



**Universidade Estadual de Santa Cruz
Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação
Programa Institucional de Iniciação Científica**

RELATÓRIO FINAL

Estrelas RR Lyrae e Cefeidas Clássicas como indicadores de distância de
aglomerados estelares

Estrelas RR Lyrae e Cefeidas Clássicas como indicadores de distância de
aglomerados estelares - Observatório
Astronômico/UESC

Bolsista: João Pedro dos Santos Rocha
Orientador(a): Leandro de Oliveira Kerber
Programa: CNPq
Vigência da bolsa: Agosto de 2018 à Julho de 2019

Ilhéus, 05/09/2019

1. **Resumo** (no máximo 250 palavras)

Neste projeto buscamos determinar a viabilidade do uso do telescópio Boller&Chivens (B&C) de 0.6 metro de diâmetro instalado no Observatório do Pico dos Dias (OPD) para o estudo de estrelas variáveis RR Lyrae em aglomerados globulares, e como um produto desenvolver boa parte do ferramental necessário para o estudo tanto dos aglomerados quanto das estrelas variáveis contidas neles. Para esse fim foram obtidas séries temporais de imagens de aglomerados nos filtros V e I usando o telescópio B&C. A partir das imagens foram construídas curvas de luz para as estrelas usando fotometria diferencial. Com a análise foi possível determinar uma taxa de sucesso de 78% na recuperação de RR Lyrae conhecidas na literatura para as regiões externas do aglomerado NGC 1261, atestando a viabilidade da instrumentação e do sítio astronômico para o desenvolvimento desse tipo de estudo.

2. **Introdução**

Aglomerados estelares são sistemas astrofísicos de grande importância para a compreensão da formação e evolução de estrelas e galáxias. Além disso são excelentes laboratórios para treinamento de técnicas observacionais e de análise de dados em astronomia.

Um parâmetro importante para o estudo de aglomerados é a distância, pois após determinar vínculos de distância é possível inferir vários outros parâmetros físicos dos aglomerados. E para esse fim as estrelas variáveis RR Lyrae (RRLyr), um tipo de variável pulsante, comum em populações estelares antigas, são particularmente interessantes. De forma similar as estrelas variáveis Cefeidas Clássicas (CC) possuem um papel semelhante, porém nas populações jovens.

Essas estrelas foram primeiramente estudadas no Observatório de Havard pela equipe de Edward Pickering, principalmente pelas suas assistentes Williamina Fleming e Henrietta Leavitt, que descobriram a relação entre o brilho aparente e o período de pulsação dessas estrelas (Pickering et al. 1901; Leavitt & Pickering 1912). Ambos os tipos possuem pulsação radial, o que tornou possível a calibração das relações entre brilho e período para determinar a distância até a elas. Portanto estudando a variação do brilho desses objetos podemos determinar vínculos de distância (Sandage & Tammann 2006). Logo estudando as RRLyr ou CC em um aglomerado podemos determinar de forma bastante precisa a distância até eles (e.g. Kerber et al. 2018, 2019).

A vantagem em relação ao método da paralaxe trigonométrica é que usando as variáveis podemos estudar as populações mais distantes, como no bojo da Galáxia ou nas Nuvens de Magalhães, locais onde nem a missão astrométrica Gaia consegue medir paralaxes (Gaia Collaboration et al. 2017). Assim, por meio da obtenção de séries temporais de imagens no visível podemos determinar as relações de entre período e magnitude aparente para chegar nas distâncias. No entanto para esse fim, são necessárias observações com boa resolução temporal, o que pode custar muito tempo de telescópio. Contudo existe a possibilidade de utilizar telescópios de menor porte para essa tarefa, onde existe mais tempo vago.

No Brasil, dispomos do telescópio Boller&Chivens (B&C)(0.6 m) instalado no Observatório do Pico dos Dias (OPD), bem como outros telescópios amadores de menor porte.

Com isso em mente procuramos verificar a possibilidade de estudar estrelas variáveis em aglomerados usando os recursos disponíveis no OPD, aproveitando como oportunidade para

desenvolver as técnicas e o ferramental necessário, desde a realização das observações até a análise dos dados reduzidos.

Para isso desde 2017 estão sendo realizadas observações de aglomerados e estrelas variáveis de campo usando o OPD, de forma a cobrir uma boa parte das possíveis condições de observação. Neste trabalho serão abordados os dados obtido em 2018, focando nos dados do aglomerado globular NGC 1261 onde podemos encontrar estrelas RR Lyrae.

3. Material e Métodos (ou Procedimentos Metodológicos)

3.1 Observações

As observações foram feitas durante Outubro de 2018, tanto de forma presencial quanto remota, usando o tempo alocado ao pedido de tempo I-011 submetido para o período B de observações do OPD.

Foi usado o B&C equipado com o detector Ikon-L 10127 (Ikon) da Andor de 2048x2048 pixels, montado na camera direta 2, com uma roda de filtros UBVRI e CCD de guiagem. Nesta configuração instrumental é obtida uma resolução de 0.34" por pixel e portanto um campo de 11.6'x11.6'.

A câmera CCD foi configurada para obter uma relação balanceada entre tempo de leitura, nível de ruído e sensibilidade do sensor. De forma a aumentar a resolução temporal mas continuando capaz de captar pequenas variações de brilho. Para isso foi consultada a tabela fornecida pelo observatório com as informações sobre sensibilidade e ruído de leitura para cada configuração e para descobrir o tempo de leitura foram feitos testes tirando imagens de exposição mínima. Ao fim foi escolhido usar uma taxa de leitura (A/D rate) de 1 MHz e pre-amplificação de 1x, resultando num tempo de leitura de aproximadamente 7 segundos.

Foram tiradas imagens de calibração do tipo Bias e Flat. As de Dark não são necessárias nesse CCD pois o mesmo é refrigerado a aproximadamente -70°C, o que impede o acúmulo de ruído térmico nos tempos de exposição utilizados.

As imagens de Flat foram tiradas com base em testes feitos para cada filtro que seria utilizado, para isso foram verificados o limite de saturação para os filtros escolhidos na configuração instrumental adotada e as lâmpadas de calibração disponíveis. Foi escolhido usar 21 exposições de cada tipo com tempos de exposição variando de acordo com o filtro. Os tempos de exposição foram escolhidos de forma a manter os pixels fora do limite de não linearidade.

No OPD não é disponibilizada uma calculadora de tempos de exposição para os CCD's, portanto foram escolhidos para cada alvo com base em uma fotometria por abertura rápida das estrelas dos aglomerados em dois filtros no início da primeira noite de observação. Para isso foi utilizado o pacote DAOPHOT (Stetson) do software Image Analysis and Reduction Facility (IRAF).

Com esses dados, usando um programa de manipulação rápida de dados (Topcat) foi plotado o diagrama cor-magnitude (CMD) instrumental dos aglomerados onde foi identificado a faixa onde as estrelas de interesse estariam. Esta faixa é onde passa o ramo horizontal no CMD de um aglomerado globular. Com base nisso foi escolhido um tempo de exposição onde as estrelas com $V = 20$ mag tivessem um erro instrumental de

aproximadamente 0.15 magnitude, o que faz com que na faixa de interesse o erro instrumental seja menor que 0.05 magnitude. Foram escolhidos tempos de exposição de 30 a 120 segundos dependendo do brilho aparente do alvo.

Os parâmetros foram escolhidos de forma a deixar margens devido a natureza do estudo, pois o mesmo deve ser realizado ao longo de longos períodos e portanto as condições de observação e da própria instrumentação acabam variando. Por isso foi escolhida a técnica de fotometria diferencial para a montagem das curvas de luz.

As observações foram feitas de forma a cobrir o maior intervalo de tempo possível, portanto as imagens foram tomadas em massas de ar variando de 1 até aproximadamente 2.5. Durante as observações o perfil de brilho foi monitorado para variações no foco e problemas com o acompanhamento. Também foram tomadas notas para auxiliar o processo de redução. Para conseguir tempos de exposição de 120 segundos foi necessário usar o sistema de guiagem disponibilizado pelo OPD.

3.2 Redução dos dados

Todos os dados foram inspecionados com a ajuda do registro de observações para garantir que todas as imagens estivessem no padrão de qualidade adotado, com isso foram removidas imagens indicadas no registro. E todas as imagens restantes foram visualizadas para achar variações devido a fatores climáticos bem como variações no perfil de brilho.

Nas imagens restantes foram aplicadas as correções usando as imagens de calibração. Sendo a subtração do ruído de base (bias) e normalização da sensibilidade individual dos pixels (flat). As imagens resultantes foram organizadas 5 a 5 para combinação, obtendo assim o sinal ruído referente a uma imagem de 600 segundos. Elas foram combinadas usando a mediana para remover a interferência de raios cósmicos.

Das imagens finais foi escolhida uma imagem de referência para o alinhamento das demais e detecção de fontes para gerar um catálogo de referência geral com base no número de referência gerado pelo software e posições no eixo X e Y do CCD. Para isso foram usadas novamente rotinas do IRAF.

Esse catálogo de posições foi usado para realizar a fotometria em todas as estrelas das imagens. Para isso foram utilizadas as rotinas do IRAF de fotometria por abertura.

Os parâmetros usados para a fotometria de abertura foram ajustados para cada imagem, de acordo com a variação do brilho do céu e tamanho angular das estrelas. Elas foram medidas para cada imagem usando a tarefa `imexamine` do IRAF.

Os arquivos individuais gerados pelo IRAF foram montados em uma tabela no formato CSV com a série temporal usando uma rotina desenvolvida usando a linguagem de programação Python.

3.3 Análise dos dados

A análise foi feita usando a técnica de fotometria diferencial para a obtenção de curvas de luz mais precisas, evitando assim o problema da variabilidade das condições de observação.

A fotometria diferencial consiste na comparação do brilho das estrelas relativo a um referencial dentro de cada imagem. O referencial de brilho adotado para a fotometria diferencial foi uma média do brilho aparente das estrelas com brilho médio maior do que as

estrelas no ramo horizontal do CMD, pois a princípio essas estrelas não são variáveis e tem a melhor razão sinal ruído. Com isso foi construída uma nova curva de luz, só que usando a diferença entre o brilho aparente das estrelas e o brilho de referência.

Para realizar a detecção das variáveis foram usados métodos de seleção baseados na natureza das RR Lyr, ou seja, sabemos a faixa de brilho na qual essas estrelas devem estar baseando-se no CMD, e a variabilidade típica desses objetos é de 1.5 magnitude, de forma que a variação máxima na curva de luz desses objetos deva ser da mesma ordem. Baseado nisso foram desenvolvidas rotinas em Python para realizar a fotometria diferencial na série temporal, coletar as estatísticas das séries, aplicar os cortes discutidos e retornar as candidatas a RR Lyr baseado no desvio padrão da série. As estrelas candidatas tiveram as curvas analisadas visualmente para a seleção final, e foram selecionadas aquelas com a forma conhecida da variabilidade das RR Lyr.

Por fim foi feita a solução astrométrica na imagem de referência para cruzar as estrelas selecionadas com as estrelas conhecidas em catálogos de estrelas variáveis (Clement et al. 2001, edição 2017). Foi realizada uma busca usando o software Aladin onde selecionamos todas as RR Lyr conhecidas para comparação. Com isso foi determinada uma taxa de sucesso na detecção de estrelas, no filtro V com relação ao centro do aglomerado. Foi considerado como centro a região do aglomerado englobada pelo raio á meia luz (R_{hl}), um parâmetro estrutural do aglomerado, e como periferia toda a região fora dele. No caso de NGC1261, $R_{hl}=41''$ (Harris 1996, edition 2010).

4. Resultados e Discussão

Devido ao mal tempo, foi possível observar em apenas em 2 das 10 noites alocadas para o projeto, dias 21 e 30 de Outubro de 2018. O tamanho angular típico das estrelas foi de aproximadamente $1.8''$ durante todas as observações. Os dados obtidos estão nas tabelas 1 e 2 mostradas abaixo:

Tabela 1: Dados obtidos no dia 21 de Outubro de 2018

Objeto	Tipo de Imagem	Apontamentos	Exposições	Total de Imagens
-	Bias	-	21	21
-	Flat	-	21x20s (B)	21
-	Flat	-	21x4s (VI)	42
HD 11667	Ciência	10	3x30s (BVI)	90
NGC 1261	Ciência	2	5x120s (BVI)	30
NGC 1261	Ciência	7	5x120s (VI)	70
NGC 1261	Ciência	2	10x60s (I)	20
M 11	Ciência	3	5x120s (BVI)	45
M 11	Ciência	1	3x15s (BVI)	9
-	Todos	-	-	390

Tabela 2: Dados obtidos no dia 30 de Outubro de 2018

Objeto	Tipo de Imagem	Apontamentos	Exposições	Total de Imagens
-	Bias	-	21	21
-	Flat	-	21x20s (B)	21
-	Flat	-	21x4s (VI)	42
HD 11667	Ciência	5	3x30s (BVI)	45
NGC 1261	Ciência	1	5x120s (BVI)	15
NGC 1261	Ciência	4	5x120s (VI)	40
M 11	Ciência	4	5x120 (V)	20
-	Todos	-	-	204

Foi decidido focar nos dados de NGC 1261 pois foi o objeto para o qual foi coletado mais pontos na curva de luz. Os dados do dia 30 não foram integrados aos resultados pois até o momento não foi desenvolvida a tarefa para colocar em fase os dados de observações espaçadas.

O diagrama com magnitude utilizado para guiar a escolha dos tempos de exposição e magnitudes de referência foi semelhante ao apresentado na figura 1

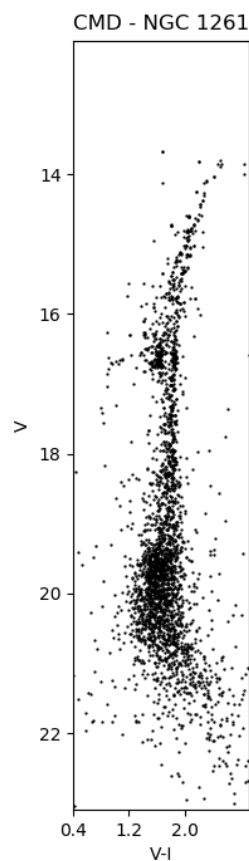


Figura 1: CMD instrumental de NGC 1261

A partir dele verificamos que magnitude média no ramo horizontal é por volta de 17 magnitudes. E para 120 segundos de exposição o ramo horizontal ficou com o erro

instrumental inferior a 0.05 magnitudes como mostrado na figura 2.

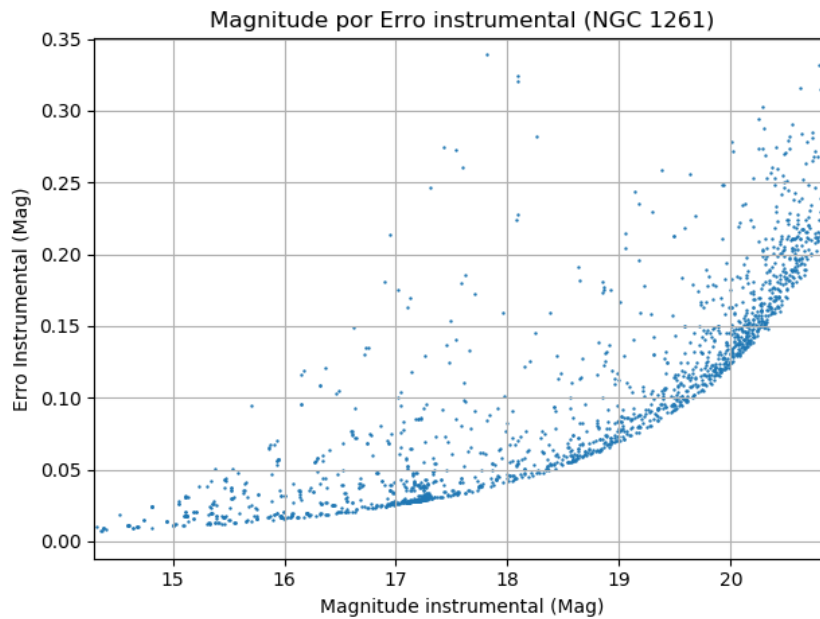


Figura 2: Erro na magnitude instrumental em V em função da própria magnitude instrumental obtida em uma imagem de NGC1261 de 120s

Para a série temporal obtida usando apenas a fotometria por abertura foi obtida a seguinte relação entre o desvio padrão e a magnitude apresentada na figura 3.

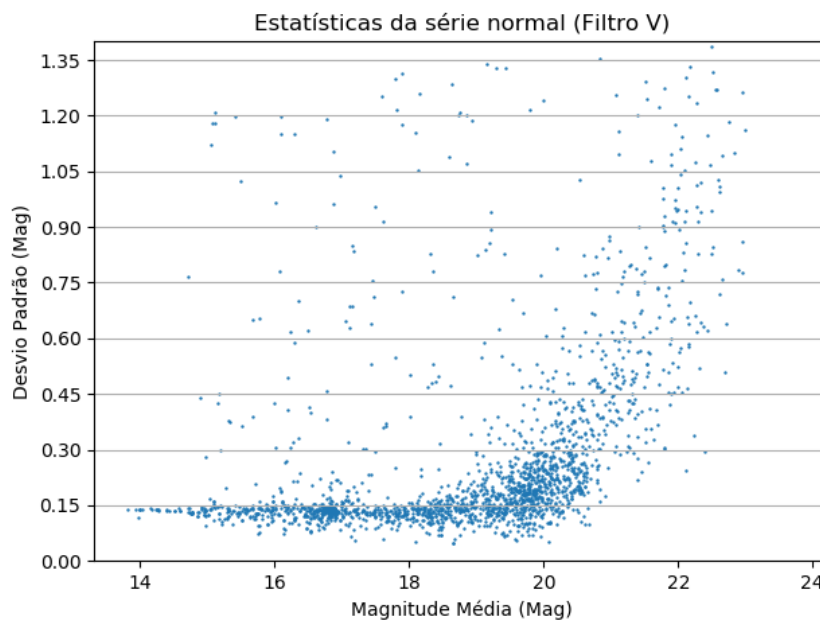


Figura 3: Desvio padrão em V na série temporal em função da magnitude média instrumental (sem fotometria diferencial).

Por outro lado, aplicando-se a técnica de fotometria diferencial foi obtido o gráfico apresentado na Figura 4.

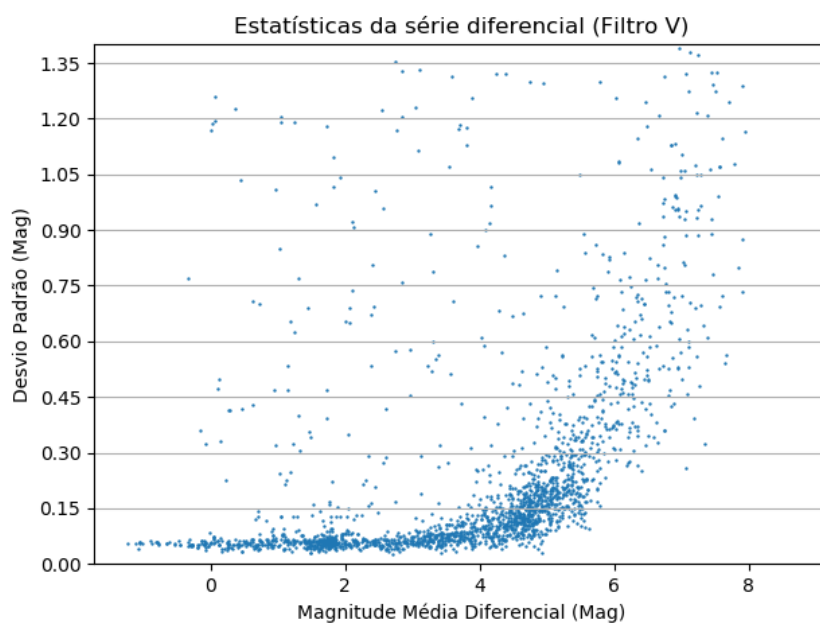


Figura 4: Desvio padrão em V na série temporal em função da magnitude diferencial média

Usando a fotometria diferencial obtivemos uma diminuição na variabilidade do brilho das estrelas mais brilhantes de aproximadamente 0.15 para 0.05 magnitude. A partir da análise das séries temporais foi possível detectar variáveis RR Lyrae conhecidas (Clement et al. 2001 – 2017 edition), tal como apresentado na Figura 5.

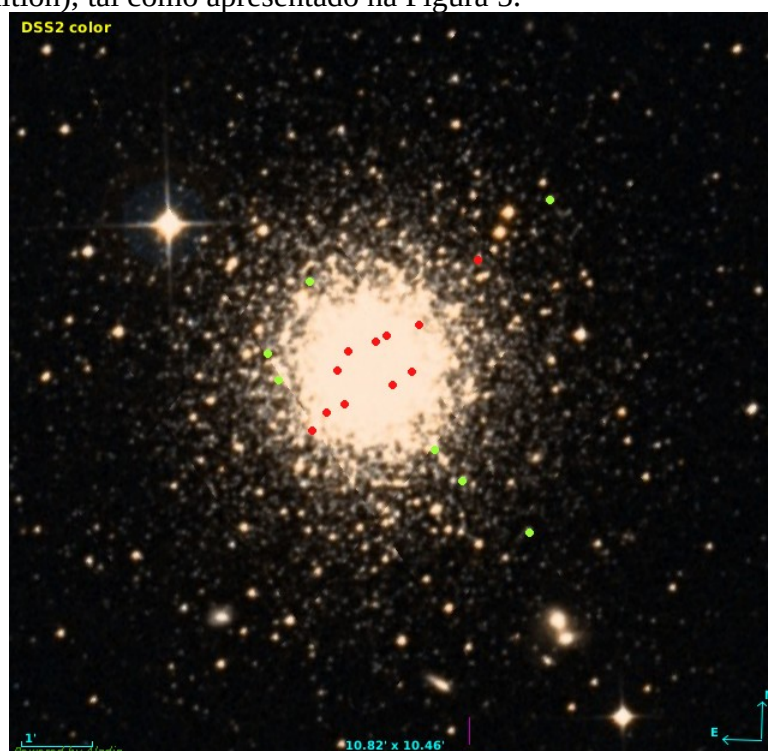


Figura 5: Estrelas RR Lyrae conhecidas (pontos vermelhos e verdes) e as detectadas (pontos verdes).

As estrelas marcadas são todas as RR Lyr conhecidas na literatura e as em verde foram as detectadas. Foi obtida uma taxa de sucesso de 0% na região central do aglomerado ($R < 2 R_{hl} = 82''$, onde R_{hl} é o raio a meia luz) e 77.8% (7/9) na região periférica ($R > 2 R_{hl} = 82''$).

Dentre as curvas das estrelas apontadas pela rotina em Python temos curvas como as das Figuras 6 e 7.

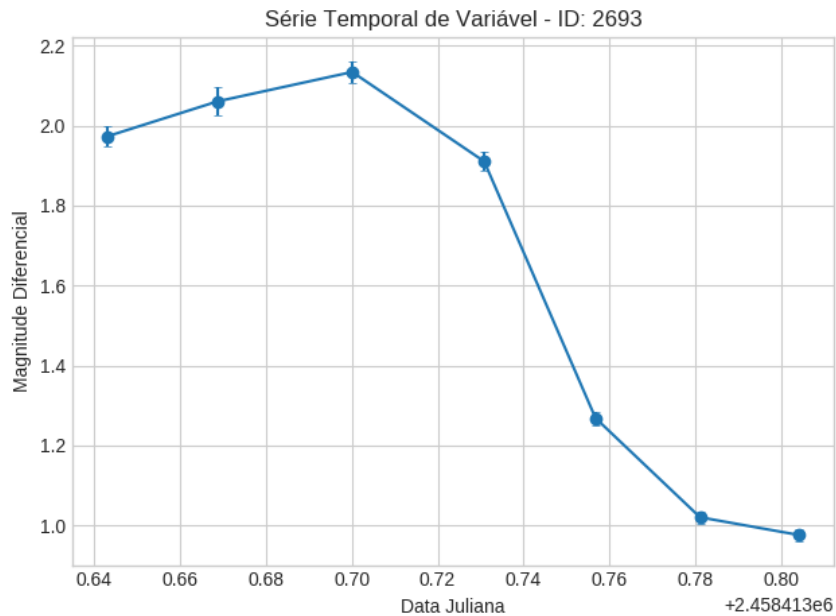


Figura 6: RR Lyr catalogada V8.

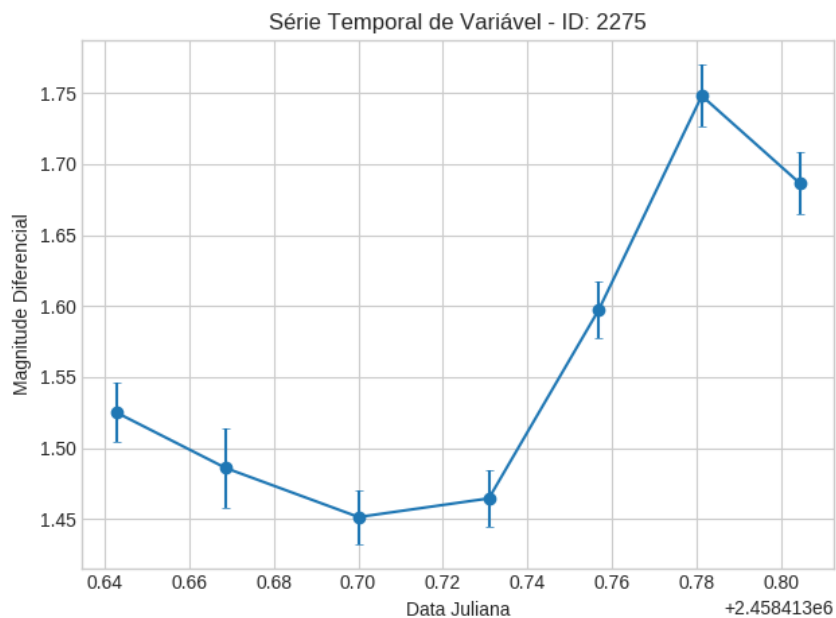


Figura 7: RR Lyr catalogada V13.

Tais figuras representam o comportamento típico da variação de brilho em uma estrela do tipo RR Lyr, ou seja, o brilho aumenta de forma bastante rápida e diminui num ritmo reduzido, característico do mecanismo de pulsação dessas estrelas. Ambas as estrelas estão

localizadas na parte periférica do aglomerado.

Na parte central não foram feitas detecções mas alguns casos recuperados a partir dos catálogos apresentam a característica da variável apresentada na Figura 8.

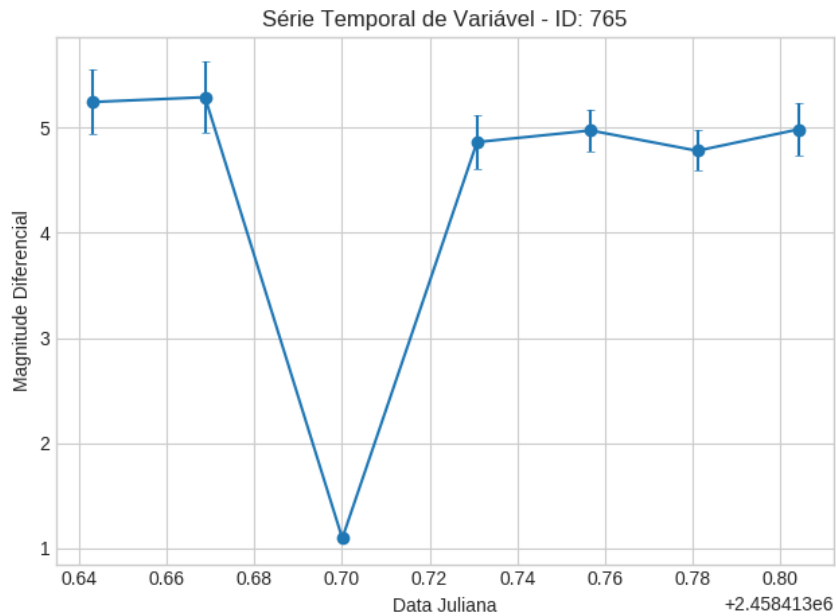


Figura 8: RR Lyr catalogada V3.

Nesse caso houve uma variação de brilho muito além do esperado, isso ilustra provavelmente o efeito de crowding em partes centrais de um globular. Uma variação de brilho nessa escala provavelmente foi causada pela falta de separação angular entre estrelas, fazendo com que o brilho delas seja somado quando o software não consegue resolvê-las.

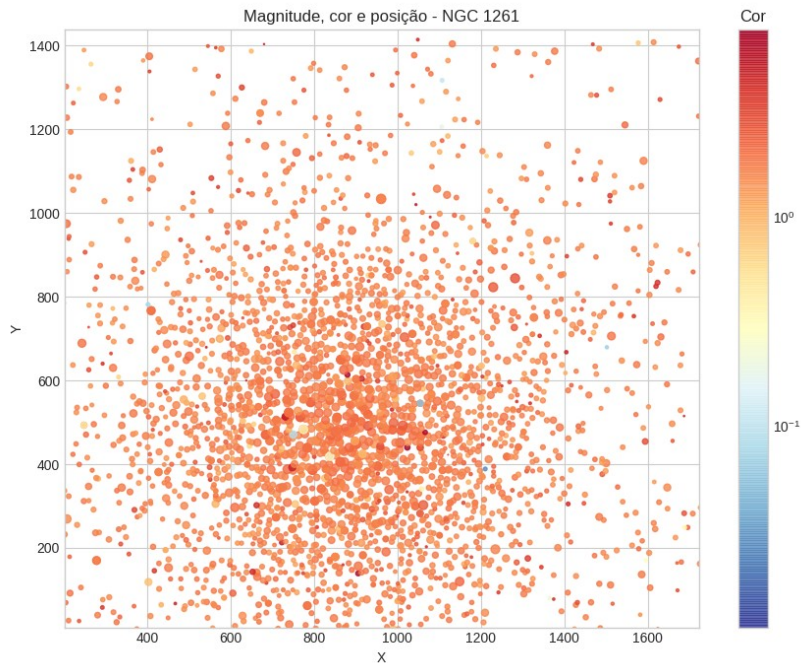


Figura 9: Estrelas detectadas pelo IRAF (posição, cor, e magnitude)

Na figura acima (Figura 9) podemos ver esse efeito a medida que olhamos em direção ao centro. Nessa região as estrelas do aglomerado que são detectadas são aquelas cujo a magnitude (representada pelo tamanho dos pontos) é maior.

Portanto, nas regiões onde a densidade de estrelas é maior a técnica de fotometria por abertura falha. Nesse caso a fotometria via ajuste de PSF (point spread function) seria a mais apropriada, e a aplicação dessa técnica está sendo estudada. Atualmente avaliamos globulares cuja amostra de RR Lyrae nas suas periferias é pouco conhecida.

Cabe ressaltar que um telescópio desse porte seria mais apropriado para estudar os aglomerados abertos, uma vez que nestes objetos a resolução angular da ordem de 2" no OPD é boa o suficiente para resolver todas as estrelas no aglomerado. Com base nisso o foco na continuação do projeto está se encaminhando para o estudo de estrelas do tipo Delta Scuti em aglomerados abertos. Um estudo preliminar dos dados de M11 e HD11667 apontam que a instrumentação disponível seria apropriada para isso.

5. Conclusões

Com o estudo realizado foi possível desenvolver uma técnica para a detecção de estrelas variáveis em aglomerados estelares. Com a metodologia utilizada foi obtida uma taxa de sucesso de 78% em regiões com densidade de estrelas não muito altas. Foi possível ver que com um telescópio de pequeno porte em apenas uma noite é possível estudar esse tipo de objeto e detectar variáveis com uma boa taxa de sucesso através da técnica de fotometria diferencial, dado que as mesmas não estejam localizadas em um campo muito denso de estrelas. No entanto percebemos a necessidade do refinamento da técnica de fotometria e análise para esse fim.

Com a experiência obtida foi possível encaminhar o estudo num caminho mais apropriado dada a infraestrutura disponível, voltando-se para o estudo de sistemas onde não seja a resolução angular não seja tão crucial.

6. Referências

Clement et al. 2001, AJ, 122, 2587
Gaia Collaboration et al. 2017, A&A, 605, A79
Harris, W.E. 1996, AJ, 112, 1487 (2010 edition <http://physwww.mcmaster.ca/~harris/mwgc.dat>)
Kerber et al. 2018, ApJ, 853, 15
Kerber et al. 2019, MNRAS, 484, 5530
Leavitt & Pickering 1912, Harvard College Observatory, 173, 1
Pickering et al. 1901, ApJ, 13, 226
Sandage & Tammann 2006, ARA&A, 44, 93

7. Publicações

Não houve publicações

	UNIVERSIDADE ESTADUAL DE SANTA CRUZ PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO Gerência de Pesquisa Rodovia Ilhéus-Itabuna, Km 16 – Ilhéus-BA – Brasil - CEP 45.650-000 Fone: (73) 3680-5129 E-mail: gpesquisa@uesc.br

AValiação FINAL DE DESEMPENHO DO BOLSISTA
(a ser preenchido pelo orientador)

1. IDENTIFICAÇÃO

1.1. NOME DO BOLSISTA: João Pedro dos Santos Rocha	
1.2. PROGRAMA INSTITUCIONAL DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA <input type="checkbox"/> ICB <input type="checkbox"/> ICV <input checked="" type="checkbox"/> CNPq <input type="checkbox"/> CNPq-AF <input type="checkbox"/> PIBIC EM	
1.3. NOME DO ORIENTADOR: Leandro de Oliveira Kerber	
1.4. DATA DE INGRESSO NA EQUIPE: 01/08/2018	1.5. PERÍODO DAS ATIVIDADES DESENVOLVIDAS: 01/08/2018 a 31/07/2019
1.6. TÍTULO DO PROJETO DE PESQUISA: Estrelas RR Lyrae e Cefeidas Clássicas como indicadores de distância de aglomerados estelares	1.7. N° CADASTRO PROPP:
1.8. TÍTULO DO PROJETO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA: Estrelas RR Lyrae e Cefeidas Clássicas como indicadores de distância de aglomerados estelares – Observatório Astrônomico/ UESC	

2. DESEMPENHO

2.1. PARTICIPAÇÃO DO BOLSISTA NO DESENVOLVIMENTO DO PROJETO E, OU GRUPO DE PESQUISA (atribuir notas de 0 – 5)		
		NÃO SE APLICA
AULAS E SEMINÁRIOS:	(5)	()
APRESENTAÇÃO DE COMUNICAÇÕES EM SEMINÁRIOS/CONGRESSOS:	(5)	()
DISCUSSÕES TÉCNICAS:	(5)	()
COLETA DE DADOS:	(5)	()
ANÁLISE DE DADOS:	(5)	()
OUTROS TIPOS DE PARTICIPAÇÃO (ESPECIFICAR):	()	()
2.2. ANÁLISE DO DESEMPENHO (atribuir notas de 0-5):		

INICIATIVA:	(5)	CRIATIVIDADE:	(5)
LIDERANÇA	(5)	QUALIDADE DOS TRABALHOS DESENVOLVIDOS/RESULTADO FINAL	(5)
CAPACIDADE DE REFLEXÃO	(5)	CAPACIDADE DE DISCUSSÃO	(5)
ASSIDUIDADE:	(5)	RESPONSABILIDADE:	(5)

3. PARECER (OBRIGATÓRIO) E OBSERVAÇÕES (SE HOUVER)

O aluno João Pedro apresentou excelente rendimento no seu primeiro ano como aluno de IC deste projeto, demonstrando alto interesse, dedicação e capacidade de trabalho para planejar e realizar observações astronômicas (tanto presenciais quanto remotas) e para aprender e desenvolver ferramentas de redução e análise de imagens. O aluno também apresentou um rápido e crescente amadurecimento no tema da pesquisa, demonstrando muita iniciativa para discussões científicas. Além disso o aluno interage bem com os demais integrantes do grupo, muitas vezes auxiliando os demais em aspectos técnicos de redução e análise de dados. Recomendo fortemente sua continuidade no programa de IC da UESC.

4. CONTINUIDADE NO PROGRAMA

RECOMENDA (X)	NÃO RECOMENDA ()
-----------------	-------------------