

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

Fernanda Nogueira

**A população de aglomerados globulares
acretados na Via Láctea**

São Paulo

2021

Fernanda Nogueira

A população de aglomerados globulares acretados na Via Láctea

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

Vertente: Pesquisa Básica

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Silvia C. F. Rossi

São Paulo

2021

*Ao Fredy e ao Duque,
as duas estrelas no centro do meu universo.
“Starry eyes sparking up my darkest night”*

Agradecimentos

Agradeço em primeiro lugar aos meus pais e minha família que me apoiaram nessa jornada louca de me graduar em Astronomia. Agradeço aos amigos queridos que estiveram do meu lado, não necessariamente desde o início, mas certamente nos piores, melhores e mais decisivos momentos dessa graduação e fizeram tudo ser mais leve e divertido: Ana Clara, Giovani, Guilherme, Ingrid, Kayleigh, Kethelin, Melissa e Vinícius.

Aos demais, obrigada por terem compartilhado risadas comigo e aqueles momentos que sempre vou lembrar com um quentinho no coração: Mariana, André, Amanda, Ge, Thayse, Henrique, Mirian, Fabio, Júlia, Catarina, Marcelo, Daiane, Stela, Cadu, Vanessa, André, Guilherme, Bruna, Letícia, Luciana, Fernando, Rafael, Alexandre, Amanda, Gabriela, Jady, Jhon, Laís, Raniere, Isabela, Letícia e me perdoe se esqueci de alguém por agora.

Obrigada a todos os professores que participaram da minha formação, em especial: Alex, Alessandro, Elysandra, Ramachrisna, Jane e Vera.

O Guilherme merece um segundo agradecimento em destaque por ter sido fundamental no desenvolvimento desse trabalho. Obrigada por tudo, amigo.

Por fim, minha eterna gratidão à professora Silvia, que com muita paciência, disposição e compreensão, entendeu o momento em que eu me encontrava quando pedi sua orientação para esse trabalho, e foi a melhor orientadora que eu poderia ter, mesmo não tendo sido a melhor orientanda que ela merecia.

“Não tem nada a ver com ser possível ou não, eu faço porque quero!”

- Monkey D. Luffy

“Pare de contar apenas as coisas que você perdeu! O que se foi, se foi!”

- Jinbei

“Milagres só acontecem com as pessoas que não desistem.”

- Emporio Ivankov

Resumo

De acordo com o modelo cosmológico Λ cdm, as estruturas do universo se formam de acordo com um modelo hierárquico, crescendo através de uma sequência de eventos de fusão entre galáxias. Com o advento de grandes levantamentos observacionais, foi identificado um evento de acreção denominado Gaia-Sausage/Enceladus ocorrido na Via Láctea há 10 bilhões de anos. Esse evento trouxe objetos como aglomerados globulares e estrelas que devem guardar informações de sua origem em suas órbitas, permitindo que sejam separados dinamicamente daqueles formados *in situ*.

O objetivo deste trabalho é usar de métodos de seleção quimio-cinemáticos para encontrar os aglomerados acretados do Gaia-Sausage/Enceladus. Myeong et al. (2018) e Massari et al. (2019) fizeram buscas por esses objetos, obtendo resultados concordantes, embora o segundo tenha encontrado um número cerca de três vezes maior que o primeiro. Foi feito um estudo comparativo entre esses resultados, além das seleções de Feuillet et al. (2020), Naidu et al. (2020) e Yuan et al. (2020) para as estrelas do Gaia-Sausage/Enceladus, que foram transpostas para aglomerados globulares.

Foi possível classificar 66 aglomerados globulares como provenientes do Gaia Sausage/Enceladus, sendo 27 identificados em ao menos duas seleções, 16 em ao menos três – contendo os 10 categorizados em Myeong et al. (2018) – e apenas 4 são comuns à todas. Avaliando as melhores seleções, chegou-se a uma lista com 19 aglomerados provenientes dessa estrutura.

Abstract

Accordingt to the Λ cdm cosmological model, the structures in the universe must have formed following a hierarchical model, growing through multiple merger events between galaxies. With the outbreak of large observational surveys, a merger was identified to have occured 10Gyr ago in the Milky Way and it was called Gaia-Sausage/Enceladus. It must have carried stars and globular clusters into the Galaxy, which should retain information of their origin in their orbits, allowing for a dynamical tagging of accreted and *in situ* objects.

This work aims to use chemo-dynamical selection methods to find the accreted globular clusters from Gaia-Sausage/Enceladus. Myeong et al. (2018) and Massari et al. (2019) searched for them, achieving compatible results, although the latter found a number of objects nearly three times greater than the former one. A comparative study was made between these results and those obtained with the selections from Feuillet et al. (2020), Naidu et al. (2020) and Yuan et al. (2020) for the Gaia-Sausage/Enceladus stars, assigned to a globular cluster sample.

66 clusters were classified as provenient from Gaia-Sausage/Enceladus, 27 from those being identified in at least two selection, 16 in at least three – which include the 10 cluster categorized in Myeong et al. (2018) – and only 4 were tagged in all of them. Evaluating the best selections, 19 clusters were tagged as most certainly originated in that structure.

Lista de Figuras

1.1	Exemplo das sobredensidades formadas por estrelas de galáxias acretadas pela Via Láctea no espaço de energia por momento angular (cada uma dessas quantidades por unidade de massa). Figura retirada de Naidu et al. (2020).	11
1.2	Estruturas cinemáticas identificadas em Koppelman et al. (2018). Figura retirada de Helmi (2020).	13
2.1	Relação idade-metalicidade para os aglomerados de Forbes (2020).	16
2.2	Distribuição de $[\alpha/\text{Fe}]$ por $[\text{Fe}/\text{H}]$ para as estrelas da amostra do APOGEE, sobrepostas pela seleção feita em Feuillet et al. (2020) de estrelas do GSE, com a divisão feita entre estas e a contaminação dos discos.	17
2.3	Função de distribuição de metalicidades para as estrelas da amostra do APOGEE separadas entre aquelas com movimento prógrado ($L_z > 0$) e retrógrado ($L_z < 0$). As médias de cada uma são, respectivamente, $-1.18(38)$ e $-1.20(36)$.	18
2.4	Diagrama de energia por ação na direção angular em coordenadas cilíndricas para a amostra do APOGEE, sobreposta pela de aglomerados globulares e da seleção do GSE feita em Feuillet et al. (2020).	19
2.5	Diagrama de ações das órbitas da amostra do APOGEE, sobreposta pela de aglomerados globulares e da seleção do GSE feita em Feuillet et al. (2020).	19
2.6	Relação de idade-metalicidade para a seleção de Feuillet et al. (2020).	20
2.7	Distribuição de $[\alpha/\text{Fe}]$ por $[\text{Fe}/\text{H}]$ para as estrelas da amostra do APOGEE, sobrepostas pela seleção feita em Naidu et al. (2020) de estrelas do GSE, com a divisão feita entre estas e a contaminação dos discos.	20

2.8	Diagrama de inclinação da órbita em relação ao plano Galáctico pela excentricidade da mesma, para a amostra do APOGEE, sobreposta pela de aglomerados globulares e da seleção do GSE feita em Naidu et al. (2020).	21
2.9	Diagrama de energia por ação na direção radial em coordenadas cilíndricas para a amostra do APOGEE, sobreposta pela de aglomerados globulares e da seleção do GSE feita em Naidu et al. (2020).	22
2.10	Relação de idade-metalicidade para a seleção de Naidu et al. (2020).	22
2.11	Distribuição de $[\alpha/\text{Fe}]$ por $[\text{Fe}/\text{H}]$ para as estrelas da amostra do APOGEE, sobrepostas pela seleção feita em Yuan et al. (2020) de estrelas do GSE, com a divisão feita entre estas e a contaminação dos discos.	23
2.12	Diagrama de energia por ação na direção radial em coordenadas cilíndricas para a amostra do APOGEE, sobreposta pela de aglomerados globulares e da seleção do GSE feita em Yuan et al. (2020).	24
2.13	Diagrama de inclinação da órbita em relação ao plano Galáctico pela excentricidade da mesma, para a amostra do APOGEE, sobreposta pela de aglomerados globulares e da seleção do GSE feita em Yuan et al. (2020).	24
2.14	Relação de idade-metalicidade para a seleção de Yuan et al. (2020).	25

Sumário

1. <i>Introdução</i>	10
1.1 Químico-cinemática de populações estelares	11
1.2 Missão espacial Gaia e o Gaia-Sausage/Enceladus	12
1.3 Aglomerados globulares do halo e objetivos	13
2. <i>Seleção dos aglomerados globulares acretados</i>	15
2.1 Dados e critérios	15
2.2 Seleção do GSE	16
2.2.1 Feuillet et al. (2020)	17
2.2.2 Naidu et al. (2020)	18
2.2.3 Yuan et al. (2020)	21
3. <i>Considerações finais - aglomerados do Gaia-Sausage/Enceladus</i>	26
<i>Referências</i>	28

Introdução

Atualmente, o modelo cosmológico padrão é o Λ cdm (*Lambda Cold Dark Matter*), segundo o qual a formação de estruturas ocorre de modo hierárquico, com as galáxias sendo constituídas dentro de halos de matéria escura e crescendo através da fusão com outras ao longo de sua história, originando o universo que observamos hoje. Por conseguinte, a própria Via Láctea deve ter experienciado esses eventos, os quais poderiam ser responsáveis pelo estabelecimento das componentes clássicas da Galáxia como o halo estelar, o disco espesso e a barra central.

A arqueologia Galáctica é uma área de estudo fundamentada em desvendar o histórico dessas estruturas a partir das estrelas que as compõem, uma vez que elas guardam um registro fóssil do ambiente em que se formaram. As atmosferas estelares refletem a composição química do meio interestelar do qual procedem, e a dinâmica das órbitas fornece pistas sobre o local de sua origem: *in situ* ou acretadas. Dessa forma, é possível identificar populações com padrões que apontam para uma procedência em comum e uma história compartilhada. Diferentes características na cinemática e distribuição de idades e metalicidades das componentes da Galáxia indicam que cada uma teve seu próprio caminho de formação e evolução. Particularmente, o halo Galáctico guarda evidências de que seu desenvolvimento se deu pela canibalização de galáxias menores que a Via Láctea, que nele depositaram seus escombros estelares. Por conta disso, o estudo da quimio-cinemática das populações dessa estrutura tem revelado a sequência de eventos que formaram a Galáxia (Helmi, 2020).

1.1 Químio-cinemática de populações estelares

Durante o encontro de duas galáxias, dependendo da diferença de massa entre elas, a menor está propensa a ser dilacerada por forças de maré. Quando isso ocorre, as estrelas tendem a seguir a trajetória do sistema inicial, dadas as leis de conservação da mecânica clássica. No caso de galáxias pequenas, elas devem ter integrais de movimento – energia (E) e momento angular (L) – semelhantes, porque suas órbitas o são (Helmi, 2020). Assim, usando o espaço formado por essas grandezas, é possível identificar sobredensidades que correspondem a esses grupos com dinâmica similar, como exemplificado na Figura 1.1. Essa é uma ferramenta poderosa, porque permite a detecção de eventos de acreção mesmo que já tenha decorrido tempo suficiente para que as estrelas se espalhem por todo o espaço físico, e não seja possível traçar a origem delas apenas observando sua disposição no céu.

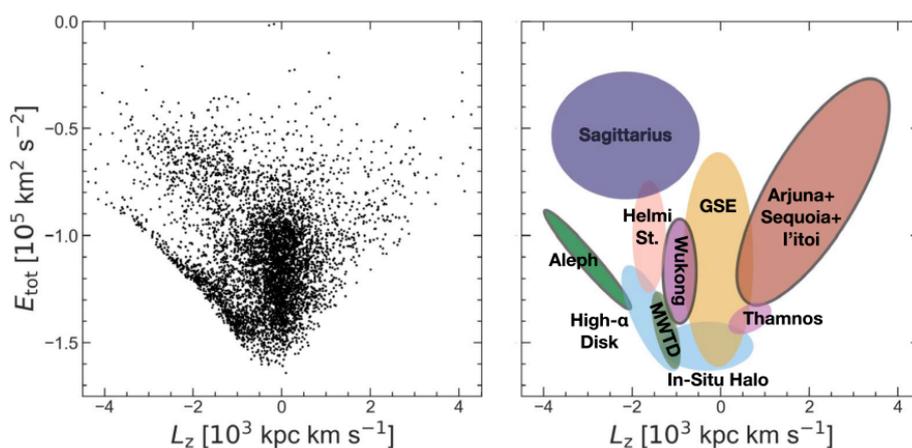


Figura 1.1: Exemplo das sobredensidades formadas por estrelas de galáxias acretadas pela Via Láctea no espaço de energia por momento angular (cada uma dessas quantidades por unidade de massa). Figura retirada de Naidu et al. (2020).

Esse método, no entanto, apresenta algumas ressalvas. A conservação de energia e momento angular ocorre em potenciais fixos; mas o potencial gravitacional da Galáxia deve ter mudado ao longo do tempo. Apesar disso, simulações de Gómez et al. (2013) e Simpson et al. (2019) mostram que as estruturas são observadas mesmo com as alterações sofridas pela Via Láctea. E ainda assim, há a alternativa de usar a ação das órbitas (J), que apesar de apresentar maiores dificuldades computacionais, tem a propriedade de serem conservadas mesmo em potenciais assimétricos.

Para além da cinemática, a composição química das estrelas também guarda informações do ambiente em que se formaram e de como o mesmo evoluiu. Em particular, dados de

idade e metalicidade de uma população revelam se há uma história compartilhada entre as componentes da mesma, posto que em um sistema fechado a metalicidade – comumente medida como a abundância de ferro em relação à abundância de hidrogênio – deve aumentar com o tempo, devido à produção de elementos mais pesados no núcleo de estrelas de alta massa. Até mesmo simples modelos de evolução química conseguem descrever uma relação entre as duas grandezas, que será distinta para diferentes ambientes, a depender da composição química inicial do mesmo. Então esta relação se torna uma aliada na tarefa de determinar se um grupo de objetos estelares compartilha de uma origem em comum.

Esse tipo de estudo combinando a cinemática e química das estrelas ganhou força na última década, especialmente devido ao advento de grandes levantamentos observacionais como a missão espacial Gaia (Gaia Collaboration et al., 2016), que possibilitou uma precisão sem precedentes em astrometria.

1.2 Missão espacial Gaia e o Gaia-Sausage/Enceladus

O segundo *Data Release* do Gaia (Gaia DR2) (Gaia Collaboration, 2018), com um grande volume de dados astrométricos de altíssima qualidade, trouxe uma riqueza de detalhes para estudos feitos previamente sobre estrelas observadas com cinemática de halo, mas abundâncias típicas do disco espesso (e.g. Bonaca et al., 2017). De fato, Gaia Collaboration et al. (2018) constata duas populações estelares no halo seguindo sequências distintas no diagrama de cor-magnitude, explicadas pela diferença de idade e metalicidade entre elas. Koppelman et al. (2018) demonstra que aquela mais velha e pobre em metais – e também com menor abundância de elementos α – coincide com uma estrutura cinemática ligeiramente retrógrada, apelidada de “blob” na Figura 1.2.

Um estudo aprofundado dessa população em específico é feita em Helmi et al. (2018), em que a autora conclui que ela foi acretada de outra galáxia, denominada “Gaia-Enceladus”, há 10 bilhões de anos. A evidência mais contundente desse evento vem da química das estrelas, as quais apresentam uma abundância de $[\alpha/\text{Fe}]$ menor que aquela de estrelas do disco espesso para uma mesma metalicidade ($[\text{Fe}/\text{H}]$). Dado que elementos α se formam durante supernovas de tipo II, a razão $[\alpha/\text{Fe}]$ de uma população estelar que nasceu junta tende a se manter constante com o aumento de $[\text{Fe}/\text{H}]$. Com o passar do tempo, quando as estrelas menos massivas deixam a sequência principal e se transformam em anãs brancas,

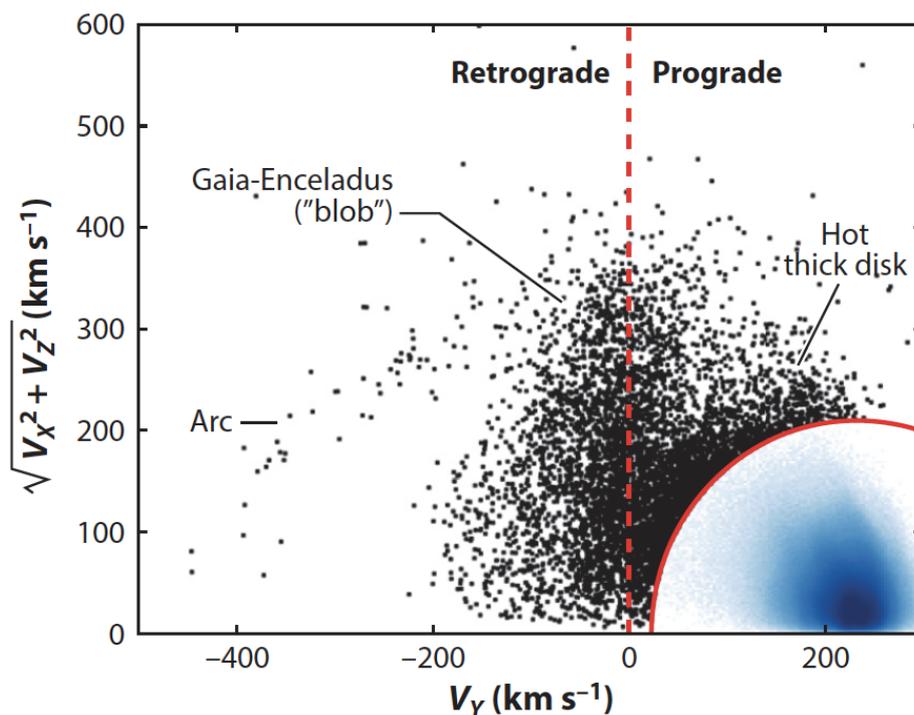


Figura 1.2: Estruturas cinemáticas identificadas em Koppelman et al. (2018). Figura retirada de Helmi (2020).

é possível a ocorrência de supernovas de tipo Ia nesse ambiente. Estas não produzem elementos α , mas enriquecem o meio, aumentando a quantidade de $[\text{Fe}/\text{H}]$ e com isso vemos uma queda em $[\alpha/\text{Fe}]$. Em resumo, se para o mesmo $[\text{Fe}/\text{H}]$ as estrelas do halo têm $[\alpha/\text{Fe}]$ menor que aquelas do disco espesso, isso significa que elas se formaram em ambientes diferentes, e como as do disco tiveram sua formação *in situ*, as do halo devem ter sido acregadas.

Com o advento do Gaia e de levantamentos espectroscópicos como o APOGEE (*Apache Point Observatory Galactic Evolution Experiment*), (Majewski et al., 2017), estão sendo desvendados diversos possíveis eventos de acreção que ocorreram na história da Via Láctea. Contudo, o Gaia-Sausage (Belokurov et al., 2018) em pouco tempo se consolidou como um paradigma, por sua excepcional dimensão.

1.3 Aglomerados globulares do halo e objetivos

A acreção do Gaia-Sausage/Enceladus (GSE) trouxe outros objetos dessa galáxia, como aglomerados globulares, além de estrelas. Esses, assim como seu análogo estelar, também devem guardar informações de sua origem em suas órbitas e composição química. O obje-

tivo deste trabalho é usar dos métodos citados na Seção 1.1 para encontrar os aglomerados acretados de GSE. Myeong et al. (2018) e Massari et al. (2019) já fizeram a busca por esses objetos, obtendo resultados concordantes, porém Massari et al. (2019) encontrou um número cerca de três vezes maior do que Myeong et al. (2018).

Aqui, será feito um estudo comparativo entre esses dois resultados, além das seleções feitas em Feuillet et al. (2020), Naidu et al. (2020) e Yuan et al. (2020) para as estrelas do GSE, transpostas para aglomerados.

Seleção dos aglomerados globulares acretados

Neste capítulo são descritos os dados utilizados na realização do projeto, bem como a análise feita com base nos trabalhos de Feuillet et al. (2020), Naidu et al. (2020) e Yuan et al. (2020), os quais ocasionalmente serão referenciados apenas pelo nome dos primeiros autores – Feuillet, Helmi, Naidu e Yuan.

2.1 Dados e critérios

Para o estudo mecânico, foi feito um cruzamento dos catálogos estelares do Gaia DR2 e do 16^o *Data Release* do APOGEE, para então se calcular as órbitas estelares com o código de Vasiliev (2019a), utilizando o potencial de McMillan (2017) (o procedimento completo está descrito na Seção 2.2 de Limberg et al., 2021). Os parâmetros orbitais dos aglomerados globulares foram calculados da mesma forma, utilizando os dados de Vasiliev (2019b). A amostra final de estrelas – referida como amostra do APOGEE – tem cerca de 234 mil membros, e a de aglomerados, 151. Optou-se pelo cruzamento de dados ao invés de simplesmente usar o catálogo do Gaia DR2, pois há uma distinção visual entre os discos e o halo da Galáxia no diagrama de $[\alpha/\text{Fe}] \times [\text{Fe}/\text{H}]$, que foi utilizada para avaliar a contaminação dos discos em cada seleção. Para essa separação, foi utilizada uma reta empírica definida por $[\alpha/\text{Fe}] = -1.12 - 1.6[\text{Fe}/\text{H}]$.

Já para o estudo químico, foi usada a compilação de Kruijssen et al. (2019) contendo idades e metalicidades de 95 dos 151 aglomerados, provenientes de dados fotométricos da *Advanced Camera for Surveys* do Telescópio Espacial Hubble. O intuito inicial era aplicar os parâmetros determinados por Forbes (2020) na Equação 2.1 (adiante) e verificar quão bem as seleções feitas seguiam essa relação. Todavia, não foi possível aplicar os parâmetros

corretamente à equação e optou-se por criar uma amostra dos aglomerados definidos no Apêndice A de Forbes (2020) como pertencentes ao GSE, separá-la em janelas de idade de 1 Gano, calcular a média e o desvio padrão da metalicidade dessas subamostras e definir o intervalo entre $+1\sigma$ e -1σ como a região em que se encontrariam os aglomerados do GSE. A Figura 2.1 mostra os aglomerados selecionados por Forbes (2020) e a relação idade-metalicidade definida conforme descrito.

$$[\text{Fe}/\text{H}] = -p \ln \left(\frac{t}{t_f} \right). \quad (2.1)$$

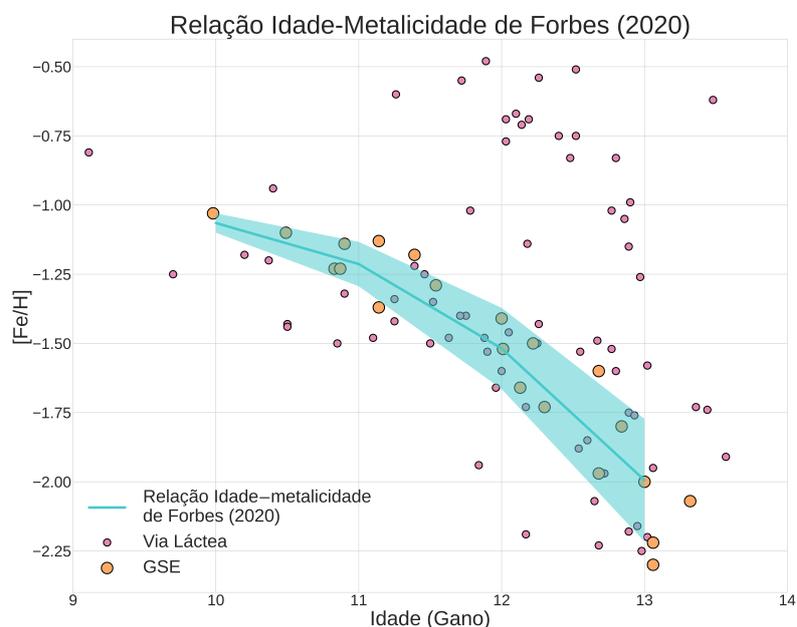


Figura 2.1: Relação idade-metalicidade para os aglomerados de Forbes (2020).

2.2 Seleção do GSE

Os trabalhos escolhidos apresentam diferentes abordagens para a definição do GSE, todos usando espaços de grandezas dinâmicas ou cinemáticas calculadas a partir de dados do Gaia DR2, o que garante uniformidade nas comparações que serão feitas. Ademais, são todos estudos recentes dessa estrutura.

2.2.1 Feuillet et al. (2020)

O intuito principal de Feuillet et al. (2020) é caracterizar o GSE em espaços cinemáticos e de ações, obtendo uma amostra com a menor contaminação possível de estrelas do disco. A Figura 2.2 demonstra que essa contaminação é de fato pequena, calculada em torno de 11% quando aplicada a seleção dos autores à amostra do APOGEE.

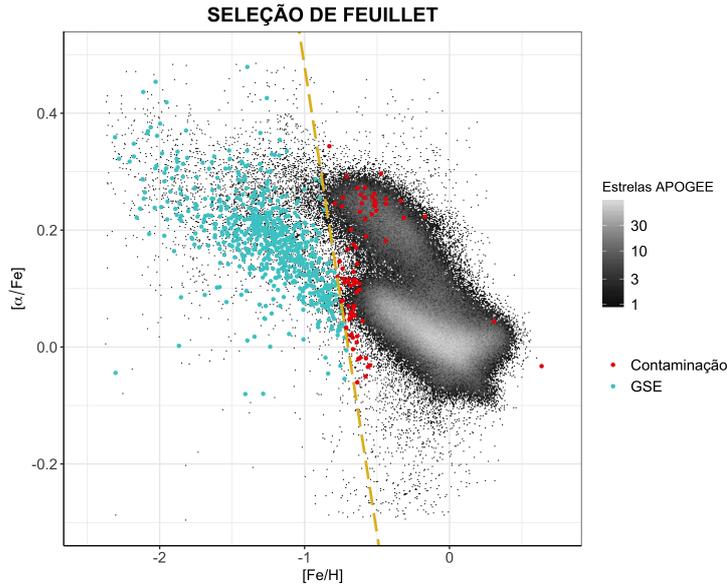


Figura 2.2: Distribuição de $[\alpha/\text{Fe}]$ por $[\text{Fe}/\text{H}]$ para as estrelas da amostra do APOGEE, sobrepostas pela seleção feita em Feuillet et al. (2020) de estrelas do GSE, com a divisão feita entre estas e a contaminação dos discos.

Feuillet analisa a função de distribuição de metalicidades de aproximadamente 900 mil estrelas do cruzamento dos catálogos do Gaia DR2 e *SkyMapper*, concluindo que as estrelas associadas ao GSE são aquelas que satisfazem $30 \leq \sqrt{J_R} \leq 50$ (kpc km/s)^{1/2} e $-500 \leq L_z \leq 500$ (kpc km/s). Aqui encontramos um problema de compatibilidade dos dados; Feuillet adota um potencial Galáctico diferente daquele da amostra do APOGEE, o que não tem grande impacto sobre os valores de $\sqrt{J_R}$, mas poderia ter sobre L_z . No entanto, como mostra a Figura 2.3, a seleção feita gerou aproximadamente a mesma função de distribuição de metalicidades para as duas metades da amostra simétricas em relação a L_z , o que indica que a incompatibilidade apontada pode ser desconsiderada.

As Figuras 2.4 e 2.5 mostram os 11 aglomerados globulares que satisfazem os critérios de Feuillet e portanto teriam sua origem no sistema de GSE. Na Figura 2.4, alguns dos aglomerados Galácticos parecem ocupar o espaço das estrelas associadas ao GSE por essa

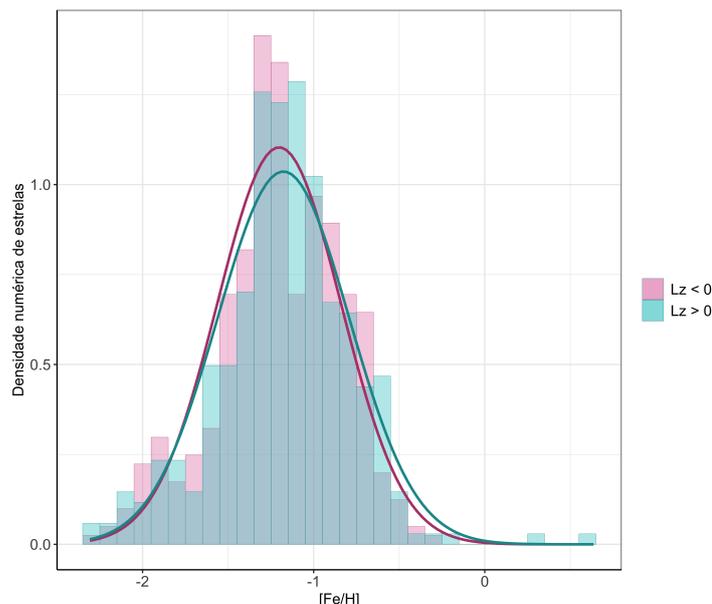


Figura 2.3: Função de distribuição de metalicidades para as estrelas da amostra do APOGEE separadas entre aquelas com movimento prógrado ($L_z > 0$) e retrógrado ($L_z < 0$). As médias de cada uma são, respectivamente, $-1.18(38)$ e $-1.20(36)$.

seleção, mas isso se deve ao fato de que a ação na direção do centro da Via Láctea (em coordenadas cilíndricas) não impõe fortes restrições à energia, enquanto o momento angular perpendicular ao plano Galáctico é uma grandeza quase equivalente à ação em ϕ . Logo, os objetos em questão são excluídos da seleção por não terem J_R compatível com o que foi imposto – o que é claramente observado na Figura 2.5.

Dos 11 aglomerados selecionados, 10 estavam presentes na amostra de Kruijssen e seguem uma sequência de idade metalicidade coesa, Figura 2.6, reforçando a qualidade da amostra em representar a população de aglomerados globulares do GSE.

2.2.2 Naidu et al. (2020)

O objetivo principal de Naidu et al. (2020) é identificar subestruturas do halo, até 50 kpc do centro da Galáxia, com dados cruzados do Gaia DR2 com o levantamento espectroscópico H3. Naidu define as estrelas pertencentes ao GSE como aquelas com excentricidade $e > 0.7$, o que resulta em uma amostra com altíssima contaminação do disco espesso e do fino (Figura 2.7), chegando a quase 45% da seleção sobre as estrelas do APOGEE. A Figura 2.8 mostra os 63 aglomerados que satisfazem ao critério imposto para pertencerem ao GSE.

Mais uma vez, o potencial gravitacional usado pelos autores é diferente daquele usado

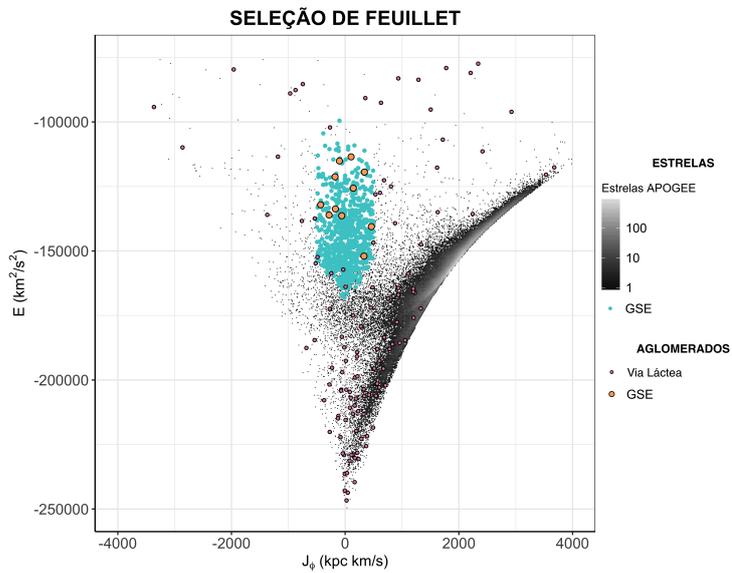


Figura 2.4: Diagrama de energia por ação na direção angular em coordenadas cilíndricas para a amostra do APOGEE, sobreposta pela de aglomerados globulares e da seleção do GSE feita em Feuillet et al. (2020).

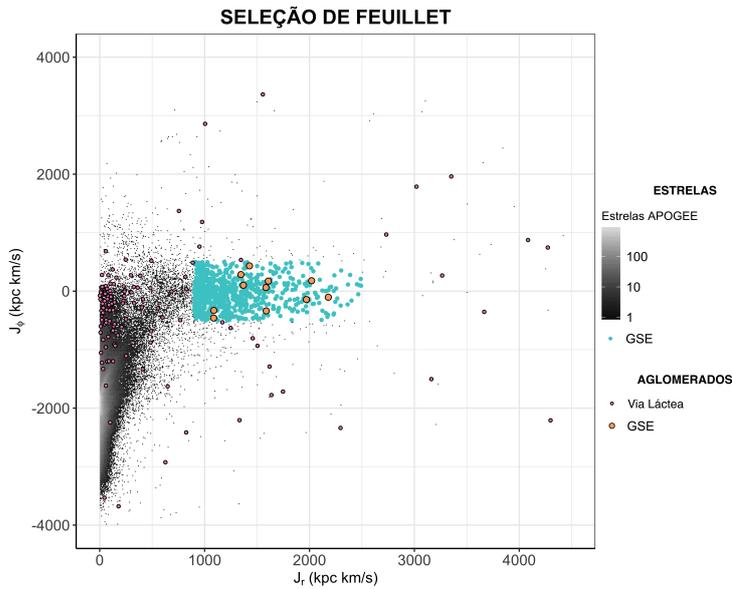


Figura 2.5: Diagrama de ações das órbitas da amostra do APOGEE, sobreposta pela de aglomerados globulares e da seleção do GSE feita em Feuillet et al. (2020).

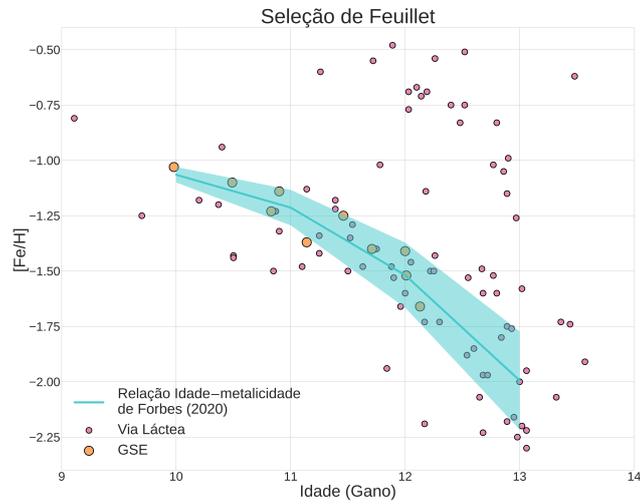


Figura 2.6: Relação de idade-metalicidade para a seleção de Feuillet et al. (2020).

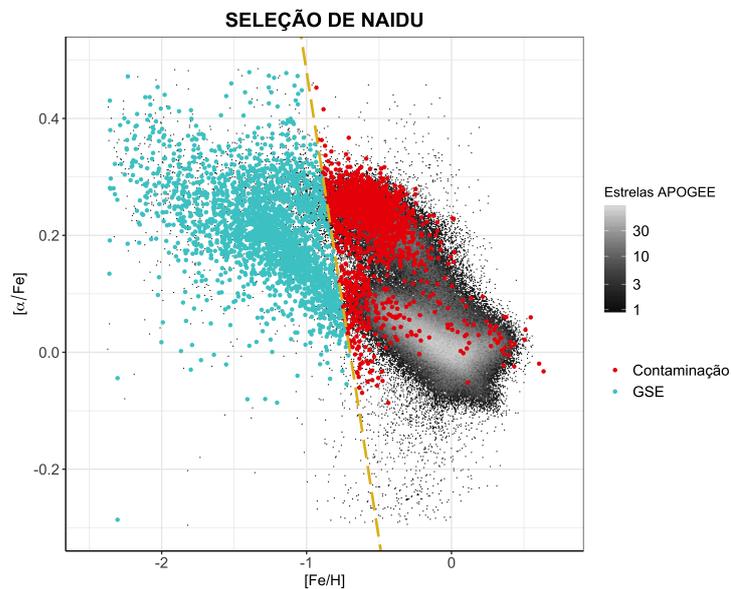


Figura 2.7: Distribuição de $[\alpha/\text{Fe}]$ por $[\text{Fe}/\text{H}]$ para as estrelas da amostra do APOGEE, sobrepostas pela seleção feita em Naidu et al. (2020) de estrelas do GSE, com a divisão feita entre estas e a contaminação dos discos.

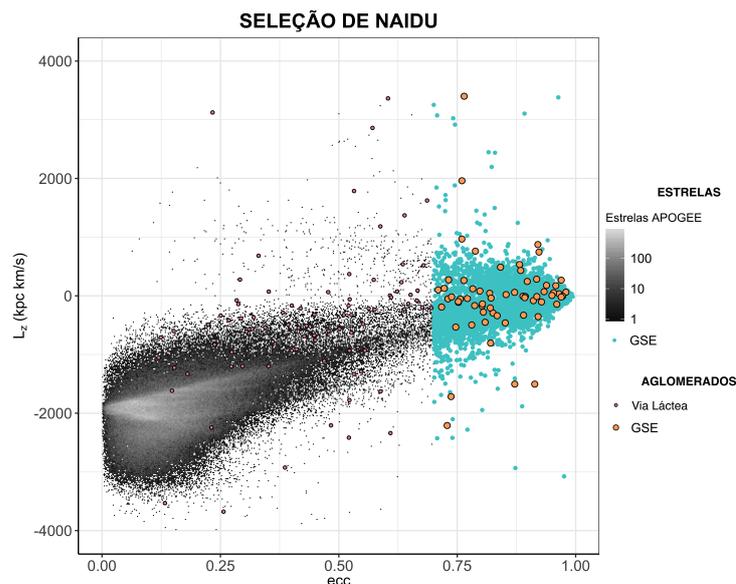


Figura 2.8: Diagrama de inclinação da órbita em relação ao plano Galáctico pela excentricidade da mesma, para a amostra do APOGEE, sobreposta pela de aglomerados globulares e da seleção do GSE feita em Naidu et al. (2020).

neste projeto, mas a excentricidade é uma grandeza pouco afetada por essa mudança, permitindo que ela seja novamente desconsiderada.

A Figura 2.9 mostra como a seleção segue uma sequência coesa em um espaço dinâmico.

Dos 63 aglomerados selecionados, 39 estavam presentes na amostra de Kruijssen e estes não formam uma relação coesa de idade-metalicidade, como mostra a Figura 2.10, tendo aglomerados até na sequência de maior idade e metalicidade, no canto superior direito da figura, atribuído à progenitora da Via Láctea em Kruijssen et al. (2019).

2.2.3 Yuan et al. (2020)

Em Yuan et al. (2020) é feita uma procura por subestruturas dinâmicas – semelhante ao que é feito por Naidu – no terceiro *Data Release* do catálogo de estrelas muito pobres em metais do LAMOST (*Large Sky Area Multi-Object Fiber Spectroscopic Telescope*), cruzado com o Gaia DR2, através de um método computacional que agrupa as estrelas de acordo com suas características dinâmicas. Os grupos que Yuan associa ao GSE têm $e \geq 0.7$, $J_R > 500$ (kpc km/s), $J_z < 500$ (kpc km/s) e $-2 \cdot 10^5 < E < -1.3 \cdot 10^5$ (km²/s²). As Figuras 2.12 e 2.13 mostram os 15 aglomerados selecionados por esses critérios em espaços cinemáticos e a Figura 2.11, a alta contaminação dos discos nessa seleção, de

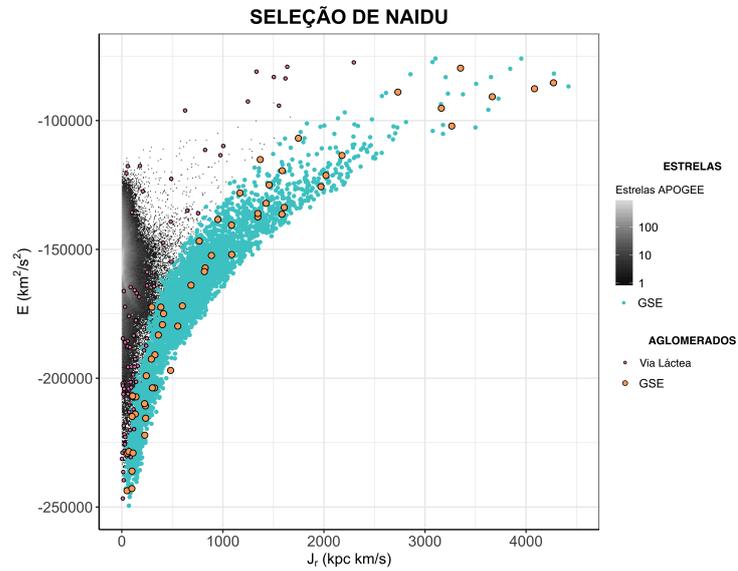


Figura 2.9: Diagrama de energia por ação na direção radial em coordenadas cilíndricas para a amostra do APOGEE, sobreposta pela de aglomerados globulares e da seleção do GSE feita em Naidu et al. (2020).

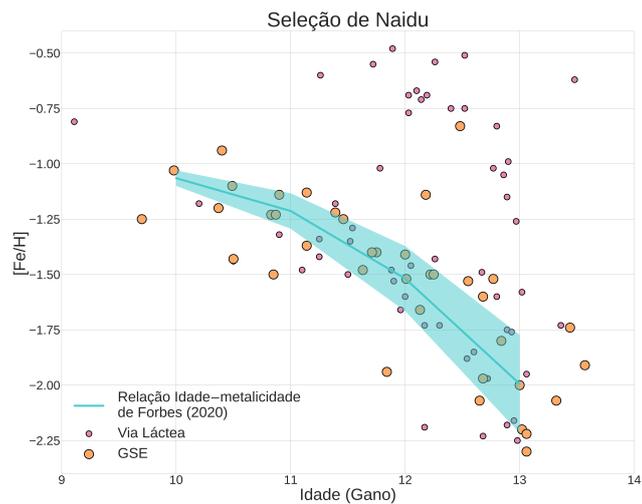


Figura 2.10: Relação de idade-metalidade para a seleção de Naidu et al. (2020).

aproximadamente 36%.

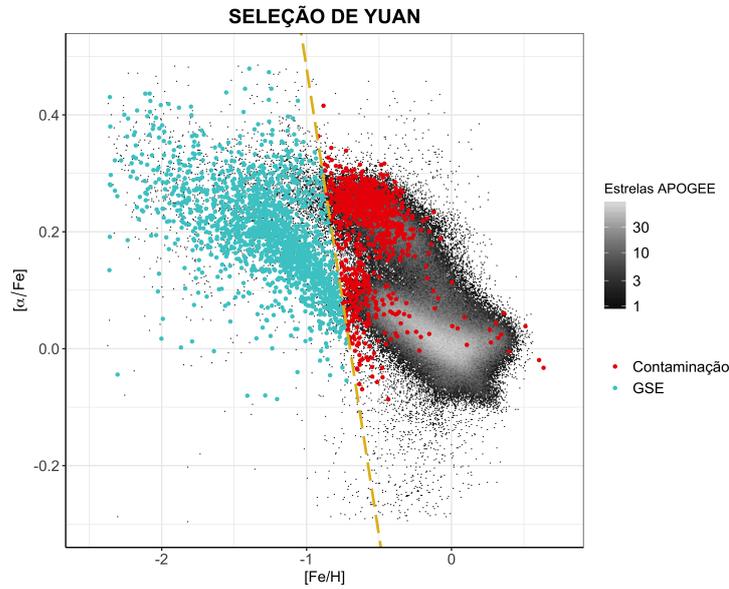


Figura 2.11: Distribuição de $[\alpha/\text{Fe}]$ por $[\text{Fe}/\text{H}]$ para as estrelas da amostra do APOGEE, sobrepostas pela seleção feita em Yuan et al. (2020) de estrelas do GSE, com a divisão feita entre estas e a contaminação dos discos.

Dos 15 aglomerados selecionados, 12 estavam presentes na amostra de Kruijssen e seguem uma sequência de idade metalicidade coesa, Figura 2.14, reforçando a qualidade da amostra em representar a população de aglomerados globulares do GSE.

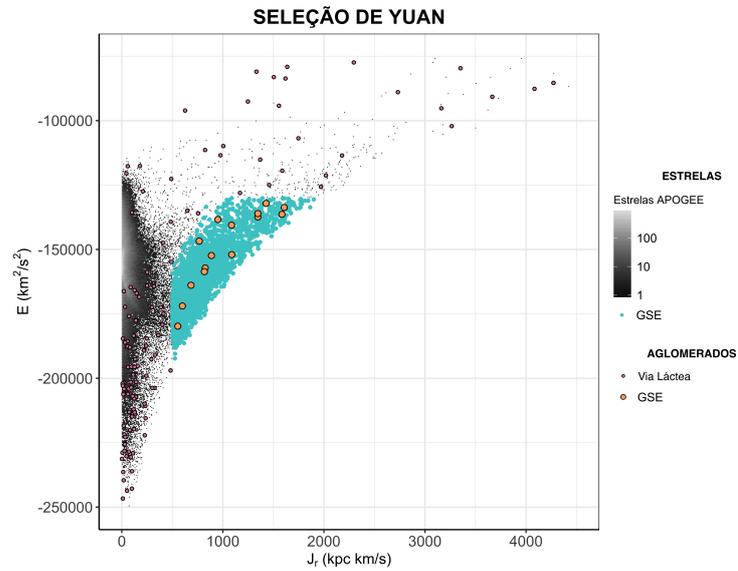


Figura 2.12: Diagrama de energia por ação na direção radial em coordenadas cilíndricas para a amostra do APOGEE, sobreposta pela de aglomerados globulares e da seleção do GSE feita em Yuan et al. (2020).

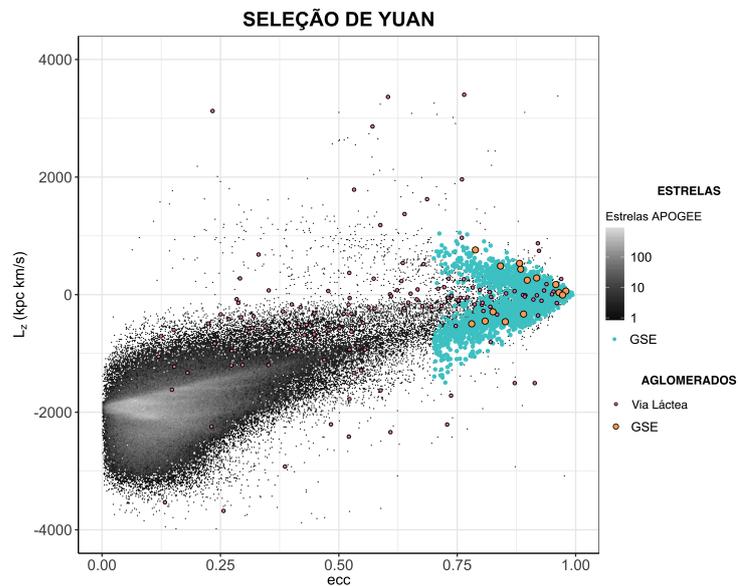


Figura 2.13: Diagrama de inclinação da órbita em relação ao plano Galáctico pela excentricidade da mesma, para a amostra do APOGEE, sobreposta pela de aglomerados globulares e da seleção do GSE feita em Yuan et al. (2020).

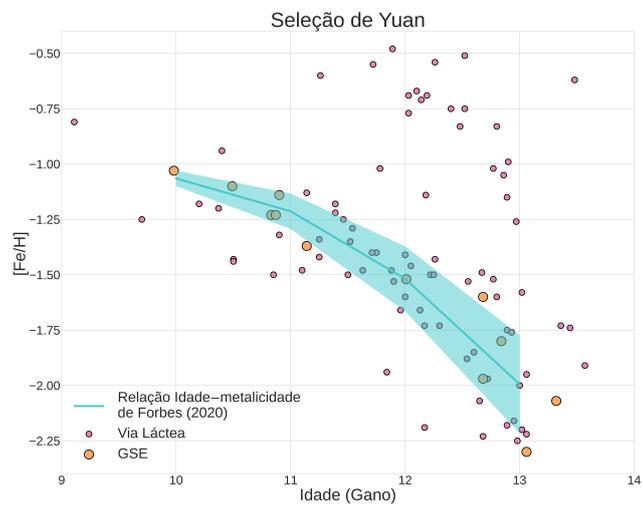


Figura 2.14: Relação de idade-metalicidade para a seleção de Yuan et al. (2020).

Considerações finais - aglomerados do Gaia-Sausage/Enceladus

Recapitulando brevemente:

- 66 aglomerados globulares ao todo foram classificados como provenientes do Gaia-Sausage/Enceladus, dos quais:
 - Naidu rotulou 63;
 - Yuan, 15;
 - Feuillet, 11.

Então 27 foram classificados por ao menos duas seleções, 16 por ao menos três e apenas 4 aglomerados são comuns à todas. Ainda pode ser destacado que:

- Elas estão de acordo com Myeong et al. (2018), que classifica 10 aglomerados como originários do GSE pelos autores e todos esses são contemplados no conjunto de 16 objetos presentes em ao menos 3 seleções;
- Também estão de acordo com Massari et al. (2019), pois 81% dos aglomerados aqui classificados como pertencentes ao GSE assim também o foram pelos autores do artigo.

Dentre as amostras estudadas, a de Naidu se mostrou a pior para caracterizar a população do GSE. Apesar de incluir aglomerados que poderiam ter nascido fora da Galáxia que não estão presentes na seleção de Feuillet e Yuan, é a amostra de maior contaminação e que não forma uma relação de idade-metalicidade coesa.

Dessa forma, o critérios que se utilizaram das ações J das estrelas, aqueles de Yuan et al. (2020) e Feuillet et al. (2020), mostraram selecionar os aglomerados do GSE com maior acurácia, tendo pouca contaminação dos discos e descrevendo uma sequência de idade-metalicidade compatível com a de Forbes (2020). A união das duas amostras define os seguintes aglomerados como pertencentes ao GSE: Djorg1, IC1257, NGC1261, NGC1851, NGC1904, NGC2298, NGC2808, NGC362, NGC4147, NGC4833, NGC5286, NGC5904, NGC6229, NGC6341, NGC6779, NGC6864, NGC6981, NGC7089, NGC7492.

Referências Bibliográficas

- Belokurov V., Erkal D., Evans N. W., Koposov S. E., Deason A. J., Co-formation of the disc and the stellar halo, *MNRAS*, 2018, vol. 478, p. 611
- Bonaca A., Conroy C., Wetzell A., Hopkins P. F., Kereš D., Gaia Reveals a Metal-rich, in situ Component of the Local Stellar Halo, *ApJ*, 2017, vol. 845, p. 101
- Feuillet D. K., Feltzing S., Sahlholdt C. L., Casagrande L., The SkyMapper-Gaia RVS view of the Gaia-Enceladus-Sausage - an investigation of the metallicity and mass of the Milky Way's last major merger, *MNRAS*, 2020, vol. 497, p. 109
- Forbes D. A., Reverse engineering the Milky Way, *MNRAS*, 2020, vol. 493, p. 847
- Gaia Collaboration VizieR Online Data Catalog: Gaia DR2 (Gaia Collaboration, 2018), VizieR Online Data Catalog, 2018, p. I/345
- Gaia Collaboration Babusiaux C., van Leeuwen F., Barstow M. A., Jordi C., Vallenari A., others Gaia Data Release 2. Observational Hertzsprung-Russell diagrams, *A&A*, 2018, vol. 616, p. A10
- Gaia Collaboration Prusti T., de Bruijne J. H. J., Brown A. G. A., Vallenari A., others The Gaia mission, *A&A*, 2016, vol. 595, p. A1
- Gómez F. A., Helmi A., Cooper A. P., Frenk C. S., Navarro J. F., White S. D. M., Streams in the Aquarius stellar haloes, *MNRAS*, 2013, vol. 436, p. 3602
- Helmi A., Streams, substructures and the early history of the Milky Way, arXiv e-prints, 2020, p. arXiv:2002.04340

-
- Helmi A., Babusiaux C., Koppelman H. H., Massari D., Veljanoski J., Brown A. G. A.,
The merger that led to the formation of the Milky Way's inner stellar halo and thick
disk, *Nature*, 2018, vol. 563, p. 85
- Koppelman H., Helmi A., Veljanoski J., One Large Blob and Many Streams Frosting the
nearby Stellar Halo in Gaia DR2, *ApJ*, 2018, vol. 860, p. L11
- Kruijssen J. M. D., Pfeffer J. L., Reina-Campos M., Crain R. A., Bastian N., The formation
and assembly history of the Milky Way revealed by its globular cluster population,
MNRAS, 2019, vol. 486, p. 3180
- Limberg G., Santucci R. M., Rossi S., Queiroz A. B. A., Chiappini C., Souza S. O., Pe-
rottoni H. D., Pérez-Villegas A., Barbosa F. O., Abundance Patterns of α and Neutron-
capture Elements in the Helmi Stream, *ApJ*, 2021, vol. 913, p. L28
- Majewski S. R., Schiavon R. P., Frinchaboy P. M., Allende Prieto C., others The Apache
Point Observatory Galactic Evolution Experiment (APOGEE), *AJ*, 2017, vol. 154, p. 94
- Massari D., Koppelman H. H., Helmi A., Origin of the system of globular clusters in the
Milky Way, *A&A*, 2019, vol. 630, p. L4
- McMillan P. J., The mass distribution and gravitational potential of the Milky Way, *MN-
RAS*, 2017, vol. 465, p. 76
- Myeong G. C., Evans N. W., Belokurov V., Sanders J. L., Koposov S. E., The Sausage
Globular Clusters, *The Astrophysical Journal*, 2018, vol. 863, p. L28
- Naidu R. P., Conroy C., Bonaca A., Johnson B. D., Ting Y.-S., Caldwell N., Zaritsky D.,
Cargile P. A., Evidence from the H3 Survey that the Stellar Halo is Entirely Comprised
of Substructure, *arXiv e-prints*, 2020
- Simpson C. M., Gargiulo I., Gómez F. A., Grand R. J. J., Maffione N., others Simulating
cosmological substructure in the solar neighbourhood, *MNRAS*, 2019, vol. 490, p. L32
- Vasiliev E., AGAMA: action-based galaxy modelling architecture, *MNRAS*, 2019a,
vol. 482, p. 1525
- Vasiliev E., Proper motions and dynamics of the Milky Way globular cluster system from
Gaia DR2, *MNRAS*, 2019b, vol. 484, p. 2832

Yuan Z., Myeong G. C., Beers T. C., Evans N. W., Lee Y. S., others Dynamical Relics of the Ancient Galactic Halo, *ApJ*, 2020, vol. 891, p. 39