação dos filtros estreitos, como visto nas Figuras 3.6 e 3.7.

A cores (J0410–J0515) e (J0430–J0861), painel (b) da Figura 3.7, são boas opções de parâmetros de separação entre essas estrelas. É possível ver claramente uma separação entre as estrelas do tipo A e estrelas mais frias por volta de (J0410–J0515)  $\sim$  0.30 e (J0430–J0861)  $\sim$  0.25.

Apesar desta contaminação não ser esperada no corte fotométrico inicial que seleciona as estrelas do tipo A, a própria fotometria de filtros estreitos do S-PLUS é capaz de ajudar na limpeza dos objetos indesejados, sem que seja necessário cruzar essa base com outras da literatura. O cruzamento da amostra com os dados do *Gaia* foi útil para encontrar a origem da contaminação e, apesar de possuir parâmetros importantes para realizar o corte do grupo de objetos indesejados, nenhuma restrição com informações do *Gaia* foi adotada. A partir deste ponto, foram consideradas somente as cores com filtros estreitos para eliminar a contaminação de estrelas mais frias, conforme é descrito a seguir.



## Distinção fotométrica entre estrelas BHB e estrelas da sequência principal

Este capítulo apresenta uma metodologia para a identificação e classificação de estrelas do tipo A utilizando dados fotométricos do S-PLUS. Inicialmente, aplicamos as restrições definidas no capítulo anterior à DR4 do S-PLUS. Em seguida, descrevemos a implementação de uma técnica estatística avançada, o *Gaussian Mixture Model* (GMM), para duas tarefas principais: (1) a criação de um catálogo abrangente e confiável de estrelas do tipo A, e (2) a diferenciação entre estrelas BHB e estrelas da sequência principal dentro desta amostra.

### 4.1 *Gaussian Mixture Model* (GMM)

O GMM é uma técnica de modelagem estatística que assume que os dados são gerados a partir de uma mistura de várias distribuições gaussianas, cada uma com sua própria média e variância. É amplamente utilizado em tarefas de agrupamento e classificação, onde é necessário identificar subgrupos ou padrões nos dados sem rótulos explícitos, permitindo uma modelagem flexível e probabilística das distribuições subjacentes (Bishop, 2006; McLachlan e Krishnan, 2007).

Essencialmente, o GMM tenta encontrar um conjunto de  $n$  distribuições gaussianas que, quando combinadas, melhor representam a distribuição dos dados observados. No processo, o algoritmo ajusta uma função de densidade de probabilidade para cada pico, e a partir disto, calcula o grau de pertencimento de cada ponto a um componente gaussiano. Neste trabalho, o modelo é usado considerando parâmetros cujas distribuições podem ser descritas por até 2 gaussianas.

A partir da função de densidade de probabilidade, é atribuído a cada ponto uma medida quantitativa de pertencimento àquela distribuição. Esses valores de pertencimento são atribuídos usando valores em um intervalo contínuo entre 0 e 1, sendo 0 associado aos dados que estatisticamente não pertencem àquela distribuição e 1 aos dados localizados no pico da distribuição.

## 4.2 Definindo estrelas do tipo A usando o GMM

Como visto no Capítulo 3, algumas cores se mostraram eficientes em distinguir entre estrelas do tipo A e as estrelas mais frias presentes na amostra. Dentre essas cores, se destacam (J0410–J0515) e (J0430–J0861), como visto na Figura 3.7, principalmente devido à natureza bimodal da distribuição para essas duas cores.

Para quantificar a confiabilidade na identificação de estrelas do tipo A na base de dados do S-PLUS, o GMM foi aplicado para calcular a função de densidade de probabilidade para a componente gaussiana associada às estrelas deste tipo espectral, e atribuir a cada ponto um valor de `d_Atype`.

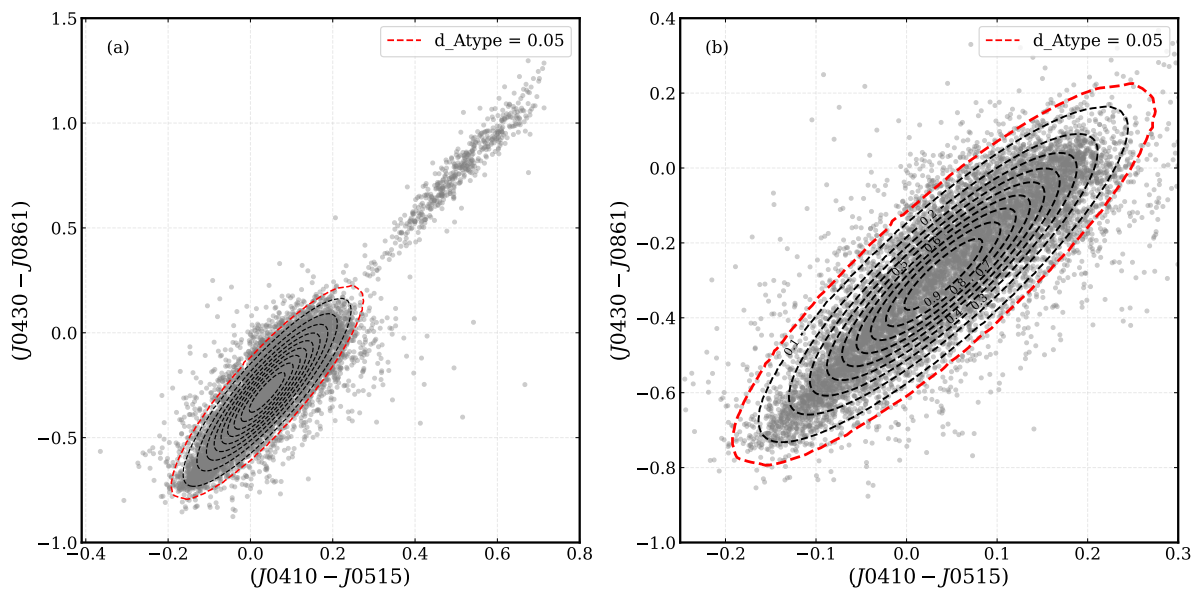


Figura 4.1: Diagrama (J0410–J0515) x (J0430–J0861) para a amostra com estrelas do tipo A e estrelas mais frias. As curvas tracejadas indicam curvas de nível para valores de `d_Atype` calculados usando o GMM. A região interna a curva tracejada vermelha agrupa estrelas com `d_Atype` > 0.05.

Na Figura 4.1 temos o diagrama cor-cor para as cores (J0410–J0515) e (J0430–J0861) onde as curvas de nível em linhas tracejadas indicam intervalos de 0.1 para `d_Atype`. Nesse diagrama cor-cor, as estrelas do tipo A se concentram em um subgrupo bem definido

na região inferior esquerda. Para as estrelas dessa amostra, valores de `d_Atype`  $> 0.05$  selecionam uma amostra de 9556 estrelas do tipo A. O limite foi definido via inspeção visual, de modo a evitar a região de sobreposição com estrelas frias.

Ainda dentro desta amostra de estrelas do tipo A, temos estrelas azuis de ramo horizontal e estrelas da sequência principal. Como visto na seção 3.2 do Capítulo 3, é possível usar índices de cor com filtros do S-PLUS para fazer a distinção entre elas.

### 4.3 Separando estrelas BHB e estrelas da sequência principal usando o GMM

Ao adotar as cores (`u_JAVA-J0378`) e (`u_JAVA-J0395`) como critérios de separação entre estrelas BHB e estrelas da sequência principal, é possível definir uma amostra de estrelas BHB com confiabilidades individuais usando novamente o GMM. Para esta etapa, o GMM calcula e atribui dois parâmetros de agrupamento. O parâmetro `d_MS`, que quantifica a relação dessa estrela com a distribuição que identifica estrelas da sequência principal, e `d_BHB`, em relação à distribuição que representa as estrelas BHB.

Na Figura 4.2 são apresentados os diagramas cor-cor com curvas de nível representando a distribuição de valores de `d_BHB`, nos painéis (a) e (c), e `d_MS`, nos painéis (b) e (d). As estrelas BHB formam um grupo mais compacto e bem definido na região superior direita nesse diagrama cor-cor, enquanto estrelas da sequência principal se concentram, com maior dispersão, na região inferior esquerda. Para definir uma amostra de estrelas BHB, evitando contaminação por estrelas da sequência principal, adotou-se um limite para `d_BHB`  $> 0.1$ . Feito isso, obtemos uma amostra com 3578 estrelas BHB.

Para estrelas da sequência principal, foi adotado um limite mais restritivo de `d_MS`  $> 0.17$ . Esse limite garante uma amostra dessas estrelas sem que haja uma sobreposição com a amostra de estrelas BHB. Aplicando esse limite, temos uma amostra de 4794 estrelas da sequência principal, onde encontramos estrelas BS e estrelas do disco.

Os limites adotados estão indicados pelas curvas vermelhas na Figura 4.2. No painel (e), é possível ver que os limites aplicados para `d_BHB` e `d_MS` selecionam a maioria dos objetos com as características fotométricas de cada grupo, sem que as amostras se sobreponham.

Até este momento, não podemos distinguir estrelas de sequência principal entre candidatas a estrelas BS e estrelas do disco (mais ricas em metais). Para este tipo de estudo, é

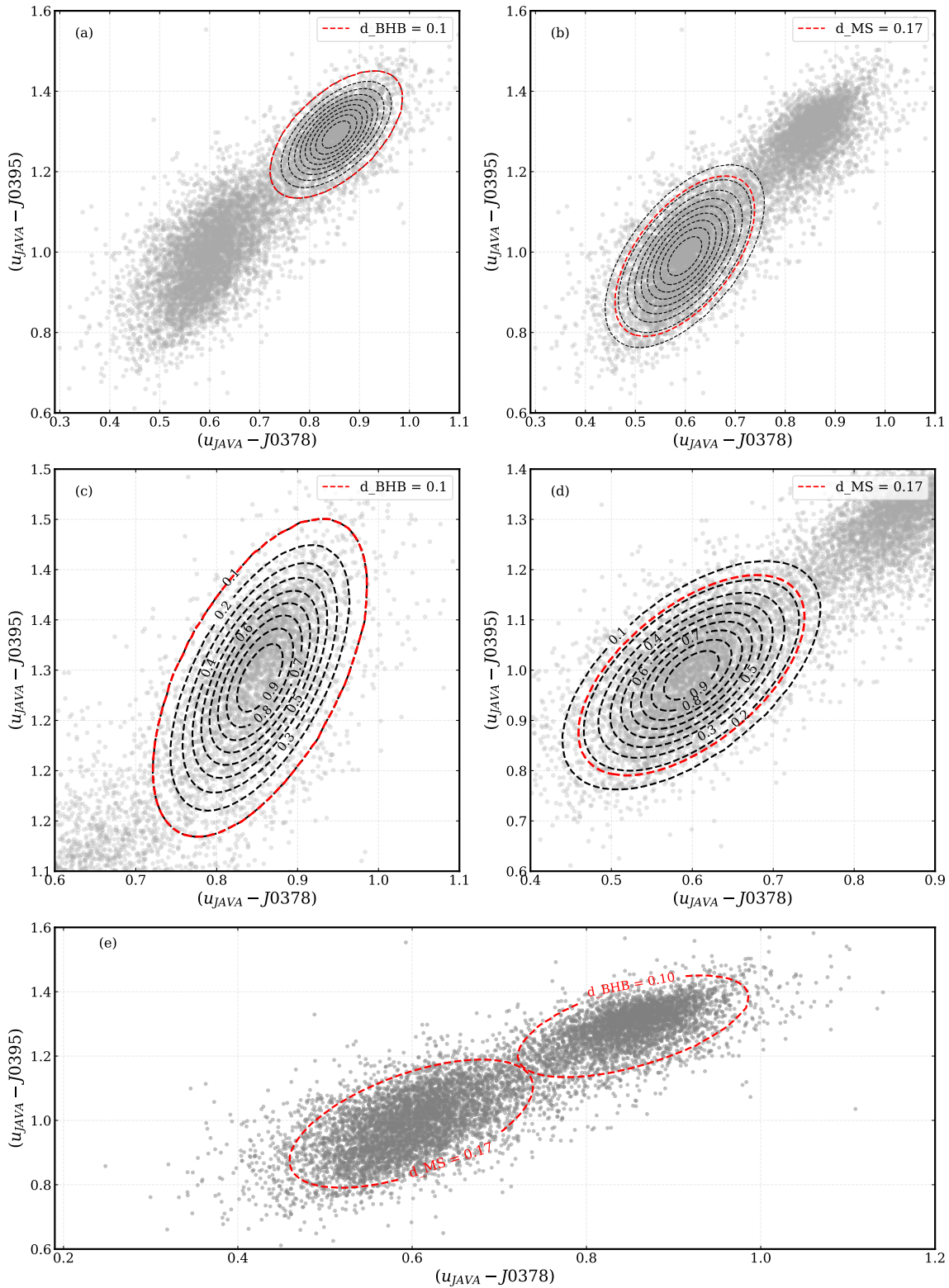


Figura 4.2: Diagrama  $(u_{\text{JAVA}} - J0378)$  vs  $(u_{\text{JAVA}} - J0395)$  para estrelas do tipo A no S-PLUS. Nos painéis (a) e (c) as curvas de nível indicam o agrupamento de estrelas BHB nessa distribuição considerando valores de  $p_{\text{BHB}}$ , e nos painéis (b) e (d) indicam estrelas da sequência principal com base nos valores de  $p_{\text{MS}}$ . As curvas em vermelho representam os limites adotados para  $p_{\text{BHB}}$  e  $p_{\text{MS}}$  para a seleção de estrelas nestes dois grupos. O painel (e) evidencia os limites de seleção adotados.

necessário estimar, de alguma forma, a metalicidade das estrelas analisadas.



## Estimativas de parâmetros atmosféricos

Estimativas confiáveis de parâmetros atmosféricos, como temperatura efetiva, gravidade superficial e metalicidade, normalmente são feitas através de informações espectroscópicas. Entretanto, a ampla informação fotométrica disponível na base de dados do S-PLUS pode ser útil para estimar estes parâmetros, através da comparação de parâmetros feita com a amostra de controle. Mesmo que os parâmetros estimados pela fotometria tenham erros maiores do que os parâmetros estimados com a informação espectroscópica, será possível ter informações, até então inéditas, para uma grande quantidade de estrelas do tipo A no hemisfério Sul celeste, que não estão descritas em nenhuma outra base de dados da literatura até então.

Usando o J-PLUS, que conta com o mesmo sistema de filtros do S-PLUS, [Whitten et al. \(2019\)](#) derivaram, através de redes neurais,  $T_{\text{eff}}$  e  $[\text{Fe}/\text{H}]$  para estrelas com temperatura efetiva entre  $4500 < T_{\text{eff}}(\text{K}) < 6200$ , e posteriormente [Yang et al. \(2022\)](#) estimaram  $T_{\text{eff}}$ ,  $\log g$ ,  $[\text{Fe}/\text{H}]$  e outras abundâncias químicas para estrelas com temperatura efetiva entre  $4000 < T_{\text{eff}}(\text{K}) < 7500$ . Usando o DR2 do S-PLUS, [Whitten et al. \(2021\)](#) estimaram  $T_{\text{eff}}$  e  $[\text{Fe}/\text{H}]$  para estrelas com temperatura entre  $4250 < T_{\text{eff}}(\text{K}) < 7000$ .

[Ju et al. \(2024\)](#) aplicaram o método *Stellar Label Machine* (SLAM) para estimar parâmetros atmosféricos de estrelas BHB usando espectros de baixa resolução do *Large Sky Area Multi-Object Fiber Spectroscopic Telescope* (LAMOST). Eles demonstraram que a inclusão de índices de cor no processo de treinamento melhorou significativamente a precisão das estimativas, especialmente para espectros com baixa razão sinal-ruído.

Neste capítulo é verificada a potencialidade em estimar esses parâmetros atmosféricos também para estrelas quentes do tipo A,  $7500 < T_{\text{eff}}(\text{K}) < 10000$ , usando apenas a fotometria do S-PLUS.

Para fazer esses ajustes foi utilizado o **Turingbot**<sup>1</sup>, um software de regressão simbólica<sup>2</sup>. Esse *software* nos permite relacionar diferentes parâmetros em vários níveis de complexidade matemática.

Para os ajustes feitos neste capítulo foi utilizada a amostra de estrelas do tipo A do S-PLUS/SDSS/SSPP, descrita na seção 3.1. As estimativas encontradas são apresentadas para `Teff_SPLUS` na seção 5.1, para `logg_SPLUS` na seção 5.2 e na seção 5.3 para `FEH_SPLUS`.

### 5.1 Estimativas de temperatura efetiva (`Teff_SPLUS`)

O **TuringBot** define a complexidade das soluções com base nas operações ajustadas. Atribui-se um valor numérico inteiro a cada tipo de operação, e cada vez que uma operação matemática é inserida no ajuste, o seu valor é somado ao valor de complexidade da solução<sup>3</sup>. Com o objetivo de encontrar um ajuste simples para esses parâmetros, foi limitado ao *software* considerar apenas operações básicas, como adição, multiplicação e divisão.

Após selecionado o parâmetro a ser ajustado, foram definidos os parâmetros de entrada e as operações possíveis para o ajuste. Para `Teff` foram feitos três ajustes distintos. O primeiro ajuste (A1) utilizou como parâmetros de entrada as magnitudes de todos os filtros do S-PLUS, permitindo ao software combinar essas magnitudes livremente. O segundo ajuste (A2) considerou como parâmetros de entrada todos os índices de cor possíveis, utilizando combinações entre filtros largos e estreitos do S-PLUS. O terceiro ajuste (A3) empregou apenas índices de cor calculados a partir de filtros distantes espectralmente entre si (tanto estreitos quanto largos), como (`uJAVA-z`), (`g-z`) ou (`J0378-i`).

Para cada ajuste feito, tem-se uma lista de soluções com diferentes valores de complexidade e erro. Na Figura 5.1 temos a relação entre complexidade e valor de erro médio absoluto (MAE - do inglês *mean absolute error*) das soluções para `Teff_SPLUS` para cada ajuste feito. Nota-se que todos os ajustes atingem um mesmo patamar de erro, por volta de  $\sim 132\text{K}$ . Para o ajuste feito utilizando as magnitudes dos filtros largos e estreitos (linha vermelho escuro), esse patamar é atingido para um valor maior de complexidade do que

<sup>1</sup> <https://turingbotsoftware.com/>.

<sup>2</sup> Do inglês *Symbolic regression*, é um tipo de regressão que procura encontrar o melhor modelo matemático que descreve um parâmetro através de diversas variáveis de entrada.

<sup>3</sup> Mais detalhes sobre esse *software* podem ser encontrados em: <https://turingbotsoftware.com/documentation>.

pode ser observado para as outras duas soluções.

Para escolher a melhor solução, é necessário considerar a relação entre complexidade e o MAE da solução. Busca-se, além de minimizar o erro, encontrar a solução mais simples possível, pois modelos excessivamente complexos tendem a capturar não apenas os padrões relevantes, mas também os ruídos específicos dos dados usados no treinamento, comprometendo a generalização para o restante dos dados. Isto pode ser feito identificando, nas curvas da Figura 5.1, o ponto onde a precisão da solução não justifica o aumento de complexidade.

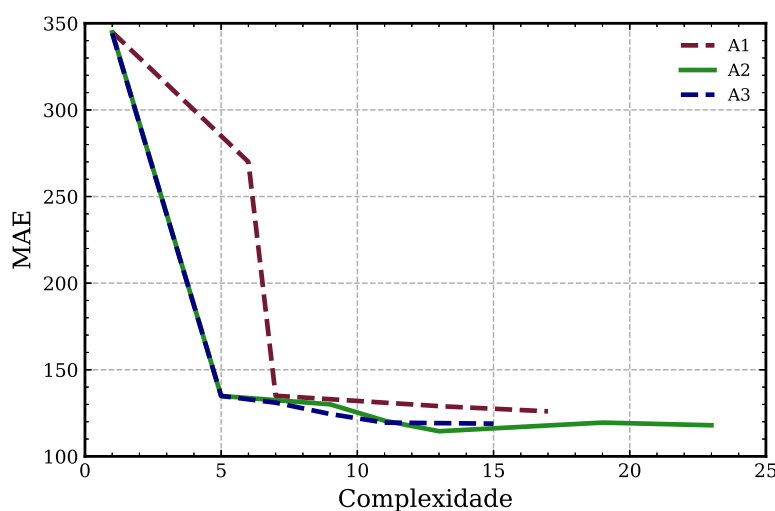


Figura 5.1: Relação entre a complexidade e o erro médio absoluto (MAE) para as soluções de *Teff\_SPLUS*. A1 se refere ao ajuste feito utilizando as magnitudes de todos os filtros do S-PLUS como parâmetro de entrada, enquanto A2 é o ajuste feito utilizando todos os índices de cor possíveis com os filtros do S-PLUS, e por fim, A3 é o ajuste feito utilizando apenas índices de cor com filtros largos e estreitos distantes entre si, como ( $u_{\text{JAVA}}-z$ ) ou ( $J0378-i$ ).

As soluções de complexidade 5 para os ajustes A2 e A3 apresentaram as melhores relações complexidade/MAE e a mesma expressão matemática:

$$\text{Teff\_SPLUS} = 7451.38 - 2553.46 * (g - z). \quad (5.1)$$

Nota-se a presença do índice de cor ( $g-z$ ) na solução, que é um índice de cor formado da combinação da magnitude de dois filtros distantes, que abrange uma faixa espectral grande.

A solução de *Teff\_SPLUS* apresenta um erro médio de  $\sim 132$  K na amostra. Na Figura 5.2 temos, no painel (a), uma comparação com os valores de temperatura efetiva ajustados (*Teff\_SPLUS*) e os valores processados pelo SSPP (*TEFF\_ADOP*). No painel (b) vemos que

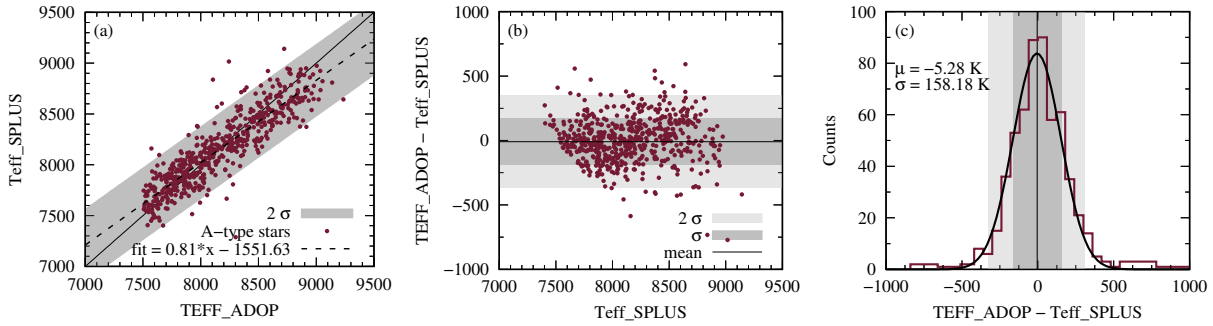


Figura 5.2: Comparação entre  $T_{\text{eff\_SPLUS}}$  calculado com o ajuste aplicado aos filtros largos e estreitos do S-PLUS e  $TEFF\_ADOP$  do SDSS, calculado pelo SSPP (SEGUE *Stellar Parameter Pipeline*). O painel (a) mostra a concordância entre os dois parâmetros e os painéis (b) e (c) mostram os resíduos e sua distribuição, respectivamente.

os resíduos, diferença entre o valor esperado e o valor ajustado, se distribuem de forma aleatória, o que indica uma variância constante e, no painel (c), os resíduos se distribuem de forma normal.

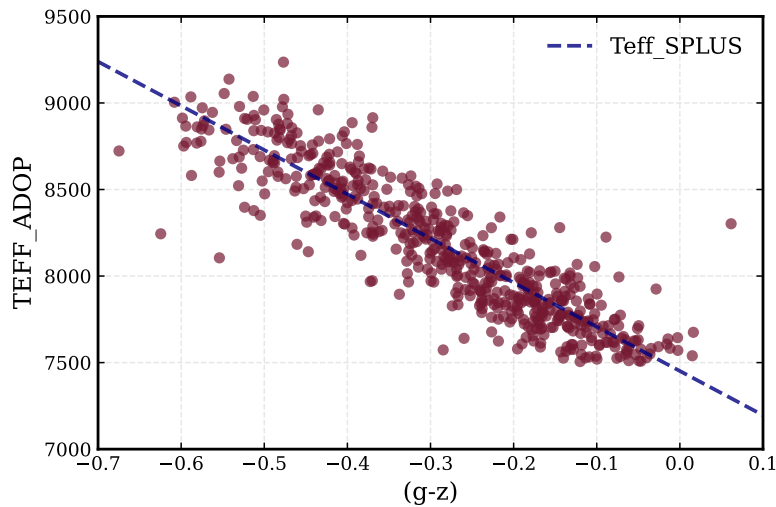


Figura 5.3: Relação entre a temperatura efetiva ( $TEFF\_ADOP$ ) determinada pelo SSPP (pontos em laranja) e o índice de cor ( $g-z$ ) do S-PLUS. A linha tracejada azul representa o ajuste da calibração fotométrica do S-PLUS para a temperatura efetiva ( $T_{\text{eff\_SPLUS}}$ ).

A Figura 5.3 apresenta a correlação entre  $TEFF\_ADOP$  e o índice de cor ( $g-z$ ) para uma amostra de estrelas observadas pelo S-PLUS. O objetivo desta análise é evidenciar a relação entre temperatura efetiva e índice de cor, permitindo avaliar a coerência das estimativas fotométricas do S-PLUS em comparação com os valores espectroscópicos do SSPP. Como esperado, observa-se uma clara relação inversa entre a temperatura efetiva e o índice de cor, onde estrelas mais quentes apresentam índices ( $g-z$ ) menores, enquanto estrelas mais

frias mostram índices maiores. O ajuste fotométrico do S-PLUS (linha tracejada azul) demonstra boa concordância com as determinações do SSPP.

## 5.2 Estimativas de gravidade superficial (*logg\_SPLUS*)

Para *logg\_SPLUS* também foram feitos ajustes distintos. Os ajustes A1 e A2 apresentam os mesmos parâmetros descritos na seção anterior, e um ajuste A3 contando apenas com índices de cor calculados a partir dos filtros localizados na região mais azul do espectro, como ( $u_{\text{JAVA}}\text{-J0378}$ ) e ( $u_{\text{JAVA}}\text{-J0430}$ ), onde encontramos a maioria das linhas de absorção de H.

Na Figura 5.4 temos a relação entre o MAE e a complexidade para as soluções obtidas a partir destes ajustes. Nota-se que as soluções para os ajustes A2 e A3 convergem para um erro  $\sim 0.23$  dex com complexidades menores do que para as soluções do ajuste A1. Para os três ajustes, se destaca a presença dos índices de cor ( $u_{\text{JAVA}}\text{-J0378}$ ) e ( $u_{\text{JAVA}}\text{-J0410}$ ) nas soluções.

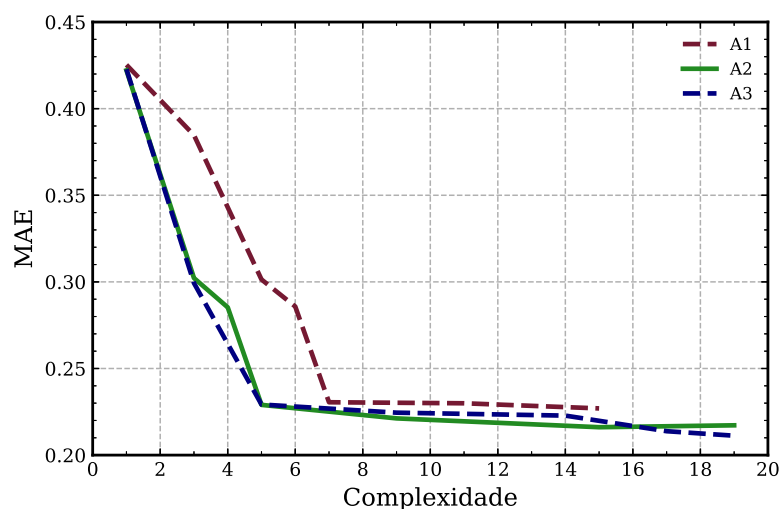


Figura 5.4: Relação entre a complexidade e o erro médio absoluto para as soluções de *logg\_SPLUS*. A1 se refere ao ajuste feito utilizando as magnitudes de todos os filtros do S-PLUS como parâmetro de entrada, enquanto A2 é o ajuste feito utilizando todos os índices de cor possíveis com os os filtros do S-PLUS, e por fim, A3 é o ajuste feito utilizando apenas índices de cor com filtros mais azuis.

Os ajustes A2 e A3 alcançam o mesmo valor de MAE para as soluções de complexidade 5. Porém, devido ao número de parâmetros de entrada escolhidos para o ajuste A3, o algoritmo necessita de menos iterações para alcançar o mesmo erro que o ajuste A2. A solução de complexidade 5 do ajuste A3 possui um erro médio de  $\sim 0.22$  dex na amostra e

possui a seguinte forma:

$$\log g_{\text{SPLUS}} = 5.58 - 2.58 * (u_{\text{JAVA}} - J0378). \quad (5.2)$$

Vale ressaltar a presença do índice de cor ( $u_{\text{JAVA}} - J0378$ ) que, como visto na seção 3.2 do Capítulo 3, é o mais sensível às diferenças da largura das asas das linhas de absorção do Hidrogênio, causadas pelas diferentes gravidades superficiais para as estrelas do ramo horizontal e estrelas da sequência principal.

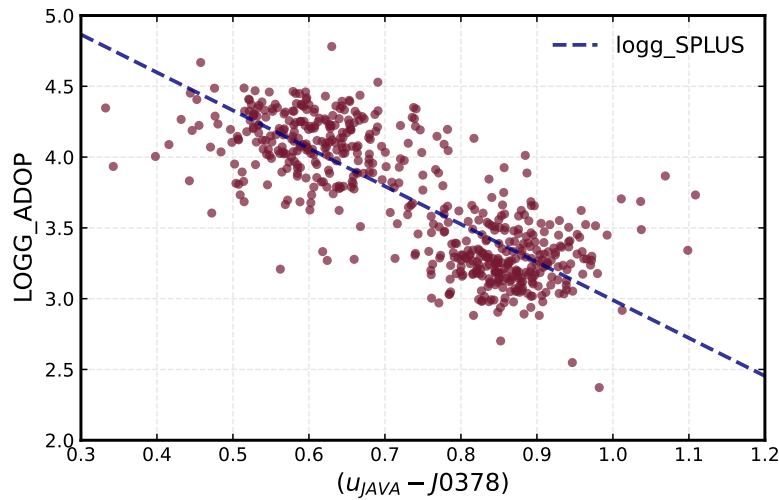


Figura 5.5: Relação entre a temperatura efetiva ( $\text{LOGG\_ADOP}$ ) determinada pelo SSPP (pontos em laranja) e o índice de cor ( $u_{\text{JAVA}} - J0378$ ) do S-PLUS. A linha tracejada azul representa o ajuste da calibração fotométrica do S-PLUS para a temperatura efetiva ( $\log g_{\text{SPLUS}}$ ).

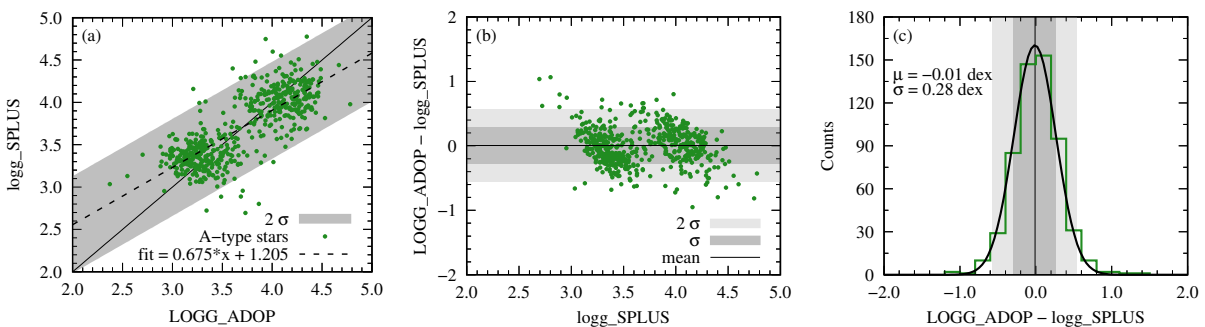


Figura 5.6: Comparação entre  $\log g_{\text{SPLUS}}$  calculado com o ajuste aplicado aos filtros largos e estreitos do S-PLUS e  $\text{LOGG\_ADOP}$  do SDSS, calculado pelo SSPP. O painel (a) mostra a concordância entre os dois parâmetros e os painéis (b) e (c) mostram os resíduos e sua distribuição, respectivamente.

Vemos na Figura 5.6 que os resíduos também apresentam uma variância constante (painel b) e uma distribuição normal em torno da média dos resíduos (painel c), indicando um ajuste bastante satisfatório para  $\log g$ .

### 5.3 Estimativa de metalicidade (FEH\_SPLUS)

Estimar metalicidade para estrelas quentes ( $T_{\text{eff}} > 7500$  K) apenas com fotometria é bastante desafiador, uma vez que linhas de absorção importantes para estimar a abundância química de elementos mais pesados são bem discretas no espectro destas estrelas, como mostrou a linha vertical pontilhada na Figura 1.3, ela mostra a assinatura de absorção mais proeminente para confirmação de metalicidade nas estrelas analisadas: a linha Ca II K. Mesmo uma fotometria mais precisa com filtros estreitos pode não ser suficiente para um ajuste acurado.

Da mesma forma que o procedimento adotado para `Teff_SPLUS` e `logg_SPLUS`, também foi utilizado o `TuringBot` para buscar uma relação que estima a metalicidade das estrelas analisadas. Também foi feito um ajuste utilizando os filtros isolados do S-PLUS (A1), um ajuste utilizando índices de cor para as combinações de filtros largos e estreitos possíveis (A2) e um ajuste (A3) apenas utilizando índices de cor com filtros mais azuis.

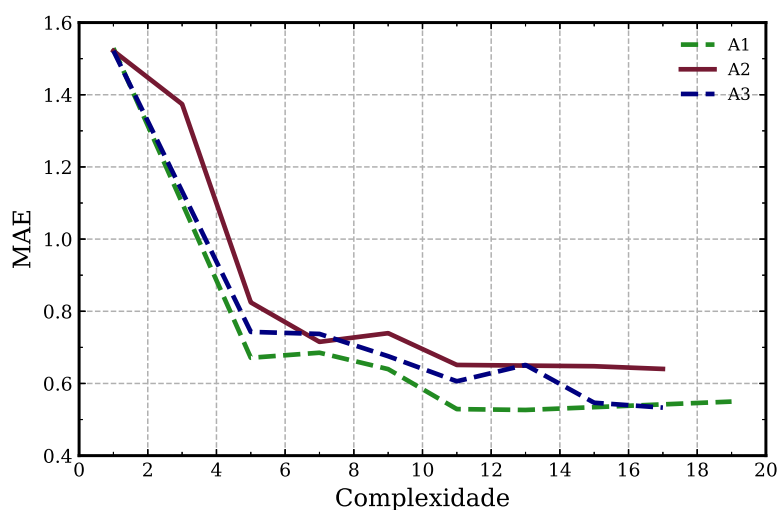


Figura 5.7: Relação entre a complexidade e o erro médio absoluto para as soluções de FEH\_SPLUS. A1 se refere ao ajuste feito utilizando as magnitudes de todos os filtros do S-PLUS como parâmetro de entrada, enquanto A2 é o ajuste feito utilizando todos os índices de cor possíveis com os os filtros do S-PLUS, e por fim, A3 é o ajuste feito utilizando apenas índices de cor com filtros mais azuis.

Na Figura 5.7 temos a relação complexidade vs MAE para as soluções obtidas a partir dos ajustes feitos. Nota-se que para os três ajustes, a partir do valor de complexidade 7, o erro se manteve em um intervalo entre  $\sim 0.5$  dex e  $\sim 0.8$  dex, sem nenhuma tendência de queda para maiores valores de complexidade.

Em especial para as soluções de FEH\_SPLUS, é importante analisar também o erro de

validação cruzada (*CV\_error*). O *CV\_error* é um parâmetro que quantifica a capacidade de generalização daquela solução para os demais dados não usados pelo TuringBot no treinamento.

Assim como ocorreu para as soluções de *Teff\_SPLUS* e *logg\_SPLUS*, espera-se que os valores de *CV\_error* diminuam conforme a complexidade da solução aumenta, sugerindo que soluções mais complexas possuem um poder de generalização melhor do que soluções mais simples.

Para *FEH\_ADOP*, o erro de validação cruzada das soluções obtidas não apresenta esse mesmo comportamento, com valores de *CV\_error* aumentando e diminuindo conforme a complexidade das soluções aumenta, de formas diferentes para os três ajustes. Isso fica visível na Figura 5.8, onde temos a relação entre complexidade e *CV\_error* para essas soluções.

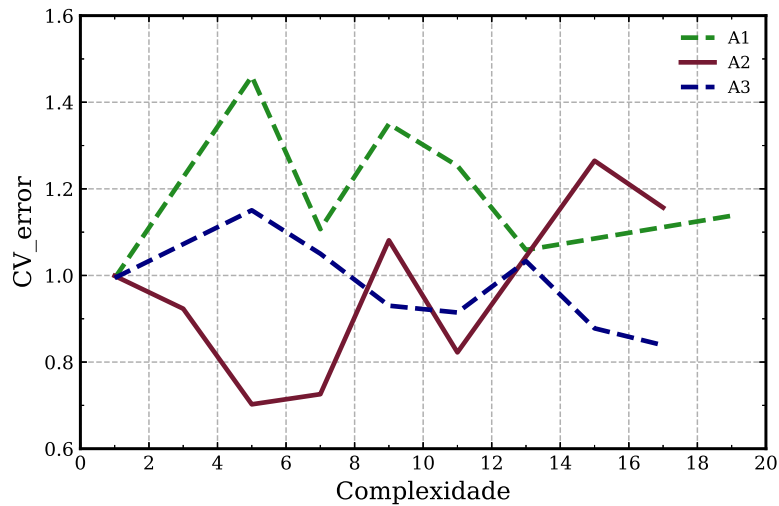


Figura 5.8: Relação entre a complexidade e o erro validação cruzada (*CV\_error*) para as soluções de *logg\_FEH*. O *CV\_error* quantifica a capacidade de generalização da solução calibrada.

Para escolher a melhor solução, é preciso analisar de forma conjunta a relação entre a complexidade da solução, o erro médio absoluto e o erro de validação cruzada. A solução de complexidade 7 do ajuste A2 é a solução mais equilibrada considerando esses fatores. Essa solução possui um MAE em torno de  $\sim 0.71$  dex e *CV\_error* em torno de  $\sim 0.72$  dex.

A solução escolhida para a metalicidade:

$$\text{FEH\_SPLUS} = 3.76 * (1.49 * (J0378 - r) - (u_{J\text{AVA}} - J0861)). \quad (5.3)$$

Os valores estimados de metalicidade possuem um erro médio na amostra de  $\sim 0.70$

dex, enquanto os valores de metalicidade obtidos pelo espectro (calculados pelo SSPP) possuem um erro médio na amostra de  $\sim 0.14$  dex.

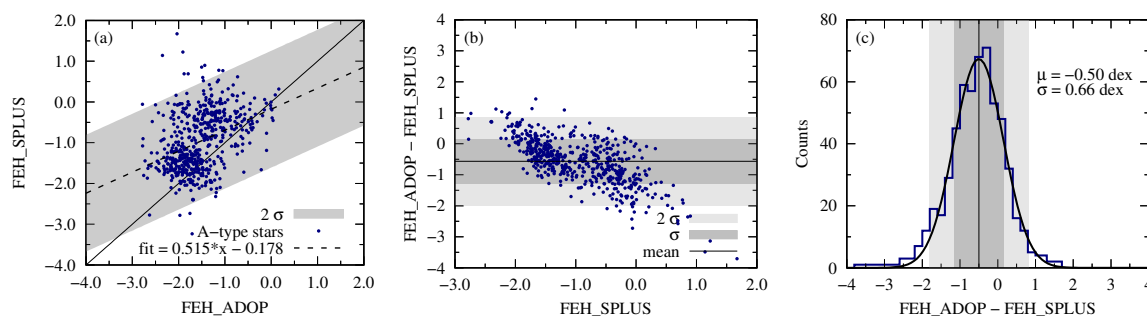


Figura 5.9: Comparação entre  $FEH\_SPLUS$  calculado com o ajuste aplicado aos filtros largos e estreitos do S-PLUS e  $FEH\_ADOP$  do SDSS, calculado pelo SSPP. O painel (a) mostra a concordância entre os dois parâmetros e os painéis (b) e (c) mostram os resíduos e sua distribuição, respectivamente.

Na Figura 5.9, é apresentada a comparação entre os valores de metalicidade calculados pelo SSPP e os valores estimados para o S-PLUS, assim como a dispersão e distribuição dos resíduos. O painel (b) da Figura 5.9 evidencia uma forte tendência sistemática nos resíduos, que aumenta negativamente em relação a  $FEH\_SPLUS$ . No painel (c) temos a distribuição desses resíduos, que embora apresente um viés sistemático significativo para  $FEH\_SPLUS$ , destaca a aleatoriedade dos erros nas medidas.

Esse resultado evidencia as dificuldades em se obter estimativas para metalicidade em estrelas quentes, como estrelas do tipo A, apenas com fotometria.

Extrapolando essa calibração de metalicidade para a amostra de estrelas da sequência principal do S-PLUS definida no Capítulo anterior, foi possível fazer um corte de metalicidade  $FEH\_SPLUS < -1$ , que é importante para distinguir quimicamente as estrelas BS das estrelas de sequência principal do disco, conforme citado anteriormente.



## Magnitudes absolutas e distâncias de estrelas BHB

Como mencionado no Capítulo 1, estrelas BHB são conhecidas por sua magnitude absoluta praticamente constante, tornando-as ótimas traçadoras de distância, o que faz com que estes objetos desempenhem um papel fundamental em estudos de estrutura e arqueologia galáctica (Xue et al., 2011; Deason et al., 2012; Santucci et al., 2015; Bird et al., 2022; Barbosa et al., 2022; Amarante et al., 2024; Culpan et al., 2024). Neste capítulo, é apresentado o cálculo das magnitudes absolutas e distâncias para as estrelas BHB identificadas neste trabalho, empregando as calibrações feitas por Barbosa et al. (2022) para estrelas BHB do SDSS. Este esforço tem como objetivo fornecer informações adicionais para estas estrelas.

Barbosa et al. (2022) selecionaram uma amostra de estrelas BHB em aglomerados globulares bem conhecidos usando dados do SDSS e SEGUE. Em seguida, calcularam suas magnitudes absolutas. Com esses dados, desenvolveram novas calibrações para a magnitude absoluta usando as cores ( $g-r$ ) e ( $u-r$ ) do SDSS, comparando-as com calibrações anteriores e validando-as com dados do Gaia DR3. Apresentaram evidências de que a calibração utilizando a cor ( $u-r$ ) do SDSS se mostrou superior à calibração que utiliza a cor mais usual ( $g-r$ ) para estimar as magnitudes absolutas de estrelas BHB.

Com o objetivo de aplicar essa calibração de magnitude absoluta às estrelas BHB do S-PLUS, foi feito um ajuste do índice de cor ( $u_{\text{JAVA}}-r$ ) do S-PLUS em relação ao índice de cor ( $u-r$ ) do SDSS em uma amostra de estrelas BHB do S-PLUS em comum com a amostra utilizada no trabalho citado. Este ajuste é simples pois os filtros largos presentes no S-PLUS são parecidos aos presentes no SDSS, ambos no sistema  $u, g, r, i$  e  $z$ .

Na Figura 6.1 temos, no painel esquerdo, a comparação entre os índices de cor ( $u_{\text{JAVA}}-r$ ) do S-PLUS e ( $u-r$ ) do SDSS, onde é possível observar os deslocamentos dos dados em

relação à reta  $y=x$  (linha cinza pontilhada). O que era esperado, considerando que o filtro  $u_{\text{JAVA}}$  presente no S-PLUS é ligeiramente diferente do filtro  $u$  do SDSS.

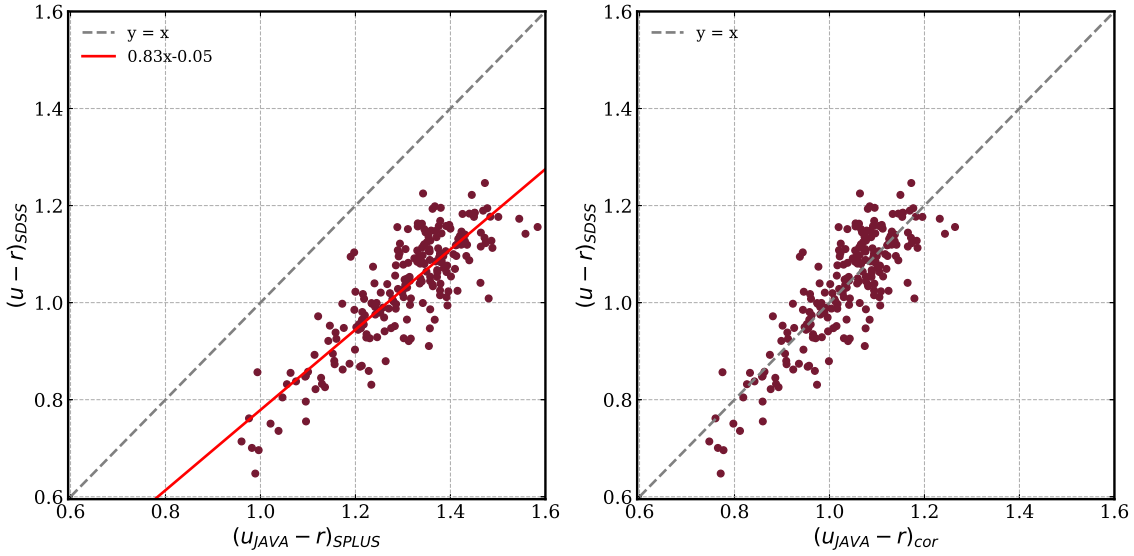


Figura 6.1: Comparação entre índices de cor ( $u-r$ ) do SDSS e S-PLUS. Painel esquerdo: correlação inicial entre ( $u-r$ ) do SDSS e ( $u_{\text{JAVA}}-r$ ) do S-PLUS, com ajuste linear  $y = 0.83x + 0.05$  (linha vermelha) usado para a correção de cor. Painel direito: correlação dos dados após a ajuste do índice de cor ( $u_{\text{JAVA}}-r$ ) do S-PLUS,  $(u_{\text{JAVA}}-r)_{\text{cor}}$ .

A correção é feita aplicando a função ajustada, indicada pela linha vermelha no painel esquerdo da Figura 6.1, à cor ( $u_{\text{JAVA}}-r$ ) do S-PLUS, resultando em um novo índice de cor corrigido:  $(u_{\text{JAVA}}-r)_{\text{cor}}$ . A comparação entre as cores  $(u_{\text{JAVA}}-r)_{\text{cor}}$  e  $(u-r)$  está ilustrada no painel direito da Figura 6.1.

O próximo passo foi calcular a magnitude absoluta<sup>1</sup> e em seguida a distância<sup>2</sup> ( $D_{\text{SPLUS}}$ ) utilizando a cor ajustada  $(u_{\text{JAVA}}-r)_{\text{cor}}$  do S-PLUS. Na Figura 6.2 temos a comparação direta entre os valores de distância ( $D_{\text{SDSS}}$ ) calculados com a calibração feita por [Barbosa et al. \(2022\)](#) e a distância ( $D_{\text{SPLUS}}$ ) calculada utilizando o índice de cor ajustado do S-PLUS. Observa-se que há uma relação praticamente linear entre  $D_{\text{SDSS}}$  e  $D_{\text{SPLUS}}$ , onde as distâncias do SDSS são  $\sim 6\%$  maiores que as distâncias do S-PLUS.

Esta correção e a calibração de distância foram aplicadas na amostra de estrelas BHB do S-PLUS. Unindo essa informação com as coordenadas celestes galácticas destes objetos, foram estimadas as distâncias galácticas  $X$ ,  $Y$  e  $Z$ , onde  $R$  é a distância do centro galáctico, definido como:  $R = \sqrt{(X^2 + Y^2 + Z^2)}$ .

<sup>1</sup>  $M = \frac{0.721}{(u-r)} - 0.212$  ([Barbosa et al., 2022](#)).

<sup>2</sup>  $D_{\text{SPLUS}} = 10^{\frac{q-M}{5}+1}$

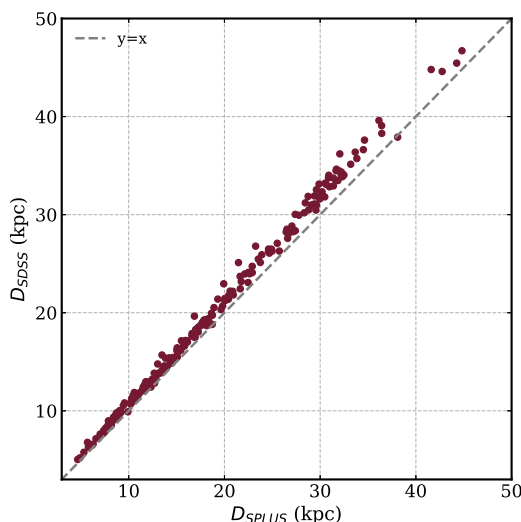


Figura 6.2: Comparação entre distâncias calculadas por Barbosa et al. (2022) ( $D_{SDSS}$ ) e as distâncias obtidas usando o índice de cor ajustado do S-PLUS ( $D_{SPLUS}$ ).

Na Figura 6.3 temos uma distribuição espacial de estrelas BHB do S-PLUS, em diferentes planos das coordenadas galácticas XYZ, com o centro da Galáxia localizado na origem do sistema de coordenadas.

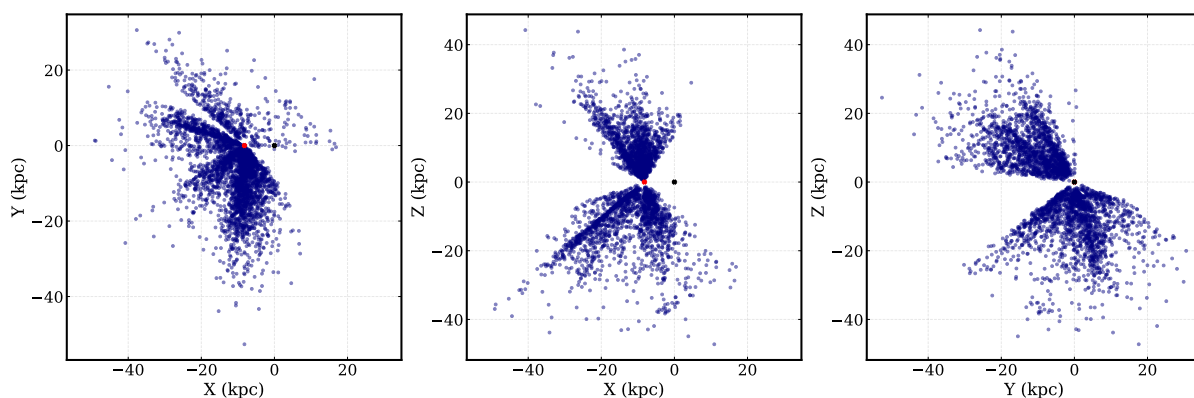


Figura 6.3: Distribuição espacial de estrelas BHB do S-PLUS na Galáxia em coordenadas cartesianas. Da esquerda para direita: projeções nos planos X-Y, X-Z e Y-Z, onde o centro da Galáxia está localizado na origem do sistema de coordenadas. O Sol, representado pelo ponto vermelho, está localizado em  $(X, Y, Z) = (-8.2, 0, 0)$  kpc (Bland-Hawthorn e Gerhard, 2016; Utkin e Dambis, 2020). O ponto preto indica o centro da Galáxia.

A amostra de estrelas BHB do S-PLUS se estende até aproximadamente 60 kpc em algumas direções, com a densidade diminuindo significativamente para distâncias superiores a 20 kpc. A distribuição não uniforme é resultado de viés observacional devido à cobertura do céu pelo S-PLUS.

Ao final desta análise, obtivemos duas amostras inéditas de objetos: (1) uma amos-

tra inédita de BHBs com 3578 estrelas, com estimativas dos principais parâmetros atmosféricos estelares: temperatura,  $\log g$  e metalicidade; (2) uma amostra inédita de estrelas na sequência principal com 4794 estrelas, também com estimativas dos principais parâmetros atmosféricos estelares: temperatura,  $\log g$  e metalicidade.

O DR4 do S-PLUS já se encontra público, e os dados resultantes desta análise serão amplamente compartilhados, a quem demonstrar interesse, através do contato direto com o autor do trabalho<sup>3</sup>.

---

<sup>3</sup> E-mail: franktyerry@discente.ufg.br

## Considerações finais e perspectivas

Através de comparações com outras bases de dados, definimos limites fotométricos na base de dados do S-PLUS para selecionar estrelas do tipo A, um levantamento fotométrico de dados feito predominantemente no Hemisfério Sul celeste. As restrições adotadas para seleção destas estrelas foram:  $1.0 < (u_{\text{JAVA}} - g) < 1.6$  e  $-0.3 < (g - r) < 0.1$ , muito similares às restrições adotadas para seleção destas estrelas na base de dados do SDSS, dada a grande semelhança entre estes sistemas fotométricos. Foram definidos também os cortes de qualidade na fotometria do S-PLUS ( $\text{FLAGS\_SEX\_DET} > 0$ ,  $\text{s2n\_DET\_auto} > 30$ ,  $\text{e\_u\_PStotal} < 0.1$ ,  $\text{e\_J0378\_PStotal} < 0.09$  e  $\text{e\_J0395\_PStotal} < 0.09$ ) para garantir que as estrelas do tipo A pudessem mostrar diferenças fotométricas para objetos em diferentes estágios evolutivos: estrelas do ramo horizontal e estrelas na sequência principal.

Dentre todas as combinações de índices de cor possíveis com a fotometria do S-PLUS, as cores  $(u_{\text{JAVA}} - \text{J0378})$  e  $(u_{\text{JAVA}} - \text{J0395})$  foram as mais eficientes em separar as estrelas em estágios evolutivos diferentes. Estas cores foram usadas como parâmetros para separar esses objetos usando o GMM, uma ferramenta estatística que identifica diferentes picos na distribuição de dados e atribui ao objeto um valor de pertencimento a um dos grupos.

Usando o DR4 do S-PLUS, foi obtida uma amostra de aproximadamente 9500 estrelas do tipo A. Dentre elas, cerca de 3600 são candidatas a estrelas BHB, enquanto aproximadamente 4800 são candidatas a estrelas da sequência principal.

Os principais parâmetros atmosféricos ( $T_{\text{eff}}$ ,  $\log g$  e  $[\text{Fe}/\text{H}]$ ) destes astros foram estimados com as calibrações que compararam os dados fotométricos do S-PLUS com dados espectroscópicos fornecidos pelo SDSS, com erros médios de 132 K na temperatura, 0.22 dex no  $\log g$  e 0.70 dex na metalicidade. Outra característica importante desta análise foi o uso de ferramentas e códigos que nos deram relações explícitas entre os parâmetros

estudados, sem que seja necessário o uso de um código restrito. Através das calibrações estimadas para temperatura (equação 5.1),  $\log g$  (equação 5.2) e metalicidade (equação 5.3), espera-se que qualquer pessoa interessada em trabalhar com os dados do S-PLUS consiga estimar os parâmetros atmosféricos das estrelas do tipo A de maneira simples e direta.

Na etapa final deste trabalho, foi feita uma correção da cor ( $u_{\text{JAVA}}-r$ ) do S-PLUS em relação à cor ( $u-r$ ) do SDSS, para a aplicação das estimativas de magnitude absoluta e distância feitas por [Barbosa et al. \(2022\)](#) para estrelas BHB do S-PLUS.

As amostras aqui selecionadas possuem uma ampla variedade de aplicações. As BHBs podem ser usadas como traçadoras de idade no halo galáctico, da mesma forma que [Santucci et al. \(2015\)](#) mostraram, porém agora utilizando uma amostra inédita de objetos no hemisfério sul celeste. As estrelas de sequência principal, em particular as estrelas BS, também podem ser úteis para a mesma finalidade ([Santucci, 2016](#)). Elas também podem ser usadas para estudar a razão entre estes tipos estelares no halo galáctico ([Santucci et al., 2015](#)).

Além disso, estrelas BHB e estrelas BS podem ser usadas como objetos de estudo na arqueologia galáctica. Como toda estrela pobre em metais, elas também são úteis desde estudos a respeito da binaridade de populações estelares ([Rain et al., 2024](#)), formação e evolução da nossa Galáxia ([Xue et al., 2011](#); [Deason et al., 2012](#); [Amarante et al., 2024](#)) e até a evolução dos elementos químicos no Universo ([Kafando et al., 2016](#)). Entretanto, convém ressaltar que, para estas finalidades, uma campanha observacional deveria ser feita com objetos mais promissores desta amostra, mesmo que em espectroscopia de baixa resolução, para confirmação de abundâncias químicas mais precisas e também para a aquisição de qualquer informação a respeito da velocidade radial destes objetos.

## Referências Bibliográficas

- Amarante J. A., Koposov S. E., Laporte C. F., Mapping the anisotropic Galactic stellar halo with Blue Horizontal Branch stars, arXiv preprint arXiv:2404.09825, 2024
- Barbosa F. O., Santucci R. M., Rossi S., Limberg G., Pérez-Villegas A., Perottoni H. D., The SDSS-Gaia View of the Color–Magnitude Relation for Blue Horizontal-branch Stars, *The Astrophysical Journal*, 2022, vol. 940, p. 30
- Beers T. C., Christlieb N., The discovery and analysis of very metal-poor stars in the galaxy, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 2005, vol. 43, p. 531
- Bird S. A., Xue X.-X., Liu C., Flynn C., Shen J., Wang J., Yang C., Zhai M., Zhu L., Zhao G., et al., Milky Way mass with K giants and BHB stars using LAMOST, SDSS/SEGUE, and Gaia: 3D spherical Jeans equation and tracer mass estimator, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2022, vol. 516, p. 731
- Bishop C. M., *Pattern recognition and machine learning* by Christopher M. Bishop. Springer Science+ Business Media, LLC, 2006
- Bland-Hawthorn J., Gerhard O., The Galaxy in Context: Structural, Kinematic, and Integrated Properties, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 2016, vol. 54, p. 529
- Boffin H. M., Carraro G., Beccari G., et al., *Ecology of Blue Straggler Stars*. vol. 413, Springer, 2015
- Bok B. J., Reilly E. F., Small dark nebulae., *The Astrophysical Journal*, 1947, vol. 105, p. 255

- Carney B. W., Latham D. W., Laird J. B., Metal-poor Field Blue Stragglers: More Evidence for Mass Transfer, *The Astronomical Journal*, 2005, vol. 129, p. 466
- Carollo D., Beers T., Placco V., Santucci R., Denissenkov P., Tissera P. B., Lentner G., Rossi S., Lee Y., Tumlinson J., The age structure of the Milky Way's halo, *Nature Physics*, 2016, vol. 12, p. 1170
- Catelan M., Horizontal branch stars: the interplay between observations and theory, and insights into the formation of the Galaxy, *Astrophysics and Space Science*, 2009, vol. 320, p. 261
- Cenarro A. J., Moles M., Cristóbal-Hornillos D., Marín-Franch A., Ederoclite A., Varela J., López-Sanjuan C., Hernández-Monteagudo C., Angulo R., Ramió H. V., et al., J-PLUS: The javalambre photometric local universe survey, *Astronomy & Astrophysics*, 2019, vol. 622, p. A176
- Culpan R., Dorsch M., Geier S., Pelisoli I., Heber U., Kubatova B., Cabezas M., Probing the inner Galactic halo with blue horizontal-branch stars-Gaia DR3-based catalogue with atmospheric and stellar parameters, *Astronomy & Astrophysics*, 2024, vol. 685, p. A134
- Deason A., Belokurov V., Evans N., The Milky Way stellar halo out to 40 kpc: squashed, broken but smooth, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2011, vol. 416, p. 2903
- Deason A., Belokurov V., Evans N., Koposov S., Cooke R., Penarrubia J., Laporte C., Fellhauer M., Walker M., Olszewski E., The cold veil of the Milky Way stellar halo, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2012, vol. 425, p. 2840
- Foley H. M., The Pressure Broadening of Spectral Lines, *Physical Review*, 1946, vol. 69, p. 616
- Gaia Collaboration Prusti T., De Bruijne J., Brown A. G., Vallenari A., Babusiaux C., Bailer-Jones C., Bastian U., Biermann M., Evans D. W., Eyer L., et al., The gaia mission, *Astronomy & astrophysics*, 2016, vol. 595, p. A1

- 
- Hills J., Day C., Stellar collisions in globular clusters, *Astrophysical Letters*, 1976, vol. 17, p. 87
- Hoeneisen B., et al., Study of Baryon Acoustic Oscillations with SDSS DR13 Data and Measurements of  $\Omega_k$  and  $\Omega_{DE}(a)$ , *International Journal of Astronomy and Astrophysics*, 2017, vol. 7, p. 11
- Ju J., Zhang B., Cui W., Huo Z., Liu C., Huang Y., Shi J., The Blue Horizontal-branch Stars from the LAMOST Survey: Atmospheric Parameters, *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 2024, vol. 276, p. 12
- Kafando I., LeBlanc F., Robert C., Detailed abundance analysis of five field blue horizontal-branch stars, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2016, vol. 459, p. 871
- Klessen R. S., Star formation in molecular clouds, *EAS Publications Series*, 2011, vol. 51, p. 133
- Lee Y. S., Beers T. C., Sivarani T., Johnson J. A., An D., Wilhelm R., Prieto C. A., Koesterke L., Fiorentin P. R., Bailer-Jones C. A., et al., The SEGUE stellar parameter pipeline. II. Validation with Galactic globular and open clusters, *The Astronomical Journal*, 2008, vol. 136, p. 2050
- Lithopsian, 2017 Hertzsprung–Russell diagram for globular cluster M5
- López-Sanjuan C., Varela J., Cristóbal-Hornillos D., Ramió H. V., Carrasco J., Tremblay P.-E., Whitten D., Placco V., Marín-Franch A., Cénarro A., et al., J-PLUS: photometric calibration of large-area multi-filter surveys with stellar and white dwarf loci, *Astronomy & Astrophysics*, 2019, vol. 631, p. A119
- McCrea W., The interpretation of the Schwarzschild metric and the release of gravitational energy, *Astrophysica Norvegica*, 1964, vol. 9, p. 89
- McKee C. F., Ostriker E. C., Theory of star formation, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 2007, vol. 45, p. 565
- McLachlan G. J., Krishnan T., *The EM algorithm and extensions*. John Wiley & Sons, 2007

- Meert A., Vikram V., Bernardi M., A catalogue of 2D photometric decompositions in the SDSS-DR7 spectroscopic main galaxy sample: preferred models and systematics, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2015, vol. 446, p. 3943
- Mendes de Oliveira C., Ribeiro T., Schoenell W., Kanaan A., Overzier R., Molino A., Sampedro L., Coelho P., Barbosa C., Cortesi A., et al., The Southern Photometric Local Universe Survey (S-PLUS): improved SEDs, morphologies, and redshifts with 12 optical filters, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2019, vol. 489, p. 241
- Momany Y., Held E. V., Saviane I., Zaggia S., Rizzi L., Gullieuszik M., The blue plume population in dwarf spheroidal galaxies - Genuine blue stragglers or young stellar population?, *Astronomy & Astrophysics*, 2007, vol. 468, p. 973
- Morgan W. W., Keenan P. C., Spectral Classification, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 1973, vol. 11, p. 29
- Perottoni H. D., Placco V. M., Almeida-Fernandes F., Herpich F. R., Rossi S., Beers T. C., Smiljanic R., Amarante J. A. S., Limberg G., Werle A., Rocha-Pinto H. J., Beraldo e Silva L., Daffon S., Alvarez-Candal A., Oliveira Schwarz G. B., Schoenell W., Ribeiro T., Kanaan A., The S-PLUS Ultra-Short Survey: First data release, *A&A*, 2024, vol. 691, p. A138
- Preston G. W., Sheckman S. A., Beers T. C., Detection of a galactic color gradient for blue horizontal-branch stars of the halo field and implications for the halo age and density distributions, *The Astrophysical Journal*, 1991, vol. 375, p. 121
- Preston G. W., Sneden C., What Are These Blue Metal-Poor Stars?, *The Astronomical Journal*, 2000, vol. 120, p. 1014
- Rain M. J., Pera M. S., Perren G. I., Benvenuto O. G., Panei J. A., De Vito M. A., Carraro G., Villanova S., Binary origin of blue straggler stars in Galactic star clusters, *Astronomy & Astrophysics*, 2024, vol. 685, p. A33
- Sandage A. R., The color-magnitude diagram for the globular cluster M 3., *The Astronomical Journal*, 1953, vol. 58, p. 61

- Santucci R. M., Identificação de subestruturas no halo galáctico através de estrelas azuis tardias, Universidade de São Paulo, 2016, Tese de Doutorado
- Santucci R. M., Beers T. C., Placco V. M., Carollo D., Rossi S., Lee Y. S., Denissenkov P., Tumlinson J., Tissera P. B., Chronography of the Milky Way's halo system with field blue horizontal-branch stars, *The Astrophysical Journal Letters*, 2015, vol. 813, p. L16
- Santucci R. M., Placco V. M., Rossi S., Beers T. C., Reggiani H. M., Lee Y. S., Xue X.-X., Carollo D., The Frequency of Field Blue-Straggler Stars in the Thick Disk and Halo System of the Galaxy, *The Astrophysical Journal*, 2015, vol. 801, p. 116
- Shimasaku K., Fukugita M., Doi M., Hamabe M., Ichikawa T., Okamura S., Sekiguchi M., Yasuda N., Brinkmann J., Csabai I., et al., Statistical properties of bright galaxies in the sloan digital sky survey photometric system, *The Astronomical Journal*, 2001, vol. 122, p. 1238
- Sirko E., Goodman J., Knapp G. R., Brinkmann J., Ivezić Ž., Knerr E. J., Schlegel D., Schneider D. P., York D. G., Blue horizontal-branch stars in the Sloan Digital Sky Survey. I. Sample selection and structure in the Galactic halo, *The Astronomical Journal*, 2004, vol. 127, p. 899
- Utkin N. D., Dambis A. K., Calibrating the BHB star distance scale and the halo kinematic distance to the Galactic Centre, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2020, vol. 499, p. 1058
- Vallenari A., Brown A. G., Prusti T., De Bruijne J. H., Arenou F., Babusiaux C., Biermann M., Creevey O. L., Ducourant C., Evans D. W., et al., Gaia data release 3-summary of the content and survey properties, *Astronomy & Astrophysics*, 2023, vol. 674, p. A1
- Whitten D., Placco V., Beers T., Chies-Santos A., Bonatto C., Varela J., Cristóbal-Hornillos D., Ederoclite A., Masseron T., Lee Y., et al., J-PLUS: Identification of low-metallicity stars with artificial neural networks using SPHINX, *Astronomy & Astrophysics*, 2019, vol. 622, p. A182
- Whitten D. D., Placco V. M., Beers T. C., An D., Lee Y. S., Almeida-Fernandes F., Herpich F. R., Daflon S., Barbosa C. E., Perottoni H. D., et al., The Photometric Metallicity and

- Carbon Distributions of the Milky Way's Halo and Solar Neighborhood from S-PLUS Observations of SDSS Stripe 82, *The Astrophysical Journal*, 2021, vol. 912, p. 147
- Xue X., Rix H., Zhao G., Fiorentin P. R., Naab T., Steinmetz M., Van den Bosch F., Beers T., Lee Y., Bell E., et al., The Milky Way's circular velocity curve to 60 kpc and an estimate of the dark matter halo mass from the kinematics of  $\sim 2400$  SDSS blue horizontal-branch stars, *The Astrophysical Journal*, 2008, vol. 684, p. 1143
- Xue X.-X., Rix H.-W., Yanny B., Beers T. C., Bell E. F., Zhao G., Bullock J. S., Johnston K. V., Morrison H., Rockosi C., et al., Quantifying Kinematic Substructure in the Milky Way's Stellar Halo, *The Astrophysical Journal*, 2011, vol. 738, p. 79
- Yang L., Yuan H., Xiang M., Duan F., Huang Y., Liu J., Beers T. C., Galarza C. A., Daflon S., Fernández-Ontiveros J. A., et al., J-PLUS: Stellar parameters, C, N, Mg, Ca, and  $[\alpha/\text{Fe}]$  abundances for two million stars from DR1, *Astronomy & Astrophysics*, 2022, vol. 659, p. A181
- Yanny B., Rockosi C., Newberg H. J., Knapp G. R., Adelman-McCarthy J. K., Alcorn B., Allam S., Prieto C. A., An D., Anderson K. S., et al., SEGUE: A Spectroscopic Survey of 240,000 Stars with  $g = 14 - 20$ , *The Astronomical Journal*, 2009, vol. 137, p. 4377
- York D. G., Adelman J., Anderson Jr J. E., Anderson S. F., Annis J., Bahcall N. A., Bakken J., Barkhouser R., Bastian S., Berman E., et al., The sloan digital sky survey: Technical summary, *The Astronomical Journal*, 2000, vol. 120, p. 1579