



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE SANTA CRUZ – UESC
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FÍSICA - PROFÍSICA**

TIAGO DOS ANJOS ALMEIDA

**ESTIMATIVA DA COMPLETEZA DE RR LYRAE EM AGLOMERADOS
GLOBULARES DA GALÁXIA**

ILHÉUS - BAHIA

2021

TIAGO DOS ANJOS ALMEIDA

**ESTIMATIVA DA COMPLETEZA DE RR LYRAE EM AGLOMERADOS
GLOBULARES DA GALÁXIA**

Dissertação apresentada à Universidade
Estadual de Santa Cruz para obtenção do
título de Mestre em Física.

Linha de pesquisa: Astrofísica

Orientador: Prof. Dr. Leandro de Oliveira
Kerber

ILHÉUS - BAHIA

2021

A447 Almeida, Tiago dos Anjos.
Estimativa da completeza de RR Lyrae em aglomerados globulares da galáxia / Tiago dos Anjos Almeida. – Ilhéus, BA: UESC, 2021.
50 f. : il. ; anexos.

Orientador: Leandro de Oliveira Kerber.
Dissertação (mestrado) –Universidade Estadual de Santa Cruz. Programa de Pós-graduação em Física (PROFÍSICA).

Inclui referências e apêndices.

1. Astrofísica. 2. Galáxias – Aglomerados. 3. Estrelas variáveis. 4. Estrelas – Catálogos. I.Título.

CDD 523.01

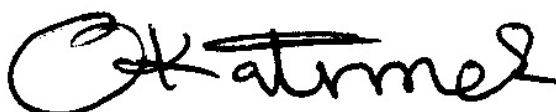
TIAGO DOS ANJOS ALMEIDA

**ESTIMATIVA DA COMPLETEZA DE RR LYRAE EM AGLOMERADOS
GLOBULARES DA GALÁXIA**

Ilhéus-BA, 13 de fevereiro de 2021.



Prof. Dr. Leandro de Oliveira Kerber
UESC - Universidade Estadual de Santa Cruz
Orientador



Prof. Dr. Orlando José Katime Santrich
UESC - Universidade Estadual de Santa Cruz
Examinador Interno



Prof. Dr. Jules Batista Soares
UESC - Universidade Estadual de Santa Cruz
Examinador Externo

Ilhéus-BA
2021

“Um país se faz da educação, quem planta arma colhe corpo no chão. Temos que acreditar nas favelas, nos cortiços, chega de morrer por migalhas, de mofar em presídios.”

Facção Central

AGRADECIMENTOS

À Universidade Estadual de Santa Cruz por conceder a infraestrutura para o desenvolvimento da pesquisa.

Ao Programa de Pós-Graduação em Física - PROFÍSICA pela oportunidade de cursar o mestrado.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de estudo.

A minha família, pelo apoio, principalmente a minha mãe Cildes, aos meus avós maternos, Sinésia e Geraldo (“in memoriam”), por terem sempre me guiado nos caminhos corretos.

Aos meus avós paternos, “Nalva” e “Rochim” (“In memoriam”) por sempre estarem presentes, e por me acolherem em seu lar.

Agradeço à minha esposa Marconiete, por estar sempre ao meu lado durante todo o período do curso, me incentivando e me dando forças para continuar.

Ao professor Leandro Kerber, pela orientação, pelo apoio e, principalmente, pela paciência. Obrigado por compartilhar o seu conhecimento comigo.

Agradeço a todos os amigos que estiveram presentes durante esse período, em especial João Paulo, Leandro, João Pedro e também a Seu Braz, pelos conselhos e companherismo.

Agradeço aos professores do PROFÍSICA, especialmente aos professores Adriano, Henri e André. Obrigado por compartilharem um pouco do conhecimento de vocês.

Agradeço a todos que de alguma forma se fizeram presentes em minha vida.

ESTIMATIVA DA COMPLETEZA DE RR LYRAE EM AGLOMERADOS GLOBULARES DA GALÁXIA

RESUMO

As estrelas RR Lyrae (RRLyr) são variáveis pulsantes e excelentes velas padrão que fornecem grandes contribuições na determinação de distâncias astronômicas em escala Galáctica e extragaláctica. Estas estrelas são encontradas em aglomerados globulares (GCs), no halo e bojo da Via Láctea. Através do estudo das RRLyr podemos compreender melhor as fases para a morfologia do Ramo Horizontal (HB) e a possibilidade de enriquecimento de hélio (He) em GCs. Neste trabalho analisamos as estrelas variáveis pulsantes RRLyr presentes no *Catalog of Variable Stars in GCs (CVS)* de [Clement et al. \(2001, 2017 edition\)](#) e também no catálogo construído com base nos dados da missão *Gaia* ([Clementini et al. 2018](#)). Além disso, usamos dados do *ACS Survey of Galactic GCs* ([Sarajedini et al. 2007](#)), que reúne fotometria obtida com o Telescópio Espacial Hubble (HST) para GCs da Via Láctea, e também com dados *Gaia* DR2 ([Gaia Collaboration et al. 2018](#)) para estimar a completeza da amostra destas variáveis nestes aglomerados. Em seguida, computamos a magnitude *V* média das RRLyr em cada GC e estimamos a distância até eles utilizando a relação magnitude absoluta na banda *V* e metalicidade, tal como calculada com base no catálogo *Gaia DR1*. Com os dados do CVS, constatamos que a grande maioria (90,9%) das distâncias estimadas por nós para 55 GCs está de acordo com os valores presentes no catálogo de [Harris et al. \(1996, 2010 edition\)](#). Tendo como referência o diagrama cor-magnitude do GC Messier 3 (~ 200 RRLyr conhecidas), determinamos a faixa de instabilidade que cruza o HB tanto para os dados HST quanto para os dados *Gaia* DR2. Assim, estimamos a fração de RRLs conhecidas e o número destas variáveis que podem ser descobertas em 21 aglomerados. Segundo os dados HST cruzados com o catálogo CVS somente 29 ± 2 % das RRLyr nestes GCs são conhecidas, sendo que para 81% dos GCs da amostra a completeza das RRLyr é inferior a 50%. Já a análise envolvendo dados da missão *Gaia* indica que a fração de GCs abaixo deste nível de completeza é de 71%, e que 55 ± 4 % das RRLyr destes objetos já foram catalogadas. Tais resultados atestam o grande potencial ainda existente para descoberta de RRLyr em GCs.

Palavras-chave: aglomerados globulares; estrelas variáveis pulsantes; RR Lyrae

DETERMINING THE COMPLETENESS OF RR LYRAE STARS IN GALACTIC GLOBULAR CLUSTERS

ABSTRACT

The RR Lyrae stars (RRLyr) are pulsating variables and excellent standard candles that provide great contributions in determining astronomical distances on a Galactic and extragalactic scale. These stars are found in globular clusters (GCs), in the halo and bulge of the Milky Way. Through the study of RRLyr we can improve the understanding the morphology of the Horizontal Branch (HB) and the possibility of helium enrichment (He) in GCs. In this work, we analyzed the pulsating variable stars RRLyr present in the Catalog of Variable Stars in GCs (CVS) by [Clement et al. \(2001, 2017 edition\)](#) and also in the catalog built based on data from the Gaia mission ([Clementini et al. 2018](#)). In addition, we used data from the ACS Survey of Galactic GCs ([Sarajedini et al. 2007](#)), which provides photometry obtained with the Hubble Space Telescope (HST) for Milky Way GCs, with Gaia DR2 data ([Gaia Collaboration et al. 2018](#)) to estimate the completeness of the sample of these variables in these clusters. Then, we computed the average V magnitude of the RRLyr in each GC and estimated the distance to them using the absolute magnitude relationship in the V band and metallicity, as calculated based on the Gaia DR1 catalog. With the CVS data, we found that the vast majority (90,9%) of the distances estimated by us for 55 GCs are in accordance with the values present in the [Harris et al. \(1996, 2010 edition\)](#). Using the color-magnitude diagram of the GC Messier 3 (~ 200 known RRLyr) as a reference, we determined the instability strip that crosses the HB for both HST and Gaia DR2 data. Thus, we estimated the fraction of known RRLs and the number of these variables that can be discovered in 21 clusters. According to the match of the HST data and CVS catalog, only $29 \pm 2\%$ of the RRLyr in these GCs are known, and for 81% of the sample GCs the completeness of the RRLyr is less than 50%. The analysis involving data from the Gaia mission indicates that the fraction of GCs below this level of completeness is 71%, whereas $55 \pm 4\%$ of the RRLyr of these objects have already been cataloged. Such results attest to the great potential that still exists for the discovery of RRLyr in GCs.

KEYWORDS: globular cluster; Pulsating variable stars; RR Lyrae

Lista de Tabelas

2.1 Parâmetros das 3 primeiras RR Lyrae do aglomerado globular M3 presentes no CVS.....	12
2.2 Parâmetros para 8 aglomerados presente no CVS.....	13
2.3 Alguns parâmetros (retirados do CVS e catálogo de Harris) para 5 aglomerados.....	19
4.1 Comparação entre as distâncias com metalicidades de dois catálogos diferentes.....	27
4.2 Resultados para a estimativa da completeza de RR Lyrae (dados do HST e CVS).....	31
4.3 Resultados para a estimativa da completeza de RR Lyrae (dados Gaia DR2).....	33

Lista de Figuras

1.1 Classificação das estrelas variáveis	1
1.2 Curva de Luz de Delta Cephei	2
1.3 Diagrama H-R Mostrando a localização das estrelas variáveis.....	4
1.4 Fase superior do diagrama H-R com as regiões RGB, HB e AGB.....	5
1.5 CMD e diagrama H-R mostrando os diferentes tipos de RR Lyrae.....	6
1.6 CMD de um aglomerado globular genérico.....	7
2.1 Imagem DSS2 color de M3 mostrando todas as RR Lyrae alí presentes.....	12
2.2 Média temporal na banda V em função do período (em dias) para Messier 3.....	14
2.3 CMD do aglomerado M3 utilizando dados do HST.....	15
2.4 Imagem de M3 mostrando as RR Lyrae e o pequeno campo do HST.....	16
2.5 Imagem de M3 mostrando as RR Lyrae que estão no catálogo de Clementini.....	17
2.6 CMD do aglomerado M3 utilizando dados do Gaia.....	18
2.7 Gráfico da $\langle \text{mag} \rangle$ vs. período (em dias) para M3 (dados do Gaia DR2).....	18
3.1 CMD de M3 obtido pelo HST indicando as RR Lyrae presentes no catálogo CVS.....	22
3.2 CMD e histograma com as RR Lyrae na região da faixa de instabilidade.....	23
3.3 Histograma mostrando os aglomerados que estão entre -1.1 a -1.9 dex.....	24
3.4 Gráfico do movimento próprio para M3 obtido com dados do Gaia.....	25
3.5 CMD e M3, obtido com dados do Gaia, indicando a faixa de instabilidade.....	26
4.1 Comparação entre as distâncias dos aglomerados, calculadas através das RR Lyrae, com as distâncias presentes no catálogo de Harris.....	30
4.2 CMD de NGC 5286 (dados HST) - Grande potencial de descoberta de RR Lyrae.....	32
4.3 CMD de NGC 6121 (dados HST) a amostra praticamente completa.....	33
4.4 CMD de NGC 7089 (dados Gaia DR2) - Grande potencial de descoberta de RR Lyrae...35	
4.5 CMD de NGC 3201 (dados Gaia DR2) amostra praticamente completa.....	35
4.6 Relação entre a completezas com dados HST e dados do Gaia DR2.....	36

Conteúdo

Resumo

Abstract

1 Introdução	1
1.1 Estrelas variáveis pulsantes.....	1
1.2 RR Lyrae.....	4
1.3 Aglomerados Globulares.....	6
1.4 Objetivos.....	9
2 Dados	11
2.1 <i>Catalogue of Variable Stars in Galactic Globular Clusters (CVS)</i>	11
2.2 <i>The ACS Survey of Galactic Globular Clusters</i>	14
2.3 <i>Gaia</i> Data Release 2 (<i>Gaia</i> DR2).....	16
2.4 <i>Catalog of Parameters for Milky Way Globular Cluster</i>	18
3 Metodologia	20
3.1 Cálculo das distâncias utilizando a relação M_V -[Fe/H].....	20
3.2 Estimativa da completeza de RR Lyrae em globulares - dados CVS e HST.....	21
3.3 Estimativa da completeza de RR Lyrae em globulares - dados <i>Gaia</i> DR2.....	24
4 Resultados e Discussão	27
4.1 Distâncias utilizando a relação M_V -[Fe/H].....	27
4.2 Completeza de RR Lyrae em globulares - dados CVS e HST.....	30
4.3 Completeza de RR Lyrae em globulares - dados <i>Gaia</i> DR2.....	33
5 Conclusões e Perspectivas	37
Referências Bibliográficas	39
Apêndices	43

Capítulo 1

Introdução

Estrelas variáveis pulsantes

As estrelas variáveis são por definição aquelas que apresentam periodicamente variação em seus brilhos. Estas variações podem ocorrer de forma extrínseca ou intrínseca (Fig. 1.1): as primeiras apresentam variações por algum fenômeno externo à estrela, como por exemplo, nos sistemas binários eclipsantes, nos quais a aparente variação do brilho se deve ao fato de uma das estrelas componentes eclipsar a outra ao passar pela sua frente (Vicente *et al.* 2003); já as variáveis do tipo intrínsecas, têm suas variabilidades devido às mudanças físicas que ocorrem em seu interior. Entre estas estão às estrelas que periodicamente se expandem e se contraem, pulsando tanto em brilho como em tamanho, daí o nome variáveis pulsantes. O tipo mais simples desse movimento é uma pulsação puramente radial, na qual a estrela mantém uma forma esférica o tempo todo, mas altera seu volume, como se estivesse respirando (Cox *et al.* 1974). A pulsação pode ocorrer também de forma não radial, em que a estrela pulsa de forma não esférica.

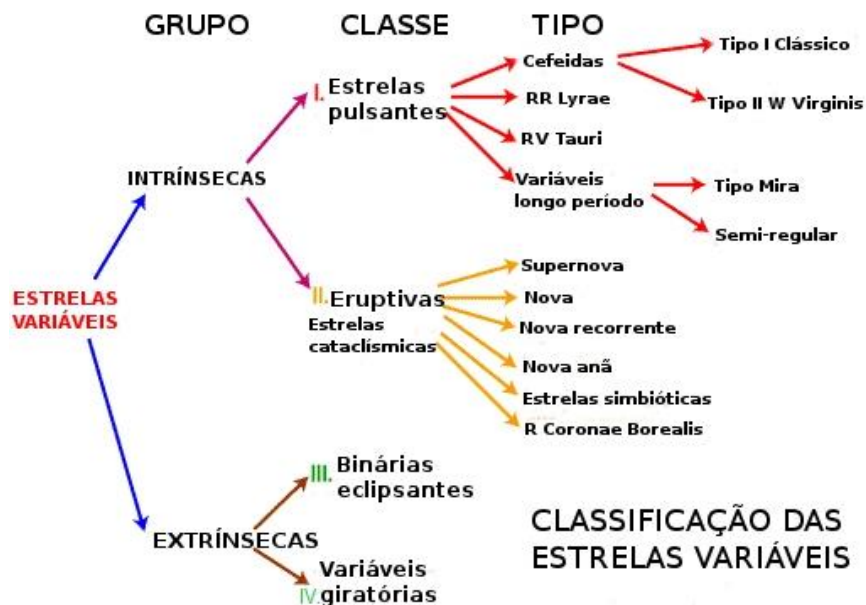


Figura 1.1: Classificação das estrelas variáveis (Fonte: <https://astronomiapg.wordpress.com/atm/>).

Existem diversas classes de estrelas variáveis pulsantes, são elas: variáveis de longo período, Cefeidas Clássicas e do tipo II, RR Lyrae, SX Phe, Delta Scuti, β Cephei e ZZ Ceti. Elas se diferenciam de acordo com seus períodos de pulsação e suas magnitudes, o que gera uma espécie de identidade para cada classe, que são as curvas de luz. A Figura 1.2 mostra a curva de luz para a estrela Delta Cephei, protótipo da classe das Cefeidas Clássicas, onde no eixo vertical tem-se a variação de magnitude e no eixo horizontal o tempo (em dias). Através da curva de luz pode-se identificar a qual classe pertence a variável, visto que todas estrelas de mesma classe compartilham de propriedades físicas e químicas semelhantes, possuindo curvas de luz com a mesma assinatura.

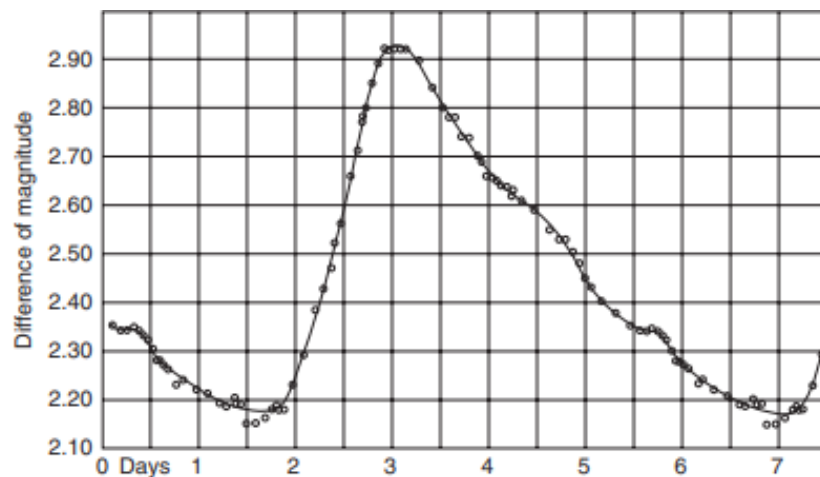


Figura 1.2: Curva de luz para Delta Cephei, com período de pulsação de 5,37 dias (Figura adaptada de [Catelan & Smith, 2014](#)).

Através da Figura 1.2 podemos ver que há um aumento considerável no brilho da estrela até atingir o máximo brilho (correspondente a máxima variação de magnitude), fato que ocorre devido a variações na opacidade da estrela associada à geração e dissolução de H e He parcialmente ionizados (Mecanismo kappa), fazendo com que ela aumente rapidamente seu tamanho e conseqüentemente sua luminosidade. À medida que a superfície estelar esfria, a estrela retorna ao seu estado normal, só que de forma mais lenta do que seu aumento de tamanho. Isto mostra que a radiação está escapando da estrela em um processo gradual permitindo que a superfície retorne ao normal de maneira controlada antes de todo o processo recomeçar ([Bono et al. 2003](#)).

O estudo de variáveis pulsantes é de grande importância para a astrofísica. Algumas classes destas estrelas possuem propriedades muito valiosas, dentre elas, destacam a relação direta entre o período de pulsação e a magnitude absoluta em V (M_V) nas Cefeidas Clássicas,

ou entre M_V e a metalicidade $[Fe/H]$ para as RR Lyrae. Devido a estas duas relações citadas anteriormente, as RR Lyrae e as Cefeidas são excelentes velas padrão com grande relevância para determinação de distâncias astronômicas em escalas Galácticas e extragalácticas (Sandage & Tammann 2006).

O estudo destas variáveis nos possibilita calcular distâncias bem maiores que as obtidas com o método da paralaxe trigonométrica. Povoando a região de instabilidade do diagrama Hertzsprung-Russel (H-R, Figura 1.3) as variáveis pulsantes podem possuir períodos entre 1 e 2 h (SX Phe e Delta Scuti), entre 0,3 e 1,2 dias (RR Lyrae), e entre 1 dia e 2 meses (Cefeidas). Em termos de amplitude da curva de luz, Cefeidas e RR Lyrae podem superar 1 magnitude em V , enquanto que as SX Phe e Delta Scuti dificilmente ultrapassam 0,2 mag. Cefeidas clássicas e Delta Scuti são variáveis pulsantes típicas de População I de estrelas (jovens e com metalicidade solar), portanto são encontradas no disco da Galáxia e em aglomerados abertos. Já estrelas RR Lyrae, SX Phe e Cefeidas do tipo II são características de População II de estrelas (velhas e pobres em metal), sendo muito comuns em aglomerados globulares (GCs), no halo e no bojo da Via Láctea. Estas estrelas são igualmente encontradas em M31 e na Pequena e Grande Nuvem de Magalhães, galáxias anãs irregulares em interação com nossa Galáxia e que possuem estrelas e aglomerados de todas as idades.

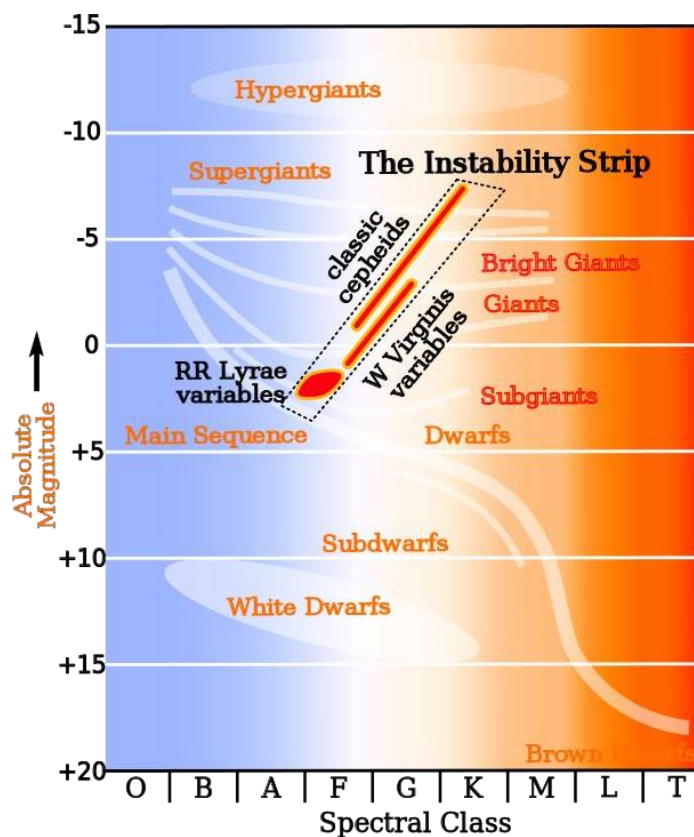


Figura 1.3: Diagrama H-R mostrando a classificação das estrelas através da sua Magnitude Absoluta (*Absolute Magnitude*), associada à luminosidade, pelo Tipo Espectral (*Spectral Class*), relacionado com a temperatura. A faixa de instabilidade (*Instability Strip*) é mostrada e contém as variáveis pulsantes (Fonte: https://en.wikipedia.org/wiki/Instability_strip).

RR Lyrae

As estrelas RR Lyrae estão localizadas na faixa de instabilidade do Ramo Horizontal (*Horizontal Branch*, HB) no diagrama H-R (Fig. 1.4). São, portanto estrelas de baixa massa (entre 0,5 e 1,0 massa solar) que estão fazendo a fusão do He no núcleo depois de terem passado pelo Ramo de Gigantes Vermelhas (*Red Giant Branch*, RGB). O ponto (7) na Figura 1.4 mostra o início da estrela no RGB, em que há uma grande queima de hidrogênio, aumentando cada vez mais a massa de He no núcleo. Ainda no ponto (7) temos a trajetória em cor preta, que representa a trajetória da estrela no RGB.

O ponto (8) representa o estágio final da ascensão da estrela no RGB, onde o núcleo de hélio cresce cada vez mais. Depois de passar pelo ponto (8) a estrela entra na fase pré-HB. A partir daí, a estrela passa a queimar hélio quiescente em um núcleo convectivo e hidrogênio em uma casca, a estrela atingiu o chamado *zero-age HB (ZAHB)*, HB de idade zero, ponto (9). O estágio evolutivo após o ZAHB é um traço horizontal característico que é visto nos CMDs de aglomerados globulares. Após passar cerca de 10^6 anos no HB, a estrela chega ao Ramo Assintótico de Gigantes (*Asymptotic Giant Branch*, AGB) ponto (10), ejetando suas camadas

exteriores como nebulosa planetária, tendo como destino final tornar-se uma anã branca.

As RR Lyrae possuem cerca de 50 vezes a luminosidade solar ($\log(L/L_{\odot}) \sim 1.7$), o que equivale a $M_V \sim 0.6$ (Catelan & Smith, 2014). As RR Lyrae possuem um papel fundamental na astrofísica teórica e observacional. No que diz respeito à parte teórica, o estudo das RR Lyrae tem diversas aplicações, dentre elas destaca-se uma melhor precisão no estudo da evolução estelar (Cacciari *et al.* 2009). Do ponto de vista observacional, é ainda mais importante, pois são os indicadores de distâncias primários mais populares para estrelas antigas de baixa massa.

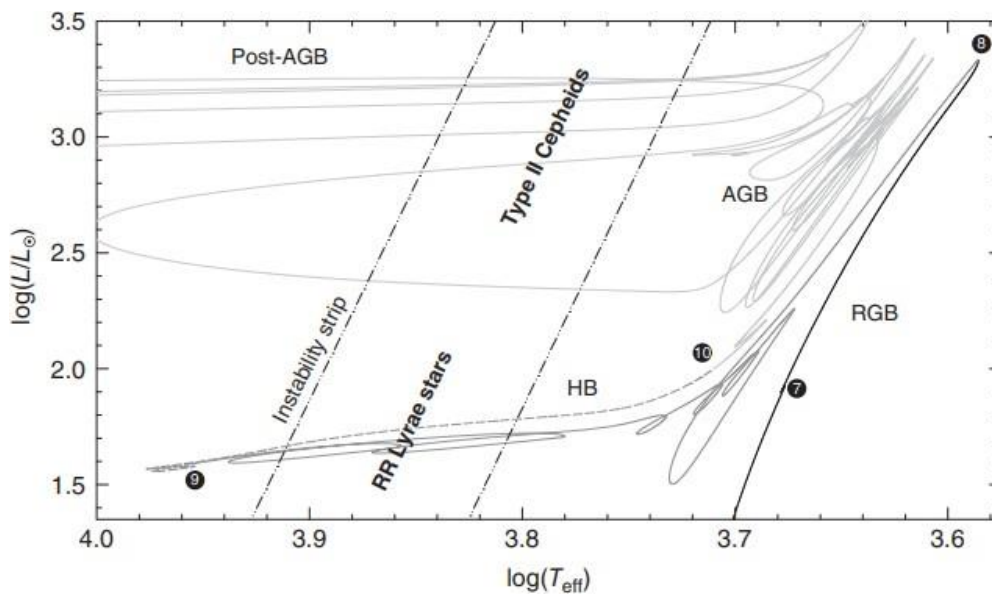


Figura 1.4: Fase superior do diagrama H-R, com as regiões RGB, HB e AGB. Os limites de instabilidade clássica são mostrados esquematicamente, assim como as posições esperadas das estrelas RR Lyrae e Cefeidas tipo II. (Figura retirada de Catelan & Smith, 2014).

As variáveis RR Lyrae são conhecidas, principalmente a partir de estudos de aglomerados globulares, por se situarem sobre ou imediatamente acima do HB do diagrama de H-R (Feast *et al.* 2008). Elas são os indicadores de distância mais importantes dos GCs (Belloni 2014), por isso, vários estudos vêm sendo feitos para buscarem novas RR Lyrae (Kuehn *et al.* 2018). Um dos grandes responsáveis pelo estudo das RR Lyrae foi Solon Irving Bailey (1854 -1931), que ao estudar o aglomerado Ômega Centauri (NGC 5139), classificou as RR Lyrae ali presentes em três subclasses, *a*, *b* e *c*, que foram distinguidas de acordo com suas amplitudes, formas e curvas de luz. Posteriormente, após alguns estudos da forma de pulsação destas classes de variáveis, por exemplo, Schwarzschild (1940), verificou-se que as classes *a* e *b* pulsam no modo fundamental radial, e com isso elas foram combinadas em um único tipo chamado RR*ab*. As variáveis do tipo *c*, pulsam no modo radial de primeiro tom, e

são representadas por RRc. Há ainda RR Lyraes que pulsam nos dois modos, fundamental e primeiro harmônico, são representadas por RRd. Além desses comportamentos de pulsação, existem alguns outros, por isso as classes acima são também representadas pela notação RR0, RR1 e RR01 para RRab, RRc e RRd respectivamente (Alcock *et al.* 2000). O diagrama H-R do aglomerado Messier 3 (NGC 5272, Fig. 1.5), bem como sua contrapartida fotométrica, o diagrama cor-magnitude (*Colour Magnitude Diagram*, CMD), ilustram a localização das diferentes classes de RR Lyrae. As variáveis RRc (RR1) são encontradas no lado azul (mais quente) da faixa de instabilidade, já as variáveis RRab (RR0) são encontradas no lado vermelho (mais frio) desta região. As estrelas RRd (RR01) são encontradas entre as duas subclasses anteriores (Catelan & Smith, 2014).

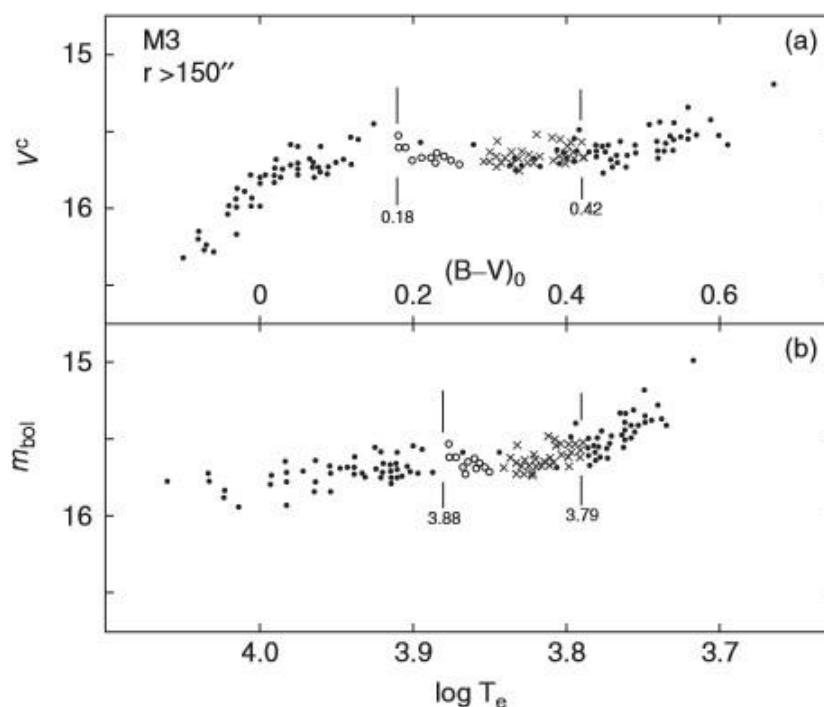


Figura 1.5: Diagrama cor-magnitude (parte superior) e diagrama H-R (inferior) de estrelas do Ramo Horizontal no aglomerado globular M3. As estrelas RRab são mostradas como cruces, enquanto as estrelas RRc são mostradas como círculos abertos. Estrelas do Ramo Horizontal não variáveis são mostradas como círculos preenchidos (Figura retirada de Catelan & Smith, 2014).

Aglomerados globulares

Aglomerados globulares são objetos astronômicos que possuem entre 10^4 e 10^6 estrelas ligadas gravitacionalmente. Eles estão localizados principalmente no Halo, mas também existem vários identificados no Bojo. Eles possuem esse nome por terem formas aproximadamente esféricas, e estão entre os componentes mais velhos da Via Láctea, podendo

ultrapassar os 12 bilhões de anos (Thompson *et al.* 2020). Isso faz com que muitas das estrelas componentes de um globular já estejam em estado evolutivo bastante avançado, fora da Sequência Principal (*Main Sequence*, MS).

A Figura 1.6 ilustra um CMD genérico de um GC, com várias sequências evolutivas de uma estrela de baixa massa. O diagrama mostra a MS, que é quando inicia no núcleo da estrela a conversão de hidrogênio em hélio. Nesta fase as estrelas passam cerca de 90% de suas vidas. Quando a estrela converte cerca de 10% de sua massa de H em He, ela passa pelo ponto de desligamento (*turnoff*), para então começar a contração do núcleo de He, a expansão de suas camadas exteriores e entrar no Ramo das Subgigantes (*Subgiant Branch*, SGB). Na fase do SGB, a estrela queima hidrogênio em uma camada acima do núcleo, e após esta fase, a estrela evolui para o Ramo das Gigantes Vermelhas (*Red Giant Branch*, RGB). À medida que a estrela se expande, ela ascende ao RGB, tornando-se uma gigante vermelha no topo desta fase. No seu interior há um núcleo de He cada vez mais quente e que se sustenta via degenerescência eletrônica. Quando no núcleo da estrela se atinge as condições físicas necessárias, ela então começa a queima do He, contraindo-se e passando para o Ramo Horizontal (*Horizontal Branch*, HB), onde a faixa de instabilidade se encontra.

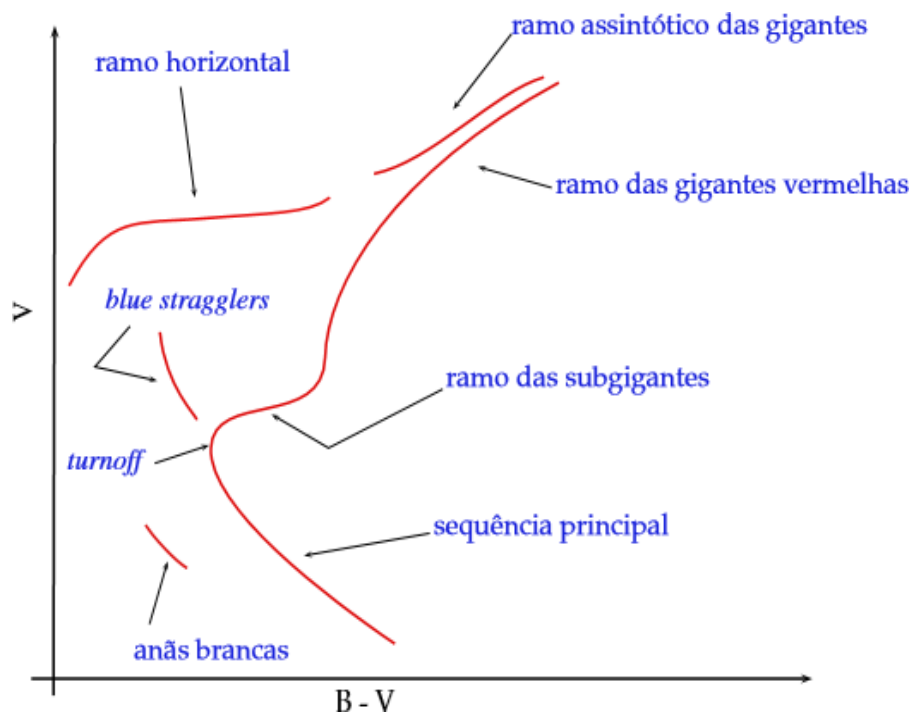


Figura 1.6: CMD de um aglomerado globular genérico onde são mostradas as sequências evolutivas para as estrelas ali presentes. (Figura retirada de Belloni, 2014).

Tomando como exemplo uma estrela de baixa massa, o HB é composto principalmente por estrelas que possuem luminosidades similares, cerca de $50 L_{\odot}$. Isso se deve ao fato de que todas elas, no início da queima do hélio, possuem massa de núcleo semelhantes, em torno de $0,45 M_{\odot}$ (Gratton *et al.* 2010). Portanto, a localização da estrela no HB dependerá menos de sua massa inicial e mais da quantidade total de hélio e metais. Por tudo isso, os GCs são considerados objetos perfeitos para explorar vários aspectos da astrofísica estelar, em especial as estrelas variáveis ali presentes.

O estudo de estrelas variáveis em GCs data de 1890, em que os astrônomos Solon I. Bailey e Pickering (1913) encontraram mais de 500 estrelas variáveis em uma pesquisa de 23 destes globulares. A maioria dessas estrelas variáveis eram estrelas RR Lyrae (Catelan & Smith, 2014). O fato de serem bastante encontradas em GCs fez com que elas fossem apelidadas de variáveis de *Clusters* (fazendo referência ao nome em inglês para aglomerados). E essa grande presença de RR Lyrae nos aglomerados as torna importantíssimas na determinação de distâncias até eles, visto que estas estrelas são consideradas como estando à mesma distância, uma vez que GCs são estruturas bem compactas.

O primeiro uso das RR Lyrae para determinar distâncias a sistemas estelares foi a determinação pioneira de Harlow Shapley (1885-1972) das distâncias para aglomerados globulares. Shapley descobriu que os aglomerados estavam distribuídos aproximadamente ao redor da constelação de Sagitário, e concluiu que estes aglomerados se agrupariam em torno do centro da Galáxia. A partir dessa descoberta sobre os aglomerados, Shapley concluiu que o Sol não era o centro da Via Láctea, mas estava a cerca de 50.000 anos-luz do centro (Shapley 1914).

Hoje as RR Lyraes são amplamente utilizadas para medir as distâncias dos aglomerados globulares galácticos, do Centro Galáctico e para muitos membros do grupo local (Layden *et al.* 1996). Para o cálculo destas distâncias, é necessário saber a magnitude aparente, que é obtida por observação direta através de um telescópio, e estimar a magnitude absoluta valendo-se de uma relação luminosidade-metalicidade para as RR Lyrae. Neste trabalho adotaremos metalicidades $[Fe/H]$ obtidas por outros autores via espectroscopia. Esta última pode ser relacionada com a magnitude absoluta em V (M_V) ver Sandage (1990b), de acordo com a Eq. 1.1, que mostra uma forma geral de calibração entre estas grandezas para RR Lyrae, em que a e b são constantes de calibração.

$$\langle M_V \rangle = a[Fe/H] + b \quad (1.1)$$

Neste trabalho assumiremos $a = 0.214$ e $b = 0.88$ obtidos pela análise dos dados da missão Gaia (Gaia Collaboration *et al.* 2017):

$$\langle M_V \rangle = 0.214[Fe/H] + 0.88_{-0.06}^{+0.04} \quad (1.2)$$

Além disso, adotaremos metalicidades $[Fe/H]$ obtidas por outros autores via espectroscopia e compiladas nos catálogos de Harris *et al.* (1996, 2010 edition) e Dias *et al.* (2016).

Identificar e caracterizar variáveis pulsantes em aglomerados estelares é uma excelente forma de impor vínculos para as suas distâncias (e.g. Kerber *et al.* 2018), bem como para melhorar e compreender as propriedades físicas e estágios evolutivos destas estrelas (Musella *et al.* 2016). É importante destacar que vários trabalhos vêm sendo feitos na busca de variáveis em aglomerados globulares (e.g. Salinas *et al.* 2016, Smolec *et al.* 2017). O estudo dessas variáveis é importante, também, para aumentar a precisão de valores de idade de aglomerados bem como de suas órbitas na Galáxia. Além disso, fazer uma análise mais detalhada pode proporcionar um estudo autoconsistente da distribuição espacial de aglomerados na Galáxia e nas Nuvens de Magalhães, também possibilita o estudo de avermelhamento do campo, visto que existem RR Lyrae em todas as direções.

Convém ressaltar que os maiores desafio para o estudo de RR Lyrae em GCs da Galáxia é a obtenção de curvas de luz de estrelas em regiões centrais do aglomerado, onde a densidade de estrelas dificulta enormemente a aquisição de séries fotométricas de estrelas do HB espacialmente resolvidas. Evidentemente que este problema é agravado em aglomerados distantes, como os do Halo externo da Via Láctea, ou em aglomerados obscurecidos pela poeira da Galáxia, como é o caso dos globulares do Bojo.

Objetivos

O principal objetivo deste estudo é estimar a completeza de estrelas RR Lyrae conhecidas em uma amostra de GCs da Galáxia. Para isso pretendemos fazer uso de catálogos de estrelas variáveis, como o *Catalogue of Variable Stars in Galactic Globular Clusters* (CVS, Clement *et al.* 2001, 2017 edition) e o catálogo de RR Lyrae obtido pela missão Gaia (Clementini *et al.* 2019), combinados com fotometria obtida pelo Telescópio Espacial Hubble (*Hubble Space Telescope*, HST) (Sarajedini *et al.* 2007) e a disponibilizada pelo Gaia DR2

([Gaia Collaboration et al. 2018](#)). Além disso, queremos comparar as distâncias obtidas para os GCs utilizando as calibrações atuais de M_V -[Fe/H] com determinações históricas presentes no catálogo de [Harris et al. \(1996, 2010 edition\)](#). Com base neste estudo pretendemos selecionar alvos para projetos de observação com o SOAR utilizando o módulo de óptica adaptativa (SAM) [Tokovinin et al. \(2016\)](#).

Capítulo 2

Dados

Neste trabalho utilizamos e combinamos dados públicos de diversos catálogos: estrelas variáveis de [Clement *et al.* \(2001, 2017 edition\)](#) e [Clementini *et al.* \(2019\)](#), sendo esta última obtida com dados da missão *Gaia* DR2 ([Gaia Collaboration *et al.* 2018](#)); fotometria de alta resolução obtida com o HST ([Sarajedini *et al.* 2007](#)); fotometria e astrometria de alta precisão do *Gaia* DR2; parâmetros físicos de globulares presentes em [Harris *et al.* \(1996, 2010 edition\)](#). As imagens coloridas de fundo utilizadas nas figuras deste capítulo são da segunda geração do *Digitized Sky Survey* (DSS)¹ e foram obtidas por meio do programa Aladin². Todas as figuras, cruzamentos de catálogos e seleção de subamostras foram feitos utilizando-se o programa TOPCAT³. A seguir faremos uma breve apresentação de cada catálogo, bem como dos dados que utilizamos. Para ilustrá-los usaremos como exemplo o GC Messier 3 (M3, NGC5272), um globular ideal para servir de modelo pois possui um grande número (~ 200) estrelas RR Lyrae catalogadas, com extinção e avermelhamento quase nulos ($E(B-V) = 0.01$) e relativamente próximo (10.2 kpc).

2.1 *Catalogue of Variable Stars in Galactic Globular Clusters (CVS)*

O *Catalogue of Variable Stars in Galactic Globular Clusters (CVS, Clement *et al.* 2001, 2017 edition)*⁴ é um catálogo de diferentes tipos de estrelas variáveis em aglomerados globulares da Via Láctea. Este catálogo foi lançado inicialmente em 1939 por Helen Sawyer Hogg, com o intuito de permitir que pesquisadores obtivessem o maior número de informações possíveis sobre estrelas variáveis em aglomerados globulares através da compilação de resultados de diferentes trabalhos publicados. Desde 1997 é atualizado por Christine Clement, oferecendo um precioso serviço para a comunidade astronômica.

No CVS constam 149 aglomerados globulares com várias informações a respeito das RR Lyrae ali presentes. A Tabela 2.1 exemplifica essas informações para as três primeiras entradas do aglomerado M3⁵. Constam nas colunas desta tabela as seguintes quantidades: (1)

¹http://archive.stsci.edu/cgi-bin/dss_form

²<https://aladin.u-strasbg.fr/>

³<http://www.star.bris.ac.uk/~mbt/topcat/>

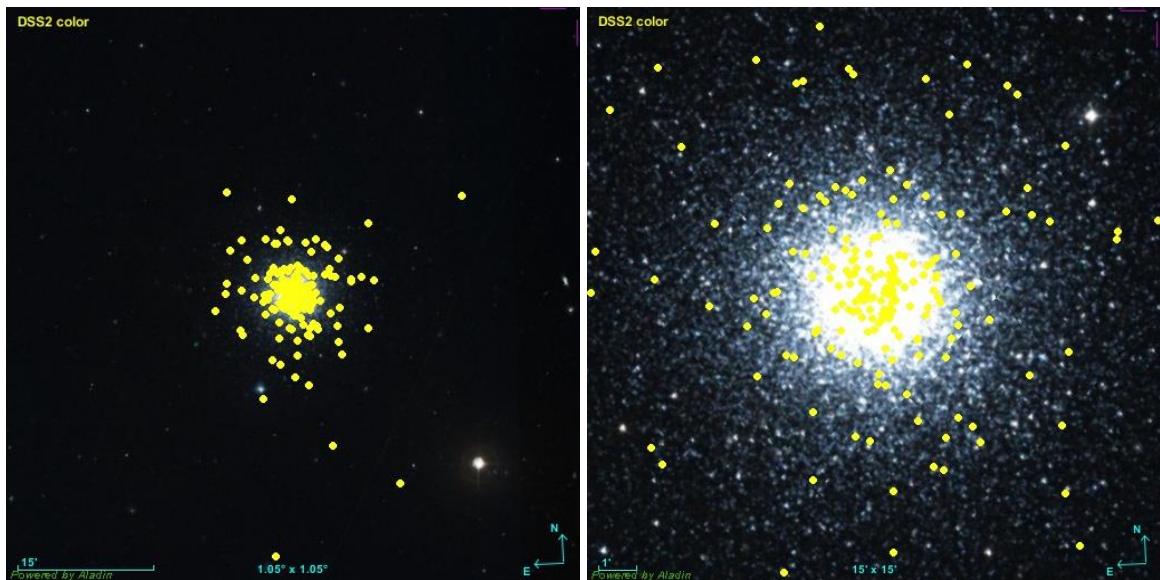
⁴<http://www.astro.utoronto.ca/~cclement/read.html>

⁵<http://www.astro.utoronto.ca/~cclement/cat/C1339p286>

identificação das estrelas variáveis; (2) e (3) são as coordenadas, normalmente ascensão reta (R.A) e declinação (Dec.); (4) código usado para a unidade para a posição (R0 denota coordenada em J2000); (5) período em dias; (6) magnitude média; (7) amplitude da curva de luz; (8) filtro utilizado para magnitude média e amplitude; e (9) tipo de variável RR Lyrae (RR0, RR1 ou RR01). A Figura 2.1 (a) nos dá uma ideia da quantidade (207) e da distribuição espacial das RR Lyrae no aglomerado M3 e a Figura 2.1 (b) é a mesma imagem com um zoom na região central.

Tabela 2.1: Parâmetros das 3 primeiras estrelas RR Lyrae do aglomerado globular M3 presentes no CVS.

ID	RA/X	Dec/Y	Units	Period	<mag>	Ampl	F	Type
1	13:42:11.13	+28:20:33.9	R0	0,5206	15,591	1,15	V	RR0
3	13:42:15.71	+28:21:41.6	R0	0,5582	15,545	1,22	V	RR0
5	13:42:31.29	+28:22:20.9	R0	0,5057	15,592	088	V	RR0



(a)

(b)

Figura 2.1: (a) Imagem DSS2 color de M3 obtida através do programa Aladin, onde constam as 207 RR Lyrae presentes no CVS; (b) mesma figura, porém com um zoom na região central do aglomerado.

A Tabela 2.2 apresenta os dados para oito dos aglomerados que possuem algum tipo de RR Lyrae no CVS. São ao todo 91 aglomerados com esta informação, totalizando 2364 RR Lyrae, o que equivale a uma média de 25,7 em cada globular. A tabela completa encontra-se

no Apêndice A. As informações das colunas desta tabela são: (1) identificação do aglomerado; (2) magnitude média; (3) desvio padrão; (4) quantidade de RR Lyrae encontradas em cada aglomerado; (5) filtro em que se encontra a magnitude; (6) desvio padrão da média. Embora o filtro mais comum seja V, ressaltamos que alguns aglomerados possuem RR Lyrae com magnitudes em diferentes filtros.

Tabela 2.2: Parâmetros das estrelas RR Lyrae para 8 aglomerados, presentes no CVS.

Cluster	<mag>	Magsig	N_{RRL}	F	<mag>sig
NGC 288	15,16	0,020	2	V	0,014
NGC 362	15,40	0,303	20	V	0,068
NGC 1261	16,78	0,360	18	B	0,085
NGC 1851	16,03	0,274	28	V	0,052
NGC 1904	16,10	0,102	10	V	0,032
NGC 2298	16,50	0,050	4	B	0,025
M3 (NGC 5272)	15,65	0,240	207	V	0,017
NGC 2808	16,26	0,010	2	V	0,007
	16,30	--	1	B	--

A Figura 2.2 é o gráfico da média temporal na banda V em função do período em dias para M3. Podemos ver que as RR Lyrae se distribuem em torno de um valor médio (15,65 mag no caso de M3), fato que ocorre para todas as RR Lyrae em um aglomerado.

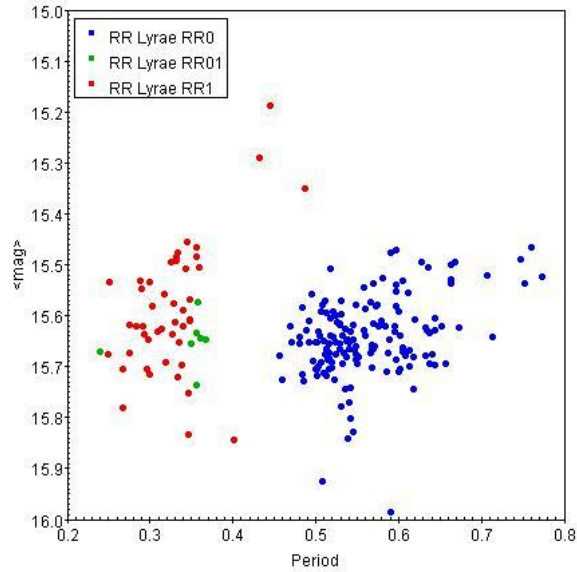


Figura 2.2: Média temporal na banda V em função do período (em dias) para as RR Lyrae do aglomerado M3 catalogadas no CVS. Os pontos vermelhos são as RR Lyrae do tipo RR1, os pontos verdes são as do tipo RR01 e os pontos azuis são as do tipo RR0.

2.2 The ACS Survey of Galactic Globular Clusters

O projeto *ACS Survey of Galactic Globular Clusters* usou a *Advanced Camera for Surveys/Wide Field Camera* (ACS/WFC) a bordo do *Hubble Space Telescope* (HST). A ACS é um instrumento axial de terceira geração projetado principalmente para obter imagens em comprimentos de onda no ultravioleta, visível e no infravermelho próximo com eficiência 10 vezes maior do que a câmera anterior, a *Wide Field Planetary Camera 2* (WFPC2). A ACS/WFC foi usada para obter imagens nos filtros F606W e F814W dos 65 aglomerados globulares mais próximos, fornecendo assim um excelente conjunto de dados com alta resolução espacial ($\sim 0,05''$) e grande profundidade fotométrica ($V \sim 26$).

Utilizamos dados publicados por [Sarajedini et al. \(2007\)](#) disponíveis no MAST (*Mikulski Archive for Space Telescopes*)⁶. Cada aglomerado possui uma tabela com várias informações de suas estrelas, como por exemplo: magnitudes nas bandas V e I no sistema Vegamag e as coordenadas em ascensão reta e declinação em J2000. As Figuras 2.3 e 2.4 ilustram os dados deste levantamento fotométrico para o aglomerado globular M3. A Figura 2.3 (a) apresenta o CMD (V vs. V-I) deste aglomerado cobrindo um intervalo aproximado de 15 magnitudes (o que corresponde a uma impressionante razão em fluxo de um milhão!) que vai do topo do RGB até a baixa MS, passando pelo HB, SGB e MSTO. Na Figura 2.3 (b) são

⁶<https://archive.stsci.edu/prepds/acsggct/>

mostradas as estrelas selecionadas na faixa de magnitude do HB para realizar o cruzamento com as RR Lyrae do CVS. Esta faixa de magnitude foi escolhida como sendo a região que compreende 2 magnitudes em torno da média do HB ($V = 15,65 \pm 1,00$ mag), o que inevitavelmente avança sobre o RGB. Convém ressaltar que estas magnitudes podem ser consideradas como instantâneas. Isso significa que a fotometria das RR Lyrae se deu em um instante aleatório do ciclo de pulsação, fazendo com que a posição destas estrelas no CMD se deslocasse da faixa de instabilidade que cruza o HB. É possível perceber que as RR Lyrae quando estão com o máximo de brilho tornam-se mais azuis (mais quentes). Por outro lado, quando elas atingem o mínimo de brilho tornam-se mais vermelhas (mais frias), inclusive cruzando o RGB.

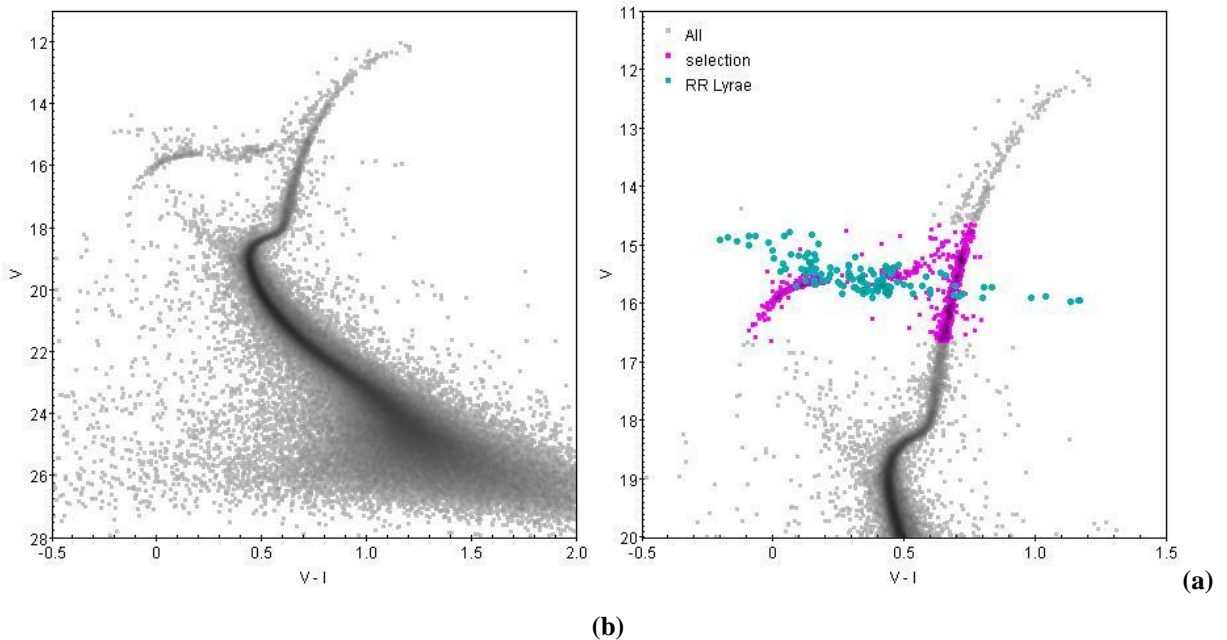


Figura 2.3: CMD do aglomerado M3 utilizando dados do HST. Painel (a) mostra todas as estrelas do catálogo. Painel (b) apresenta as estrelas selecionadas na faixa de magnitude do HB (pontos magentas) para realizar o cruzamento com as RR Lyrae do CVS (pontos verdes).

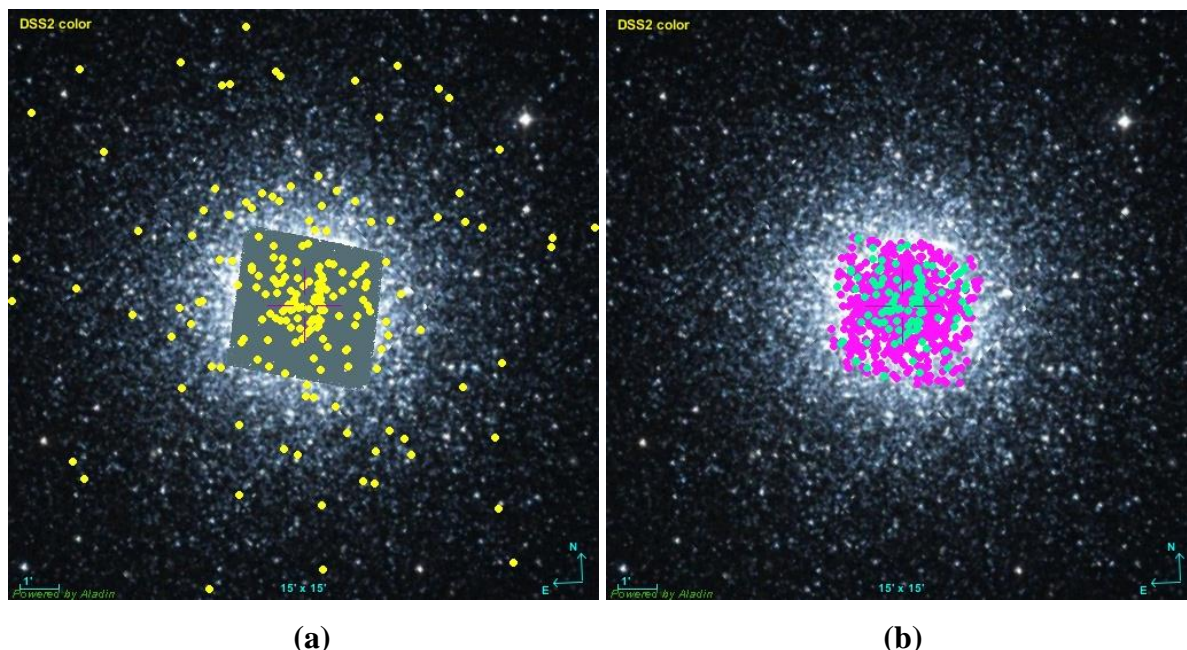


Figura 2.4: Imagem DSS2 color de M3. **(a)** Estrelas RR Lyrae (pontos amarelos) presentes no CVS e estrelas do catálogo HST (pontos cinzas). **(b)** Estrelas selecionadas do catálogo HST (pontos magentas) usadas no cruzamento com as RR Lyrae do CVS (pontos verdes).

A Figura 2.4 mostra novamente a imagem DSS2 color do globular M3, desta vez apresentando não apenas as RR Lyrae presentes no catálogo CVS, mas também as estrelas do catálogo HST. No painel (a) podemos ver o pequeno campo de visão da ACS/WFC (202'' x 202''). Podemos ver ainda através desta figura as RR Lyrae (pontos verdes) que estão presentes no ACS.

2.3 *Gaia* Data Release 2 (*Gaia* DR2)

A missão *Gaia* tem o objetivo de mapear tridimensionalmente a Via Láctea. Possui medições de paralaxe e de movimento próprio com as precisões necessárias para produzir um censo estereoscópico e cinemático de cerca de um bilhão de estrelas em nossa Galáxia e em todo o Grupo Local. Isso equivale a aproximadamente 1 % da população estelar Galáctica.

Desde o início das operações científicas, em 25 de julho de 2014, a missão *Gaia* vem monitorando repetidamente a esfera celeste. A sonda possui fotometria multibanda e medições astrométricas de fontes que cruzam seu campo de visão até uma magnitude limite $G \sim 21$ mag ($V \sim 21$ mag), junto com espectroscopia de baixa resolução para fontes mais brilhantes que $G \sim 16$ mag. O instrumento astrométrico coleta imagens na banda G do *Gaia* (330–1050 nm); os fotômetros de prisma Azul (BP) e Vermelho (RP) coletam medições espectrofotométricas de baixa resolução das distribuições de energia espectral da fonte nas faixas de comprimento de onda 330–680 nm e 630–1050 nm, respectivamente;

A segunda liberação de dados da missão *Gaia* (*Second Gaia Data Release, Gaia DR2, Gaia Collaboration et al. 2018*) possui posição celestial e brilho aparente em G para aproximadamente 1,7 bilhão de fontes, sendo que para cerca de 80% destas fontes há informação de paralaxe, movimento próprio e índice de cor BP-RP. Além disso, para algo em torno de 0,5 milhão de estrelas existe informação sobre variabilidade. Valendo-se destes dados, *Clementini et al. (2019)* identificou e caracterizou 140784 RR Lyrae distribuídas em todo o céu, sendo que 2860 em aglomerados globulares e cerca de 50 mil prováveis descobertas da missão *Gaia*.

Para este trabalho utilizamos dados do catálogo *Clementini et al. (2019)*, onde constam os valores de magnitude média na banda G e período de RR Lyrae em globulares. A Figura 2.5 mostra o aglomerado globular M3 com as estrelas deste catálogo. O painel (a) nos dá uma ideia da quantidade (195 estrelas) e da distribuição espacial das RR Lyrae presentes no catálogo Gaia DR2, enquanto que o painel (b) é a mesma imagem com um zoom na região central para destacar a localização das RR Lyrae no centro do aglomerado.

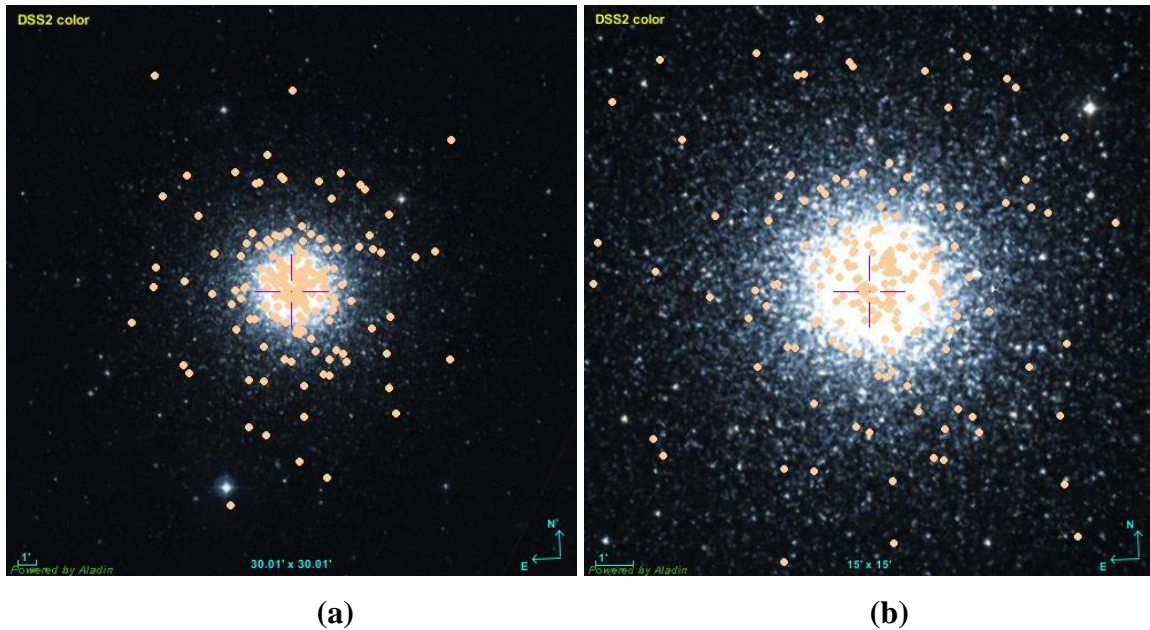


Figura 2.5: (a) Imagem DSS2 color do aglomerado globular M3, mostrando as 195 RR Lyrae que estão no catálogo de Clementini et al. (2019). (b) Mesma figura do painel (a), porém com um zoom na região central.

A Figura 2.6 apresenta o CMD (G vs. BP-RP) de M3 para um raio de extração de 15 arcmin. São mostradas também as estrelas RR Lyrae do *Gaia*. Podemos perceber que as RR Lyrae se distribuem em torno da magnitude média do HB ($G = 15,64 \pm 0,70$ mag), fato que pode ser percebido também na Figura 2.7, que é um gráfico da magnitude média em função de período em dias.

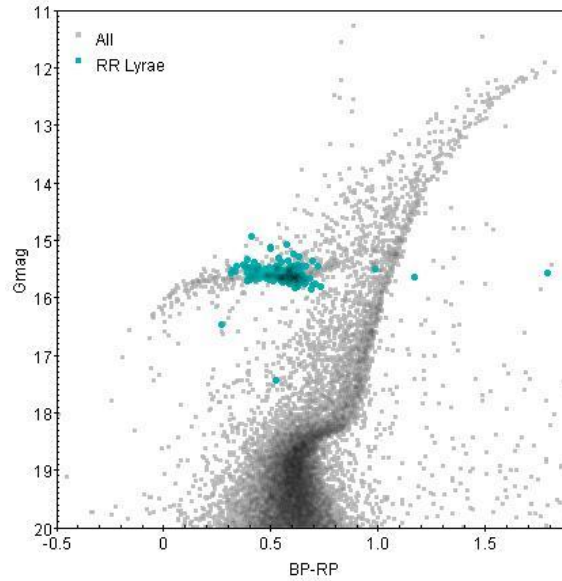


Figura 2.6: CMD do aglomerado M3 utilizando dados do *Gaia*, onde podemos ver as RR Lyrae no HB (pontos verdes).

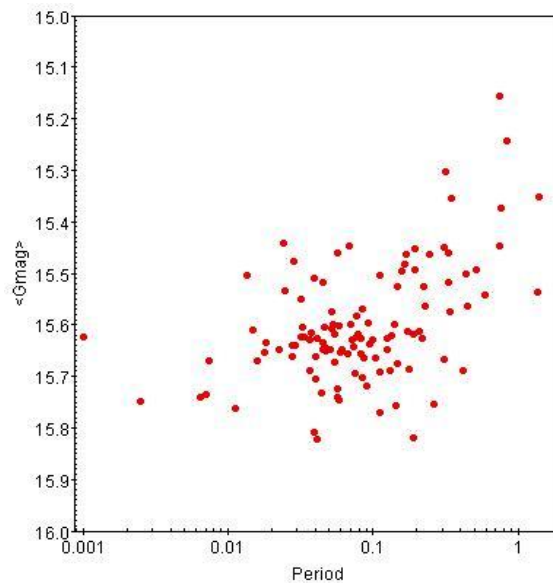


Figura 2.7: magnitude média no filtro G em função do período (em dias) para o aglomerado M3.

2.4 Catalog of Parameters for Milky Way Globular Clusters

O *Catalog of Parameters for Milky Way Globular Clusters* [Harris et al. \(1996, 2010 edition\)](#) é um catálogo que contém parâmetros básicos de distâncias, velocidades, metalidades, luminosidades, cores e parâmetros dinâmicos de 157 objetos classificados como aglomerados globulares na Via Láctea. Para podermos fazer a estimativa de distâncias das RR Lyrae utilizando relações da magnitude absoluta destas estrelas nas bandas V e G (M_V e M_G)

com a metalicidade, compilamos os valores de $[Fe/H]$ neste catálogo, bem como os valores de $E(B-V)$, necessários para se determinar o correto valor do módulo de distância absoluto $(m - M)_0$. Além disso, compilamos os valores de distância heliocêntrica para os 55 aglomerados que analisamos com dados do CVS. Na Tabela 2.3 ilustramos os parâmetros citados acima, combinando-os com informações obtidas por nós a partir da análise do CVS. As colunas desta tabela informam: (1) identificação do aglomerado; (2) magnitude média; (3) desvio padrão; (4) número de RR Lyrae do CVS presentes no GC; (5) desvio padrão da média; (6) metalicidade; (7) avermelhamento e (8) distância heliocêntrica. Cabe ressaltar que os valores de metalicidade provêm de uma média de resultados obtidos por diferentes autores via espectroscopia. Novamente, constam nesta tabela apenas as 5 primeiras linhas, com informações para 5 aglomerados. A versão completa encontra-se no Apêndice B.

Tabela 2.3: Alguns parâmetros sobre os aglomerados, retirados do CVS (colunas 2, 3, 4 e 5) e do catálogo de [Harris *et al.* \(1996, 2010 edition\)](#) (colunas 6, 7 e 8).

Cluster	$\langle V \rangle$	σ_V	$N_{RRLyrae}$	σ_{Vmed}	$[Fe/H]$	$E(B-V)$	D_{Harris} (kpc)
NGC2808	16,26	0,014	2	0,010	-1,14	0,22	9,6
NGC6362	15,29	0,087	35	0,015	-0,99	0,09	7,6
NGC4147	16,89	0,034	15	0,034	-1,80	0,02	19,3
NGC3201	14,77	0,034	68	0,011	-1,59	0,24	4,9
NGC1851	16,03	0,274	28	0,052	-1,18	0,02	12,1

Capítulo 3

Metodologia

Neste capítulo detalhamos a metodologia aplicada para obtermos os resultados de estimativa de distâncias via RR Lyrae, bem como da completeza da amostra destas estrelas variáveis em globulares.

3.1 Cálculo das distâncias utilizando a relação M_V -[Fe/H]

Utilizamos o CVS para compor uma base de dados com as informações sobre os aglomerados. Analisamos todos os aglomerados a fim de identificar em quais deles tinham RR Lyrae. Encontramos 55 aglomerados com estes tipos de estrelas e verificamos quais delas eram RR Lyrae do tipo RR0 e RR1, e posteriormente criamos arquivos com estas estrelas encontradas. Utilizamos apenas as RR Lyrae com magnitude no filtro V, tiramos a média dessas magnitudes $\langle V \rangle$ e fizemos uma comparação com o período. Vale ressaltar que, diferentemente das Cefeidas, as RR Lyrae não possuem uma relação período-luminosidade acentuada, mas luminosidade-metalicidade, particularmente envolvendo o filtro V.

Com os dados do CVS, estimamos os valores de magnitude absoluta das RR Lyrae no filtro V (M_V). Para isso usamos a Eq. 1.2, obtida no artigo que analisa os dados do Gaia Data Release 1 ([Gaia Collaboration et al. 2017](#)). Com os valores de magnitude aparente e absoluta das RR Lyrae, bem como a informação de $E(B - V)$ presente no catálogo de [Harris et al. \(1996, 2010 edition\)](#) calculamos o módulo de distância intrínseco de cada aglomerado através da relação.

$$(m - M_V)_0 = \langle V \rangle - M_V - 3.1E(B - V) \quad (3.1)$$

Onde m é a magnitude aparente e M_V a magnitude absoluta, ambas no filtro V. Em seguida calculamos a distância (d) em parsecs até as RR Lyrae pela seguinte relação conhecida como módulo de distância:

$$(m - M_V)_0 = 5 \log\left(\frac{d}{pc}\right) - 5 \quad (3.2)$$

3.2 Estimativa da completeza de RR Lyrae em globulares - dados CVS e HST

Para estimar a completeza das variáveis RR Lyrae catalogadas no CVS ([Clementi et al. 2001, 2017 edition](#)). Inicialmente buscamos obter fotometria com alta resolução espacial nas regiões centrais destes sistemas estelares, notoriamente muito densos. Desta forma podemos identificar a posição destas estrelas variáveis no CMD para delimitar a região da faixa de instabilidade que cruza o HB, e com isso reconhecer possíveis estrelas candidatas a RR Lyrae.

Para obter fotometria com alta qualidade buscamos dados públicos do HST, uma vez que sua resolução espacial (FWHM ~ 0.05 arcsec) é capaz de resolver espacialmente todas as estrelas RR Lyrae nas regiões centrais destes sistemas. Para este propósito inicialmente buscamos dados do *Exoplanets & Stellar Populations Group* da Universidade de Padova (Itália), visto que este catálogo é um dos mais completos que existem, porém tivemos dificuldades de prosseguir, uma vez que o catálogo fotométrico disponível no filtro V não possui coordenadas das estrelas no sistema equatorial de coordenadas, apenas em coordenadas X,Y dos chips do CCD empregado. Isso impediu a identificação das estrelas variáveis já conhecidas. Com essa dificuldade pelo caminho, buscamos outro catálogo do Hubble que possuísse astrometria no sistema equatorial de coordenadas. O encontrado que atendia às nossas necessidades foi o *ACS Survey of Galactic Globular Cluster* ([Sarajedini et al. 2007](#)). Cruzamos este catálogo com o CVS, para poder ver em quais dos aglomerados havia estrelas presentes em ambos os catálogos. Após esta etapa, encontramos que 55 dos aglomerados com RR Lyrae no CVS estão presentes neste catálogo do HST. Posteriormente fizemos a análise em um dos aglomerados, o Messier 3. Este aglomerado foi escolhido por que é o que possui o maior número de estrelas variáveis RR Lyrae catalogadas (207), possui extinção e avermelhamento quase nulos e está relativamente próximo (~ 10 kpc), sendo então utilizado como referência de comparação para os demais globulares.

A Fig. 3.1 apresenta o CMD de M3, do catálogo HST, bem como as estrelas RR Lyrae presentes no catálogo CVS pertencentes a este aglomerado. Para identificar as RR Lyrae primeiramente selecionamos uma faixa de magnitude correspondente às estrelas brilhantes pertencentes ao HB, definida como a magnitude média das RR Lyrae (15,65) $\pm 1,00$ mag. Convém ressaltar que a faixa escolhida que compreende duas magnitudes em torno da média pode ter sido um fator preponderante para a grande quantidade de RR Lyrae candidatas. Estas estrelas, que foram denominadas *bright*, aparecem na figura como pontos de cor magenta. Na

sequência foi feito o cruzamento das RR Lyrae catalogadas no CVS, com as *brights*, onde foram identificadas 113 das 207 RR Lyrae catalogadas, que são os pontos azuis na Figura 3.1. Após essa etapa, convertemos a magnitude aparente para magnitude absoluta e a cor aparente para cor intrínseca através das expressões (3.3) e (3.4).

$$M_V = V - 5 \log(d) + 5 - 3.1E(B - V) \quad (3.3)$$

$$(V - I)_0 = V - I + 1.6E(B - V) \quad (3.4)$$

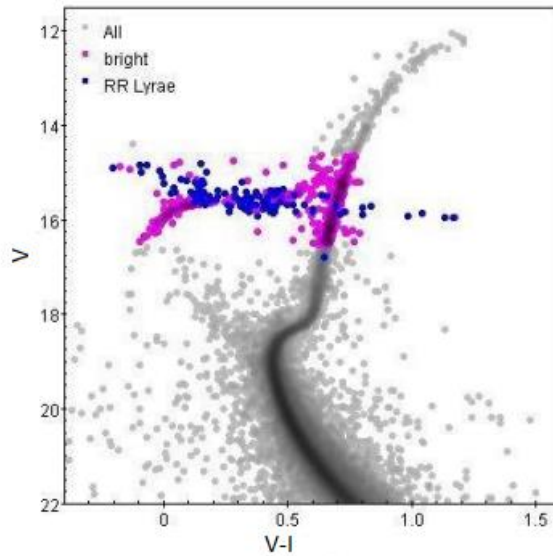


Figura 3.1: CMD de M3 obtido pelo HST, indicando as RR Lyrae presentes no catálogo CVS (pontos azuis) e as estrelas usadas para fazer o cruzamento de catálogos (pontos magenta).

Na sequência, para encontrar a região da faixa de instabilidade que cruza o HB, aplicamos limites na cor intrínseca, usando o método dos quartis. Definimos então esta faixa como sendo o intervalo compreendido entre o quartil 1 (Q1) e o quartil 3 (Q3), o que contempla o 50% central da distribuição em cor intrínseca das estrelas no HB. Isso pode ser exemplificado no CMD (painel esquerdo) da Figura 3.2, em que os pontos vermelhos representam as RR Lyrae na região dos quartis. Em seguida fizemos um histograma (painel direito), onde a cor verde representa todas as estrelas que estão na faixa de instabilidade, portanto, candidatas a serem RR Lyrae. Note que os pontos vermelhos são subconjunto dos pontos verdes, justamente as estrelas RR Lyrae conhecidas que se encontram entre Q1 e Q3.

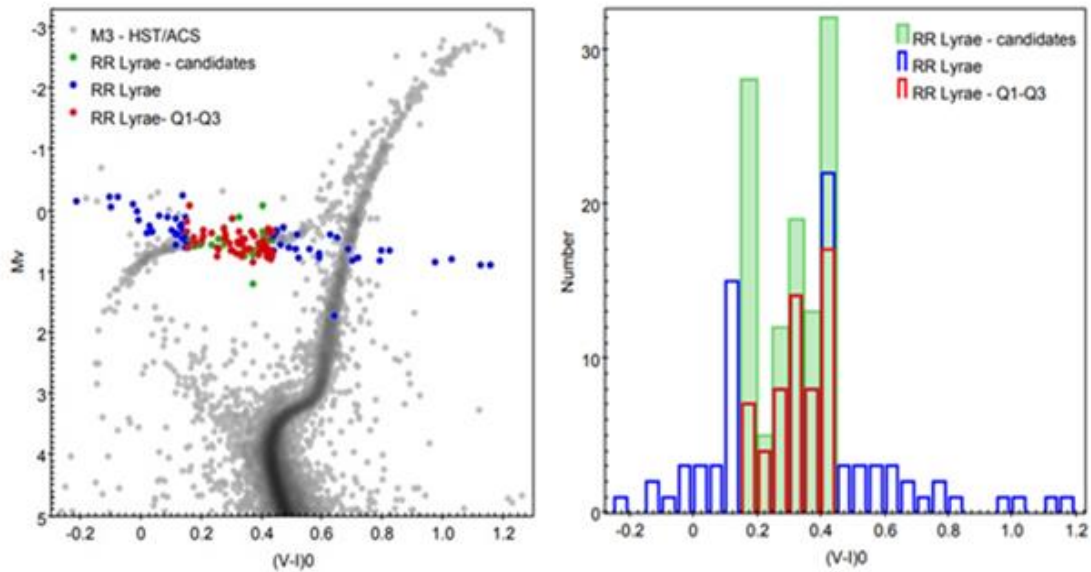


Figura 3.2: A esquerda, CMD com as RR Lyrae na região da faixa de instabilidade (pontos azuis) e a direita é um histograma do número de RR Lyrae em função da cor intrínseca, em que mostra a posição das RR Lyrae e das “candidatas” nos quartis.

Encontrada a faixa de instabilidade de M3, obtemos que 54% (58 em 108) das estrelas presente nessa região são RR Lyrae catalogadas pelo CVS. Ou seja, para o aglomerado mais populoso em RR Lyrae, supostamente ainda existem 46% a serem descobertas. Convém ressaltar que vários fatores podem influenciar na não descoberta destas RR Lyrae, como por exemplo, o fato do telescópio não conseguir resolver inteiramente as estrelas do HB na região mais central de um aglomerado ou mesmo a insuficiência de séries fotométricas nestes objetos, impedindo assim a construção de curvas de luz de estrelas candidatas a variáveis.

Com base nesta determinação empírica da região da faixa de instabilidade que cruza o HB, analisamos os outros aglomerados, e para isso usamos os mesmos critérios estabelecidos para análise de M3. Primeiro comparamos a metalicidade, uma vez que ela é o principal parâmetro físico que faz com que a morfologia do HB de um aglomerado seja diferente da de outro globular. Via de regra, aglomerados globulares pobres em metais ($[Fe/H] < -2.0$ dex) possuem HB muito azul, e com isso estrelas a esquerda da faixa de instabilidade, enquanto que globulares com $[Fe/H] > -0.5$ dex tendem a ter HB muito vermelho (inclusive formando o *red clump*), portanto com estrelas mais frias que o limite à direita da faixa de instabilidade. Como M3 possui metalicidade $[Fe/H] = -1.49$ dex (Harris et al. 1996, 2010 edition), este foi um critério adicional para o escolhermos como aglomerado referência. Para minimizarmos os possíveis efeitos de metalicidades em nosso estudo, utilizamos valores de $[Fe/H]$ próximos ao valor de Messier 3 (-1.1 até -1.9 dex). Com isso houve uma redução em nossa amostra, que passou de 55 aglomerados para 34. A Figura 3.3 é um histograma que mostra toda a amostra

de GCs com RR Lyrae catalogadas no CVS e dados HST, bem como a subamostra de aglomerados que estão nessa faixa de metalicidade. Por fim, dessa subamostra de 34 aglomerados, encontramos dados do HST para 21 deles, que foi a quantidade de aglomerados que trabalhamos.

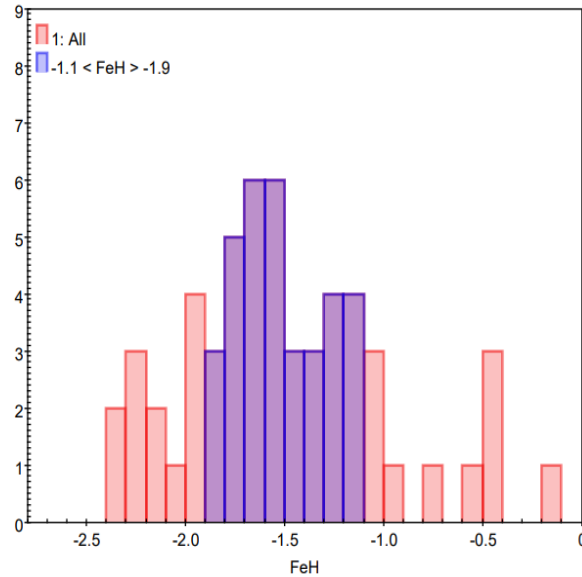


Figura 3.3: Histograma em $[Fe/H]$ que apresenta toda nossa amostra de aglomerados, e também os globulares que estão na faixa de metalicidade de -1.1 a -1.9.

A etapa seguinte foi a sobreposição do CMD com magnitude absoluta e cor intrínseca de cada aglomerado com o de M3, de forma que a MS do aglomerado ficasse o mais em cima possível da MS de M3. A partir daí achamos a faixa de instabilidade de cada um dos outros aglomerados, baseando-se nos mesmos limites em cor para M3. Com a faixa de instabilidade dos outros aglomerados encontrada, pudemos estimar o quão completo cada aglomerado está segundo nosso critério. Os resultados e uma discussão mais completa encontram-se no próximo capítulo.

3.3 Estimativa da completeza de RR Lyrae em GCs - dados *Gaia* DR2

Após a estimativa para a completeza, na amostra do número de RR Lyraes, com os dados do Hubble, fizemos a estimativa com os dados do *Gaia* DR2 ([Gaia Collaboration et al. 2018](#)). Como dito anteriormente, os dados, para cada aglomerado, foram obtidos através do programa Aladin. Para a estimativa, primeiramente plotamos o gráfico de movimento próprio (Figura 3.4), a fim de saber qual estrela fazia parte do aglomerado, depois selecionamos uma região mais central, visto que a contaminação de estrelas de campo poderia dificultar a estimativa. Chamamos essa região de *cluster* (pontos cinza no gráfico da Figura 3.4).

Posteriormente fizemos o cruzamento destas estrelas com todas as RR Lyraes do catálogo de Clementini, [Clementini et al. \(2019\)](#), onde foram identificadas 186 RR Lyraes (pontos azuis, chamados de “RR Lyrae match” na Fig. 3.4). Convertemos então a magnitude aparente para magnitude absoluta e a cor aparente para cor intrínseca através das Eqs. 3.5 e 3.6, que por sua vez são similares as Eqs. 3.3 e 3.4, com a diferença que a fotometria do Gaia nos fornece magnitude na banda G e cores BP-RP.

$$M_G = G - 5\log(d) + 5 - 3.1E(B - V) \quad (3.5)$$

$$(BP - RP)_0 = G - I + 1.6E(B - V) \quad (3.6)$$

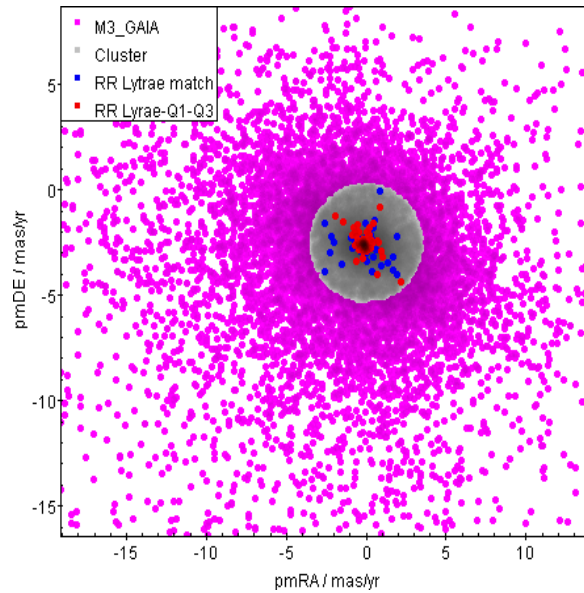


Figura 3.4: Gráfico do movimento próprio para o aglomerado M3, com a região central cor cinza, e os pontos vermelhos e azuis são respectivamente as RR Lyraes do cruzamento do catálogo de [Clementini et al. \(2019\)](#) com as presentes no catálogo *Gaia* e as RR Lyraes na região Q1-Q3.

Encontramos a faixa de instabilidade (Região entre o Q1 e Q3) com os mesmos procedimentos realizados na Seção 3.2. As RR Lyraes nessa região são os pontos vermelhos na Figura 3.5 que é o CMD do aglomerado M3, em escala absoluta, e mostra também as “RR Lyrae match” (pontos azuis) e os pontos verdes que representam as estrelas candidatas a RR Lyrae (“RR Lyrae candidates”).

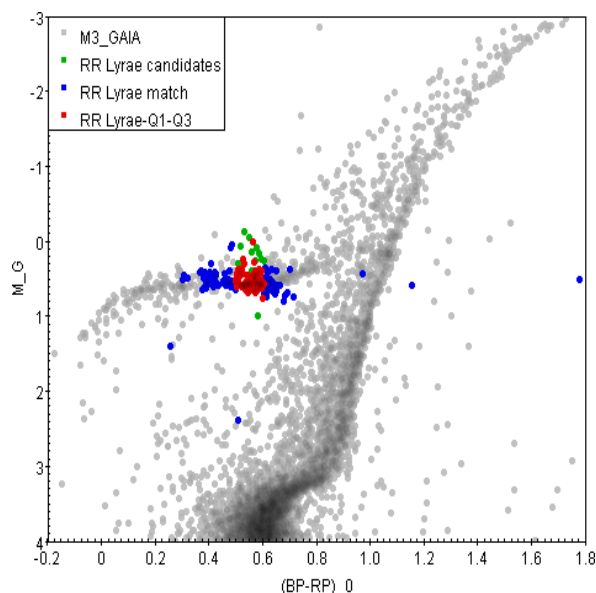


Figura 3.5: CMD de M3, indicando as estrelas do cruzamento e mostrando a faixa de instabilidade (pontos azuis) as RR Lyraes (pontos vermelho) e as candidatas a RR Lyraes (pontos verdes) presentes nessa região.

Das 106 estrelas da faixa de instabilidade (candidatas) 90 já estão confirmadas como RR Lyrae, o que dá uma porcentagem de 85%, ou seja, teoricamente só faltam 15% de RR Lyrae a serem descobertas.

Terminada a estimativa para M3, realizamos o mesmo procedimento descrito no ultimo parágrafo da Seção 3.2, aplicando-o para os mesmos aglomerados analisados com dados HST. Todavia, 5 aglomerados ficaram de fora, 4 por possuírem poucas estrelas candidatas, o que torna a estimativa pouco confiável, e Omega Centauri por não ter sido possível baixar as informações sobre ele, tamanha a quantidade de pontos. Com isso pudemos estimar a completeza de 17 aglomerados com base nos dados da missão Gaia. Os resultados e uma discussão mais completa encontram-se no próximo capítulo.

Capítulo 4

Resultados e Discussões

4.1 Distâncias utilizando a relação M_V -[Fe/H]

A Tabela 4.1 apresenta os resultados das determinações de distância para 55 GCs utilizando a relação M_V -[Fe/H] para RR Lyrae apresentada na seção 3.1. Estas distâncias foram calculadas utilizando-se os valores de metalicidade presentes em [Harris et al. \(1996, 2010 edition\)](#) e em [Dias et al. \(2016\)](#). Como os valores de metalicidade nestes dois catálogos são relativamente próximos, os valores de distâncias também são. Comparamos então estas distâncias com as presentes no catálogo [Harris et al. \(1996, 2010 edition\)](#), tal como mostrado na Figura 4.1. Para uma boa correspondência o esperado no painel esquerdo desta figura seria uma linha reta que seguisse a linha identidade. Podemos observar que a maioria (50 em 55, ou seja, 90,9% da amostra) das distâncias calculadas via RR Lyrae está de acordo com as presentes no catálogo de [Harris et al. \(1996, 2010 edition\)](#), sendo que apenas em 5 aglomerados (pontos azuis) a razão entre o módulo da diferença entre os valores de distâncias e a incerteza superou 3 vezes a incerteza em nossas determinações. Os GCs que apresentaram uma discrepância significativa entre as distâncias são NGC6304, NGC6401, NGC6553, NGC6809 e NGC7492, o que indica que estes objetos precisam ser mais bem investigados no futuro.

Tabela 4.1: Comparação entre as distâncias calculadas com as metalicidades presentes no catálogo de [Harris et al. \(1996, 2010 edition\)](#), (índice 1) e as disponíveis em [Dias et al. \(2016\)](#) (índice 2). A última coluna apresenta a distância presente no catálogo de [Harris et al. \(1996, 2010 edition\)](#).

Cluster	D_1 (kpc)	D_2 (kpc)	[Fe/H] ₁	[Fe/H] ₂	D_{Harris} (kpc)
NGC288	7,84	7,84	-1,32	-1,33	8,90
NGC362	8,45	8,33	-1, 26	-1,11	8,60
NGC1851	11,70	11,62	-1, 18	-1,11	12,1
NGC1904	12,78	12,74	-1,60	-1,57	12,9
NGC2419	83,64	83,40	-2,15	-1,45	82,6

NGC2808	9,74	9,66	-1,14	-1,06	9,60
NGC3201	4,93	4,87	-1,59	-1,45	4,90
NGC4147	18,22	18,50	-1, 80	-1,95	19,3
NGC4590	10,58	10,60	-2,23	-2,25	10,3
NGC4833	5,99	6,05	-1, 86	-1,96	6,60
NGC5024	18,43	18,07	-2,10	-1,90	17,9
NGC5053	17,18	17,13	-2,27	-2,24	17,4
NGC5139	5,31	5,40	-1, 53	-1,70	5,20
NGC5272	10,18	10,26	-1, 40	-1,48	10,2
NGC5286	11,84	11,76	-1, 69	-1,62	11,7
NGC5466	15,95	15,70	-1, 98	-1,82	16,0
NGC5897	12,69	12,80	-1, 90	-1,99	12,5
NGC5904	7,46	7,33	-1, 29	-1,12	7,50
NGC5986	9,13	9,11	-1, 59	-1,57	10,4
NGC6093	10,70	10,66	-1, 75	-1,72	10,0
NGC6101	14,91	15,16	-1, 98	-2,14	15,4
NGC6121	2,11	2,12	-1,16	-1,22	2,20
NGC6171	6,47	6,46	-1,02	-1,00	6,40
NGC6205	7,03	7,05	-1,53	-1,55	7,1
NGC6229	29,56	29,21	-1,47	-1,35	30,5
NGC6266	6,76	6,81	-1,03	-1,09	6,8
NGC6304	7,21	7,20	-0,45	-0,43	5,9
NGC6316	9,25	9,26	-0,45	-0,46	10,4
NGC6333	9,00	8,94	-1,77	-1,70	7,9
NGC6341	8,44	8,41	-2,31	-2,27	8,3

NGC6362	7,39	7,42	-0,99	-1,03	7,6
NGC6388	10,01	10,01	-0,55	-0,51	9,9
NGC6401	9,21	9,27	-1, 02	-1,08	10,6
NGC6402	8,73	8,73	-1, 28	-1,28	9,3
NGC6426	21,13	21,57	-2,15	-2,36	20,6
NGC6441	11,44	11,45	-0,46	-0,47	11,6
NGC6553	8,30	8,25	-0,18	-0,12	6,0
NGC6626	6,37	6,29	-1,32	-1,18	5,5
NGC6656	3,66	3,74	-1,70	-1,92	3,2
NGC6723	8,47	8,39	-1,10	-1,01	8,7
NGC6779	9,58	9,41	-1, 98	-1,80	9,4
NGC6809	6,78	6,74	-1, 94	-1,87	5,4
NGC6864	20,60	20,05	-1, 29	-1,01	20,9
NGC6934	15,66	15,68	-1, 47	-1,48	15,6
NGC6981	16,26	16,25	-1, 42	-1,35	17,0
NGC7006	40,93	41,13	-1, 52	-1,57	41,2
NGC7078	10,41	10,31	-2,37	-2,27	10,4
NGC7089	11,26	11,10	-1, 65	-1,51	11,5
NGC7099	7,88	7,92	-2,27	-2,33	8,1
NGC7492	23,78	23,52	-1, 78	-1,67	26,3
PALOMAR3	93,53	93,26	-1, 63	-1,60	92,5
PALOMAR13	25,91	25,83	-1, 88	-1,85	26,0
47TUC	3,87	3,87	-0,72	-0,71	4,50
RUPR.106	22,48	22,20	-1, 68	-1,55	21,2
IC.4499	18,57	18,94	-1, 53	-1,73	18,8

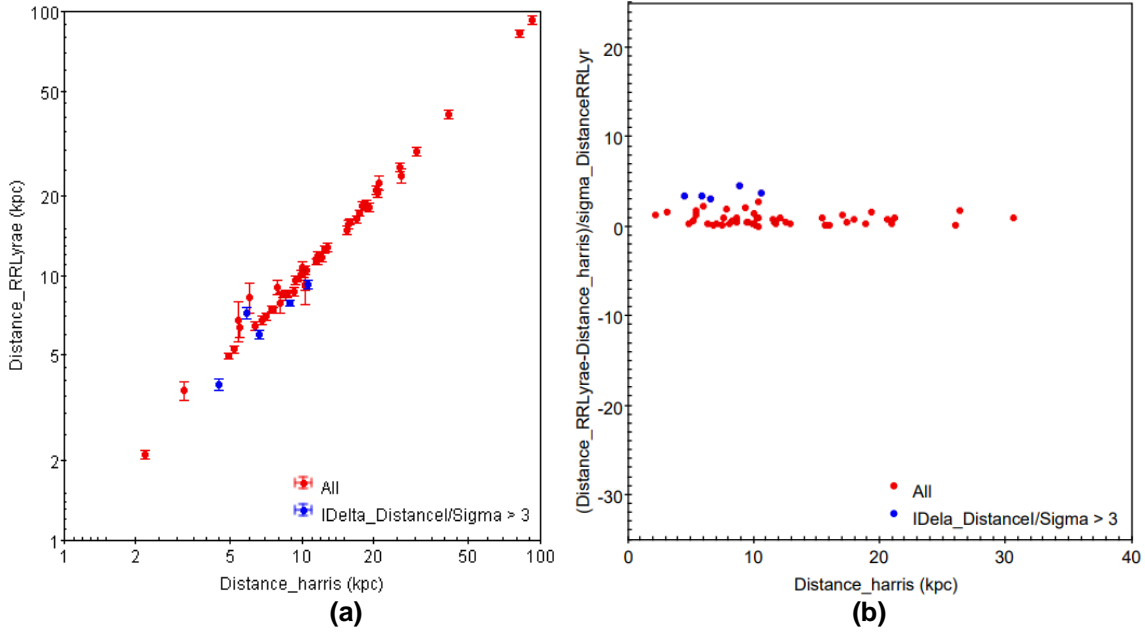


Figura 4.1: (a) Comparação das distâncias dos aglomerados, calculadas através das RR Lyrae, com as distâncias presentes no catálogo de [Harris et al. \(1996, 2010 edition\)](#) Os casos onde a razão entre o módulo da diferença entre estas duas distâncias e a incerteza superou 3 vezes a incerteza na distância das RR Lyrae estão marcados em azul. (b) Razão mencionada anteriormente confrontada com as distâncias no catálogo de Harris.

4.2 Completeza das RR Lyrae em globulares – dados CVS e HST

A Tabela 4.2 apresenta os resultados da estimativa de completeza utilizando dados HST ([Sarajedini et al. 2007](#)) e catálogo CVS ([Clement et al. 2001, 2017 edition](#)). Constam nas colunas desta tabela as seguintes informações: coluna (1) identificação do aglomerado; coluna (2) RR Lyrae que já foram catalogadas e que foram recuperadas com os dados do HST; (3) todas as estrelas candidatas a RR Lyrae que aparecem na faixa de instabilidade; coluna (4) RR Lyrae que já foram catalogadas e que apareceram na faixa de instabilidade, aqui definida como aquelas entre os quartis 1 e 3 da distribuição de cor das RR Lyrae identificadas do HST; (5) razão entre os valores da coluna (3) e os valores da coluna (4); coluna (6) erro do parâmetro da coluna (5).

Tabela 4.2: – Resultados completos para a estimativa da completude de RR Lyrae utilizando dados HST e CVS.

Cluster	N_{RRLyrae} Conhecidas em qualquer cor	N_{RRLyrae}, conhecidas (Q1-Q3)	N_{RRLyrae}, candidatas (Q1-Q3)	Fração	σ_{\pm}
NGC 288	1	0	3	0,00	0,00
NGC 362	19	13	53	0,25	0,08
NGC 1261	14	8	24	0,33	0,14
NGC 1851	22	7	49	0,14	0,06
NGC 3201	20	12	18	0,67	0,35
NGC 5024 (M53)	30	10	41	0,24	0,09
NGC 5139 (Ω_{cen})	27	19	41	0,46	0,13
NGC 5272 (M3)	113	58	108	0,54	0,09
NGC 5286	24	2	107	0,02	0,01
NGC 5466	13	6	17	0,35	0,17
NGC 5904 (M5)	52	22	56	0,39	0,10
NGC 5986	5	3	21	0,14	0,09
NGC 6093 (M80)	8	5	41	0,12	0,06
NGC 6121	15	10	11	0,91	0,40
NGC 6205 (M13)	7	7	16	0,44	0,20
NGC 6584	31	19	48	0,40	0,11
NGC 6681 (M70)	2	1	6	0,17	0,18
NGC 6779 (M56)	1	0	15	0,00	0,00
NGC 6809 (M55)	5	3	10	0,30	0,20
NGC 6981 (M72)	35	20	30	0,67	0,19

NGC 7089 (M2)	22	11	92	0,12	0,04
TOTAL	466	236	807	0,29	0,02

Através desta tabela podemos destacar alguns resultados importantes: somente $29 \pm 2\%$ das RR Lyrae são conhecidas neste conjunto de 21 globulares; para 17 dos 21 GCs analisados (81%) a completude das RR Lyrae é inferior a 50%, enquanto que para os 4 restantes (19%) apenas 3 tiveram uma completude expressiva acima dos 65%. Podemos destacar ainda alguns resultados específicos. O primeiro para NGC 5286: o CMD presente na Fig. 4.2 mostra que esse GC possui um grande potencial de serem descobertas novas RR Lyraes, visto que, na região da faixa de instabilidade, das 107 estrelas candidatas (pontos verdes), apenas duas (pontos vermelhos) foram identificadas até o presente momento. Ou seja, de acordo com nossa estimativa, falta descobrir 98%, destas estrelas.

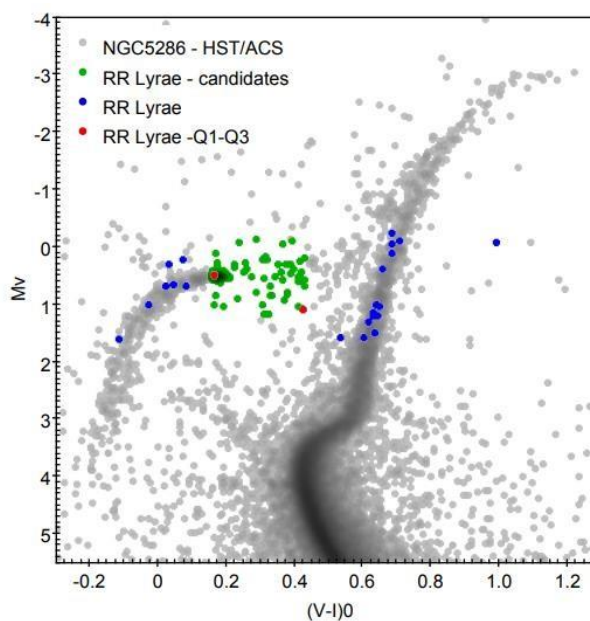


Figura 4.2: CMD obtido com o HST para NGC 5286 caso com um grande potencial de descoberta de RR Lyraes.

O caso oposto ocorre para o aglomerado NGC 6121, em que, das onze estrelas presentes na faixa de instabilidade apenas uma não está catalogada como RR Lyrae, como pode ser visto na Figura 4.3.

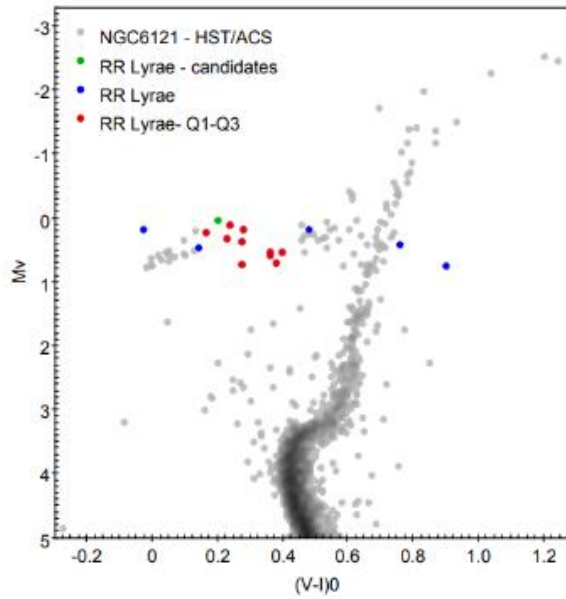


Figura 4.3: CMD obtido com dados HST para NGC 6121, caso em que a amostra de RR Lyraes está praticamente completa.

4.3 Completeza da amostra de RR Lyrae usando - dados *Gaia* DR2

A Tabela 4.3 apresenta os resultados da estimativa de completeza utilizando dados do *Gaia* DR2 ([Gaia Collaboration et al. 2018](#)) e do catálogo [Clementini et al. \(2019\)](#). As colunas são as mesmas da Tabela 4.2

Tabela 4.3: Resultados para a estimativa no número de RR Lyrae em globulares utilizando dados do *Gaia* DR2.

Cluster	N_{RRLyrae} Conhecidas em qualquer cor	N_{RRLyrae} , conhecidas (Q1-Q3)	N_{RRLyrae} , candidatas (Q1-Q3)	Fração	σ_{\pm}
NGC 362	19	12	16	0,75	0,29
NGC 1261	18	9	23	0,39	0,15
NGC 1851	84	11	30	0,37	0,13
NGC 3201	82	42	45	0,93	0,20
NGC 5024 (M53)	48	17	35	0,49	0,14
NGC 5272 (M3)	186	90	106	0,85	0,12
NGC 5286	7	5	17	0,29	0,15

NGC 5466	19	11	12	0,92	0,38
NGC 5904 (M5)	47	16	58	0,28	0,08
NGC 5986	4	2	4	0,50	0,43
NGC 6093 (M80)	7	1	12	0,08	0,09
NGC 6205 (M13)	4	1	9	0,11	0,12
NGC 6584	25	4	26	0,15	0,08
NGC 6779 (M56)	2	1	4	0,25	0,28
NGC 6809 (M55)	3	1	3	0,33	0,38
NGC 6981 (M72)	35	19	21	0,90	0,29
NGC 7089 (M2)	3	1	19	0,05	0,05
TOTAL	408	243	440	0,55	0,04

Através desta tabela podemos destacar alguns resultados importantes: a completeza das RR Lyrae conhecida é de $55 \pm 4 \%$; para 12 dos 17 GCs analisados (71%) a completeza das RR Lyrae é igual ou inferior a 50%, enquanto que os 5 restantes (29%) tiveram uma completeza acima dos 75%. Podemos destacar ainda alguns resultados mais específicos. O GC NGC 7089 possui um grande potencial de RR Lyraes a serem descobertas, visto que apenas uma em 19 foi confirmada, isso dá apenas 5%. A Figura 4.4 mostra o CMD deste aglomerado com a faixa de instabilidade exemplificando bem o que foi dito anteriormente.

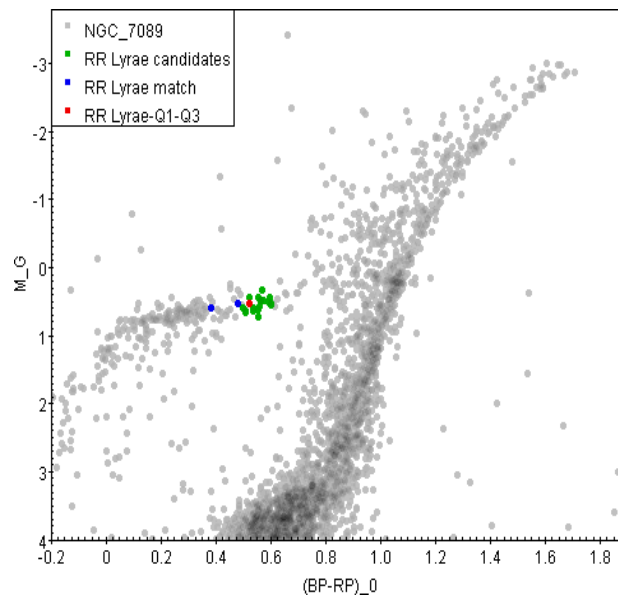


Figura 4.4: CMD obtido com dados do Gaia DR2 de NGC 7089, aglomerado que há um grande potencial de descoberta de RR Lyraes.

Na contramão da estimativa anterior, está a estimativa para o aglomerado NGC 3201, caso em que ocorre a maior porcentagem de RR Lyraes descobertas em função das candidatas, 93%, das 45 candidatas 42 dessas foram confirmadas como RR Lyrae. O diagrama cor magnitude da Figura 4.5 exemplifica o que foi dito anteriormente.

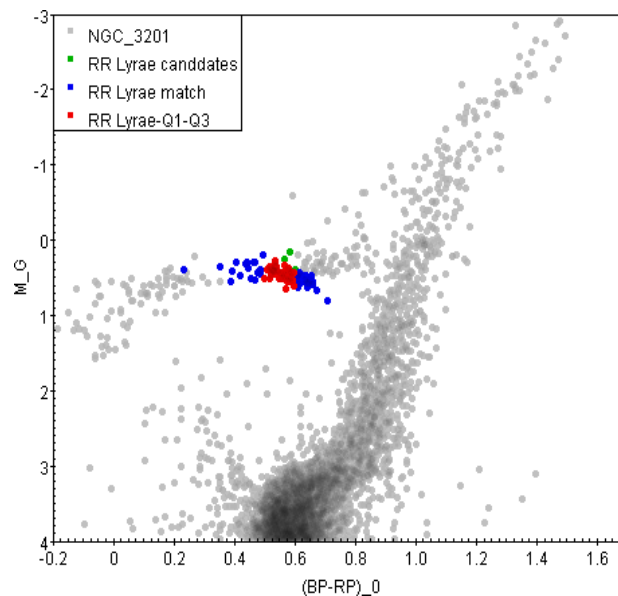


Figura 4.5: CMD obtido com dados do Gaia DR2 para NGC 3201, caso em que a amostra está praticamente completa.

A Figura. 4.6 confronta os valores de completezas obtidos pelos dois métodos apresentados. Como esperado, é possível perceber que existe uma clara correlação entre os valores de completeza estimados usando dados HST e catálogo CVS com aqueles estimados por meio dos dados da missão *Gaia*. Entretanto há uma tendência dos valores de completeza serem menores para o primeiro conjunto de dados. As razões para isso podem estar justamente na maior resolução espacial do HST (FWHM ~ 0.05 arcsec) do que da missão *Gaia* (FWHM ~ 0.50 arcsec), o que faz com que nenhuma candidata a RR Lyrae seja deixada para trás na fotometria, e conseqüentemente fazendo com que a razão RR Lyrae conhecidas / candidatas tenha a tendência de ser menor do que no caso dos dados da missão *Gaia*.

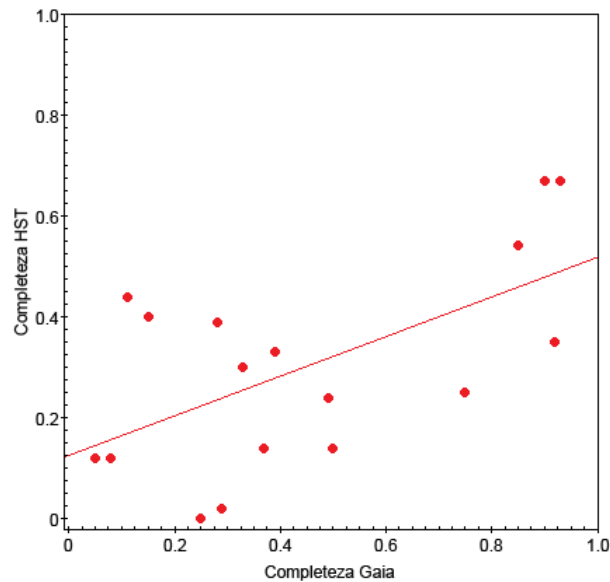


Figura 4.6: Completezas obtidas com os dados HST vs. completezas obtidas com os dados *Gaia* DR2.

Capítulo 5

Conclusões e perspectivas

Percebe-se que o método para o cálculo das distâncias calculadas para RR Lyrae com base na relação Luminosidade-Metalicidade no filtro V, nos fornece um resultado esperado uma vez que os valores obtidos para 90,9% dos globulares (50 em 55) estão de acordo, dentro de 3 sigma, com aqueles presentes no catálogo de [Harris *et al.* \(1996, 2010 edition\)](#). Oportunamente serão investigadas as razões para as quais houve uma discrepância nas distâncias para 5 globulares (NGC6304, NGC6401, NGC6553, NGC6809 e NGC7492).

Através da análise dos dados de aglomerados no catálogo CVS ([Clementini *et al.* 2001, 2017 edition](#)), *ACS Survey of Galactic Globular Clusters* ([Sarajedini *et al.* 2007](#)) (HST) e dos dados da missão Gaia ([Gaia Collaboration *et al.* 2018](#); [Clementini *et al.* 2019](#)), que há uma quantidade considerável de GCs em que podemos descobrir RR Lyrae, visto que na análise dos catálogos a maioria deles (71% no Gaia DR2 e Clementini e 81% no HST e CVS) apresentou uma estimativa igual ou abaixo dos 50%. Estes resultados indicam um grande potencial de descoberta destas variáveis nestes GCs. Levando-se em conta os 21 GCs analisados com os dados do HST e CVS, a completude da amostra de RR Lyrae corresponde a $29\% \pm 2\%$, o que indica que há cerca de 571 estrelas candidatas que podem vir a serem descobertas nestes globulares. Se levarmos em conta os 17 GCs analisados através dos catálogos Gaia DR2 e catálogo de Clementini, a completude total corresponde a $55\% \pm 4\%$, o que aponta para cerca de 197 estrelas candidatas que podem vir a serem descobertas nestes globulares. Vimos também que há uma clara correlação entre os resultados de completude usando dados HST e CVS com aqueles obtidos com dados da missão Gaia. Entretanto, os valores de completude com o método usando dados HST possuem uma tendência de serem menores, o que provavelmente pode ser explicado pela excelente resolução espacial deste telescópio, que literalmente resolve todas as estrelas candidatas a RR Lyrae, mesmo nas regiões mais centrais destes sistemas estelares densos.

Consideramos como casos interessantes de serem investigados os seguintes GCs, cujos valores de completude das RR Lyrae no método usando dados HST estão abaixo de 20% e o número estimado destas variáveis a serem descobertas é igual ou superior a 15 estrelas em cada globular: NGC1851, NGC5286, NGC5986, NGC6093 (M80), NGC6779 (M56), NGC7089. Para estes objetos, que somados tem um potencial de descoberta de 297 RR Lyrae (em média, 49,5 por aglomerado), pretendemos realizar pedidos de tempo no telescópio

SOAR para observá-los com o módulo de óptica adaptativa (SAM), o que nos permitirá construir curvas de luz mesmo para as candidatas a RR Lyrae em regiões com maior densidade de estrelas.

Referências Bibliográficas

ALCOCK, C.; ALLSMAN, R.; ALVES, D. R. et al. The MACHO project Large Magellanic Cloud variable-star inventory. IX. Frequency analysis of the first-overtone RR Lyrae stars and the indication for nonradial pulsations. **The Astrophysical Journal**. [S.I.], vol. 542, n. 1, pp.257–280, 2000.

BELLONI, D. T. **Colisão entre aglomerados globulares**. Tese (Mestrado em Astronomia) – Observatório do Valongo, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, p. 201. 2014.

BONO, G. RR Lyrae Distance Scale. Theory and Observations. In: ALLOIN, D; GIEREN, W. **Stellar Candles for the Extragalactic Distance Scale**. Santiago, Concepción: Springer, 2003. p. 85-104.

BROWN, A.G.; VALLENARI, A. Gaia Data Release 2 Summary of the contents and survey properties. **Astronomy & Astrophysics**. [S.I.], vol. 616, p.22, b2018.

CACCIARI, C.; CLEMENTINI, G. RR Lyrae Distance Scale. Theory and Observations. In: ALLOIN, D; GIEREN, W. **Stellar Candles for the Extragalactic Distance Scale**. Bologna: Springer, 2003. p. 105- 122.

CATELAN, M.; SMITH, A.H. Pulsating Stars. 1. ed. Santiago e East Lansing: Wiley-VCH, 2014.

CLEMENT, C.M.; MUZZIN, A.; DUFTON, Q. et al. Variable stars in galactic globular clusters. **The Astronomical Journal**, Chicago, vol. 122, n. 5, p.2587-2599, 2001.

CLEMENTINI, G.; RIPEPI, V.; MOLINARO, R. et al. *Gaia* Data Release 2 Specific characterisation and validation of all-sky Cepheids and RR Lyrae stars. **Astronomy & Astrophysics**. [S.I.], vol. 622, n.60, p.37, 2019.

COX, J.P. Pulsating stars. **Reports on Progress in Physics**, vol. 37, pp.563–698, 1974.

DIAS, B.; BARBUY.; SAVIANE, I. et al. GOTHAM survey: Milky Way globular cluster chemical evolution based on full spectrum fitting. **Astronomical Society of India**. [S.I.], vol. 14, pp.17-20, 2017.

FEAST, M. W.; LANEY, D. C.; KINMAN, D. T. et al. The Luminosities and Distance Scales of Type II Cepheid and RR Lyrae variables. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**. Oxford, vol. 386, n. 4, p.29, 2008.

GAIA COLLABORATION; CLEMENTINI, G.; EYER, L. et al. Gaia data Release 1. Testing parallaxes with local Cepheids and RR Lyrae stars. **Astronomy & Astrophysics**. Strasbourg, vol. 605, n. 79, p.29, 2017.

GRATTON, R. G.; D'ORAZI, V.; BRAGAGLIA, A. et al. The connection between missing AGB stars and extended horizontal branches. **Astronomy & Astrophysics**. [S.I.], vol. 522, n. 77, p.5, 2010

HARRIS, W.E. A Catalog of Parameters for Globular Clusters in the Milky Way. **The Astronomical Journal**, [S.I.], vol. 122, n.4, p.1487. 1996.

KERBER, L. O.; LIBRALATO, M.; SOUZA, S. O. et al. A deep view of a fossil relic in the Galactic bulge: the Globular Cluster HP 1. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, Oxford, vol. 484, n. 4, pp.5530-5550, 2019.

KUEHN, C. A. et al. Variable stars in Large Magellanic Cloud globular clusters. III. Reticulum. **The Astronomical Journal**. Chile, vol. 145, n. 6, 2013.

LAYDEN, A. C.; HANSON, R. B.; HAWLEY, S. L. et al. The Absolute Magnitude and Kinematics of RR Lyrae Stars Via Statistical Parallax. **The Astronomical Journal**. [S.I.], vol. 112, n. 3, p.2110, 1996.

MAJAESS, D.J.; TURNER, D.G.; LANE, D.J.; KRAJCI, T. Deep Infrared ZAMS Fits to Benchmark Open Clusters Hosting Delta Scuti Stars. **The Journal of the American Association of Variable Star Observers**. Cambridge vol. 39, n. 2, p.2019, 2011.

MUSELLA, I.; MARCONI, M.; STETSON, P. B. et al. The Cepheids of NGC 1866: a precise benchmark for the extragalactic distance scale and stellar evolution from modern UBVI photometry. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**. Oxford, vol. 457, n. 3, pp.3084-3095, 2016.

RICHARD, I.A.; LAURENT E.; NAMI M. Cepheids in Open Clusters: An 8-D All-sky Census. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**. Oxford, vol. 434, n. 3, pp.2238-2261, 2013.

SALINAS, R.; CONTRERAS R. R.; STTRADER, J. et al. An AO-assisted Variability Study of Four Globular Clusters. **The Astronomical Journal**. [S.I.], vol. 152, n.3, p.10, 2016.

SANDAGE, A.; TAMMANN, G.A. Absolute Magnitude Calibrations of Population I and II Cepheids and Other Pulsating Variables in the Instability Strip of the Hertzsprung-Russell Diagram. **Annual Review of Astronomy & Astrophysics**. [S.I.], vol. 44, n. 1, pp.93-140, 2006.

SARAJEDINI. A.; BEDIN. L. R.; CHABOYER, B. et al. The ACS Survey of Galactic Globular Clusters without previous Hubble Space Telescope photometry. **The Astronomical Journal**. L Laguna, vol. 133, n. 4, pp.1658-1672, 2007.

SCHWARZSCHILD, M. On the variables in Messier 3. **Harvard College Observatory Circular**. [S.I.], vol. 437, pp.1–12, 1940.

SHAPLEY, H. On the nature and cause of Cepheid variation. **The Astrophysical Journal**. [S.I.], vol. 40, pp.448–465, 1914.

SMOLEC, R.; MOSKALIK, P.; KALUZNY, J. et al. **RR Lyrae stars in NGC 6362**. Oxford, vol. 467, n. 2, pp.2349-2366, 2017.

THOMPSON, IB.; UDALSKI, A.; DOTTER, A. et al. The Cluster Ages Experiment (CASE). VIII. Age and Distance of the Globular Cluster 47 Tuc from the Analysis of Two Detached Eclipsing Binaries. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**. Oxford, vol. 492, pp.4254-4267, 2020.

TOKOVININ, A.; CANTARUTTTI, R.; TIGHE, R. et al. SOAR Adaptive Module (SAM): Seeing Improvement with a UV Laser. **Astronomical Society of the Pacific**. [S.I.], vol. 128, n. 970, p.16, 2016.

Apêndices

A.

Tabela A.1: Parâmetros das estrelas RR Lyrae para todos aglomerados, presentes no CVS.

Cluster	<mag>	Magsig	N _{RRLL}	Filter	<mag>sig
NGC 288	15,16	0,020	2	V	0,014
NGC 362	15,40	0,303	20	V	0,068
NGC 1261	16,78	0,360	18	B	0,085
NGC 1851	16,03	0,274	28	V	0,052
NGC 1904	16,10	0,102	10	V	0,032
NGC 2298	16,50	0,05	4	B	0,025
NGC 2419	20,28	0,178	74	V	0,021
NGC 2808	16,26 16,30	0,010 --	2 1	V B	0,007 --
NGC 3201	14,75	0,117	77	V	0,013
NGC 4147	16,86	0,222	21	V	0,048
NGC 4590	15,68	0,049	42	V	0,008
NGC 4833	15,36	0,138	17 1	V B	0,034
NGC 5024	16,82 17,00	0,23 0,11	52 8	V B	0,032 0,039
NGC 5053	16,60	0,05	10	V	0,016
NGC 5139	14,55 13,84	0,30 0,54	176 5 1	V K P	0,023 0,241
NGC 5272	15,65	0,24	207	V	0,017
NGC 5286	16,63	0,25	49 2	V I	0,036
NGC 5466	16,47	0,07	20 1	V P	0,016
NGC 5634	17,60	0,16	6	B	0,065
NGC 5694			1	V	
NGC 5824	17,67	0,12	24	P	0,024
NGC 5897	16,27	0,05	5	V	0,022

NGC 5904	15,06 15,19	0,10 0,2	85 18 1	V P B	0,011 0,047
NGC 5946	18	0,1	2	B	0,071
NGC 5986	16,21	0,70	6	V	0,286
NGC 6093	16,21	0,23	9	V	0,077
NGC 6101	16,48 16,8	0,12 0,14	17 3	V B	0,029 0,081
NGC 6121	13,34	0,19	41 1	V B	0,030
NGC 6171	15,74	0,28	23	V	0,060
NGC 6205	14,85	0,04	5	V	0,018
NGC 6229	17,95	0,30	55	V	0,040
NGC 6139	18,9	0,13	4	B	0,065
NGC 6235	17,21	0,13	3	B	0,075
NGC 6266	16,27 16,37	0,42 0,26	109 9	V P	0,040 0,070
NGC 6304	16,75	0,26	8	V	0,092
NGC 6316	17,29	0,14	4	V	0,070
NGC 6333	16,45	0,50	18	V	0,117
NGC 6341	15,08	0,05	12	V	0,014
NGC 6273	15,51	0,71	3	B	0,410
NGC 6284+	17,17	0,43	6	B	0,175
NGC 6293	16,62	0,20	4	B	0,100
NGC 6362	15,29	0,087	35	V	0,015
NGC 6366			1	V	
NGC 6388	16,92 15,73	0,25 0,70	14 10 1	V I B	0,067 0,221
NGC 6397	--	--	1	V	--
NGC 6401	17,81	0,34	33	V	0,059
NGC 6402	17,17	0,27	110	V	0,026
NGC 6426	18,16 17,16	0,09 0,78	10 4	V P	0,028 0,39
NGC 6441	17,53	0,11	26	V	0,021
NGC 6553	17,39	0,44	3	V	0,25

NGC 6453	16,29	0,35	10	I	0,111
NGC 6522	15,86	0,67	11	I	0,202
NGC 6528			1	I	
NGC 6535	17	0,15	2	B	0,106
NGC 6540	15,10	0,08	3	I	0,046
NGC 6541	16,02	0,67	7	B	0,253
NGC 6558	15,50	0,12	11	I	0,036
NGC 6569	16,25	0,28	24	I	0,057
NGC 6584	16,32	0,37	46	B	0,054
NGC 6626	15,86 15,73	0,54 0,32	12 2	V B	0,156 0,226
NGC 6637			1	P	
NGC 6638	16,03	0,24	15 13	P I	0,062
NGC 6642	18,98	0,17	10	B	0,054
NGC 6652	16,82	0,91	4	B	0,455
NGC 6656	14,39	0,71	22	V	0,151
NGC 6681	15,98	0,97	4 1	B I	0,485
NGC 6712	17,43	0,66	7 5	B U	0,249
NGC 6715	17,4	0,33	177	I	0,025
NGC 6717			1	B	
NGC 6723	15,44	0,07	29	V	0,013
NGC 6779	16,17	0,07	2 1 1	V B R	0,049
NGC 6809	14,87	1,29	15	V	0,333
NGC 6864	17,67	0,21	16	V	0,050
NGC 6934	16,85	0,21	74	V	0,024
NGC 6981	16,80	0,14	44	V	0,021
NGC 7006	18,77 19,08 19,08	0,17 0,11 0,11	47 8 5	V P B	0,025 0,039 0,049
NGC 7078	15,77 16,14	0,14 0,35	135 10	V B	0,012 0,111

			3	P	
NGC 7089	15,97	0,08	30	V	0,015
NGC 7099	14,97	0,46	7	V	0,174
NGC 7492	17,38	0,15	2 1	V B	0,106
PALOMAR3	20,51	0,075	8	V	0,027
PALOMAR5	17,72	0,04	5	B	0,018
PALOMAR7			1	B	
PALOMAR13	17,70	0,061	4	V	0,030
47TUC	13,79	0,114	2	V	0,081
Djorge2	16,36	0,09	7	I	0,034
TERZAN1	17,81	0,24	12	I	0,069
TERZAN10	14,75 18,29	0,14 0,15	8 4	K I	0,049 0,075
2MASS	14,70	0,16	5	K	0,071
RUPR.106	17,90	0,36	12	V	0,104
IC.4499	17,61	0,36	96	V	0,037

B.**Tabela B.1:** Alguns parâmetros de aglomerados, retirados do CVS (colunas 2, 3, 4 e 5) e do catálogo de [Harris et al. \(1996, 2010 edition\)](#) (colunas 6, 7 e 8).

Cluster	$\langle V \rangle$	σ_V	$N_{RRLy\alpha}$	σ_{Vmed}	[Fe/H]	E(B-V)	D_{Harris} (kpc)
NGC288	15,16	0,020	2	0,014	-1,32	0,03	8,90
NGC362	15,40	0,303	20	0,068	-1,26	0,05	8,60
NGC1851	16,03	0,274	28	0,052	-1,18	0,02	12,1
NGC1904	16,10	0,102	10	0,032	-1,60	0,01	12,9
NGC2419	20,28	0,178	74	0,021	-2,15	0,08	8,20
NGC2808	16,26	0,010	2	0,007	-1,14	0,22	9,60
NGC3201	14,75	0,117	77	0,013	-1,59	0,24	4,90
NGC4147	16,86	0,222	21	0,048	-1,80	0,02	19,3
NGC4590	15,68	0,049	42	0,008	-2,23	0,05	10,3
NGC4833	15,36	0,138	17	0,034	-1,86	0,32	6,60
NGC5024	16,82	0,230	52	0,032	-2,10	0,02	17,9
NGC5053	16,60	0,050	10	0,016	-2,27	0,01	17,4
NGC5139	14,55	0,300	176	0,023	-1,53	0,12	5,20
NGC5272	15,65	0,24	207	0,017	-1,40	0,01	10,2
NGC5286	16,63	0,250	49	0,036	-1,69	0,24	11,7
NGC5466	16,47	0,070	20	0,016	-1,98	0,00	16,0
NGC5897	16,27	0,050	5	0,022	-1,90	0,09	12,5
NGC5904	15,06	0,100	85	0,011	-1,29	0,03	7,50
NGC5986	16,21	0,700	6	0,286	-1,59	0,28	10,4
NGC6093	16,21	0,250	9	0,077	-1,75	0,18	10,0
NGC6101	16,48	0,12	17	0,029	-1,98	0,05	15,4

NGC6121	13,34	0,19	41	0,030	-1,16	0,35	2,20
NGC6171	15,74	0,2	23	0,060	-1,02	0,33	6,40
NGC6205	14,85	0,04	5	0,018	-1,53	0,02	7,1
NGC6229	17,95	0,300	55	0,040	-1,47	0,01	30,5
NGC6266	16,27	0,420	109	0,040	-1,03	0,47	6,8
NGC6304	17,75	0,260	8	0,092	-0,45	0,54	5,9
NGC6316	17,29	0,140	4	0,070	-0,45	0,54	10,4
NGC6333	16,45	0,500	18	0,117	-1,77	0,38	7,9
NGC6341	15,08	0,050	12	0,014	-2,31	0,02	8,3
NGC6362	12,29	0,087	35	0,015	-0,99	0,09	7,6
NGC6388	16,92	0,25	14	0,067	-0,55	0,37	9,9
NGC6401	17,81	0,34	33	0,059	-1,02	0,75	10,6
NGC6402	17,17	0,27	110	0,026	-1,28	0,60	9,3
NGC6426	18,16	0,09	10	0,028	-2,15	0,36	20,6
NGC6441	17,17	0,11	26	0,021	-0,46	0,47	11,6
NGC6553	17,39	0,44	3	0,250	-0,18	0,63	6,0
NGC6626	15,86	0,54	12	0,156	-1,32	0,40	5,5
NGC6656	14,39	0,70	22	0,151	-1,70	0,34	3,2
NGC6723	15,44	0,07	29	0,013	-1,10	0,05	8,7
NGC6779	16,17	0,07	2	0,049	-1,98	0,26	9,4
NGC6809	14,87	1,29	15	0,333	-1,94	0,08	5,4
NGC6864	17,67	0,21	16	0,050	-1,29	0,16	20,9
NGC6934	16,85	0,21	74	0,024	-1,47	0,10	15,6
NGC6981	16,80	0,14	44	0,021	-1,42	0,05	17,0
NGC7006	18,77	0,17	47	0,025	-1,52	0,05	41,2

NGC7078	15,77	0,14	135	0,012	-2,37	0,10	10,4
NGC7089	15,97	0,08	30	0,015	-1,65	0,06	11,5
NGC7099	14,97	0,46	7	0,174	-2,27	0,03	8,1
NGC7492	17,38	0,15	2	0,106	-1,78	0,00	26,3
PALOMAR3	20,51	0,075	8	0,027	-1,63	0,04	92,5
PALOMAR13	17,70	0,06	4	0,030	-1,88	0,05	26,0
47TUC	13,79	0,12	2	0,081	-0,72	0,04	4,50
RUPR.106	17,90	0,36	12	0,104	-1,68	0,20	21,2
IC.4499	17,61	0,36	96	0,037	-1,53	0,23	18,8

Anexos

- A. Artigo publicado na Revista da Semana da Física da UESC, vol. 4, p. 3, 2020. Disponível em <https://revistasemanafisica.wixsite.com/revistasemanafisica/edicoes>, (acesso em

Revista Semana da Física – EDITUS - Editora da UESC, Volume 4, 2020 – ISSN: 2527-1830



[Voltar/Sumário](#)

ESTIMATIVA DA COMPLETEZA DA AMOSTRA DE RR LYRAE EM AGLOMERADOS GLOBULARES DA GALÁXIA

ALMEIDA, T.A.; KERBER, L. O

Universidade Estadual de Santa Cruz
Contato: tiago.alves789@gmail.com

RESUMO

As RR Lyrae (RRLs) são estrelas variáveis pulsantes muito comuns em aglomerados globulares (GCs), sendo usadas como importantes velas padrão na determinação de distâncias astronômicas em escala Galáctica e extragaláctica. Neste trabalho analisamos RRLs presentes no catálogo de Clement et al. (2001, 2017 edition) e também em fotometria obtida com o Telescópio Espacial Hubble (HST) para GCs da Via Láctea para estimar a completude da amostra destas variáveis nestes aglomerados. Além disso, computamos a magnitude V média das RRLs em cada GC e estimamos a distância até eles utilizando a relação magnitude absoluta na banda V e metalicidade, tal como calculada com base no catálogo Gaia DR1. Constatamos que a grande maioria (82,3 %) das distâncias estimadas por nós para 56 GCs está de acordo com os valores presentes no catálogo de Harris et al. (1996, 2010 edition). Tendo como referência o GC M3 (209 RRLs), determinamos a faixa de instabilidade que cruza o Ramo Horizontal. Com isso estimamos em 21 GCs a fração entre o número de RRLs a serem descobertas e o número conhecido destas estrelas variáveis. Em 17 destes GCs (81%) a completude de RRLs é inferior a 50%, o que demonstra o grande potencial ainda existente para descoberta destas variáveis pulsantes em globulares.

Palavras-Chaves: estrelas variáveis; aglomerados globulares; RR Lyrae.

INTRODUÇÃO

Estrelas variáveis pulsantes, particularmente Cefeidas Clássicas e RR Lyrae (RRL), são excelentes velas padrão com grande relevância para determinação de distâncias astronômicas em escalas Galácticas e extragalácticas (Sandage & Tammann, 2006). Povoando a região de instabilidade do diagrama HR, as variáveis pulsantes RRLs podem possuir períodos entre 0,3 e 1,2 dias. Em termos de amplitude da curva de luz, Cefeidas e RRLs podem superar 1,0 mag em V . As estrelas RRLs são estrelas do Ramo Horizontal características de População II de estrelas (velhas e pobres em metal), sendo muito comuns em aglomerados globulares, no halo e no bojo da Via Láctea. Estas estrelas são igualmente encontradas na Pequena e Grande Nuvem de Magalhães, galáxias anãs irregulares em interação com nossa Galáxia e que possuem estrelas e aglomerados de todas as idades. Identificar e caracterizar variáveis pulsantes em aglomerados estelares é uma excelente forma de impor vínculos para as suas distâncias (e.g. Kerber et al. 2018), bem como melhor compreender as propriedades físicas e estágios evolutivos destas estrelas (Musella et al. 2016). Com base em distâncias mais precisas é possível aumentar a precisão de valores de idade de aglomerados e também de suas órbitas na Galáxia. Além disso, fazer uma análise mais detalhada pode proporcionar um estudo autoconsistente da distribuição espacial de aglomerados na Galáxia e nas Nuvens de Magalhães.