

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Instituto de Física - Departamento de Astronomia

ANÁLISE DE SISTEMAS TÊNUES DO HALO
GALÁCTICO

Guilherme Müller Lopes

Porto Alegre
2024

Guilherme Müller Lopes

ANÁLISE DE SISTEMAS TÊNUES DO HALO GALÁCTICO

Monografia apresentada ao curso Bacharelado em Física com ênfase em Astrofísica do Instituto de Física - Departamento de Astronomia, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito para a obtenção do grau de Bacharelado em Física..

Orientador:

Prof. Dr. Basílio Santiago

Porto Alegre, fevereiro de 2024

Resumo

Neste trabalho, discutimos galáxias anãs satélites da Via Láctea e aglomerados tênues do halo, suas propriedades estruturais e suas populações estelares. Revisamos descobertas recentes e seu papel no estudo da formação da Galáxia e das limitações do modelo padrão da cosmologia. Para isso foi feita uma extensa busca na literatura por objetos recentemente descobertos e suas propriedades físicas, assim como métodos para analisar suas propriedades estruturais e suas populações estelares.

Revisamos como os surveys digitais, como Dark Energy Survey (DES) e Sloan Digital Sky Survey (SDSS), trouxeram uma era de ouro no estudo destes objetos, e como com início da operação do Large Synoptic Survey Telescope (LSST) devemos ter a descoberta de múltiplos novos objetos, assim nos proporcionando um censo mais completo de satélites da Via Láctea.

Também foram criados códigos que geram objetos e diagramas cor-magnitude sintéticos. Essas simulações foram utilizadas para testar códigos de ajuste estrutural e de isócronas. Após os testes bem sucedidos com dados sintéticos, foi feita a análise de cinco objetos descobertos na última década, Reticulum II, Eridanus II, Horologium I, Leo IV e Pegasus III. Pelo modelamento destes objetos, foram calculados seus parâmetros estruturais e a sua distância.

Palavras-chave: galáxias anãs, galáxias anãs ultra fracas, galáxias satélites, aglomerados fracos do halo.

Abstract

In this paper, we discussed dwarf galaxy satellites of the Milky Way and faint halo clusters, their structural properties and their stellar populations. We reviewed recent discoveries and their role in the study of the formation of the Galaxy and of the small-scale limitations of the standard model of cosmology. For this purpose, an extensive search in the literature was made for newly discovered objects and their physical properties, as well as methods for analyzing their structural properties and their stellar populations.

We review digital surveys, such as Dark Energy Survey (DES) and Sloan Digital Sky Survey (SDSS), and how they brought a golden age in the study of these objects, and how the start of operations of the Legacy Survey of Space and Time (LSST) should bring the discovery of multiple new objects, thus providing us with a more complete census of the Milky Way satellites.

Also were created codes that generate synthetic objects and color-magnitude diagrams. These simulations were used to test codes for structural and isochrone fitting. After successful tests with synthetic data, we carried out the analysis of five objects discovered in the last decade, Reticulum II, Eridanus II, Horologium I, Leo IV and Pegasus III. By modeling these objects, we calculated their structural parameters and the distances to them.

Keywords: dwarf galaxies, ultra-faint dwarf galaxies, satellite galaxies, faint halo clusters.

Sumário

1	INTRODUÇÃO	6
1.1	Modelo Padrão da Cosmologia	6
1.2	Limitações do modelo ΛCDM	7
1.2.1	Problema <i>Too-big-to-fail</i>	7
1.2.2	Cusp/Core Problem	8
1.2.3	O Problema dos Satélites Faltantes	8
1.3	Aglomerados Globulares e Aglomerados Tênues do Halo	9
1.4	Galáxias Satélites	10
2	METODOLOGIA	14
2.1	Objetos Sintéticos	14
2.2	CMDs Sintéticos	15
2.3	Ajuste estrutural	16
2.3.1	Perfil Exponencial	17
2.3.2	Perfil de Plummer	17
2.3.3	Perfil de King	17
2.4	Ajuste de Isócronas	18
3	DADOS	20
3.1	DES	20
3.2	HSC-SSP	20
4	RESULTADOS	21
4.1	Análise de objeto e CMD sintéticos	21
4.2	Análise de objetos reais	23
4.2.1	Reticulum II	23
4.2.2	Eridanus II	25
4.2.3	Horologium I	25
4.2.4	Leo IV	26
4.2.5	Pegasus III	27
5	CONCLUSÕES	28
	REFERÊNCIAS	30
A	CORNER PLOTS	34

1 INTRODUÇÃO

As últimas décadas têm sido muito produtivas no estudo de objetos tênues que habitam o halo da Via Láctea. Estes podem ser divididos em galáxias anãs ultra fracas (*Ultra-Faint Dwarf Galaxies*, UFDs), aglomerados tênues do halo (*Faint Halo CLusters*, FHCs) e objetos de transição, que são objetos que não apresentam classificação definida e apresentam parâmetros estruturais que os colocam no limiar entre os aglomerados estelares mais distendidos e as galáxias anãs mais compactas.

Nos últimos anos foram descobertos dezenas de novos objetos no halo da Galáxia (Koposov et al. 2015, Luque et al. 2016, Torrealba et al. 2018 entre outros). E, conforme já mencionado, estas descobertas foram feitas utilizando vários surveys como Dark Energy Survey (DES) (Collaboration 2016), Sloan Digital Sky Survey (SDSS) (Gunn et al. 2006), Panoramic Survey Telescope and Rapid Response System (Pan-STARRS) (Chambers et al. 2019) e DECam Local Volume Exploration survey (DELVE) (Drlica-Wagner et al. 2021).

Estes objetos são ferramentas de grande importância para o estudo da matéria escura em pequenas escalas e suas propriedades, bem como para estudos sobre a formação da Galáxia. Dessa forma, obtermos um censo completo dos objetos que habitam o halo da Galáxia é importante para melhorar o entendimento da formação e evolução da Galáxia e de seus sistemas de satélites.

1.1 Modelo Padrão da Cosmologia

A definição de um modelo padrão cosmológico está em constante evolução, com aprimoramentos sendo feitos a partir de novas descobertas e resultados experimentais, mas a maioria dos cosmólogos concorda com um evento fundamental, o chamado Big Bang, que descreve o Universo como um sistema evoluindo a partir de um estado primordial muito denso e quente que existiu há aproximadamente 13.8 bilhões de anos. O modelo cosmológico mais aceito atualmente é o Lambda Cold Dark Matter (Λ CDM). Neste modelo a letra Λ representa a constante cosmológica, atualmente associada a energia escura ou “energia do vácuo”, que é utilizada para explicar a expansão acelerada do Universo contra a atração Gravitacional gerada por toda a matéria presente no Universo.

Já o Cold Dark Matter ou Matéria Escura Fria, CDM, representa um novo tipo partícula ainda não detectada diretamente, que, conforme a hipótese atual, tem como características: (i) não bariônica: esta matéria não é composta por bárions, como prótons e nêutrons; (ii) fria: a velocidade dessas partículas é muito menor que velocidade da luz

na época em que matéria e a radiação ainda estavam acopladas, o que exclui os neutrinos como possíveis candidatos; (iii) sem dissipação : não pode se resfriar via emissão de fótons; (iv) sem colisão: as partículas que compõem a matéria escura interagem unicamente através da gravidade.

O Λ CDM, assim como a maioria dos modelos cosmológicos, se baseia nos conceitos de que o Universo, em escalas suficientemente grandes é: i) isotrópico, ou seja, parece o mesmo ao ser observado em todas as direções; ii) homogêneo, ou seja, as estruturas que formam o Universo em grandes escalas são as mesmas em todos os locais. Este modelo utiliza a métrica de Friedmann – Lemaître – Robertson – Walker, as equações de Friedmann e as equações de estado cosmológicas, e é capaz de descrever a evolução do Universo observável desde logo após a inflação até o presente e o futuro. O Universo como descrito pelo Λ CDM possui um parâmetro de densidade $\Omega_0 = \epsilon_0/\epsilon_{c,0} = 1$. Nessa expressão, ϵ é a densidade de energia total do Universo, ϵ_c é a densidade de energia crítica do Universo, que o torna espacialmente plano, enquanto o índice 0 se refere à época atual. Esse valor então implica em uma geometria plana, sendo que Ω_0 é a soma de três componentes básicos: a matéria com $\Omega_M \sim 0.3$, onde a matéria escura contribui com $\Omega_{CDM} \sim 0.22$ e a matéria bariônica contribui com $\Omega_B \sim 0.05$; energia escura com $\Omega_\Lambda \sim 0.7$ e; radiação com $\Omega_R \sim 4 \times 10^{-5}$. Este modelo é capaz de descrever as propriedades do Universo observável com boa precisão, incluindo a abundância de hidrogênio, hélio e lítio no Universo, a distribuição de galáxias em grandes escalas, a radiação cósmica de fundo de micro-ondas e a expansão acelerada do Universo.

1.2 Limitações do modelo Λ CDM

Mesmo com o sucesso do Λ CDM ao descrever o Universo em grandes escalas, ainda existem problemas com este modelo. Ao se aplicar o Λ CDM em pequenas escalas ($<1\text{Mpc}$) os resultados de simulações de N-corpos diferem dos resultados observacionais. Em seguida serão discutidas as principais discrepâncias entre observações e o modelo.

1.2.1 Problema *Too-big-to-fail*

Com o aprimoramento de simulações da formação da Via Láctea, grande atenção foi dada aos satélites mais luminosos da Via Láctea, que devem corresponder aos subhalos mais massivos presentes nas simulações de N-corpos. Entretanto, estes subhalos mais massivos previstos pelo Λ CDM apresentam densidades nas suas regiões centrais maiores que as densidades observadas nos satélites da Via Láctea, assim não sendo consistentes com a dinâmica estelar destes objetos (Boylan-Kolchin, Bullock e Kaplinghat 2011). O nome deste problema se origina da expectativa de que estes subhalos seriam muito massivos para falharem (*too big to fail*) na formação estelar e assim hospedariam satélites observáveis.

Este problema não está limitado a população de satélites da Via Láctea, também sendo observado na população de satélites da Galáxia de Andrômeda (Tollerud, Boylan-Kolchin e Bullock 2014) e na população de galáxias anãs do campo (Papastergis et al. 2015).

1.2.2 Cusp/Core Problem

Este é outro problema que surge de simulações de N-corpos utilizando as prescrições do modelo Λ CDM. Estas simulações preveem perfis de densidade que seguem leis de potência íngremes, o chamado *cusp*, para as regiões centrais de galáxias anãs. Isso difere dos perfis observados para algumas galáxias anãs, que têm densidades aproximadamente constantes no centro, o chamado *core*. Essa discrepância entre simulações e observações deu origem ao *cusp/core problem*. Esta diversidade em distribuições de densidade levou ao surgimento de várias hipóteses para explicá-la. Há novos modelos de matéria escura que explicam esta diversidade de perfis, como a Matéria Escura Auto-Interagente, *Self-Interacting Dark Matter* (Kahlhoefer et al. 2019), e *Fuzzy Dark Matter* (Schive, Chiueh e Broadhurst 2014). Há ainda explicações fenomenológicas, como gás expelido por supernovas transferindo energia para a matéria escura no centro da galáxias anã e assim formando o *core* (Governato et al. 2012).

1.2.3 O Problema dos Satélites Faltantes

O Modelo Λ CDM prevê uma formação hierárquica de estruturas, com pequenos subhalos de matéria escura se formando primeiro, com halos maiores sendo formados pela fusão de subhalos menores. Isto implica que deve haver de matéria em todas as escalas de massas resolvidas. Esses halos teriam uma função de massa continua e sem quebras. O Problema dos Satélites Faltantes surge desta discrepância aparente entre o número de satélites observados e o número de satélites previstos. Uma das interpretações mais populares deste problema é que os menores halos de matéria escura são ineficientes na formação estelar.

Este problema não recebeu muita atenção até que no final dos anos 1990 os primeiros resultados numéricos para o número de satélites previsto foram obtidos. Eles previam mais de 50 satélites orbitando a Via Láctea, enquanto na época apenas 12 satélites eram conhecidos (Klypin et al. 1999).

Desde o início dos anos 2000 dezenas de novos satélites e candidatos foram descobertos através dos surveys digitais como DES e Pan-STARRS. Simulações recentes (Nadler et al. 2020) sugerem que, mesmo que não existam muitos satélites a serem descobertos, não há mais evidência tão forte para o problema dos satélites faltantes.

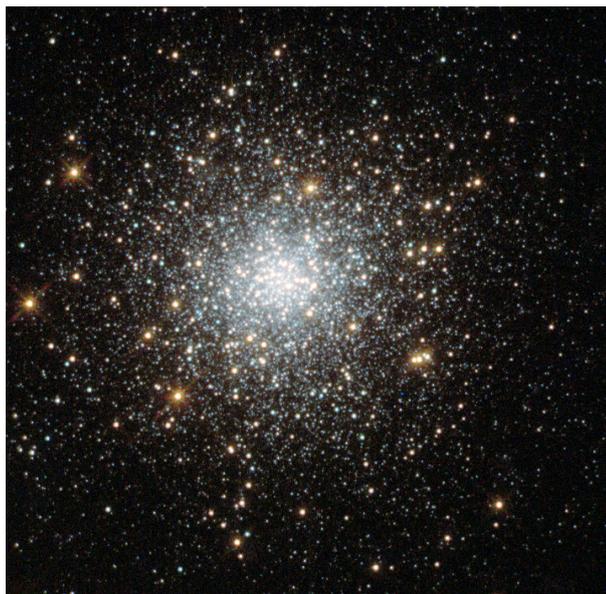


Figura 1 – Fornax 5, aglomerado globular na galáxia anã Fornax. Fonte: <https://esahubble.org/imagess>

1.3 Aglomerados Globulares e Aglomerados Tênues do Halo

Estrelas raramente nascem sozinhas. Geralmente estrelas nascem em aglomerados estelares. As estrelas de um aglomerado se formam de uma única nuvem molecular e em um curto espaço de tempo. Portanto, as estrelas pertencentes a um aglomerado estelar têm idades e metalicidade semelhantes, com a diferença maior entre elas sendo suas massas. Aglomerados estelares são objetos formados predominantemente por estrelas que se mantêm ligadas apenas por sua própria atração gravitacional.

Aglomerados globulares (*Globular Clusters*, GCs) são aglomerados estelares massivos, com forma aproximadamente esférica e tamanho de alguns parsecs, com uma grande concentração de estrelas próximas ao seu centro, contendo entre 10^4 e 10^6 estrelas. Eles apresentam populações estelares velhas, a maioria têm idade em torno de 10-12 Ganos, contendo populações estelares entre as mais velhas conhecidas¹ Em sua maioria GCs possuem populações velhas, tanto na Via Láctea quanto em outras galáxias. Suas metalicidades podem variar desde muito pobres, $[Fe/H] = -2$, até metalicidades semelhantes à do Sol, $[Fe/H] = 0$. Na Figura 1 temos Fornax 5, um exemplo de aglomerado globular, situado na galáxia anã de Fornax, satélite da Via-Láctea.

Faint Halo Clusters (FHCs) são aglomerados estelares resolvidos que habitam o halo da Galáxia. Estes objetos possuem populações estelares e tamanhos consistentes

¹ Existem algumas exceções, como por exemplo Palomar 12 (6.5 Ganos) e Whiting 1 (6.5 Ganos) Geisler et al. 2007.

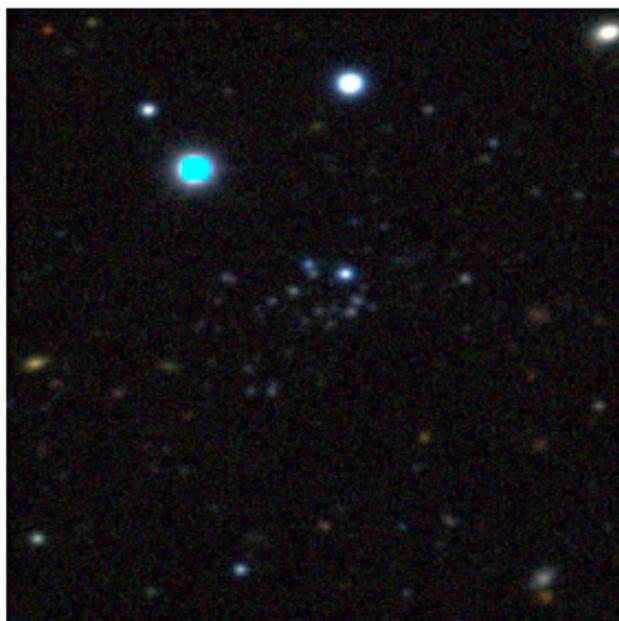


Figure 1. DES coadd image cutout of DES 1 taken from the DES Science portal. The image is $1'.78 \times 1'.78$ centered on DES 1. The R,G,B channels correspond to the i, r, g bands.

Figura 2 – DES 1, Aglomerado Tênuê do Halo. Fonte: Luque et al. 2016

com a população de aglomerados globulares da Galáxia, mas são muito menos luminosos $M_V > -4$. FHCs também diferem dos GCs por terem uma densidade muito mais baixa. Na Figura 2 podemos ver um exemplo de FHCs, DES 1.

1.4 Galáxias Satélites

A Via Láctea possui um vasto sistema de satélites. Atualmente são conhecidos mais de 60 objetos entre satélites confirmados e candidatos, com possivelmente dezmas mais de satélites e candidatos a serem descobertos nos próximos anos com novas observações do Hyper Suprime-Cam Subaru Strategic Program (HSC-SSP) (Miyazaki et al. 2017) e, no futuro, do Large Synoptic Survey Telescope (LSST) (Ivezić et al. 2019).

As UFDs estão entre os objetos mais antigos (13 Ganos), mais pobres em metais ($[Fe/H] < -1.5$) e mais dominados por matéria escura. Estes objetos estão no limite inferior da função de luminosidade das galáxias.

As primeiras galáxias anãs observadas foram a Pequena Nuvem de Magalhães (SMC) e a Grande Nuvem de Magalhães (LMC), que já eram conhecidas desde a antiguidade, e que em torno de 1519 foram avistadas por Fernão de Magalhães e sua tripulação durante a sua expedição de circum-navegação da Terra. As primeiras galáxias anãs clássicas, ou



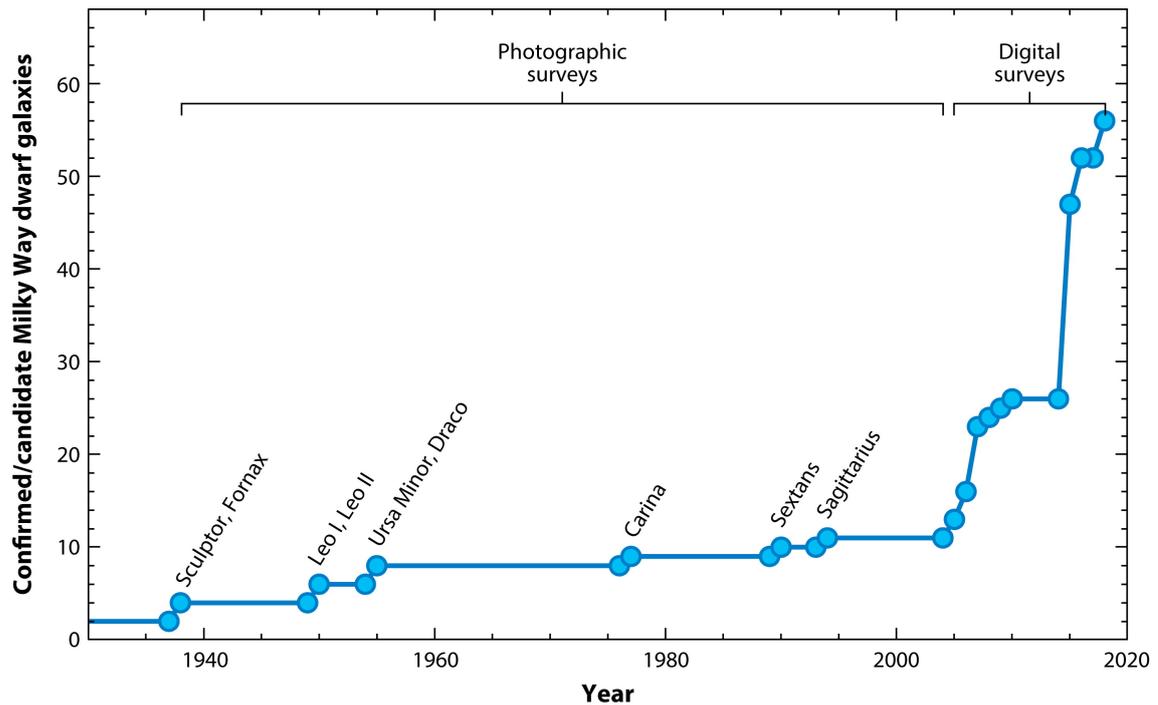
Figura 3 – Galáxia anã Fornax, exemplo de uma galáxia anã clássica. Fonte: <https://esahubble.org/images>

galáxias anãs esferoidais (dwarf Spheroidal Galaxies, dSph), Sculptor e Fornax, foram descobertas em 1938 por Harlow Shapley (Shapley 1938). As outras galáxias anãs clássicas são: Leo I (Harrington e Wilson 1950), Leo II (Harrington e Wilson 1950), Draco (Wilson 1955), Ursa Minor (Wilson 1955), Carina (Cannon, Hawarden e Tritton 1977), Sextans (Irwin et al. 1990), Sagittarius (Ibata, Gilmore e Irwin 1994) e Canis Major (Martin et al. 2004). Na Figura 3 temos uma imagem de Fornax, onde esta galáxia anã é facilmente vista no centro da imagem como uma região com maior densidade estelar em relação ao campo.

No início dos anos 2000 eram conhecidos apenas as anãs clássicas, mas com o início do Sloan Digital Sky Survey (SDSS) (Gunn et al. 2006) e surveys posteriores, o número de satélites e outros objetos que habitam o halo da Via Láctea teve um grande aumento. Este aumento pode ser vista na Figura 4. Na Figura 5 temos o gráfico mostrando magnitude absoluta na banda V (M_V) vs raio à meia-luz para a população conhecida de objetos do halo Galáctico, com destaque para a UFD recém descoberta Pegasus IV. Neste gráfico é possível identificar que diferentes tipos de objetos, aglomerados globulares, aglomerados tênues do halo e galáxias anãs (confirmadas e candidatas) tendem a ocupar regiões distintas do gráfico.

As UFDs são importantes objetos de estudos para diversos tópicos por diferentes como:

- (i) UFDs são os objetos mais dominados por matéria escura.



Simon JD. 2019.
Annu. Rev. Astron. Astrophys. 57:375–415

Figura 4 – Censo de satélites da Via Láctea em função do tempo. Pode ser visto o grande impacto do SDSS(2005-2010) e DES/PanSTARRS(2015). Fonte: Simon 2019

- (ii) UFDs se encontram nos menores halos em que houve formação estelar.
- (iii) UFDs apresentam variação nas fração de elementos produzidos pelo *processo-r*, e portanto são laboratórios para o estudo de processos que formam estes elementos.
- (iv) UFDs possuem populações entre as mais velhas, sendo relíquias da época da formação da galáxia.
- (v) UFDs estão no limite da função de luminosidade das galáxias.

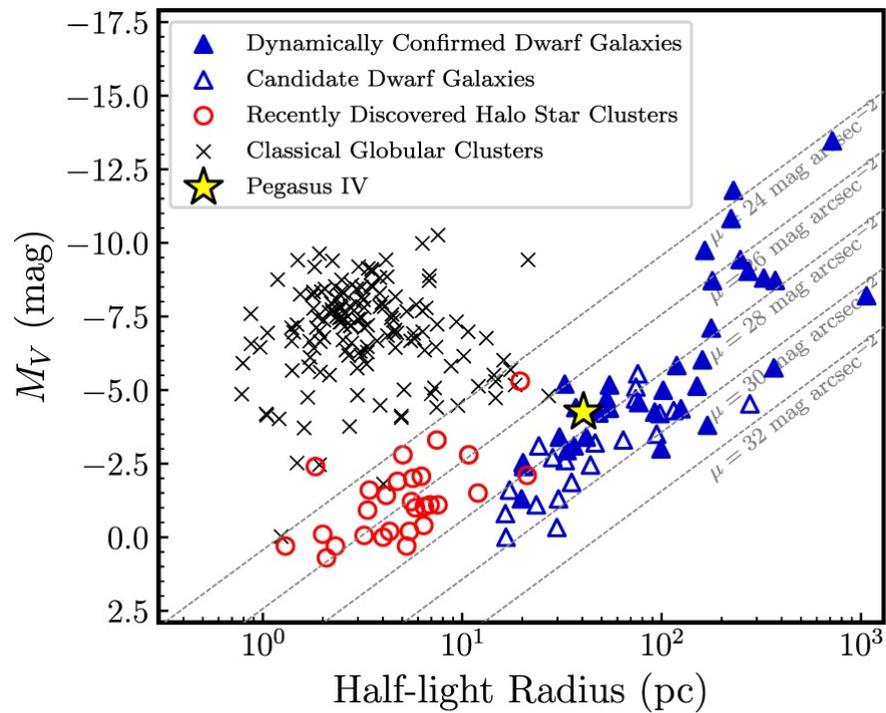


Figura 5 – Gráfico mostrando Magnitude absoluta na banda V (M_V) vs raio á meia-luz para a população conhecida de aglomerados globulares, aglomerados tênues do halo, candidatas a galáxias anãs e galáxias anãs confirmadas. Fonte: Pegasus IV: Discovery and Spectroscopic Confirmation of an Ultra-Faint Dwarf Galaxy in the Constellation Pegasus, Cerny et al. 2023

2 Metodologia

Descrever as propriedades estruturais e da população estelar de um objeto, seja ele recém descoberto ou já conhecido, é um passo fundamental nos estudos das populações de galáxias satélites e FHCs na Via Láctea. Como pode ser visto na Figura 5, o tamanho físico dos objetos é uma maneira de diferenciar galáxias satélites e aglomerados estelares, mas essa diferenciação só é clara para os mais brilhantes ($M_V < -7.5$). Para os objetos menos brilhantes, em especial os objetos com $M_V > -5.0$, esta classificação apenas pelo tamanho físico do objeto se torna menos robusta. É necessário medir a dispersão de velocidades σ das estrelas que compõem o objeto. Como espera-se que as galáxias anãs habitem halos de matéria escura, os objetos que possuem uma dispersão de velocidades muito maior que a causada apenas pela massa estelar deste objeto são então confirmados como galáxias anãs. Para determinar quais estrelas que podem pertencer a estes objetos, é necessário conhecer o tamanho e formato destes objetos. Além disso, ao conhecermos os parâmetros estruturais destes objetos podem ser testadas previsões do Modelo Λ CDM e soluções propostas para os problemas do Modelo Λ CDM em pequenas escalas.

Para fazer os ajustes estruturais e de isócronas, são gerados objetos sintéticos a partir dos perfis de densidade radial comumente usados para ajustar galáxias anãs e aglomerados estelares: perfil exponencial (Martin, Jong e Rix 2008), perfil de Plummer (Plummer 1911) e perfil de King (King 1962). Estes objetos serão gerados com simetria elíptica. Portanto as simulações incluirão parâmetros como elipticidade e ângulo de posição. Essas simulações poderão ou não incluir objetos de fundo. Também são gerados diagramas cor-magnitude (CMDs) sintéticos utilizando funções de massa inicial de Salpeter (Salpeter 1955) e Kroupa (Kroupa 2002) além de isócronas PARSEC (Bressan et al. 2012). Os dados simulados são utilizados para a testagem dos códigos de ajuste estrutural e ajuste de isócronas.

2.1 Objetos Sintéticos

Para cada estrela artificial é primeiro atribuída uma coordenada polar radial r assumindo inicialmente simetria esférica. Essa coordenada é sorteada pelo valor que satisfaz a seguinte equação

$$n \int_0^{r_f} \Sigma(r) dr - \int_0^r \Sigma(r) = 0 \quad (2.1)$$

onde n é número aleatório gerado uniformemente no intervalo $[0,1]$, $\Sigma(r)$ é o perfil de densidade utilizado para caracterizar o objeto e r_f é o valor máximo que a coordenada polar de uma estrela gerada pode assumir. Em seguida é atribuído um valor aleatório,

gerado uniformemente e distribuído ao longo dos 360° da circunferência, para a coordenada polar azimutal ϕ da estrela sintética. As coordenadas polares geradas para de cada estrela podem ser reescritas em coordenadas cartesianas utilizando a seguinte transformação de coordenadas:

$$\begin{aligned}x &= r \operatorname{sen}(\phi) \\y &= r \operatorname{cos}(\phi)\end{aligned}\tag{2.2}$$

onde x e y são as coordenadas espaciais da estrela no sistema de coordenadas cartesianas.

Após o objeto ser gerado com simetria esférica ele pode ser achatado por uma determinada elipticidade ϵ^1 , as coordenadas espaciais cartesianas do objeto achatado são dadas pelas equações:

$$\begin{aligned}x &= (1 - \epsilon)x \\y &= y\end{aligned}\tag{2.3}$$

onde o objeto após ser achatado tem seu semi eixo maior alinhado ao eixo y do plano cartesiano.

Após o achatamento do objeto pode-se também rotacioná-lo por um determinado ângulo de posição θ que tem origem no norte, e cresce de norte para leste, as coordenadas espaciais cartesianas do objeto após esta rotação são dadas pelas equações:

$$\begin{aligned}X &= x \operatorname{cos}(\theta) + y \operatorname{sen}(\theta) \\Y &= -x \operatorname{sen}(\theta) + y \operatorname{cos}(\theta)\end{aligned}\tag{2.4}$$

Também são geradas estrelas de campo distribuídas uniformemente com simetria esférica ao redor do objeto simulado.

2.2 CMDs Sintéticos

Para cada estrela gerada, a sua massa inicial é dada pelo valor de m que satisfaz a seguinte equação

$$n \int_{m_i}^{m_f} \xi(m) dm - \int_{m_i}^m \xi(m) dm = 0\tag{2.5}$$

onde n é um número aleatório gerado uniformemente no intervalo $[0,1]$, $\xi(m)$ é a função de massa inicial escolhida, m_i é a menor massa inicial que essa estrela pode ter e m_f é maior massa inicial que essa estrela pode ter. Em seguida, é feita interpolação da massa m da estrela gerada com uma isócrona escolhida para descrever esta população estelar, assim determinado os valores de magnitude absoluta desta estrela em diferentes bandas espectrais. Em seguida, é adicionada a correção para a extinção $E(B - V)$, que pode

¹ A elipticidade utilizada é definida como $\epsilon = 1 - b/a$, onde b é o tamanho do semi-eixo menor da elipse de semi-eixo maior a

ser convertida em extinção para outras bandas fotométricas na região visível do espectro eletromagnético. Por exemplo, a correção para a extinção nas bandas espectrais g , r e i são dadas respectivamente por

$$\begin{aligned} A_r &= (3.1)E(B - V) \\ A_g &= (1.19863)E(B - V) \\ A_i &= (0.83734)E(B - V) \end{aligned} \quad (2.6)$$

onde A_r , A_g e A_i são somadas as magnitudes M_g , M_r e M_i respectivamente. Em seguida é somado o módulo de distância ($m - M$) às magnitudes absolutas das estrelas geradas, resultando em suas magnitudes aparentes. Também são adicionados aos valores de magnitude aparente erros fotométricos com valores aleatórios gerados a partir de uma distribuição Gaussiana, com média $\mu = 0$ e desvio padrão σ determinado pela curva de erros fotométricos associada a um certo conjunto de dados que queremos descrever com nossa síntese.

2.3 Ajuste estrutural

O ajuste estrutural dos objetos é feito com o método de Monte Carlo via Cadeias de Markov (MCMC) utilizando o pacote Python EMCEE (Foreman-Mackey et al. 2013) para calcular a probabilidade de cada estrela pertencer a um modelo com determinado conjunto de valores para os parâmetros que estão sendo ajustados. Para uma dada estrela com ascensão reta e declinação (α_i, δ_i) , e coordenadas espaciais cartesianas (X_i, Y_i) , essas coordenadas podem ser relacionadas pelas expressões²:

$$\begin{aligned} X_i - X_0 &= (\alpha_i - \alpha_0)\cos(\delta_0) \\ Y_i - Y_0 &= \delta_i - \delta_0 \end{aligned} \quad (2.7)$$

onde α_0 é a ascensão reta do centro do objeto, δ_0 é declinação do centro do objeto e X_0 e Y_0 são as coordenadas cartesianas do centro do objeto. As coordenadas centrais do objeto podem ou não ser incluídas entre os parâmetros livres para ajuste.

A coordenada polar radial de uma estrela pertencente ao conjunto de dados com origem no centro do objeto que está sendo ajustado é relacionada com as coordenadas cartesianas por:

$$r_i = \left(\left(\frac{1}{(1 - \epsilon)} (X_i \cos\theta - Y_i \sin\theta) \right)^2 + (X_i \sin\theta + Y_i \cos\theta)^2 \right)^{1/2} \quad (2.8)$$

onde ϵ é a elipticidade do objeto e θ é ângulo de posição do objeto, com origem no norte e que cresce de norte para leste. A coordenada r_i dada por (2.8) é chamada de raio elíptico e corresponde ao eixo de elipse dada sua orientação e achatamento.

² Esta aproximação, que planifica a esfera celeste, só é válida para estrelas que estão nas proximidades do centro do objeto

2.3.1 Perfil Exponencial

O perfil de densidade exponencial geralmente é utilizado para o ajuste de densidade superficial de galáxias anãs e é dado por:

$$\Sigma_e(r) = \Sigma_{0,e} e^{-\frac{r}{r_e}} + \Sigma_{bg} \quad (2.9)$$

onde $\Sigma_e(r)$ é a densidade superficial estelar em função do raio elíptico r , r_e é o raio de escala exponencial do perfil e $\Sigma_{0,e}$ é a constante de normalização do perfil que está relacionada à densidade central do objeto. Já Σ_{bg} é a densidade superficial de estrelas de campo, ou seja, situadas à frente ou atrás do objeto. O raio à meia-luz do objeto analisado, que corresponde àquele que contém em seu interior metade da luz total emitida pelo objeto, é dado pela relação $r_h = 1.68r_e$. Para o perfil de densidade exponencial, os parâmetros usualmente ajustados são: o raio à meia-luz r_h , a elipiticidade ϵ , o ângulo de posição θ , a densidade de estrelas do campo Σ_{bg} , a ascensão reta α_0 do centro do objeto e a declinação δ_0 do centro do objeto.

2.3.2 Perfil de Plummer

O perfil de densidade de Plummer (Plummer 1911), assim como o perfil exponencial, é utilizado para o ajuste do perfil de densidade superficial de galáxias anãs e é dado por:

$$\Sigma_P(r) = \Sigma_{0,P} \left(1 + \frac{r^2}{r_p^2}\right)^{-2} + \Sigma_{bg} \quad (2.10)$$

onde $\Sigma_P(r)$ é a densidade superficial estelar em função do raio elíptico r , r_p é o raio de Plummer, o raio de escala do perfil, e $\Sigma_{0,P}$ é a constante de normalização do perfil que está relacionada a densidade central do objeto. No perfil de Plummer o raio r_p é equivalente ao raio à meia-luz r_h . Para o perfil de densidade de Plummer, os parâmetros usualmente ajustados são: o raio à meia-luz r_h , a elipiticidade ϵ , o ângulo de posição θ , a densidade de estrelas do campo Σ_{bg} , a ascensão reta α_0 do centro do objeto e a declinação δ_0 do centro do objeto.

2.3.3 Perfil de King

O perfil de densidade de King (King 1962) é geralmente utilizado para o ajuste da densidade superficial de aglomerados estelares e é dado por:

$$\Sigma_K(r) = \Sigma_{0,K} \left[\left(1 + \frac{r^2}{r_c^2}\right)^{-\frac{1}{2}} - \left(1 + \frac{r_t^2}{r_c^2}\right)^{-\frac{1}{2}} \right]^2 + \Sigma_{bg} \quad (2.11)$$

onde $\Sigma_K(r)$ é a densidade estelar em função do raio r , r_c é o raio de core (ou raio de King), r_t é o raio de maré e $\Sigma_{0,K}$ é a constante de normalização do perfil que está relacionada a densidade central do objeto. Para o perfil de densidade de King, os parâmetros usualmente

ajustados são: o raio de core r_c , o raio de maré r_t , a elipiticidade ϵ , o ângulo de posição θ , a densidade de estrelas do campo Σ_{bg} , a ascensão reta α_0 do centro do objeto e a declinação δ_0 do centro do objeto.

2.4 Ajuste de Isócronas

O ajuste de isócronas para os objetos é feito seguindo o método utilizado em Pieres et al. 2016 para calcular a probabilidade de uma determinada estrela pertencer a uma isócrona modelada deslocada por dados valores de módulo de distância e avermelhamento. Assim os parâmetros a serem ajustados serão a metalicidade e a idade, que definem uma dada isócrona, além do módulo de distância e o avermelhamento. Adicionalmente, o ajuste pode levar em conta a presença de binárias não resolvidas, que afetam as magnitudes e cores observadas. Após o ajuste estrutural do objeto ser feito, utilizando os melhores valores do ajuste, conforme descrito nas seções anteriores, é atribuída a probabilidade de uma estrela pertencer ao objeto, dada por:

$$P_i = \frac{\Sigma_{obj}(r_i)}{\Sigma_{bg} + \Sigma_{obj}(r_i)} \quad (2.12)$$

onde Σ_{bg} é novamente a densidade do campo.

Também é computada a verossimelhança Gaussiana de que uma determinada isócrona é a que melhor descreve o conjunto de dados. Para isso, inicialmente é determinada a distância mínima entre a estrela i e a isócrona j em um espaço fotométrico M -dimensional:

$$d_{ij}^2 = \min \left[\sum_{l=1}^M \left(\frac{m_{li} - m_{lj}}{\sigma_{li}} \right)^2 \right] \quad (2.13)$$

onde a soma é sobre todas as bandas fotométricas, (m_{lj}) é a magnitude da isócrona j na banda l mais próxima da magnitude observada da estrela i (m_{li}) na mesma banda, e σ_{li} é a incerteza em m_{li} . As magnitudes das isócronas já estão deslocadas pelo módulo de distância e avermelhamento. Como as magnitudes das isócronas são um conjunto discreto de pontos é utilizada a interpolação dos pontos das isócronas no cálculo de d_{ij} . A verossimelhança da estrela i ser descrita pela isócrona j é dada por:

$$P_{ij} = \frac{1}{(2\pi)^{\frac{M}{2}}} \left(\prod_{l=1}^M \frac{1}{\sigma_{mli}} \right) \exp \left(\frac{-d_{ij}^2}{2} \right) \quad (2.14)$$

E a verossimelhança logarítmica de que o conjunto de N estrelas é melhor descrito por uma isócrona j é dada por:

$$\log \mathcal{L}_j = \sum_{i=1}^N \log(P_{ij}) + \sum_{i=1}^N \log(P_i) \quad (2.15)$$

onde na expressão acima, cada estrela é pesada pela probabilidade (P_i) de pertencer ao objeto a ser ajusta ao invés de pertencer ao campo. Os parâmetros comumente ajustados são: avermelhamento, módulo de distância, idade e metalicidade.

3 Dados

Os resultados apresentados neste trabalho foram obtidos utilizando dados públicos de dois surveys, DES Data Release 2 (Abbott et al. 2021) e HSC-SSP Third Data Release (Aihara et al. 2022). Em seguida será descrito o processamento feito nestes conjuntos de dados.

3.1 DES

DES é um survey de campo amplo que utiliza a Dark Energy Camera (DECam) (Flaugher et al. 2015) para imagear 5000 deg^2 do céu do hemisfério sul. Para fazer os ajustes dos objetos neste trabalho, foram aplicados cortes baseados nos parâmetros SPREAD_MODEL, FLAGS e magnitudes dadas por point spread functions (PSF) baseadas na ferramenta SExtractor (Bertin 2011). O parâmetro FLAGS indica se um objeto é saturado ou foi truncado em uma extremidade de uma imagem. Um corte em $FLAGS < 4$ é suficiente para que seja possível eliminar qualquer objeto que poderia atrapalhar a análise. O parâmetro SPREAD_MODEL é utilizado como separador entre estrelas e galáxias. Para evitar problemas decorrentes do ajuste de PSF em diferentes profundidades é utilizada a média ponderada (WAVG) do parâmetro SPREAD_MODEL. Portanto, a amostra de estrelas utilizada neste trabalho consiste dos fontes que satisfazem $|\text{SPREAD_MODEL}| < 0.003 + \text{SPREADERR_MODEL}$ como descrito em Luque et al. 2016. Também são feitos cortes em magnitude ($17 < r < 24$) e cor ($-0.5 < g-r < 1.0$). O corte em cor é feito para evitar contaminação e estrelas do disco Galáctico. Por último é aplicada uma máscara isocronal, no ajuste são utilizadas apenas as estrelas que estão dentro desta máscara isocronal e com magnitude $r < 23.5$.

3.2 HSC-SSP

Os cortes para os dados públicos do survey HSC-SSP seguem a seleção de objetos feita em Homma et al. 2023. O primeiro corte é feito para separar estrelas e galáxias. Este corte é feito utilizando o parâmetro *extendness* disponível no catálogo do HSC-SSP. Foi utilizado *extendness*=0, em que são selecionadas apenas fontes pontuais. Em seguida, é aplicado um corte em cor para evitar contaminação do disco Galáctico e outras fontes: são selecionadas as estrelas dentro da região $(g-r, r-i)=(1.00, 0.27), (1.00, 0.57), (-0.4, -0.55)$ e $(-0.4, -0.25)$ do espaço cor-cor. Também é feito um corte magnitude ($17 < r < 26.5$). Por último é aplicada uma máscara isocronal, no ajuste são utilizadas apenas as estrelas que estão dentro desta máscara isocronal e com magnitude $r < 25.5$.

4 Resultados

4.1 Análise de objeto e CMD sintéticos

Na Figura 6 é apresentada a distribuição espacial de um objeto gerado a partir do perfil de densidade exponencial, como descrito na seção 2.1. Este objeto sintético foi simulado com raio de escala exponencial $r_e = 35'^1$, elipticidade $\epsilon = 0.35$ e ângulo de posição $\theta = 75^\circ$. Na figura, o objeto parece mais achatado devido ao fato de que o eixo horizontal cobre um arco menor no céu do que o vertical. Também é mostrado um *corner plot*, em que são apresentadas as distribuições de probabilidade a posteriori para os parâmetros estruturais do objeto ajustados a partir do método de MCMC descrito na seção 2.3, para o cálculo das incertezas nos resultados dos ajustes é assumido que as incertezas tenham um comportamento Gaussiano, ou próximo ao Gaussiano, nas proximidades dos valores com maior probabilidade obtidos pelo ajuste, as incertezas apresentadas nas Figuras 6 e 7 correspondem ao intervalo de confiança de 1σ , onde σ é o desvio padrão da distribuição. Os parâmetros ajustados foram o raio de escala exponencial r_e , a elipticidade ϵ , o ângulo de posição θ , a densidade de estrelas de campo Σ_{bg} , a correção para a ascensão reta do centro do objeto $\Delta\alpha$ e a correção para a declinação do centro do objeto $\Delta\delta$.

Na Figura 7 temos um exemplo de CMD sintético gerado com 1000 estrelas a partir de uma isócrona PARSEC (Bressan et al. 2012) com idade de 10 Ganos e metalicidade $[Fe/H] = -2.0$, como descrito na seção 2.2. Ao CMD baseado nessa isócrona foi aplicado um módulo de distância $m - M = 17.40$ e extinção $E(B - V) = 0.013$. Foi também utilizada a função de massa inicial de Kroupa (Kroupa 2002). Foram adicionados erros fotométricos as estrelas deste CMD sintético, estes erros adicionados seguem o modelo adotado em Balbinot et al. 2015 para descrever as incertezas nos dados do Dark Energy Survey Camera Science Verification (DECam SV), essas incertezas são dadas por

$$\sigma(mag) = a + \exp\left(\frac{mag - b}{c}\right) \quad (4.1)$$

os erros fotométricos adicionados foram gerados a partir de um gerador números aleatórios que segue uma distribuição Gaussiana, com média $\mu = 0$ e desvio padrão σ dado pela equação 4.1, com as variáveis a , b e c assumido os valores $(a, b, c)_g = (0.001, 26.41, 1.25)$ para os valores de magnitude na banda g e $(a, b, c)_r = (0.001, 26.34, 1.27)$ para os valores de magnitude na banda r . Também é apresentado um *corner plot*, em que são apresentadas as distribuições de probabilidade a posteriori para os parâmetros do CMD do objeto

¹ Os raios característicos de cada perfil de densidade usados para a simulação dos objetos e depois ajustados são sempre dados em unidades de minutos de arco.

Objeto sintético

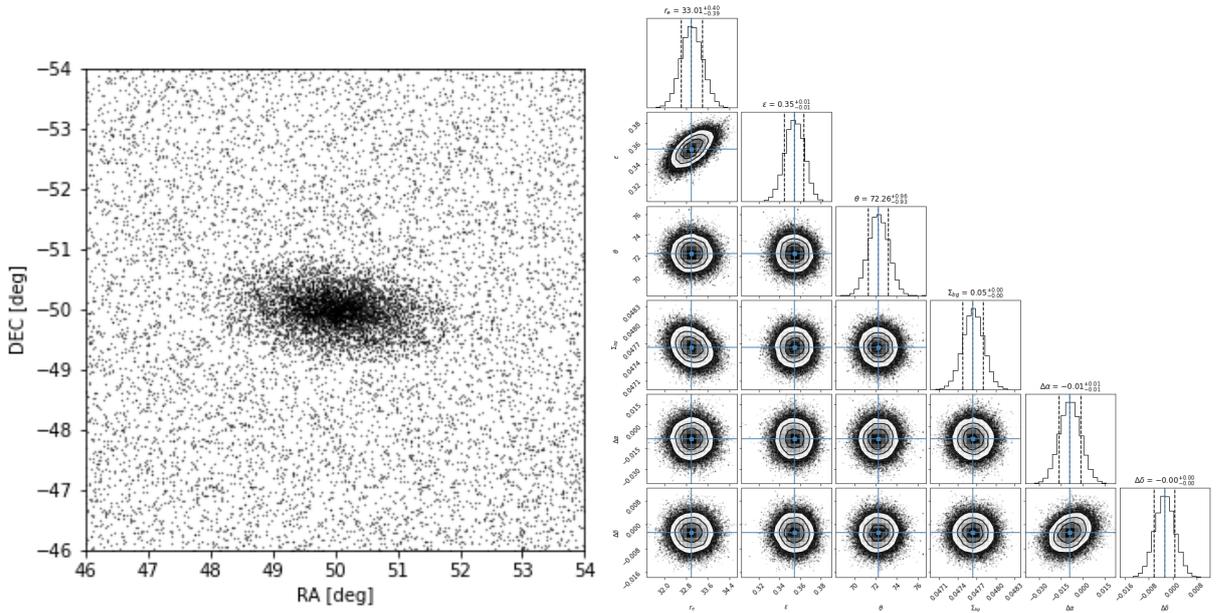


Figura 6 – *esquerda*: Objeto gerado com o perfil de densidade exponencial. *direita*: Distribuição de probabilidade a posteriori para os parâmetros estruturais do objeto ajustados obtido com o método de MCMC descrito na seção 2.3

ajustados a partir do método de MCMC descrito na seção 2.4. Os parâmetros ajustados foram a extinção $E(B - V)$ e o módulo de distância $m - M$.

Neste trabalho, os códigos de ajuste estrutural e de isócronas foram utilizados para obter parâmetros estruturais e da população estelar de cinco objetos. Para três destes objetos, utilizamos dados do DES: Reticulum II, Eridanus II e Horologium I; para os outros dois objetos utilizamos dados do HSC-SSP: Leo IV e Pegasus III.

Os parâmetros estruturais destes objetos foram ajustados utilizando os perfis de densidade Exponencial e de Plummer, descritos nas seções 2.3.1 e 2.3.2 respectivamente. Os parâmetros ajustados foram: o raio à meia-luz r_h , a elipticidade ϵ , o ângulo de posição θ , a densidade de campo Σ_{bg} e as coordenadas (α_c, δ_c) do centro do objeto. Este ajuste foi feito utilizando o pacote Python EMCEE (Foreman-Mackey et al. 2013), com 400 caminhantes aleatórios, cada um dando 1000 passos, com os primeiros 300 passos sendo descartados.

Para o ajuste de isócronas neste trabalho, como foram utilizados apenas dados fotométricos, foi assumido a priori que a população estelar destes objetos é descrita por uma isócrona PARSEC (Bressan et al. 2012). Para os objetos em que foram utilizados dados do DES, foi utilizada uma isócrona com idade 12 Ganos e metalicidade $[\text{Fe}/\text{H}]=-2$ como a utilizada em Koposov et al. 2015. Para os objetos em que foram utilizados dados do HSC-SSP, foi utilizada uma isócrona com idade 13 Ganos e metalicidade $[\text{Fe}/\text{H}]=-2.2$, como utilizada em Homma et al. 2023. Os parâmetros ajustados foram a extinção $E(B - V)$

CMD sintético

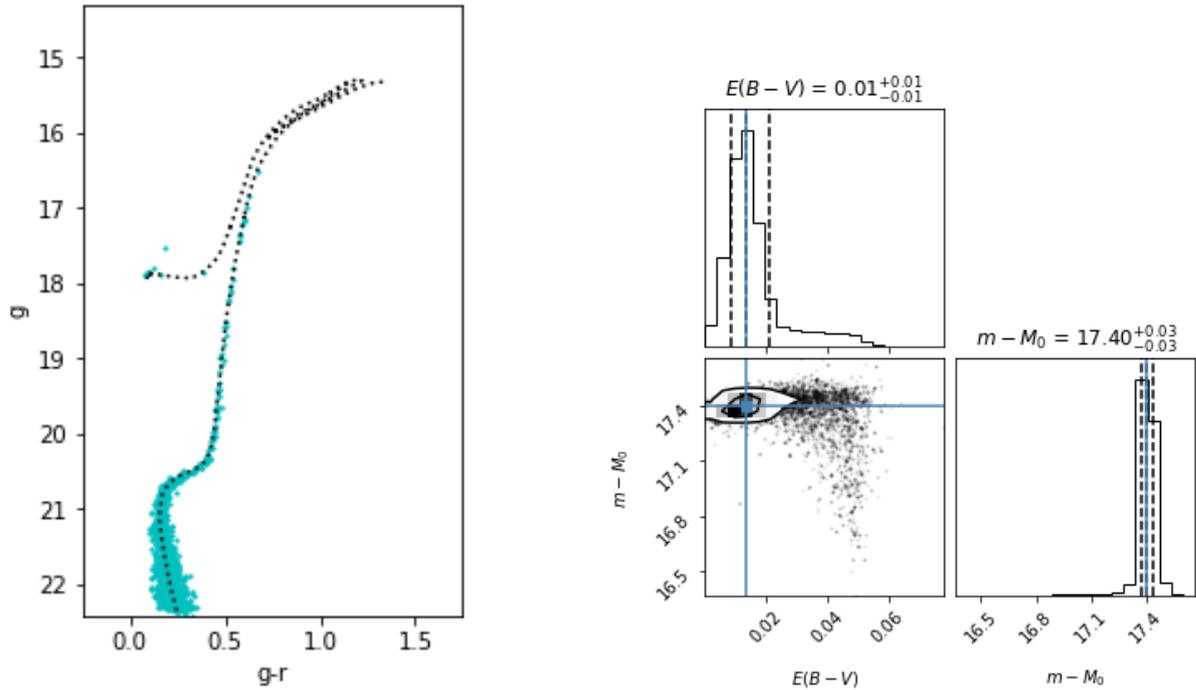


Figura 7 – *esquerda*: CMD sintético gerado utilizando uma isócrona PARSEC com idade de 10 Ganos e metalicidade $[Fe/H] = -2.0$. Foi também usada a função de massa inicial de Kroupa. *direita*: Distribuição de probabilidade a posteriori para os parâmetros do CMD do objeto ajustados obtido com o método de MCMC descrito na seção 2.4

e o módulo de distância $m - M$. O ajuste de isócronas foi feito utilizando o pacote Python EMCEE (Foreman-Mackey et al. 2013), com 250 caminhantes aleatórios dando 300 passos cada, com os primeiros 100 passos sendo descartados.

4.2 Análise de objetos reais

Na Tabela 1 estão os resultados obtidos neste trabalho. Nas seções seguintes são discutidos, primeiramente, o ajuste de parâmetros estruturais e população estelar de objetos sintéticos, e em seguida os resultados para cada objeto dos catálogos DES e HSC-SSP individualmente.

4.2.1 Reticulum II

Ao comparar os resultados obtidos neste trabalho e apresentados na Tabela 1 com resultados presentes na literatura (Muñoz et al. 2018), podemos ver que a posição do centro do objeto é o parâmetro com menor variação, como esperado ao observar a Figura 8. Nela podemos ver que no centro da imagem, que está centrada no objeto, temos uma densidade de estrelas muito maior que o campo e que essa densidade cai rapidamente

Objeto	Parâmetros ajustados								
	α [°]	δ [°]	m - M [mag]	$r_{h,exp}$ [']	ϵ_{exp}	θ_{exp} [°]	$r_{h,p}$ [']	ϵ_p	θ_p
Reticulum II	$53.924^{+0.005}_{-0.004}$	$-54.049^{+0.001}_{-0.001}$	$17.26^{+0.03}_{-0.03}$	$5.86^{+0.19}_{-0.18}$	$0.57^{+0.02}_{-0.02}$	$68.69^{+1.23}_{-1.23}$	$5.95^{+0.29}_{-0.27}$	$0.64^{+0.02}_{-0.02}$	$69.52^{+1.37}_{-1.36}$
Eridanus II	$56.099^{+0.002}_{-0.003}$	$-43.532^{+0.001}_{-0.001}$	$22.53^{+0.10}_{-0.09}$	$1.92^{+0.15}_{-0.13}$	$0.35^{+0.05}_{-0.06}$	$79.95^{+6.25}_{-6.02}$	$1.91^{+0.10}_{-0.09}$	$0.33^{+0.04}_{-0.04}$	$80.51^{+4.44}_{-4.53}$
Horologium I	$43.876^{+0.003}_{-0.003}$	$-54.117^{+0.002}_{-0.002}$	$19.40^{+0.07}_{-0.08}$	$1.96^{+0.18}_{-0.16}$	$0.20^{+0.08}_{-0.10}$	$44.11^{+13.69}_{-12.67}$	$1.66^{+0.14}_{-0.12}$	$0.09^{+0.08}_{-0.06}$	$42.83^{+76.29}_{-24.59}$
Leo IV	$173.238^{+0.002}_{-0.002}$	$-0.533^{+0.002}_{-0.002}$	$20.86^{+0.06}_{-0.07}$	$2.73^{+0.19}_{-0.18}$	$0.28^{+0.06}_{-0.07}$	$137.55^{+7.44}_{-8.15}$	$2.54^{+0.17}_{-0.16}$	$0.29^{+0.05}_{-0.06}$	$137.86^{+7.32}_{-7.04}$
Pegasus III	$336.099^{+0.002}_{-0.002}$	$5.409^{+0.002}_{-0.002}$	$21.32^{+0.10}_{-0.09}$	$1.57^{+0.16}_{-0.14}$	$0.09^{+0.08}_{-0.06}$	$94.59^{+51.82}_{-57.30}$	$1.43^{+0.15}_{-0.13}$	$0.09^{+0.08}_{-0.06}$	$93.37^{+53.62}_{-56.56}$

Tabela 1 – Tabela contendo os valores obtidos para os parâmetros ajustados neste trabalho. Os subíndices *exp* e *p* nos parâmetros indicam os perfis de densidade utilizados para obter os valores

Reticulum II

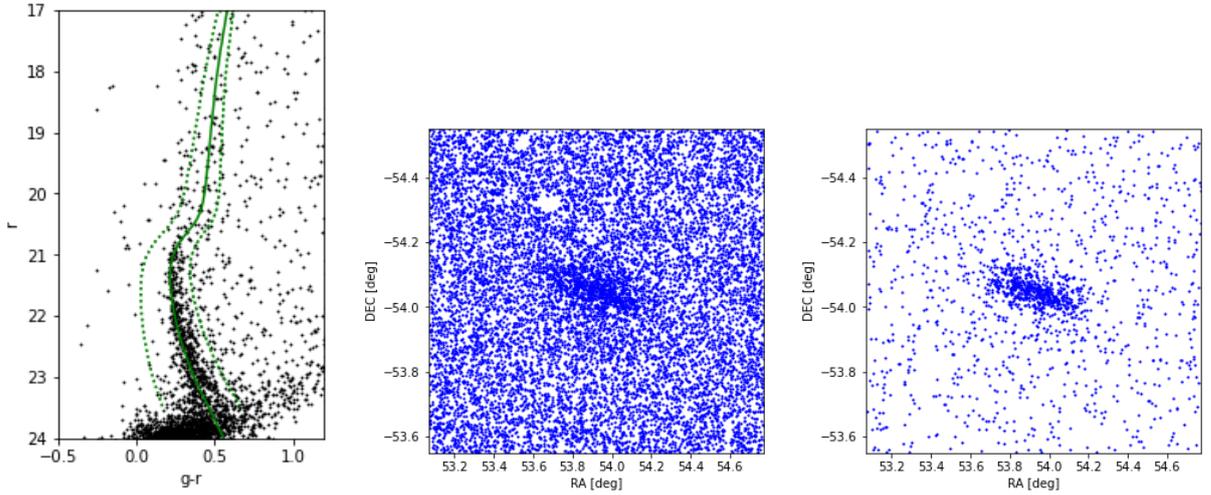


Figura 8 – *esquerda*: CMD de Reticulum II mostrando as estrelas dentro de círculo de raio $r = 2r_{h,exp}$ (o valor de $r_{h,exp}$ é apresentado na Tabela 1) centrado no objeto. A isócrona usada para descrever a população do objeto, como descrito na seção 3.1, é mostrada como a linha verde sólida e foi deslocada pelo módulo de distância $m - M = 17.4$ (Muñoz et al. 2018). As linhas verdes pontilhadas delimitam a máscara isocronal utilizada nos ajustes. *centro*: Distribuição espacial de todos os objetos que passam pelos cortes da seção 3.1, centrados em Reticulum II. *direita*: Distribuição espacial de todos os objetos que se encontram dentro da máscara do painel da esquerda.

conforme a distância ao centro do objeto aumenta. Os raios à meia-luz obtidos neste trabalho para ambos os perfis Exponencial e de Plummer convergiram para valores maiores que os disponíveis na literatura: $r_{h,exp} = 5.41' \pm 0.18'$ e $r_{h,p} = 5.52' \pm 0.19'$. Já para outros parâmetros, como elipticidade, $\epsilon_{exp} = 0.56 \pm 0.03$ e $\epsilon_p = 0.58 \pm 0.02$, e ângulo de posição, $\theta_{exp} = 69^\circ \pm 2^\circ$ e $\theta_p = 70^\circ \pm 2^\circ$, foram obtidos valores muito próximos aos disponíveis na literatura. No ajuste de isócronas, o valor do módulo de distância obtido foi menor que o valor disponível na literatura, $m - M = 17.4$. Os *corner plots* dos ajustes de Reticulum II,

Eridanus II

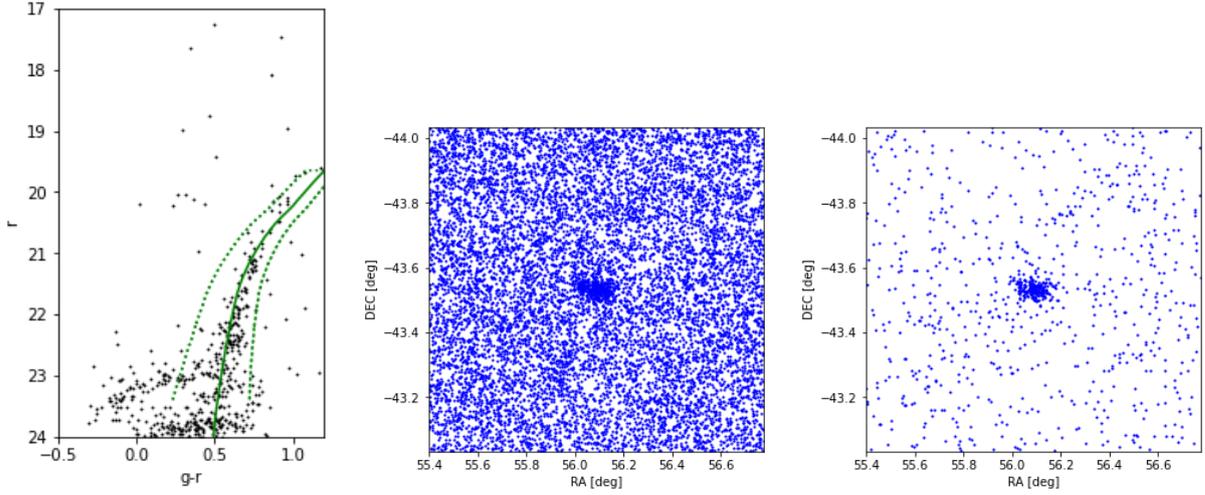


Figura 9 – O mesmo que na Figura 8, mas com módulo de distância $m - M = 22.9$ aplicado à isócrona.

e dos objetos discutidos nas seções seguintes, são apresentados no apêndice A.

4.2.2 Eridanus II

Para este objeto, assim como para Reticulum II, a posição do centro do objeto tem a menor variação quando comparada com a literatura. Os valores dos outros parâmetros estruturais ajustados neste trabalho convergiram para valores próximos aos da literatura (Muñoz et al. 2018). Isso vale para os raios à meia-luz $r_{h,exp} = 1.80' \pm 0.16'$ e $r_{h,p} = 1.77' \pm 0.17'$, elipticidade $\epsilon_{exp} = 0.38 \pm 0.07$ e $\epsilon_p = 0.35 \pm 0.06$ e ângulo de posição $\theta_{exp} = 82^\circ \pm 8^\circ$ e $\theta_p = 82^\circ \pm 8^\circ$. No ajuste de isócronas, o valor obtido para o módulo de distância foi menor que o valor encontrado na literatura, $m - M = 22.9$.

4.2.3 Horologium I

Assim como para os objetos anteriores, o centro de Horologium I também está bem definido, tanto para os valores obtidos neste trabalho quanto para os valores disponíveis na literatura (Muñoz et al. 2018) para os parâmetros deste objeto. Ao comparar os dados da Tabela 1 com os valores da literatura para os raios à meia-luz, $r_{h,exp} = 1.71' \pm 0.37'$ e $r_{h,p} = 1.59' \pm 0.31'$, vemos que estes valores ficaram próximos. O ângulo de posição foi outro parâmetro em que os valores convergiram para valores próximos aos valores da literatura, $\theta_{exp} = 53^\circ \pm 27^\circ$ e $\theta_p = 57^\circ \pm 25^\circ$. Para a elipticidade os valores obtidos neste trabalho convergiram para valores menores, descrevendo o objeto como sendo mais esférico do que na literatura, principalmente para o ajuste do Perfil de Plummer: $\epsilon_{exp} = 0.32 \pm 0.13$ e $\epsilon_p = 0.27 \pm 0.13$. Para o ajuste de isócronas, o valor obtido para o módulo de distância convergiu para um valor próximo ao valor disponível na literatura, $m - M = 19.5$.

Horologium I

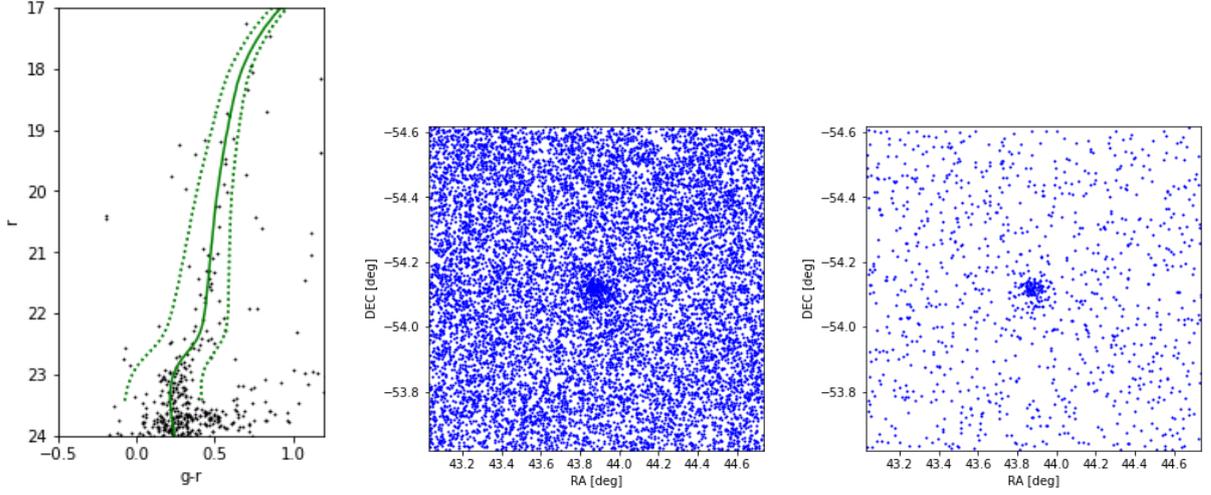


Figura 10 – O mesmo que na Figura 8, mas com módulo de distância de $m - M = 19.5$ aplicado à isócrona.

Leo IV

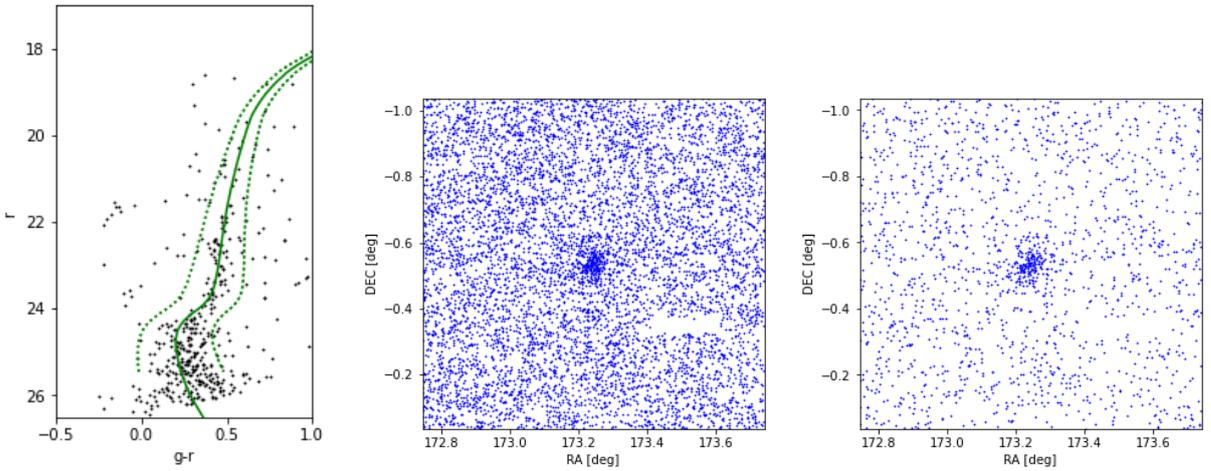


Figura 11 – O mesmo que na Figura 8, mas com a isócrona descrita na seção 3.2 e usando os dados do HSC-SSP. À isócrona foi aplicado um módulo de distância $m - M = 21.0$.

4.2.4 Leo IV

Assim como para os objetos discutidos anteriormente, a posição do centro de Leo IV está bem definida. Ao compararmos os valores obtidos para os parâmetros estruturais neste trabalho com a literatura (Homma et al. 2023), vemos que para $r_{h,exp}$ convergiu para um valor próximo ao disponível na literatura: $r_{h,exp} ['] = 2.6_{-0.2}^{+0.2}$. Para $r_{h,p}$, assim como para os demais parâmetros ajustados para o perfil de Plummer não há literatura disponível, mas é esperado que os valores obtidos para o ajuste do Perfil de Plummer convirjam para valores semelhantes aos do ajuste do Perfil Exponencial. Para a elipticidade, o valor obtido neste trabalho convergiu para um valor maior, descrevendo o objeto como sendo mais

Pegasus III

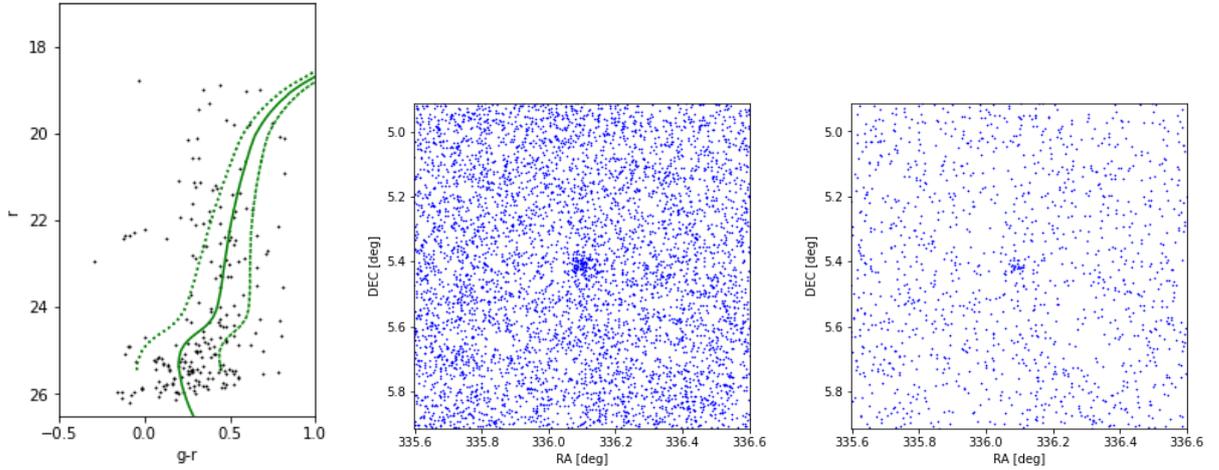


Figura 12 – O mesmo que na Figura 8, mas com a isócrona descrita na seção 3.2 e os dados do HSC-SSP. À isócrona foi aplicado um módulo de distância $m - M = 21.5$.

alongado, com a elipticidade disponível na literatura sendo $\epsilon_{exp} = 0.17^{+0.08}_{-0.10}$. O valor obtido para o ângulo de posição é ligeiramente menor que o valor da literatura, $\theta_{exp}[^{\circ}] = 158^{+16}_{-13}$. Para o ajuste de isócronas o valor obtido para o módulo de distância convergiu para um valor muito semelhante ao valor disponível na literatura, $m - M = 21.0$.

4.2.5 Pegasus III

Assim como para os objetos discutidos anteriormente, a posição do centro de Pegasus III está bem definida. Ao compararmos os valores da Tabela 1 com os valores da literatura (Homma et al. 2023), vemos que o raio à meia-luz $r_{h,exp}$ convergiu para um valor semelhante ao valor disponível na literatura, $r_{h,exp}['] = 1.5^{+0.2}_{-0.2}$. O valor de elipticidade ϵ_{exp} convergiu para um valor menor que o da literatura $\epsilon_{exp} = 0.37^{+0.11}_{-0.13}$. O ângulo de posição θ_{exp} convergiu para um valor menor que o da literatura, $\theta_{exp}[^{\circ}] = 131^{+14}_{-15}$. As diferenças significativas nos valores de elipticidade e ângulo de posição para Pegasus III podem estar relacionadas ao fato deste objeto ser o objeto mais pobre, ou seja, com menor densidade estelar ajustado neste trabalho. No ajuste de isócronas, o valor do módulo de distância convergiu para um valor semelhante ao valor da literatura, $m - M = 21.5^{+0.2}_{-0.2}$.

5 Conclusões

Nas últimas décadas, tivemos um crescimento exponencial no número conhecido de satélites da Via Láctea e aglomerados tênues do halo. E com a continuação de surveys já em atividade como DELVE e HSC-SSP, que já contribuíram com várias descobertas, e o iminente início do LSST no futuro próximo, dezenas de novos objetos tênues do halo devem ser descobertos nos próximos anos. Estes objetos apresentam laboratórios únicos para diversas áreas da Física, desde a formação da Via Láctea e galáxias em geral, já que estes objetos e suas populações estelares são relíquias da época em que a Via Láctea estava se formando, até a natureza e propriedades da matéria escura. Vimos neste trabalho que o modelo Λ CDM possui limitações ao tentar descrever o Universo em pequenas escalas, e os objetos tênues do halo, em especial as UFDs, são ferramentas essenciais para testar as previsões do modelo Λ CDM. Portanto, um censo completo dos satélites da Via Láctea é não somente essencial para o entendimento da formação da Galáxia, como um passo fundamental no entendimento do modelo padrão da cosmologia.

A grande dificuldade para o estudo dos sistemas de satélites e aglomerados do halo da Galáxia é a escassez de objetos no limite inferior de luminosidade. Na Via Láctea, os objetos conhecidos com $M_V > 0.0$ são raros, sendo que a incompleta no limite inferior de luminosidade é cada vez maior com o aumento da distância. A recente descoberta de Ursa Major III/UNIONS 1 (Smith et al. 2024), com $M_V = +2.2$, é um forte indício de que existem dezenas de objetos a serem descobertos nos novos levantamentos de dados mais profundos que ocorrerão nos próximos anos. Alguns dos estudos envolvendo UFDs e aglomerados tênues do halo a serem feitos nos próximos anos são:

1. Censo completo de satélites e aglomerados tênues do halo da Via Láctea

Com o início das observações do LSST, que vai cobrir em torno de $18000^{\circ 2}$ do céu do hemisfério sul, e que vai alcançar magnitude de até $r = 27.6$, cerca de 4 mag mais profundo que o DES, este survey mais profundo nos dará um melhor entendimento do tamanho da população de satélites da Via Láctea.

2. Testes para a natureza da matéria escura

Uma amostra maior de velocidades radiais e movimentos próprios, que além de impor um limite inferior para a função de massa de halos de matéria escura, permitirá um estudo mais detalhado da estrutura interna e perfil de densidade das regiões centrais de UFDs, permitindo testes para as previsões do modelo Λ CDM para as regiões internas de galáxias anãs, o *cusp/core problem*.

Neste trabalho foram testados códigos de ajuste estrutural e de isócronas criados para obter parâmetros estruturais e de populações estelares de objetos tênues do halo Galático. Vimos que a metodologia utilizada para criar estes códigos é capaz de fazer o ajuste desde objetos ricos, com densidade estelar alta, como Reticulum II e Eridanus II, até objetos mais pobres, como Pegasus III.

Vimos que nosso conhecimento dos sistemas de satélites e aglomerados tênues do halo, mesmo progredindo muito nas últimas décadas, ainda está longe de estar completo. Portanto, ainda há muito trabalho a ser feito neste campo. Com os novos levantamentos de dados, esta área continuará sendo de grande importância no estudo da formação da Galáxia, dos modelos cosmológicos em pequenas escalas e da natureza da matéria escura.

Referências

- ABBOTT, T. M. C. et al. The dark energy survey data release 2. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, American Astronomical Society, v. 255, n. 2, p. 20, jul. 2021. ISSN 1538-4365. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.3847/1538-4365/ac00b3>>.
- AIHARA, H. et al. Third data release of the Hyper Suprime-Cam Subaru Strategic Program. *Publications of the Astronomical Society of Japan*, v. 74, n. 2, p. 247–272, 02 2022. ISSN 0004-6264. Disponível em: <<https://doi.org/10.1093/pasj/psab122>>.
- BALBINOT, E. et al. The LMC geometry and outer stellar populations from early DES data. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 449, n. 1, p. 1129–1145, 03 2015. ISSN 0035-8711. Disponível em: <<https://doi.org/10.1093/mnras/stv356>>.
- BERTIN, E. Automated morphometry with sextractor and psfex. *Astronomical Society of the Pacific Conference Proceedings*, p. 435, jul 2011.
- BOYLAN-KOLCHIN, M.; BULLOCK, J. S.; KAPLINGHAT, M. Too big to fail? The puzzling darkness of massive Milky Way subhaloes. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters*, v. 415, n. 1, p. L40–L44, 07 2011. ISSN 1745-3925. Disponível em: <<https://doi.org/10.1111/j.1745-3933.2011.01074.x>>.
- BRESSAN, A. et al. Parsec: stellar tracks and isochrones with the padova and trieste stellar evolution code. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Oxford University Press (OUP), v. 427, n. 1, p. 127–145, oct 2012.
- CANNON, R. D.; HAWARDEN, T. G.; TRITTON, S. B. A new Sculptor-type dwarf elliptical galaxy in Carina. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 180, n. 1, p. 81P–82P, 09 1977. ISSN 0035-8711. Disponível em: <<https://doi.org/10.1093/mnras/180.1.81P>>.
- CERNY, W. et al. Pegasus iv: Discovery and spectroscopic confirmation of an ultra-faint dwarf galaxy in the constellation pegasus. *The Astrophysical Journal*, American Astronomical Society, v. 942, n. 2, p. 111, jan 2023.
- CHAMBERS, K. C. et al. *The Pan-STARRS1 Surveys*. 2019.
- COLLABORATION, D. E. S. The dark energy survey: more than dark energy – an overview. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Oxford University Press (OUP), v. 460, n. 2, p. 1270–1299, mar 2016.
- DRLICA-WAGNER, A. et al. The decam local volume exploration survey: Overview and first data release. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, American Astronomical Society, v. 256, n. 1, p. 2, aug 2021.
- FLAUGHER, B. et al. *The Astronomical Journal*, American Astronomical Society, v. 150, n. 5, p. 150, oct 2015.
- FOREMAN-MACKEY, D. et al. emcee: The mcmc hammer. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, IOP Publishing, v. 125, n. 925, p. 306–312, mar 2013.

GEISLER, D. et al. Chemical abundances and kinematics in globular clusters and local group dwarf galaxies and their implications for formation theories of the galactic halo. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, IOP Publishing, v. 119, n. 859, p. 939–961, set. 2007. ISSN 1538-3873. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1086/521990>>.

GOVERNATO, F. et al. Cuspy no more: how outflows affect the central dark matter and baryon distribution in cold dark matter galaxies: Galaxy cores in cdm. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Oxford University Press (OUP), v. 422, n. 2, p. 1231–1240, mar. 2012. ISSN 0035-8711. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2966.2012.20696.x>>.

GUNN, J. E. et al. The 2.5 m telescope of the sloan digital sky survey. *The Astronomical Journal*, American Astronomical Society, v. 131, n. 4, p. 2332–2359, apr 2006.

HARRINGTON, R. G.; WILSON, A. G. Two new stellar systems in leo. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, The Astronomical Society of the Pacific, v. 62, n. 365, p. 118, jun 1950. Disponível em: <<https://dx.doi.org/10.1086/126249>>.

HOMMA, D. et al. Final results of search for new milky way satellites in the hyper supprime-cam subaru strategic program survey: Discovery of two more candidates. 2023.

IBATA, R. A.; GILMORE, G.; IRWIN, M. J. A dwarf satellite galaxy in Sagittarius. *Nature*, v. 370, n. 6486, p. 194P–196P, 07 1994.

IRWIN, M. J. et al. A new satellite galaxy of the Milky Way in the constellation of Sextans. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 244, p. 16P–19P, 05 1990.

IVEZIĆ Željko et al. Lsst: From science drivers to reference design and anticipated data products. *The Astrophysical Journal*, The American Astronomical Society, v. 873, n. 2, p. 111, mar 2019. Disponível em: <<https://dx.doi.org/10.3847/1538-4357/ab042c>>.

KAHLHOEFER, F. et al. Diversity in density profiles of self-interacting dark matter satellite halos. *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics*, IOP Publishing, v. 2019, n. 12, p. 010–010, dez. 2019. ISSN 1475-7516. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1088/1475-7516/2019/12/010>>.

KING, I. The structure of star clusters. i. an empirical density law. *Astronomical Journal*, Vol. 67, p. 471 (1962), october 1962.

KLYPIN, A. et al. Where are the missing galactic satellites? *The Astrophysical Journal*, American Astronomical Society, v. 522, n. 1, p. 82–92, set. 1999. ISSN 1538-4357. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1086/307643>>.

KOPOSOV, S. E. et al. Beasts of the southern wild: Discovery of nine ultra faint satellites in the vicinity of the magellanic clouds. *The Astrophysical Journal*, American Astronomical Society, v. 805, n. 2, p. 130, may 2015.

KROUPA, P. The initial mass function of stars: Evidence for uniformity in variable systems. *Science*, American Association for the Advancement of Science (AAAS), v. 295, n. 5552, p. 82–91, jan 2002.

LUQUE, E. et al. Digging deeper into the southern skies: a compact milky way companion discovered in first-year dark energy survey data. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Oxford University Press (OUP), v. 458, n. 1, p. 603–612, feb 2016.

MARTIN, N. F. et al. A dwarf galaxy remnant in canis major: the fossil of an in-plane accretion on to the milky way. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Oxford University Press (OUP), v. 348, n. 1, p. 12–23, fev. 2004. ISSN 1365-2966. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2966.2004.07331.x>>.

MARTIN, N. F.; JONG, J. T. A. de; RIX, H.-W. A comprehensive maximum likelihood analysis of the structural properties of faint milky way satellites. *The Astrophysical Journal*, v. 684, n. 2, p. 1075, sep 2008. Disponível em: <<https://dx.doi.org/10.1086/590336>>.

MIYAZAKI, S. et al. Hyper Suprime-Cam: System design and verification of image quality. *Publications of the Astronomical Society of Japan*, v. 70, n. SP1, p. S1, 09 2017. ISSN 0004-6264. Disponível em: <<https://doi.org/10.1093/pasj/psx063>>.

MUÑOZ, R. R. et al. A megacam survey of outer halo satellites. iii. photometric and structural parameters* †. *The Astrophysical Journal*, The American Astronomical Society, v. 860, n. 1, p. 66, jun 2018. Disponível em: <<https://dx.doi.org/10.3847/1538-4357/aac16b>>.

NADLER, E. O. et al. Milky way satellite census. ii. galaxy–halo connection constraints including the impact of the large magellanic cloud. *The Astrophysical Journal*, American Astronomical Society, v. 893, n. 1, p. 48, abr. 2020. ISSN 1538-4357. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.3847/1538-4357/ab846a>>.

PAPASTERGIS, E. et al. Is there a “too big to fail” problem in the field? *Astronomy amp; Astrophysics*, EDP Sciences, v. 574, p. A113, fev. 2015. ISSN 1432-0746. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1051/0004-6361/201424909>>.

PIERES, A. et al. Physical properties of star clusters in the outer lmc as observed by the des. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Oxford University Press (OUP), v. 461, n. 1, p. 519–541, may 2016.

PLUMMER, H. C. On the problem of distribution in globular star clusters. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 71, n. 5, p. 460–470, 03 1911.

SALPETER, E. The luminosity function and stellar evolution. *Astrophysical Journal*, vol. 121, p.161, january 1955.

SCHIVE, H.-Y.; CHIUEH, T.; BROADHURST, T. Cosmic structure as the quantum interference of a coherent dark wave. *Nature Physics*, Springer Science and Business Media LLC, v. 10, n. 7, p. 496–499, jun. 2014. ISSN 1745-2481. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1038/nphys2996>>.

SHAPLEY, H. Two stellar systems of a new kind. *Nature*, v. 142, p. 715–716, 1938.

SIMON, J. D. The faintest dwarf galaxies. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, Annual Reviews, v. 57, n. 1, p. 375–415, aug 2019.

SMITH, S. E. T. et al. The discovery of the faintest known milky way satellite using unions. *The Astrophysical Journal*, The American Astronomical Society, v. 961, n. 1, p. 92, jan 2024. Disponível em: <<https://dx.doi.org/10.3847/1538-4357/ad0d9f>>.

TOLLERUD, E. J.; BOYLAN-KOLCHIN, M.; BULLOCK, J. S. M31 satellite masses compared to cdm subhaloes. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Oxford University Press (OUP), v. 440, n. 4, p. 3511–3519, abr. 2014. ISSN 0035-8711. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1093/mnras/stu474>>.

TORREALBA, G. et al. Discovery of two neighbouring satellites in the carina constellation with maglites. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Oxford University Press (OUP), v. 475, n. 4, p. 5085–5097, jan 2018.

WILSON, A. G. Sculptor-type systems in the local group of galaxies. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, v. 67, p. 27–29, 1955. Disponível em: <<https://api.semanticscholar.org/CorpusID:120627099>>.

Eridanus II

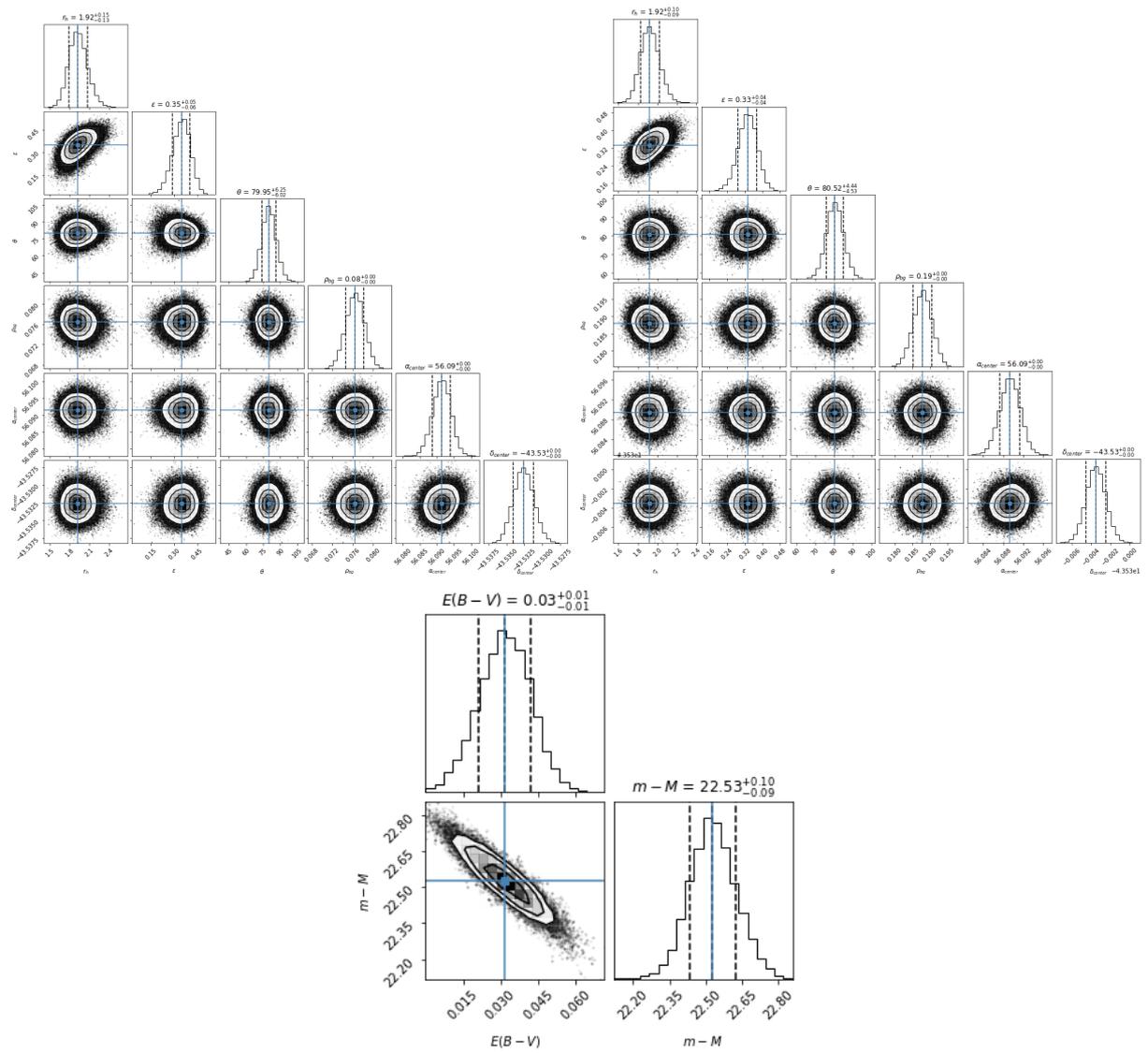


Figura 14 – O mesmo que na Figura 13

Horologium I

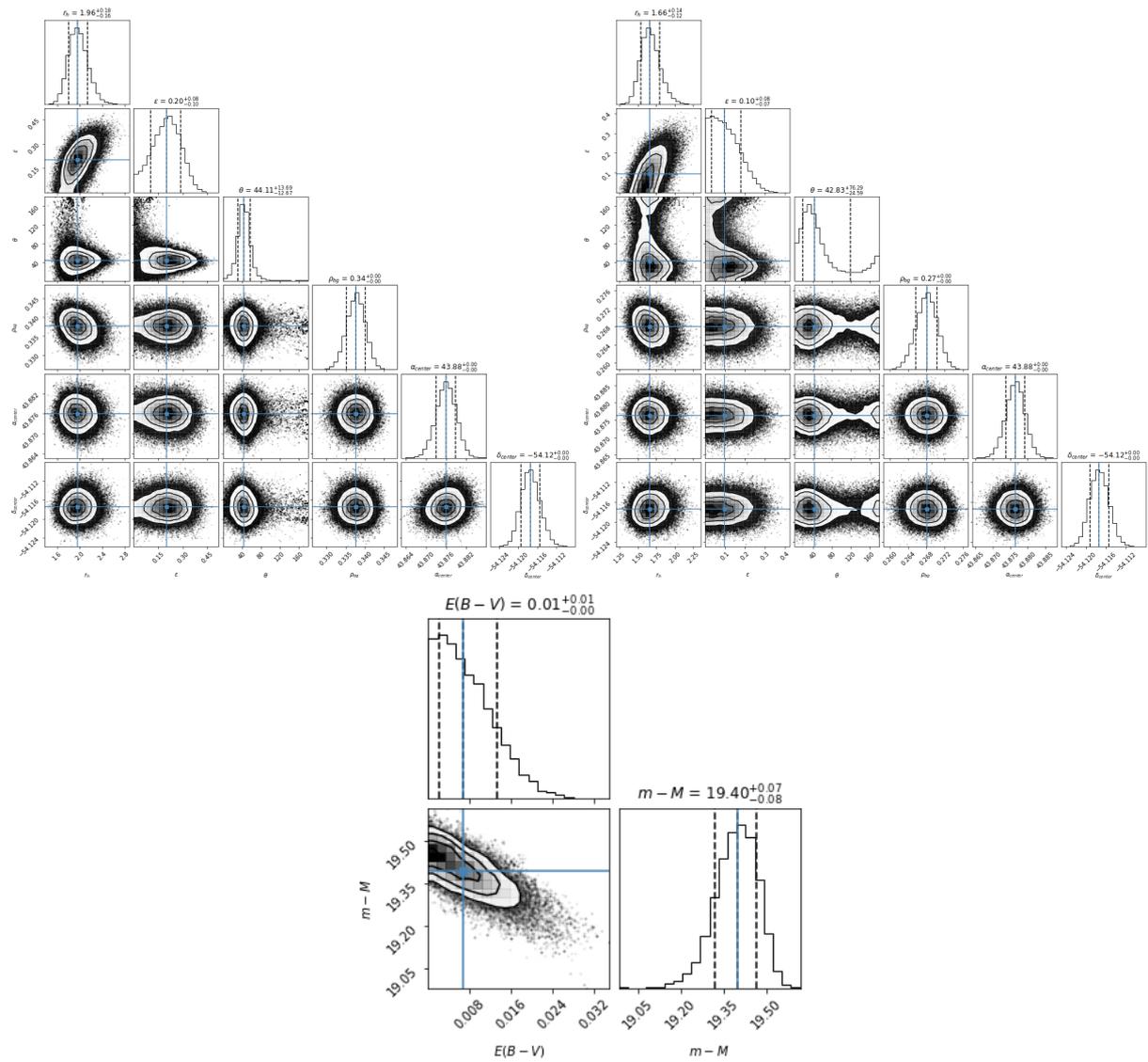


Figura 15 – O mesmo que na Figura 13

Leo IV

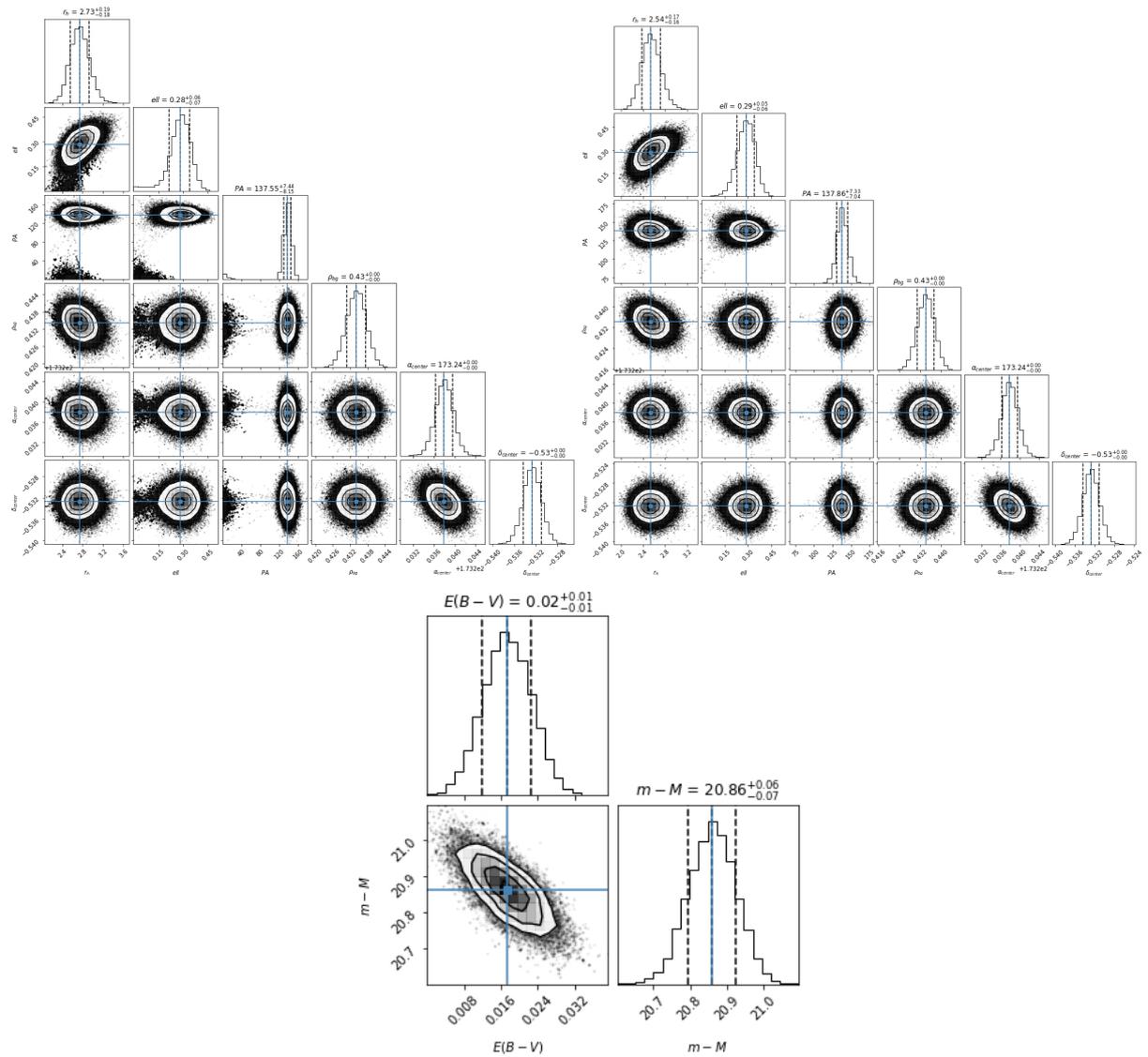


Figura 16 – O mesmo que na Figura 13

Pegasus III

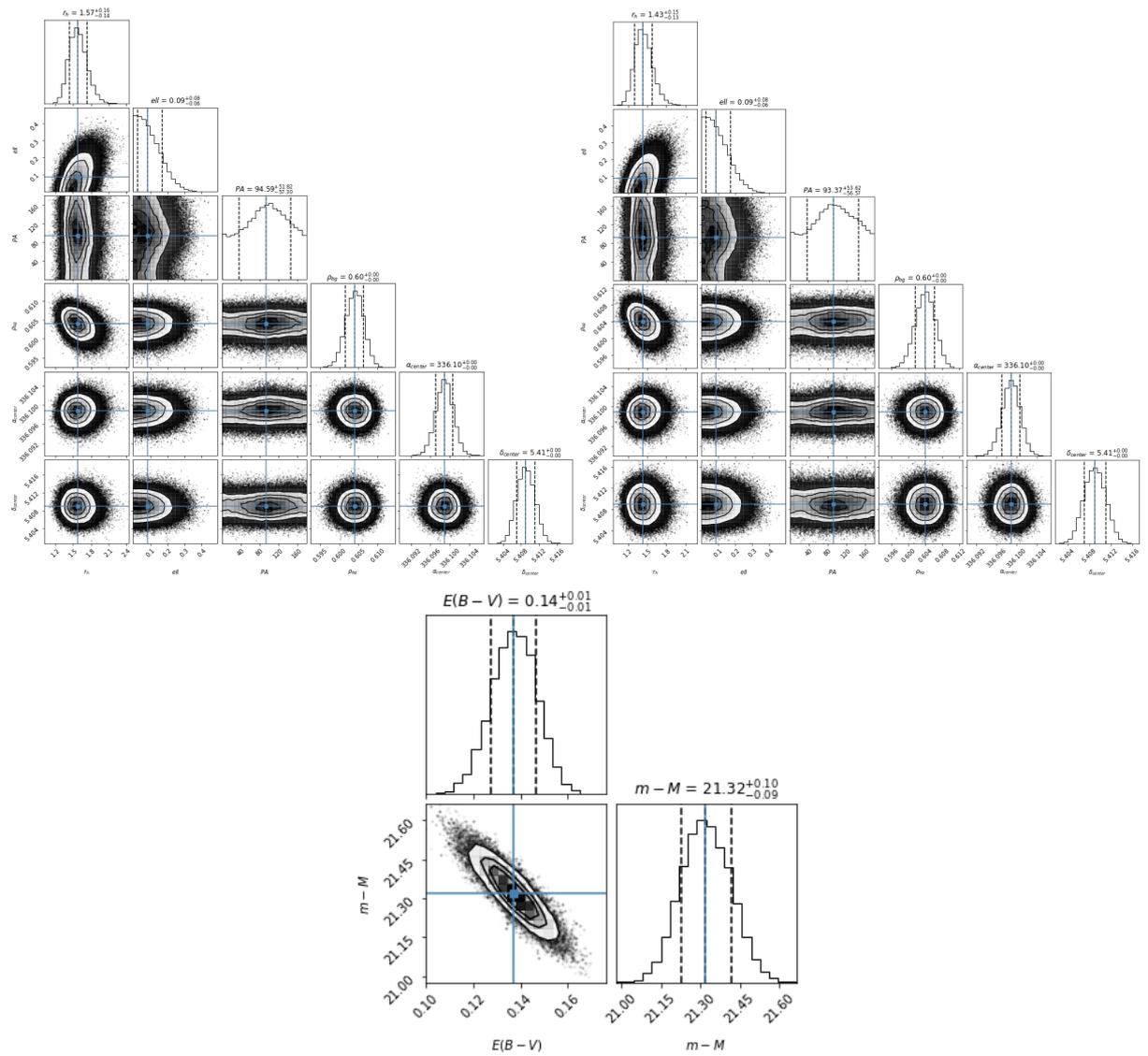


Figura 17 – O mesmo que na Figura 13