



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE FÍSICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FÍSICA**

SARAH GOMES AROUCHA BARBOSA

**SOBRE A RELAÇÃO METALICIDADE-IDADE-DISTÂNCIA PARA ESTRELAS DO
TIPO F E G NA VIZINHANÇA SOLAR**

FORTALEZA

2021

SARAH GOMES AROUCHA BARBOSA

SOBRE A RELAÇÃO METALICIDADE-IDADE-DISTÂNCIA PARA ESTRELAS DO
TIPO F E G NA VIZINHANÇA SOLAR

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Física da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para a obtenção do Título de Mestre em Física. Área de Concentração: Física da Matéria Condensada.

Orientador: Prof. Dr. Daniel Brito de Freitas.

FORTALEZA
2021

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

B212s Barbosa, Sarah Gomes Aroucha.
 Sobre a relação metalicidade-idade-distância para estrelas do tipo F e G na vizinhança solar / Sarah Gomes Aroucha Barbosa. – 2021.
 52 f. : il. color.

 Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências, Programa de Pós-Graduação em Física, Fortaleza, 2021.

 Orientação: Prof. Dr. Daniel Brito de Freitas.

 1. Metalicidade. 2. Idade. 3. Distância. 4. Vizinhança solar. I. Título.

CDD 530

SARAH GOMES AROUCHA BARBOSA

SOBRE A RELAÇÃO METALICIDADE-IDADE-DISTÂNCIA PARA ESTRELAS DO
TIPO F E G NA VIZINHANÇA SOLAR

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Física da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para a obtenção do Título de Mestre em Física. Área de Concentração: Física da Matéria Condensada.

Aprovada em 09/04/2021.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Daniel Brito de Freitas (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Afrânio de Araújo Coelho
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Mackson Matheus França Nepomuceno
Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA)

Dedico à minha família e amigos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiro à minha mãe, Luzimar Aroucha, por todo o seu esforço em me criar e educar. Mesmo ausente algumas vezes, pois precisa trabalhar para sustentar a família, ela não deixa de estar presente nos momentos mais ímpares da minha vida. Com ela aprendi e aprendo a superar as barreiras que a vida impõe, mesmo quando não têm recursos para vencê-la.

À minha avó, Ely Aroucha, que, apesar de infelizmente ser tomada pelo Alzheimer, ainda se lembra de mim com amor e carinho. Quando mais nova, foi ela que me ensinou a ler, escrever e aprender a tabuada. Ela dizia que não estaria viva para me ver formando, mas olha vó, estou terminando o mestrado e a senhora estará lá para ver!

Ao meu pai de coração, Ricardo Ferreira, pela cumplicidade e apoio. Serei eternamente grata pela sua ajuda em diversos momentos de minha jornada.

Aos meus amigos de longa data, Pâmela Kariny e Carlos Alberto, que nunca me abandonaram, mesmo morando em outro estado.

Ao meu orientador, Dr. Daniel Brito, pela sua notável orientação, bondade e seus sábios conselhos que foram indispensáveis para minha formação no campo da Astrofísica e para esse trabalho.

Agradeço também aos meus queridos amigos da pós-graduação, Edson Soares, Johnathas D'Arf, Daniel Rosa, Daniel Queiroz, João Pontes, Milena Leal, Camilo Naranjo e Michael Torres, pelos momentos de trocas de conhecimento e cultura, amparo nos períodos conflituosos e é claro, ao companheirismo além do âmbito acadêmico.

Ao corpo docente do departamento de Física da Universidade Federal do Ceará (UFC), em especial os professores Dr. Ricardo Renan Landim de Carvalho, Dr. Carlos William de Araújo Paschoal e Dr. João Milton Pereira Júnior, que proporcionaram aulas excepcionais ao longo do mestrado.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

RESUMO

A relação idade-metalicidade configura uma observação fundamental para pormenorizar a evolução química-temporal do disco galáctico. No entanto, essa relação ainda possui um histórico controverso na literatura. Neste trabalho, preconizamos o acréscimo do parâmetro distância, do Sol até a estrela R e dos planos Cartesianos XYZ do disco galáctico nessa relação, com o objetivo de traçar o seu comportamento. Para tal, utilizamos uma amostra de dados de estrelas *single* de tipos espectrais F e G na vizinhança solar advindos do catálogo *Geneva-Copenhagen survey* (GCS), que detém de $[Fe/H]$ derivadas do sistema *uvby* de Strömgren, distâncias resultantes de paralaxe dos catálogos Hipparcos e Tycho-2 e idades computadas de isócronas teóricas. A amostra final, portanto, dispõe de 2215 estrelas anãs *single*, com idades inferior a 10 giga-anos com erro menor que 25%, distâncias até o Sol $R \leq 120$ pc e, em sua grande maioria, pobre em metais. Com base nos resultados, pode-se observar que a dispersão na relação idade-metalicidade já detectada na literatura vigente, se estende por toda faixa etária para estrelas do tipo G, contudo, para aquelas do tipo F, a relação apresentou um declínio gradual explícito. Além disso, o comportamento da dispersão nessa relação propende a ser maior para estrelas G pobres em metais do que para aquelas do tipo F. Constatamos a presença de estrelas com $[Fe/H] < 0$ tanto próximo quanto distante ao Sol, com manifestações de estrelas com $[Fe/H] < -0.4$ nas regiões entre $80 < R < 120$ para o tipo F e entre $70 < R < 90$ para o tipo G. Ademais, aquelas do tipo G salientam a assiduidade de jovens estrelas a distâncias maiores. Utilizamos também o método de reamostragem *bootstrap* para averiguar o comportamento da dispersão de $[Fe/H]$ nos planos físicos. Foi detectado que as bordas desses planos são as regiões mais prováveis de efeitos de “aquecimento”, onde pode estar associado a contaminação pela massa ou outra propriedade estelar. A análise relação idade-metalicidade-distância, intensificou a concepção de difusão orbital na vizinhança solar, fator que pode ser um dos mecanismos responsáveis pelo aparecimento da diminuição na metalicidade no mesmo intervalo etário de estrelas próximas a maiores distâncias.

Palavras-chave: Metalicidade. Idade. Distância. Vizinhança solar.

ABSTRACT

The age-metallicity relation constitutes a fundamental observation to detail the chemical-time evolution of the galactic disk. However, this relation still has a controversial history in the literature. For this work, it is suggested the addition of the distance parameter, from the Sun to the star R and the XYZ Cartesian planes of the galactic disk in this relation with the aiming to trace its behavior. For this purpose, it was used a F and G spectral types single star's sample in the solar neighborhood from the Geneva-Copenhagen survey (GCS) catalog, which holds $[\text{Fe}/\text{H}]$ derived from the system uvby by Strömgren, distances resulting from parallax of the Hipparcos and Tycho-2 catalogs and computed ages of theoretical isochrones. The final sample, therefore, has 2215 single dwarf stars, aged less than 10 giga-years with an error of less than 25%, distances up to the Sun $R \leq 120$ pc and, in the great majority, poor in metals. Based on the results, it can be seen that the dispersion in the age-metallicity relation already detected in the current literature, extends across the entire age range for type G stars, however, for those of type F, the relation showed an explicit gradual decline. In addition, the dispersion behavior in this relation tends to be greater for metal-poor G stars than for type F stars. We found the presence of stars with $[\text{Fe}/\text{H}] < 0$ both near and far to the Sun, with manifestations of stars with $[\text{Fe}/\text{H}] < -0.4$ in regions between $80 < R < 120$ for type F and between $70 < R < 90$ for type G. In addition, those of type G emphasize the assiduity from young stars to greater distances. We also used the resampling method bootstrap to ascertain the behavior of the dispersion of $[\text{Fe}/\text{H}]$ on the physical planes. It has been found that the edges of these planes are the most likely regions of heating effects, where it may be associated with contamination by mass or other stellar properties. The age-metallicity-distance analysis intensified the concept of orbital diffusion in the solar neighborhood, a factor that may be one of the mechanisms responsible for the appearance of a decrease in metallicity in the same age range of stars close to greater distances.

Keywords: Metallicity. Age. Distance. Solar neighborhood.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Morfologia da Via Láctea.	10
Figura 2 – A galáxia Via Láctea com a representação da vizinhança solar.	13
Figura 3 – Distribuição da abundância química em comparação ao ^{28}Si	14
Figura 4 – Representação hipotética do plano galáctico com o sistema de coordenada apropriado.	21
Figura 5 – Distribuição da idade para toda amostra segmentada por tipo espectral.	23
Figura 6 – Distribuição da metalicidade para toda amostra segmentada por tipo espectral.	24
Figura 7 – Distribuição da distância para toda amostra segmentada por tipo espectral.	25
Figura 8 – Amostra final disposta no diagrama HR.	27
Figura 9 – Distribuição da amostra final nas coordenadas galácticas (l, b)	27
Figura 10 – Distribuição da amostra final ao longo dos planos físicos XY, XZ e ZY	28
Figura 11 – A relação idade-metalicidade.	29
Figura 12 – Diagrama da relação idade-metalicidade.	31
Figura 13 – Dispersão da metalicidade em função da sua média e da idade estelar média.	32
Figura 14 – Mediana e 1 ^o e 3 ^o quartis da relação idade-[Fe/H] da amostra final.	32
Figura 15 – Comportamento da metalicidade em função da distância.	33
Figura 16 – Esquema da reamostragem <i>bootstrap</i> aplicado neste trabalho.	34
Figura 17 – $\sigma_{[\text{Fe}/\text{H}]}$ da amostra original e da reamostragem <i>bootstrap</i> das estrelas do tipo F nos planos físicos.	35
Figura 18 – $\sigma_{[\text{Fe}/\text{H}]}$ da amostra original e da reamostragem <i>bootstrap</i> das estrelas do tipo G nos planos físicos.	36
Figura 19 – [Fe/H]-idade para estrelas do tipo F e G em diferentes distâncias.	38

SUMÁRIO

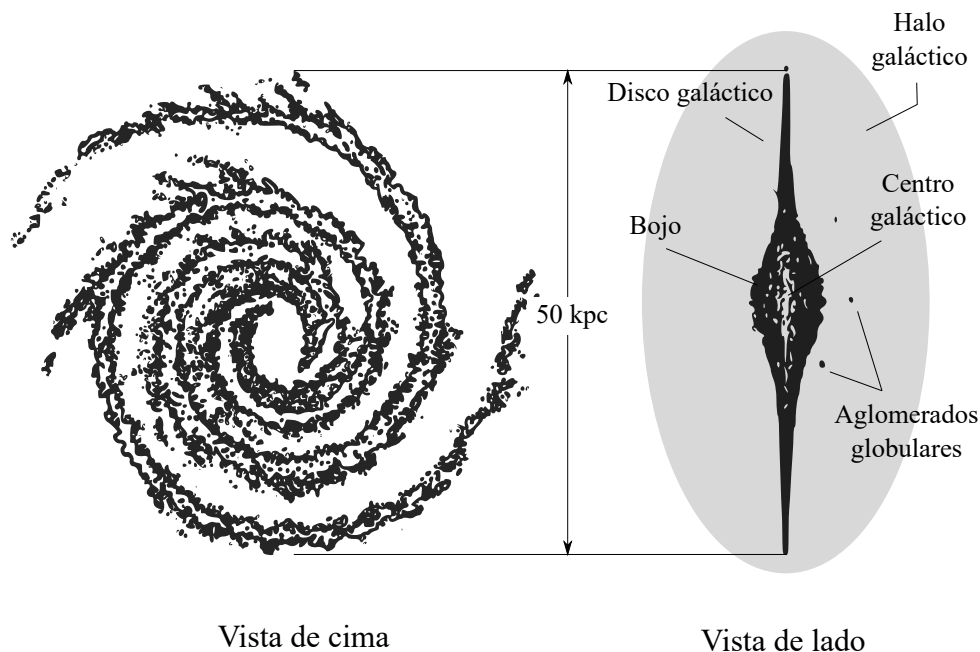
1	INTRODUÇÃO	10
2	A EVOLUÇÃO QUÍMICA NA VIZINHANÇA SOLAR	13
2.1	Uma breve descrição sobre a evolução química estelar	14
2.1.1	A metalicidade [Fe/H]	16
2.2	O dilema da relação idade-metalicidade	17
2.3	Uma relação metalicidade-idade-distância?	20
3	DADOS OBSERVACIONAIS	22
3.1	O Catálogo Geneva-Copenhague	22
3.1.1	Idade	22
3.1.2	Metalicidade	24
3.1.3	Distância	25
3.2	Filtragem dos dados	26
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	29
4.1	Relação idade-metalicidade	29
4.2	Relação metalicidade-distância	33
4.3	Relação idade-metalicidade-distância	37
5	CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS	40
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	43
	APÊNDICE A – EXTRATO DA AMOSTRA FINAL	50
	APÊNDICE B – REAMOSTRAGEM <i>BOOTSTRAP</i>	51

1 INTRODUÇÃO

Das orientações de navegação a descobertas de exoplanetas, o céu sempre foi o palco de grandes estudos e observações. Dos objetos cósmicos que compõem o céu, as galáxias, em especial, dispõem de recursos robustos que favorecem investigações tais como a evolução e a dinâmica estelar, uma vez que quase exclusivamente são elas que fomentam a formação de estrelas. Assim, esses ecossistemas astrofísicos são responsáveis pelo teatro do enriquecimento químico, e compreender o seu comportamento em conjunto a outras propriedades, como idade e distância, nos possibilita traçar modelos de sua evolução [1, 2].

Na vitrine dessas investigações, a nossa galáxia, a Via Láctea¹, se faz protagonista. A sua morfologia pode ser apreciada por dois ângulos de visão (vide fig.(1)).

Figura 1: Morfologia da Via Láctea.



Fonte adaptada: Zeilik, 2004. Esquematisação da Via Láctea vista em distintos panoramas: a figura à esquerda retrata a vista de cima e figura a direita, a vista de lado com suas características principais.

Vista de lado, a Via Láctea se assemelha com um disco plano (também conhecido

¹Os modelos que culminaram uma descrição preliminar de cunho não científico sobre a Via Láctea como sendo um disco de estrelas, podem ser apreciados nas obras de Thomas Wright (*Original theory of the Milky Way*, 1950), Immanuel Kant (*Allgemeine Naturgeschichte und Theorie des Himmels*, 1755) e Johann Heinrich Lambert (*Cosmologische Briefe über die Einrichtung des Weltbaues*, 1761). Não obstante, foram as observações de Harlow Sharpley, Heber D. Curtis e Edwin Hubble, por volta de 1920, que trouxeram clareza à extensão da Via Láctea, a sua natureza e a distância entre as galáxias. Tais descobertas preconizaram um tremendo processo na Astrofísica e na Cosmologia [3].

como disco ou plano galáctico) com um diâmetro entre 40 a 50 kpc² e na sua região central, há uma protuberância irregular chamada bojo. Externamente, o sistema é cercado pelo halo galáctico, uma região quase esférica que engloba, além da Via Láctea, aglomerados globulares, objetos mais antigos do Universo. Vista de cima, a nossa galáxia tem o formato espiral onde, nos seus quatro braços espirais (alguns estudos como de Englmaier *et al.* [5] e suas referências, mapeiam o padrão dos braços como sendo apenas dois), podemos encontrar objetos como estrelas do tipo espectral O e B e nuvens moleculares [6, 7].

Essas componentes principais surgiram certamente em distintos momentos durante a formação da Via Láctea (vide [8–12]). No entanto, dentre elas, vale destacar que o plano galáctico merece uma atenção especial nesse trabalho, uma vez que apresenta informações valiosas acerca do caráter histórico do enriquecimento químico [13]. Sendo assim, faz-se necessário uma melhor descrição sobre a sua natureza e as hipóteses de sua formação.

O disco galáctico é segregado em duas regiões, o disco fino e o disco espesso. Esse último, foi mencionado na literatura pela primeira vez por Gilmore e Reid [14], logo após realizarem ajustes com funções exponenciais que se adequassem ao perfil da densidade vertical de estrelas no plano. Com essa subdivisão, foi possível observar que ambos se diferem quanto a extensão, cinemática e química. O disco fino salienta uma altura aproximada de 300 pc, enquanto o disco espesso compreende cerca de 900 pc [15, 16]. No entender da cinemática, a velocidade de rotação orbital do disco espesso é menor do que o do fino, da ordem de 30 km/s [17]. A razão entre a abundância de ferro em relação ao hidrogênio [Fe/H] (uma indicativa se a estrela é rica ou não em metais) é maior no disco espesso, como apontam os estudos de Hayden *et al.* [18] e Yan *et al.* [19]. Apesar dessa abundância, pesquisas recentes determinaram que existe uma região no disco espesso que são pobres em metais e a intitularam de disco espesso de metal fraco (*metal-weak thick disk*, em inglês) [20, 21].

Nesse cenário de contrastes entre o disco fino e o disco espesso, diversos autores sugerem que a formação e a evolução de ambos também não foi de natureza concomitante [22–24]. Villalobos e Helmi [25], por exemplo, realizaram simulações numéricas acerca do aquecimento do disco galáctico a partir da fusão massiva entre uma galáxia satélite e a sua hospedeira. Seus resultados mostraram que uma galáxia satélite produz um fluxo que aquece e inclina o disco da galáxia hospedeira, sem destruí-la, originando o espessamento do disco fino já existente. Bournaud *et al.* [26] partiram da premissa de que aglomerados formados por instabilidades gravitacionais podem formar o disco espesso, alegando que a hipótese de fusão não explica algumas propriedades observadas por esse disco. Roškar *et al.* [27] sugerem que as estrelas do plano galáctico podem se deslocar adentro ou para fora do plano por processos

²*Parsec* é a unidade astronômica padrão de distância cujo comprimento é obtido por paralaxe e o seu valor numérico é $1 \text{ pc} = 3.086 \times 10^{16} \text{ m} = 3.26 \text{ anos-luz}$ [4].

de agitação, resultando no engrossamento do disco (alguns autores não corroboram com essa hipótese [28, 29]).

O estudo sobre a formação e evolução no disco galáctico ainda é inconclusivo. De certo, compreender o comportamento das propriedades estelares fundamentais, como a abundância química, idade e distância, pode ser o primeiro passo para a investigação da evolução da nossa galáxia. Assim, esse trabalho objetivou traçar o comportamento da relação idade-metalicidade utilizando uma amostra filtrada de dados de estrelas do tipo espectral F e G na vizinhança solar advindos do catálogo *Genebra-Copenhagen survey*³[30–32]. Para alcançar o objetivo principal, uma possível correlação entre a idade das estrelas e a abundância química foi investigada. Além disso, foi examinado o comportamento da distribuição da metalicidade e da idade como uma função da distância, medida a partir do Sol, através das dispersões de [Fe/H] nos planos físicos (galáctico, meridiano e rotacional). O presente trabalho também averiguou, a partir do método de reamostragem *bootstrap*, se a presença de bias observacionais é um parâmetro real de interferência.

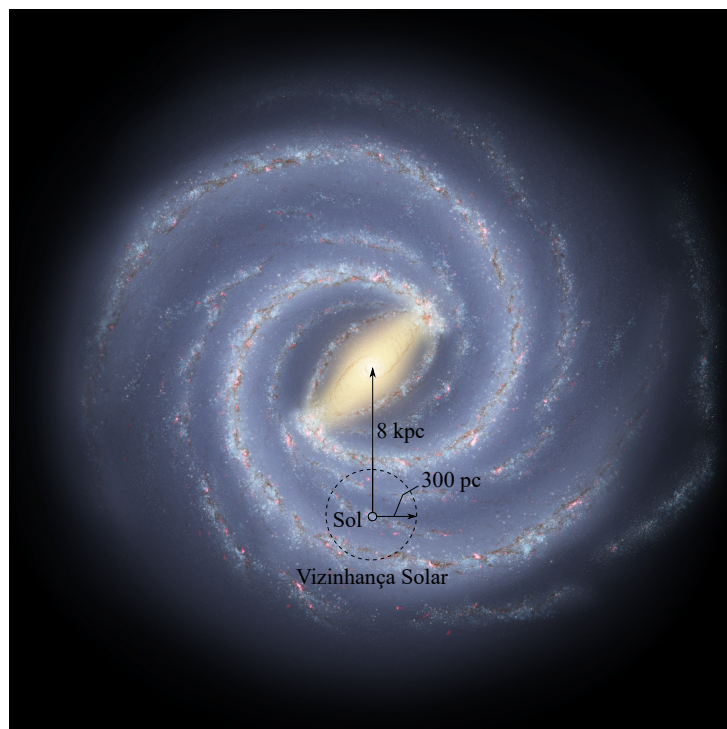
Esse trabalho está organizado da seguinte maneira: No capítulo 2 discutimos os fundamentos sobre a evolução química na vizinhança solar em conjunto do problema da relação idade-metalicidade-distância na literatura. No capítulo 3 apresentamos com detalhes os dados da nossa amostra e como foram filtrados. No capítulo 4 abordamos a análise das relações idade-metalicidade e idade-metalicidade-distância e inferimos nossos resultados. Por fim, no capítulo 5 dispomos das conclusões de nossa pesquisa e propomos trabalhos futuros complementares para que a relação idade-metalicidade seja averiguada de forma mais robusta.

³<http://vizier.u-strasbg.fr/viz-bin/VizieR-3?-source=V/130/gcs3>.

2 A EVOLUÇÃO QUÍMICA NA VIZINHANÇA SOLAR

A literatura dispõe de uma vasta quantidade de dados sobre as propriedades físicas das estrelas na vizinhança solar [30–33]. Dentre elas a metalicidade $[Fe/H]$, que abordaremos em detalhes a seguir. A vizinhança solar compreende um volume de estrelas da ordem de 300 pc muito inferior à distância do Sol até o centro da Via Láctea na qual é estimada em 8 kpc (vide fig.(2)) [34].

Figura 2: A galáxia Via Láctea com a representação da vizinhança solar.



Fonte adaptada: NASA/JPL-Caltech/R. Hurt (SSC/Caltech), 2017. O círculo tracejado denota o raio da vizinhança solar fora de escala, com o Sol no centro.

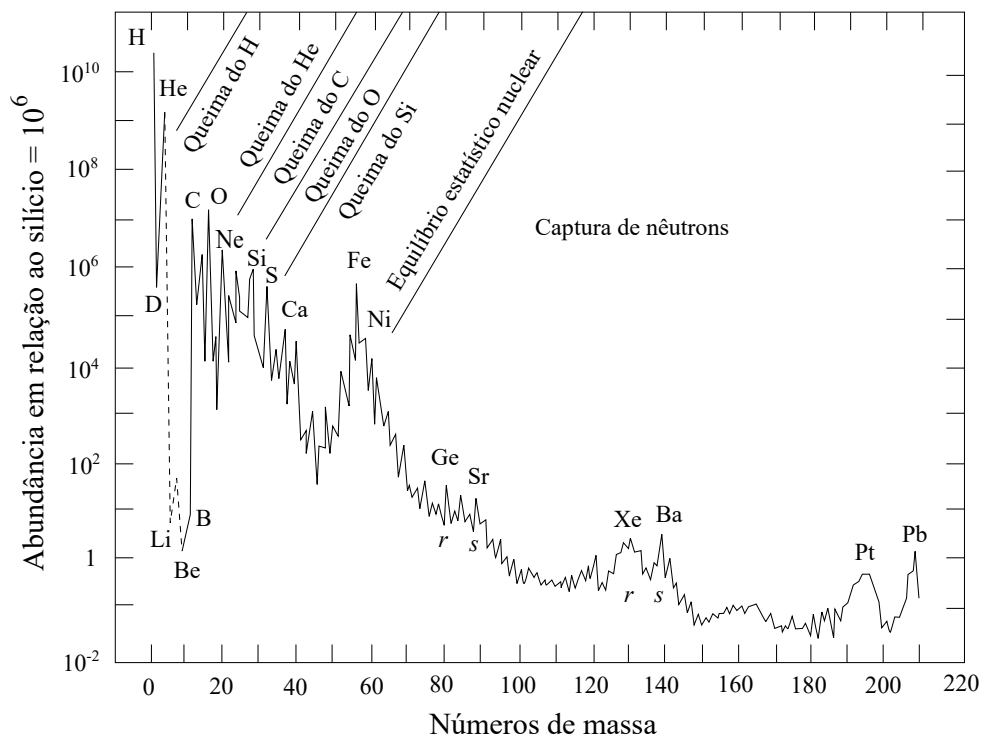
Nesse volume encontramos estrelas de diferentes tipos espectrais e, desta forma, contempla uma amostra mais ampla de estrelas com fraco brilho tais como aquelas dos tipos K e M, que não seria possível para distâncias maiores do que 300 pc [35].

Dessa maneira, agregar os dados das propriedades estelares na vizinhança solar nos viabiliza entender a cinemática (movimento das estrelas), inferir a taxa de formação estelar, bem como sua evolução química pode fornecer os precedentes da formação de galáxias. Portanto, para esse primeiro momento, vamos traçar os mecanismos a partir dos quais se forma o enriquecimento químico nas estrelas e definir como a metalicidade detém de relações controversas com a idade estelar.

2.1 Uma breve descrição sobre a evolução química estelar

A literatura assevera que o hidrogênio (H) é o elemento mais predominante no universo e em seguida o hélio (He) [36, 37]. A maior parte desses dois elementos foi produzida nos primeiros instantes do universo a partir de prótons e nêutrons. No entanto, a formação de elementos mais pesados carecem da fusão nuclear para que sejam sintetizados. Essa produção ocorre no interior estelar ou por uma explosão de supernova quando a vida da estrela chega ao fim [38]. Posto isso, Pagel [39] condensa esse percurso químico estelar comparando-o ao silício (^{28}Si), pois a queima do ^{28}Si é o processo final para qual a fusão nuclear deixa de ser benéfica para estrela e adentre o equilíbrio estatístico nuclear¹ [40, 41] (ver fig.(3)).

Figura 3: Distribuição da abundância química em comparação ao ^{28}Si .



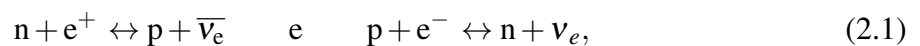
Fonte adaptada: Pagel, 2009. Cada letra disposta nos picos representa um elemento químico, por exemplo, hidrogênio (H), deutério (D), hélio (He), lítio (Li), carbono (C), oxigênio (O) e assim sucessivamente. As letras *r* e *s* simbolizam os processos que ocorrem na captura de nêutrons.

De acordo com a fig.(3), é notável a preponderância do H e He, concordando com a literatura citada anteriormente. Em contrapartida, os núcleos de lítio (^7Li), berílio (^9Be) e boro ($^{10,11}\text{B}$) são ínfimos, uma vez que são facilmente destruídos no interior estelar. O deutério (D),

¹À medida que o ^{28}Si se extingue, a temperatura no núcleo estelar se intensifica constantemente. Nesse momento, a série de reações da queima de ^{28}Si produz núcleos estáveis – via interações fortes e eletromagnéticas – que pertencem ao grupo do ferro que inclui elementos como ferro (^{56}Fe), cobalto (^{59}Co) e níquel (^{58}Ni). Essa condição configura-se como o equilíbrio estatístico nuclear (maiores detalhes ver [38, 41]).

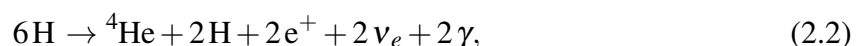
apesar de ser mais frágil que os elementos anteriores, a sua abundância razoável evidenciada na Fig.(3) é compreensível no início do universo, pois em estágios subsequentes de queima no núcleo estelar, ele é completamente destruído. Em seguida, é perceptível que os núcleos de carbono (^{12}C) até o cálcio (^{40}Ca) apresentam uma tendência decrescente em sua abundância, mas imediatamente observamos um pico de ^{56}Fe bem acentuado, na qual é justificável devido a sua alta estabilidade. A partir deste elemento em diante, a distribuição decresce sistematicamente para os demais elementos que são produzidos durante a explosão de supernova pela captura de nêutrons [39].

Cada estágio configurado na análise da fig.(3), baseia-se na nucleossíntese primordial, estelar e explosiva, respectivamente. O primeiro estágio supracitado, como já mencionado anteriormente, caracteriza a síntese dos elementos mais leves durante o *Big Bang* no instante em que a temperatura e a densidade diminuam em uma dada região em expansão no universo [42]. Nessas condições de interações fracas, o equilíbrio próton-nêutron,



sendo ν_e os neutrinos e $\bar{\nu}_e$ os antineutrinos dos elétrons, constitui dos ingredientes principais. Schramm e Turner [42] argumentam que a produção de núcleos é moderada pela energia de ligação (propicia a estabilidade) e pela entropia (contrária a estabilidade via interações dos núcleos com fótons). Quando a temperatura nessa região minimiza, as interações indicadas pelas eqs.(2.1) se encerram visto que a energia dos fótons é incapaz de desestruturar os núcleos e o sistema sai do equilíbrio para sintetizar os primeiros elementos. A série de reações que surgem conseqüentemente, resultam em isótopos de H e He, junto com o ^7Li , enquanto os núcleos de D foram destruídos por colisões com bárions.

No que diz respeito ao estágio subsequente, a nucleossíntese estelar, temos a produção da maioria dos elementos, visto que, após o nascimento de uma estrela pelo colapso de uma nuvem molecular fria, a queima nuclear no interior estelar permite a síntese desses elementos a partir dos mais leves [43]. Aquelas estrelas que evoluem para a sequência principal² têm o enriquecimento químico assistido pela cadeia próton-próton (p-p), na qual o H sucede à formação de outros elementos por distintos caminhos [45]. No entanto, combinando todas as reações possíveis da cadeia p-p, eventualmente resulta em



isto é, um núcleo de He, dois pósitrons (e^+), dois ν_e , dois raios γ e dois novos H. Elementos intermediários também são criados nas distintas cadeias: em p-pI se sintetiza D e ^3He , em p-pII

²Quando a temperatura no núcleo estelar atinge $\sim 10^7$ K, a queima de H é iniciada e essa fase é configurada como a sequência principal, onde contém cerca de 80% a 90% de todas as estrelas no diagrama HR [6, 44].

${}^7\text{Be}$ e ${}^7\text{Li}$, e por fim, em p-pIII sintetiza ${}^7\text{Be}$, ${}^8\text{Be}$ e ${}^8\text{B}$ [45].

Todavia, se a temperatura central ultrapassar 10^7 K, elementos como carbono (${}^{12}\text{C}$), nitrogênio (${}^{14}\text{N}$) e oxigênio (${}^{16}\text{O}$) se manifestam no interior estelar por reações no ciclo CNO que pode ocorrer simultaneamente com a cadeia p-p provendo também ${}^4\text{He}$. Contudo este ciclo domina a produção de energia em estrela de alta massa visto que existe uma relação intrínseca entre massa e temperatura [46].

Com o núcleo rico em ${}^4\text{He}$ e ao compasso do aumento da temperatura a $\sim 2 \times 10^8$ K, a queima do He inicia. As próximas queimas dependem fortemente de dois fatores: a temperatura e a massa da estrela. A título de exemplo, em estrelas com massa $M > 8M_{\odot}$ ocorre a combustão do ${}^{12}\text{C}$, enquanto para aquelas com $M > 16M_{\odot}$, sucede à queima do ${}^{16}\text{O}$. Nesses processos são formados outros elementos como magnésio (${}^{24}\text{Mg}$), ${}^{28}\text{Si}$ e enxofre (${}^{32}\text{S}$), em que são basicamente feitos em reações entre núcleos e partículas carregadas positivamente e podem produzir elementos mais pesados que estes citados até chegar no ${}^{56}\text{Fe}$ [47].

Para a criação de elementos mais pesados que o ${}^{56}\text{Fe}$ é fundamental que a temperatura no núcleo esteja a $\sim 10^{10}$ K, um valor acima daquele encontrado na evolução habitual e necessita, portanto, de reações entre núcleos e nêutrons [48]. O processo lento dessas reações (processo *s*) ocorrem dentro de estrelas massivas e estrelas que estão no ramo gigante assintótico do diagrama HR e possibilita a formação de elementos tais como estrôncio (${}^{88}\text{Sr}$), ítrio (${}^{89}\text{Y}$), zircônio (${}^{91}\text{Zr}$), bário (${}^{137}\text{Ba}$), e chumbo (${}^{207}\text{Pb}$) [49]. Os demais elementos são sintetizados na nucleossíntese explosiva. Neste ponto, as sínteses ocorrem em supernovas, eventos excessivamente energéticos na qual o seu tipo dependerá da massa estelar [50]: a supernova tipo I são explosões de estrelas de baixa massa (que resulta em uma anã branca) que fundiu todo o H e a supernova tipo II são para aquelas de alta massa (que colapsa para estrelas de nêutrons ou buracos negros) com abundância de H [40]. Os elementos formados nessa nucleossíntese se promovem por meio da captura rápida de nêutrons (processo *r*) e originam elementos como germânio (${}^{73}\text{Ge}$), selênio (${}^{79}\text{Se}$), telúrio (${}^{128}\text{Te}$), xenônio (${}^{131}\text{Xe}$) e platina (${}^{195}\text{Pt}$) [51].

Diante do exposto, percebemos que o enriquecimento químico dita a evolução estelar logo, é de vital importância compreender como este se comporta com outros parâmetros estelares.

2.1.1 A metalicidade [Fe/H]

Em face no que foi discutido anteriormente, é fundamental elucidar sobre a relação de abundância entre dois elementos químicos, em especial entre o ${}^{56}\text{Fe}$ e H. Matteucci [52] demonstra essa relação como sendo,

$$[\text{Fe}/\text{H}] = \log \left(\frac{n_{\text{Fe}}}{n_{\text{H}}} \right)_{\star} - \log \left(\frac{n_{\text{Fe}}}{n_{\text{H}}} \right)_{\odot}, \quad (2.3)$$

onde n_x é o número de x átomos por unidade de volume. Essa abundância, definida na eq.(2.3), tem como referência as abundâncias solares e é medida em unidades de exponenciais decimais ou dex. Ademais, tal relação é comumente indicada como a metalicidade de uma estrela, isto é, a abundância global de metais – todos os elementos mais pesados do que He [52]. De modo geral, constatamos dessa equação,

1. $[\text{Fe}/\text{H}] > 0$ para estrelas ricas em metais;
2. $[\text{Fe}/\text{H}] < 0$ para estrelas pobres em metais;
3. $[\text{Fe}/\text{H}] = 0$ estrelas com a mesma metalicidade que a do Sol.

Por ser um parâmetro de referência nessa relação e dispor de informações significativas, a metalicidade do Sol vem sendo investigada através de medidas espectroscópicas desde 1989, quando Anders e Grevesse [53] computaram o valor de 0.0202 dex e posteriormente, em 1998, Grevesse e Sauval [54] obtiveram o resultado 0.0170 dex. No entanto, a composição química solar está constantemente passando por revisões drásticas, nas quais são utilizados vários métodos como helioseismologia³ e coleta de dados de ventos solares ou partículas energéticas [56–61].

Ademais, por sistematizar a evolução química do sistema, a metalicidade será uma das propriedades estudadas neste trabalho.

2.2 O dilema da relação idade-metalicidade

Configurar a evolução estelar via a metalicidade considerando critérios como reciclagem, variação e combinação de gás, nascimento de estrelas, entre outros é, em primeira análise, esperar que estrelas mais velhas possuam uma metalicidade menor do que aquelas mais novas. No entanto, essa relação entre idade e metalicidade ainda possui uma controvérsia na literatura.

Twarog [62] foi um dos pioneiros nesse estudo sobre a relação idade-metalicidade. Para tal, ele empregou a análise de fotometria $uvby$ e $H\beta$ em combinação de isócronas teóricas⁴ para 329 estrelas do tipo F na vizinhança solar. Os resultados encontrados foram que a nossa galáxia obteve um enriquecimento químico em metais considerável ao longo do tempo: aumentou de $[\text{Fe}/\text{H}] = -1.00$ dex a 13 giga-anos para $[\text{Fe}/\text{H}] = -0.03$ dex a ~ 4.5 giga-anos. Além

³Compreende o estudo das oscilações solares que corresponde às ondas acústicas acomodadas pela pressão e pelas ondas de gravidade mantidas pela gravidade (ver [55]).

⁴A isócrona, palavra que tem origem grega que significa “mesma idade”, consiste em uma linha que conecta os pontos inerentes as diversas trilhas evolutivas de mesma composição química e diferentes valores de massa no diagrama HR. Ao se deslocar ao longo da isócrona, o tempo é constante e a massa varia, portanto, ela dita o comportamento de propriedades estelares [44].

disso, os seus resultados inferiram que a metalicidade média das estrelas que estão se formando agora aumentou razoavelmente para +0.10 dex.

Carlberg *et al.* [63] usufruíram da amostra de Twarog [62] acrescentada de dados de astrometria para obter velocidades tangenciais estelares e então poder estabelecer uma relação entre idade e velocidade de dispersão assim como a relação idade-metalicidade. As inferências que eles tomaram foi que a velocidade de dispersão das estrelas aumentam intensamente até alcançar a idade de 6 giga-anos onde, a partir deste ponto, se mantém aproximadamente constante. Para a relação idade-metalicidade, foi encontrado que houve um declínio de apenas 0.3 dex nos últimos 15 giga-anos. Tal resultado sugere que o consumo de gás na formação das estrelas se equilibra com o *infall*⁵ do gás, conservando este em uma quantidade quase inalterável na vizinhança solar.

Knude *et al.* [64] realizaram estudos semelhantes a Carlberg *et al.* [63], contudo, os seus resultados mostraram um aumento significativo na relação idade-velocidade de dispersão em toda faixa etária estelar e a amostra analisada sugere que não há nenhuma variação relevante da [Fe/H] média com idade.

Nos estudos de Schuster e Nissen [65], em que utilizaram fotometria *uvby* e $H\beta$ para 711 estrelas com alta velocidade e pobres em metal, foi observado que existiam duas populações de estrelas: aquelas que pertencem ao halo galáctico com $[Fe/H] < -1.0$ dex e aquelas que pertencem ao disco espesso com $[Fe/H] > -1.0$ dex. As inferências seguintes também mostraram que existia uma distinção apreciável na idade entre ambas as populações, indicando a formação de estrelas na galáxia primitiva em épocas diferentes.

Outras análises sobre essa relação perduraram ao longo dos anos, como de Mar-sakov *et al.* [66] e Meusinger *et al.* [67], mas foi com o trabalho de Edvardsson *et al.* [68] que a relação idade-metalicidade concebeu uma atenção especial. Eles fizeram observações espectroscópicas de alta resolução para 189 estrelas do tipo F e G da sequência principal com um intervalo na metalicidade de $-1.0 < [Fe/H] < +0.5$ e idades calculadas através de ajuste de isócronas. Os seus resultados mostraram que o gráfico $[Fe/H] \times$ idade possui uma ampla dispersão em todas as idades até 10 giga-anos. Com tal espalhamento, ficou questionável sobre o real significado da relação de dois parâmetros que até então, *deveriam* se correlacionar.

Os trabalhos seguintes a este estudo pretenderam esclarecer e até mesmo amenizar essa dispersão observada. Como, por exemplo, Ng e Bertelli [69] estimaram novas idades para a amostra estudada por Edvardsson *et al.* [68] usando isócronas atualizadas e novos valores de distâncias computadas via paralaxe de Hipparcos e com esses valores revisados, a dispersão na metalicidade reduziu-se. Feltzing *et al.* [70], usando uma amostra de 5828 estrelas anãs e sub-anãs do catálogo Hipparcos com idades estelares derivadas de trilhas evolutivas e metalicidade

⁵ queda, em uma tradução aproximada.

advinda de fotometria de Strömgren, descobriram estrelas antigas (> 10 giga-anos) ricas em metais o que sugere que a formação das estrelas na vizinhança solar foi um processo complexo, na qual certas regiões alcançaram elevada metalicidade em um curto tempo. Além disso, os seus resultados corroboraram com a dispersão encontrada por Edvardsson *et al.* [68]. Bensby *et al.* [71], no entanto, defende a existência da relação idade-metalicidade, contrariando os estudos citados acima. Eles utilizaram uma amostra de 229 estrelas do disco espesso galáctico, com idades deduzidas de isócronas e chegaram a conclusão que nessa região analisada, a formação estelar ocorreu em um período de tempo de até 5 giga-anos, reforçando a hipótese de que esta região foi formada a partir de um evento de fusão entre a Via Láctea e outra galáxia.

Com a pesquisa de Genebra-Copenhaga da vizinhança solar (*The Geneva-Copenhagen survey of the Solar neighbourhood*) [30–33], que expuseram propriedades estelares como metalicidade via fotometria de Strömgren, idade, rotação, distância, entre outras, para uma amostra de 16682 estrelas anãs do tipo F e G do catálogo Hipparcos, pode-se reanalisar o dilema da relação idade-metalicidade. No entanto, os resultados revelaram pouca variação na $[Fe/H]$ média e a dispersão, quando plotada em função da idade estelar, ainda se faz presente.

Para entender essa dispersão visível em diversos trabalhos, Haywood [72] revisou as incertezas na distribuição de metalicidade e na relação idade-metalicidade. Em suas análises, constatou que nas grandes pesquisas de fotometria de Strömgren estavam contaminadas por ruídos advindos de bias nas metalicidades e nas temperaturas efetivas. Assim, o novo resultado mostrou que idades inferiores a 3 giga-anos, a dispersão da metalicidade é de cerca de 0.1 dex e que as populações de estrelas com idade superior a 5 giga-anos se tornam progressivamente mais ricas em metais. Por fim, inferiu que o disco espesso galáctico constitui de efeitos dinâmicos e complexos na relação idade-metalicidade, ao contrário de uma alta dispersão generalizada em toda a faixa etária estelar. Soubiran *et al.* [73] contra-argumentaram os resultados de Haywood [72] expondo que não encontraram nenhuma estrela jovem pobre em metal e nem estrelas mais velhas ricas em metais, na qual o intervalo de metalicidade é $-0.70 \leq [Fe/H] \leq -0.3$ para estrelas com idades entre 8 a 10 giga-anos.

Atualmente existem vários trabalhos que utilizaram outros métodos para alcançar essa relação [74–76]. Dentre esses, podemos citar Rebassa-Mansergas *et al.* [77], que usaram uma amostra de 23 anãs brancas binárias, justificando o seu uso devido ao fato de que as anãs brancas são relógios naturais e podem contemplar com idades precisas. Todavia, os resultados forneceram evidências observacionais de que não existe correlação entre idade e metalicidade para uma faixa de idade entre 0 a 7 giga-anos.

Portanto, a inferência sobre a relação idade-metalicidade ainda é um campo de pesquisa em aberto, mas a persistência em encontrar sua descrição é fundamental para atingir a compreensão da evolução química no plano galáctico.

2.3 Uma relação metalicidade-idade-distância?

Diante de sucessivas tentativas em compreender a correlação entre o enriquecimento químico e a idade estelar utilizando diversificados métodos e correspondências com outros parâmetros estelares, como descrito acima, podemos nos questionar sobre uma possível dependência dessa relação com a distância. Garnett e Kobulnicky [78] foram um dos primeiros a propor um estudo desta natureza, na qual tiveram como base a amostra de Edvardsson *et al.* [68] em complemento com paralaxes de Hipparcos e estimativas de novas idades. Eles examinaram o gráfico $[\text{Fe}/\text{H}] \times \text{idade}$ de Edvardsson *et al.* [68] como uma função da distância das estrelas e para isso, separaram a amostra em dois grupos: (1) 89 estrelas com uma distância menor que 30 pc e (2) 71 estrelas com uma distância entre 30 pc e 80 pc. O grupo (1) apresentou uma redução na dispersão especialmente para estrelas com idade intermediária (entre 3 e 8 giga-anos) e ao comparar com o gráfico do grupo (2), salientou uma notável assimetria na distribuição de metalicidade. Para as estrelas mais próximas, $[\text{Fe}/\text{H}]$ aumentou intensamente enquanto a idade diminuía e para as estrelas mais distantes, o aumento de $[\text{Fe}/\text{H}]$ exibiu uma configuração gradual. Para uma análise com indubitabilidade, Garnett e Kobulnicky [78] inspecionaram as estrelas com faixa etária entre 3 a 8 giga-anos e constataram que a amostra mais distante era abundante em estrelas pobres em metais em comparação com a amostra de estrelas mais próximas. Essa dessemelhança apresentada por ambos os grupos sugeriu que a amostra mais distante pode abranger estrelas cujas propriedades químicas não equivalem à evolução do disco na vizinhança solar e, por conseguinte, inferiram que a amostra de Edvardsson *et al.* [68] pode estar contaminada por estrelas que estão dentro e fora da vizinhança solar.

Assim, baseado no estudo de Garnett e Kobulnicky [78], investigar a referida relação como uma função da distância e a dispersão $[\text{Fe}/\text{H}]$ pelas coordenadas cartesianas galácticas X, Y, Z , é um interessante caminho. Esse sistema de coordenadas consiste na dependência da longitude ($0 \leq l \leq 2\pi$) e latitude ($-\pi/2 \leq b \leq \pi/2$) do plano galáctico com $l = b = 0$ configurando a posição do Sol no centro como representado na fig.(4)[34]. Desta forma, podemos partir da transformação usual de coordenadas esféricas para cartesianas e levando em consideração que se trata de um sistema de coordenadas de mão direita, temos que,

$$X = R \cos(b) \cos(l) \quad (2.4a)$$

$$Y = R \cos(b) \sin(l) \quad (2.4b)$$

$$Z = R \sin(b), \quad (2.4c)$$

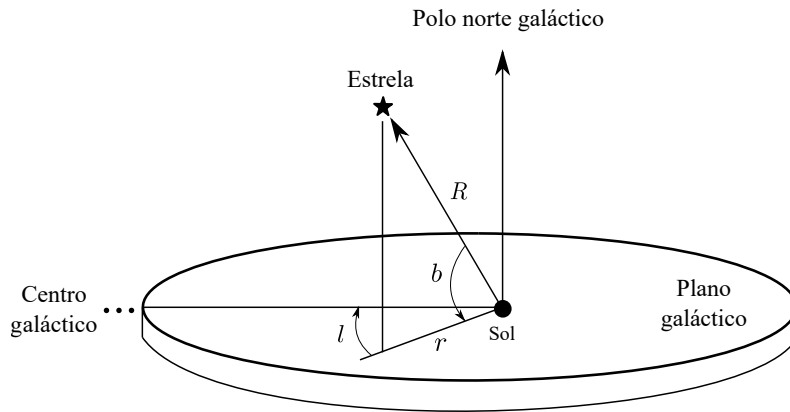
onde R é a distância entre a estrela observada e o Sol. Podemos ainda calcular a posição proje-

tada dessa estrela no plano galáctico,

$$\begin{aligned}
 r &= \sqrt{X^2 + Y^2} \\
 &= \sqrt{R^2 \cos^2(b) [\cos^2(l) + \sin^2(l)]} \\
 &= R \cos(b),
 \end{aligned} \tag{2.5}$$

com os pontos $b = \pm\pi/2$ correspondentes aos pólos galácticos (norte e sul, respectivamente), normais ao plano. Tal descrição, nos permite inferir X como o eixo que aponta para o centro galáctico com $l = 0$, Y como aquele que aponta na direção da rotação com $l = \pi/2$ e Z apontando na direção do polo norte galáctico (vide fig.(4)).

Figura 4: Representação hipotética do plano galáctico com o sistema de coordenada apropriado.



Fonte adaptada: Binney, 2011. Consideramos o Sol no centro do sistema de coordenada galáctica com l sendo a longitude e b a latitude galáctica, R a distância do Sol a estrela e o pólo norte galáctico dado por $b = +\pi/2$.

Assim, com a descrição das coordenadas cartesianas galácticas dada pelas eqs.(2.4), este trabalho se dispõe a verificar o comportamento da relação metalicidade-idade em função da distância R e investigar a dispersão $[Fe/H]$ nas projeções XY , XZ e ZY , a partir dos dados da amostra do catálogo Geneva-Copenhagen em conjunto a filtragens que serão expostas no capítulo seguinte.

3 DADOS OBSERVACIONAIS

3.1 O Catálogo Geneva-Copenhagen

O catálogo *Geneva-Copenhagen survey* (GCS) fornece dados de idade, metalicidade, rotação, propriedades cinemáticas, temperatura efetiva e massa para uma amostra completa de magnitude limitada de 16682 estrelas anãs *single*¹ e binárias do tipo F e G dispostas na vizinhança solar. A primeira versão desse catálogo [30] (GCS I) passou por diversas revisões, a saber, Holmberg *et al.* [31, 32] reavaliaram as calibrações da metalicidade e temperatura (GCS II), assim como foram feitas verificações na paralaxe de Hipparcos (GCS III). A última re-análise foi feita por Casagrande *et al.* [33] na qual contemplou o método de fluxo infravermelho² para aperfeiçoar a precisão das temperaturas efetivas e metalicidade.

A seguir iremos nos ater na descrição das propriedades concedidas por esse catálogo que são pertinentes a este trabalho.

3.1.1 Idade

As estrelas anãs do tipo F e G são fundamentais para estudos astrofísicos em razão de sua abundância no plano galático e possuem longevidade significativa. Tais estrelas que progridem na sequência principal podem ter suas idades calculadas através de isócronas, um método comum que pode ser apreciado em alguns trabalhos já citados [63, 70, 71].

O catálogo GCS I [30] também utiliza esse método para computar a probabilidade P para qual uma estrela seja localizada no espaço das isócronas, dada a sua posição no espaço tridimensional definido pelo logaritmo da temperatura efetiva ($\log T_{eff}$), magnitude visual (M_v) e metalicidade $[Fe/H]$. Essa probabilidade, assumindo que os erros observacionais têm uma distribuição gaussiana, é:

$$P = \exp \left[-\frac{(\Delta T_{eff})^2}{2(\sigma_{T_{eff}})^2} \right] \times \exp \left[-\frac{(\Delta M_v)^2}{2(\sigma_{M_v})^2} \right] \times \exp \left[-\frac{(\Delta [Fe/H])^2}{2(\sigma_{[Fe/H]})^2} \right], \quad (3.1)$$

onde ΔX é a diferença entre o parâmetro X observado da estrela e do ponto na isócrona correspondente. Os erros σ_X são expostos por Nordström *et al.* [30] e esse método advém da

¹Nós preferimos não fazer a tradução literal da palavra inglesa *single*, porque ela denota ambiguidade com esse tipo de estrelas que estamos tratando. No entanto, vale explicar o real sentido do termo no contexto astrofísico, ou seja, tratam-se de estrelas que não têm interação gravitacional com nenhuma estrela vizinha. No contexto da exoplanetologia, esse termo deve ser atualizado levando em conta que ela ainda é considerada *single* mesmo que não esteja sozinha, mas na presença de um ou mais planetas.

²Esse método consiste em medidas no fluxo estelar integrado e no fluxo estelar monocromático em um comprimento de onda infravermelho (ver [79]).

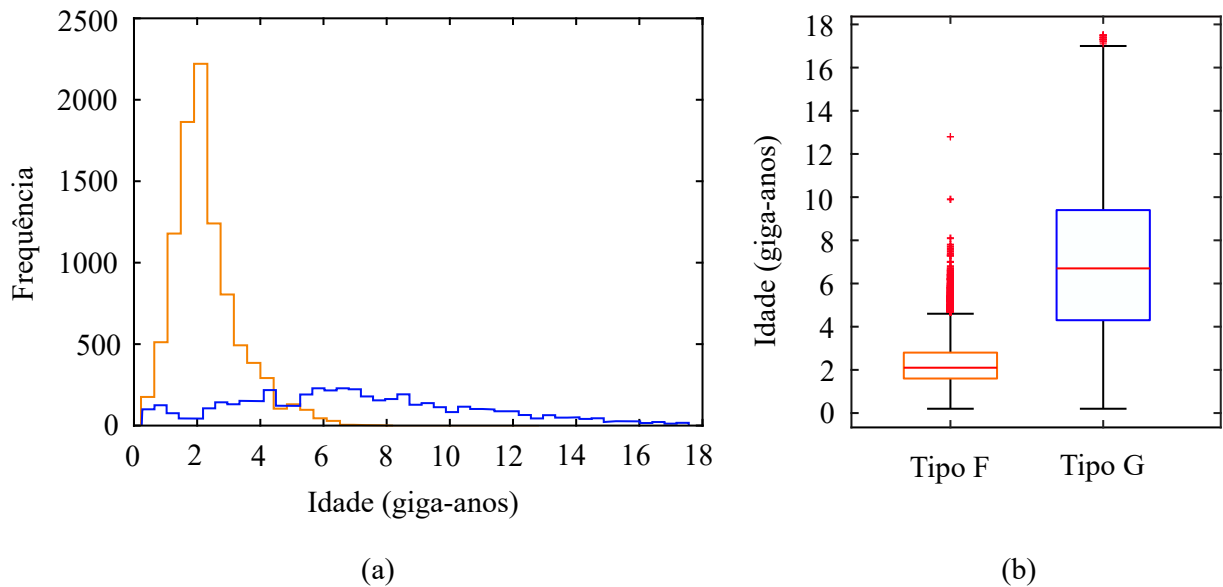
abordagem Bayesiana descrita detalhadamente por Jørgensen e Lindegren [80]. Integrando a eq.(3.1),

$$P(\text{idade}) = \int_R P d \log T_{eff} dM_v d[\text{Fe}/\text{H}], \quad (3.2)$$

com R sendo a região no espaço $(\log T_{eff}, M_v, [\text{Fe}/\text{H}])$, logramos da função-G, isto é, a distribuição de probabilidade global para todas as idades possíveis de cada estrela. O máximo de $P(\text{idade})$ pode ser usado como um estimador para determinar a idade mais provável da estrela.

Com novas calibrações para metalicidade e temperatura, a determinação das idades estelares foram revisadas por Holmberg *et al.* [31, 32] e Casagrande *et al.* [33] que empregou o método de Burnett e Binney [81], um processo similar a Jørgensen e Lindegren [80]. Assim, com essas atualizações e acatando os dados do catálogo GCS III [32], a amostra dispõe de estrelas com idade entre 0.2 e 17.5 giga-anos com limite de confiança superior e inferior declarados no catálogo e a sua distribuição segmentada por tipo espectral pode ser apreciada na fig.(5).

Figura 5: Distribuição da idade para toda amostra segmentada por tipo espectral.



Fonte: Autoria própria. (a) Histograma da amostra para estrelas do tipo F (linha laranja) e G (linha azul). (b) Boxplot com indicativas da média na idade estelar: 2.1 giga-anos para estrelas tipo F e 6.7 giga-anos para o tipo G.

Das 16682 estrelas do catálogo, 14351 possuem informações sobre a idade e destas, 9625 são do tipo F, 4719 do tipo G e 7 do tipo K. Com essa amostra, podemos observar na fig.(5a) um pico em torno de 2 giga-anos para estrelas do tipo F mas para aquelas do tipo G, só se torna evidente no *Boxplot* da fig.(5b), na qual possui uma média de 6.7 giga-anos. Além disso, o intervalo da idade para as estrelas do tipo F está entre 0.2 e 12.8 giga-anos, com diversos *outliers* entre 5 a 13 giga-anos, enquanto para as do tipo G, o intervalo se configura por todas as faixas etárias com *outliers* presentes em idades avançadas.

É importante salientar que a maior assiduidade de estrelas do tipo F em detrimento

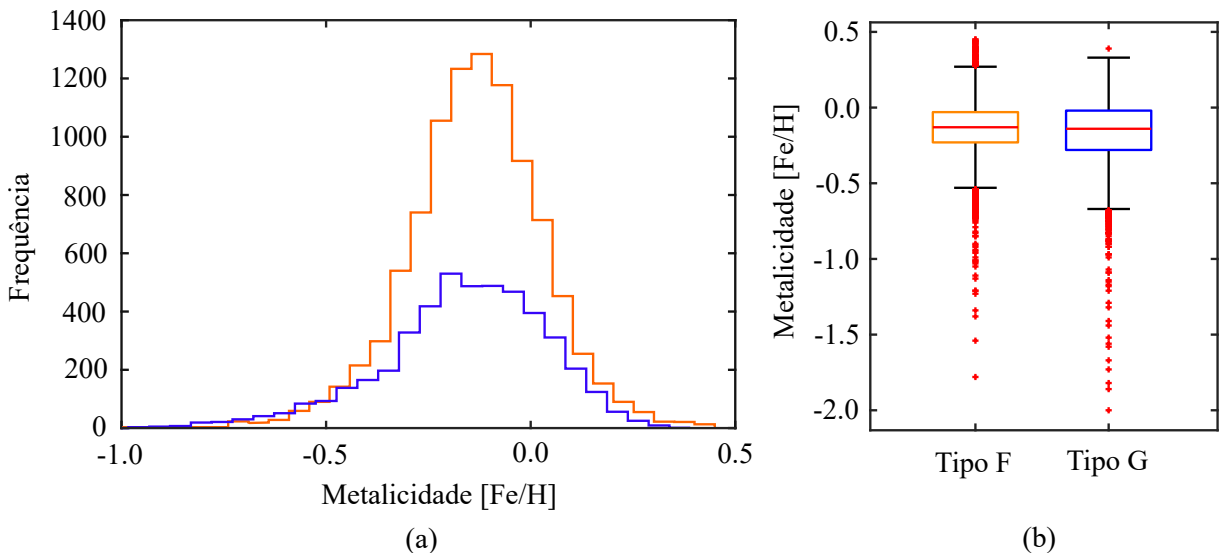
as do tipo G se deve, principalmente, a magnitude de operação do instrumento, ou seja, por possuir fraco brilho e conseqüentemente ter revés na especificação dos seus parâmetros, é inerente que estrelas do tipo G estejam escassas à medida que a distância aumenta [30].

3.1.2 Metalicidade

A metalicidade da amostra foi derivada do sistema *uvby* de Strömgen empregando o uso das calibrações de Schuster e Nissen [82], no entanto, esta calibração propicia erros sistemáticos para a metalicidade das estrelas anãs do tipo G e K com $b - y > 0.46$. Na época da primeira versão do catálogo GCS [30], as calibrações espectroscópicas eram escassas, salvo estudos espectroscópicos de alta resolução como de Flynn e Morell [83], Tomkin e Lambert [84], Thorén e Feltzing [85] e Santos *et al.* [86], que foram utilizados para extrair a metalicidade para 72 estrelas anãs com $0.44 \leq b - y \leq 0.59$.

Esse erro oriundo em algumas estrelas da amostra foi reanalisado na segunda versão do catálogo (GCS II [31]), na qual derivaram uma nova relação com base na amostra das 72 estrelas citadas acima e usando os mesmos termos da calibração de Schuster e Nissen [82]. Essas novas metalicidades adquiridas se mantiveram no GCS III [32]. Por fim, a amostra constitui de 14351 estrelas com metalicidade entre -2.0 e 0.45 dex e a sua distribuição por tipo espectral está disposta na fig.(6).

Figura 6: Distribuição da metalicidade para toda amostra segmentada por tipo espectral.



Fonte: Autoria própria. (a) Histograma da amostra para estrelas do tipo F (linha laranja) e G (linha azul). (b) Boxplot com indicativas da média na metalicidade: -0.13 dex para estrelas tipo F e -0.14 dex para o tipo G.

A fig.(6a) consta com o histograma da metalicidade para as estrelas do tipo F (linha laranja) e tipo G (linha azul) de toda amostra, sendo que, para aquelas do tipo F a metalicidade está entre $-1.78 \leq [\text{Fe}/\text{H}] \leq 0.45$ e para o tipo G, $-2.0 \leq [\text{Fe}/\text{H}] \leq 0.39$. A média é evidenciada

no *Boxplot* da fig.(6b), com -0.13 dex para o tipo F e -0.14 dex para o tipo G, o que nos leva a considerar que a presente amostra é composta, em sua grande maioria, de estrelas pobres em metais.

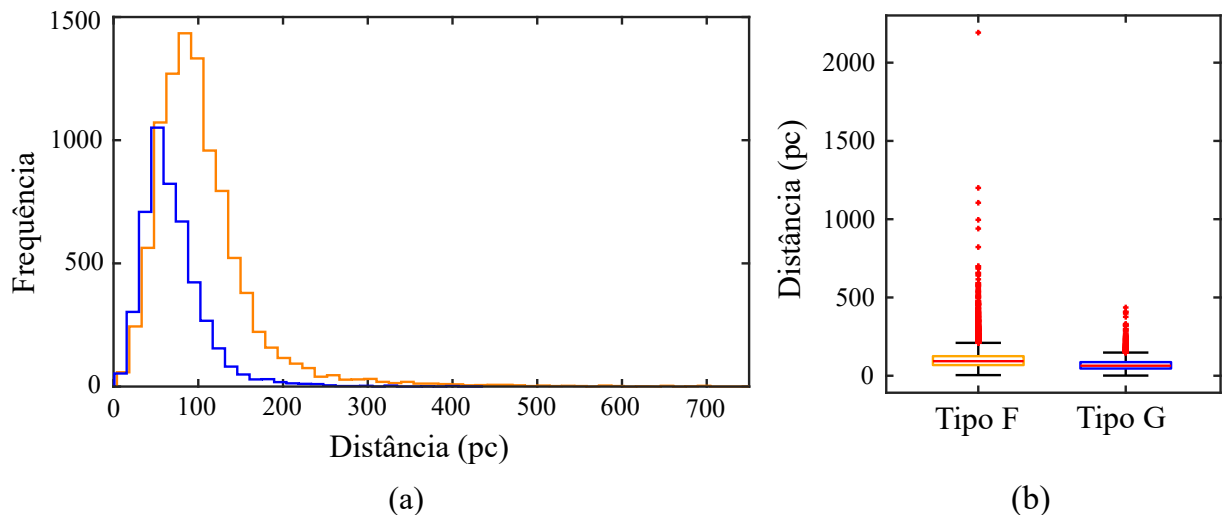
3.1.3 Distância

Praticamente todas as estrelas da amostra dispuseram de dados de paralaxe e movimento próprio, derivados dos catálogos Hipparcos [87] e Tycho-2 [88]. Quando tais dados apresentavam uma precisão menor que 13%, foi utilizado a paralaxe fotométrica ao invés da trigonométrica. No GCS I [30], usufruíram de calibrações de Crawford [89] para as distâncias fotométricas de estrelas do tipo F e de Oslen [90] para aquelas do tipo G. Essa divergência entre ambas estimativas de distância foram usadas para prognosticar possíveis estrelas binárias ou com alguma peculiaridade espectral.

Essas calibrações foram revisadas no GCS II [31], pois evidenciaram erros sistemáticos nas distâncias fotométricas e com a redução dos dados de Hipparcos por van Leeuwen [91], o catálogo GCS III [33] minimizou os erros de paralaxe, aperfeiçoando de maneira substancial os dados da amostra.

Com esses dados, foram computados parâmetros como a distância da estrela ao Sol R , magnitude absoluta e com as coordenadas equatoriais², foram determinadas as coordenadas galácticas l e b [33] definidas na subseção 2.3. Assim, a distribuição dessa distância para toda a amostra dividida por tipo espectral pode ser avaliada na fig.(7).

Figura 7: Distribuição da distância para toda amostra segmentada por tipo espectral.



Fonte: Autoria própria. (a) Histograma da amostra para estrelas do tipo F (linha laranja) e G (linha azul). (b) Boxplot com indicativas da média na distância: 93 pc para estrelas tipo F e 64 pc para o tipo G.

²Coordenadas que descrevem a posição do objeto no espaço a partir do plano equatorial celeste em função dos ângulos de ascensão reta e de declinação [92].

As 14351 estrelas do catálogo varrem uma distância entre 1 a 2192 pc, sendo $4 \geq R \geq 2192$ para o tipo F e $1 \geq R \geq 436$ para o tipo G. Em ambos os tipos existem a evidência de picos para distâncias mais próximas (93 pc para o tipo F e 64 pc para o tipo G) como mostrado nos gráficos da fig.(7). Novamente percebemos o efeito da magnitude sobre a detecção de estrelas mais brilhantes (tipo F) e mais fracas (tipo G) em função do limite da distância, uma vez que,

$$F_{\star} \propto \frac{L_{\star}}{R_{\star}^2}, \quad (3.3)$$

expressa o parecer de que estrelas com baixa luminosidade (L_{\star}) a grandes distâncias (R_{\star}) terão um fluxo (F_{\star}) menor, dificultando a sua identificação [4].

3.2 Filtragem dos dados

Perante as análises elucidadas para a amostra total do catálogo na seção anterior, este trabalho empregou os seguintes critérios de filtragem:

1. Apenas estrelas *single*;
2. idade ≤ 10 giga-anos com erro $< 25\%$;
3. $R \leq 120$ pc.

Definir nossa amostra descartando estrelas binárias ou variáveis é essencial para evitar contaminações nos valores dos parâmetros astrofísicos, uma vez que, como foi visto, logram de medidas de fotometria. Assim, para excluir as binárias da amostra, seguimos a indicação presente no catálogo, que já traz um indicador que separa essas duas populações.

Além disso, limitamos a idade estelar para ser inferior a 10 giga-anos, valor aproximado da idade do disco galáctico [93]. Nordström, Mayor e Andersen [30] estabelecem que as estrelas com idades bem definidas contém um erro menor que 25%. Portanto usamos o erro relativo total,

$$\sigma_{\text{total}} = \sqrt{(\sigma_{\text{idade}}^{\text{superior}} - \text{idade})^2 + (\text{idade} - \sigma_{\text{idade}}^{\text{inferior}})^2}, \quad (3.4)$$

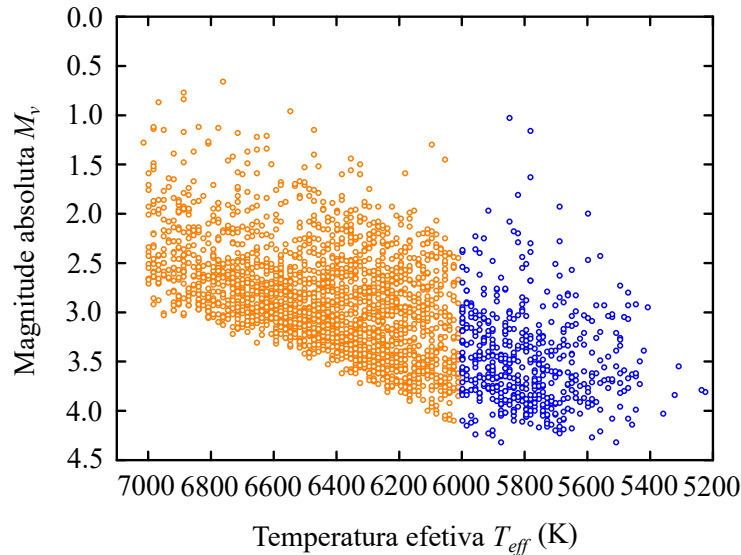
onde $\sigma_{\text{idade}}^{\text{superior}}$ e $\sigma_{\text{idade}}^{\text{inferior}}$ são os limites superior e inferior da idade definidos pelo catálogo, e consideramos apenas as estrelas que resultam em,

$$\sigma = \frac{\sigma_{\text{total}}}{\text{idade}} < 0.25. \quad (3.5)$$

A completude da amostra do catálogo GCS I [30] é dada em um volume de 40 pc (28% de todo o céu), contudo, nessa extensão, contém apenas 1685 estrelas com dados completos. Incitamos, portanto, em concordância com o critério estabelecido por Sharma *et al.* [94], a ampliação da distância até 120 pc para que compreenda uma amostra significativa.

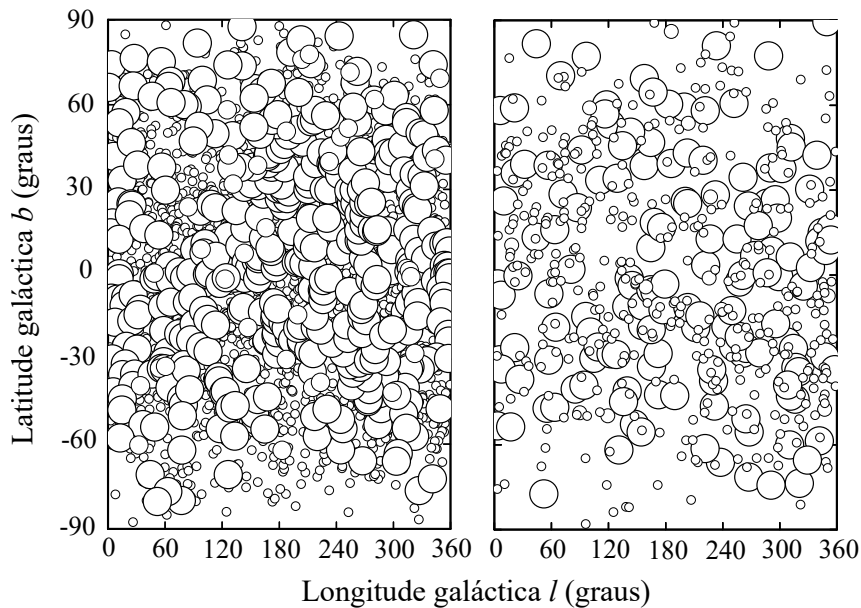
Com essas filtragens, a amostra final detém de 2755 estrelas, sendo 2215 do tipo F e 540 do tipo G (ver apêndice A). A disposição dessas estrelas no diagrama HR pode ser observada pela fig.(8), sua distribuição em um gráfico latitude *versus* longitude galáctica por tipo espectral e metalicidade pela fig.(9) e ao longo dos planos físicos definidos pelas eqs.(2.4) pela fig.(10).

Figura 8: Amostra final disposta no diagrama HR.



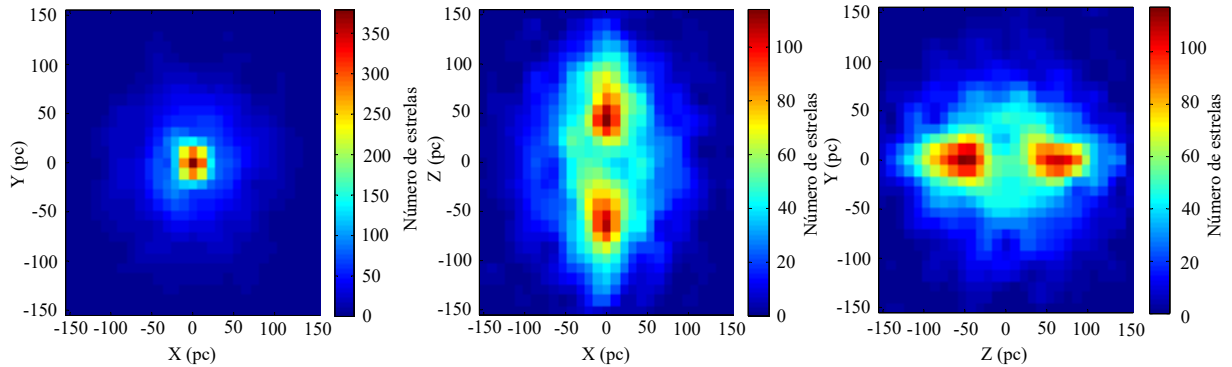
Fonte: Autoria própria. As estrelas do tipo F e G são representadas pelos pontos laranjas e azuis, respectivamente.

Figura 9: Distribuição da amostra final nas coordenadas galácticas (l, b).



Fonte: Autoria própria. A esquerda estão distribuídas as estrelas do tipo F e a direita as do tipo G. O tamanho das bolhas representam os diferentes tipos de metalicidade: $[Fe/H] > 0$ das bolhas grandes, $[Fe/H] = 0$ das médias e $[Fe/H] < 0$ das menores.

Figura 10: Distribuição da amostra final ao longo dos planos físicos XY , XZ e ZY .



Fonte: Autoria própria. Distribuição das estrelas do tipo F em uma área $300 \times 300 \text{ pc}^2$ com o mapa de cores representando a densidade do número de estrelas em um quadrado de $20 \times 20 \text{ pc}^2$. O comportamento destes mapas para as estrelas do tipo G são similares.

No diagrama HR da fig.(8), onde correlaciona a magnitude absoluta M_v com a temperatura efetiva T_{eff} , observamos que nossa amostra final contém estrelas (anãs) que se encontram na sequência principal com $-0.66 \leq M_v \leq 4.1$ para estrelas do tipo F (pontos laranjas) e $1,03 \leq M_v \leq 4,32$ para do tipo G (pontos azuis).

Destarte, a fig.(9) descreve o comportamento da distribuição da amostra final no plano $l \times b$ onde o tamanho das bolhas reflete nos diferentes valores para a metalicidade, na qual temos, $[\text{Fe}/\text{H}] > 0$ para as bolhas grandes, $[\text{Fe}/\text{H}] = 0$ para as médias e $[\text{Fe}/\text{H}] < 0$, para as menores. Assim, percebemos que a amostra final contempla todas as regiões do espaço $l \times b$ com uma distribuição não uniforme da metalicidade tanto para estrelas do tipo F (a esquerda na fig.(9)) quanto para aquelas do tipo G (a direita na fig.(9)).

A fig.(10) disponibiliza um vislumbre de como nossa amostra se distribuí ao longo dos planos galáctico, meridiano e rotacional, onde vemos claramente que a densidade do número de estrelas diminui com a distância. Além disso, temos uma distribuição unimodal no plano XY , enquanto que nos outros dois planos, esta distribuição é bimodal.

Essa separação por tipo espectral que fizemos nos fornecerá uma análise diligente da amostra final, a saber, a diminuição de *bias* nas relações entre os parâmetros estelares significativos à este estudo que serão discutidos frente aos resultados obtidos no próximo capítulo.

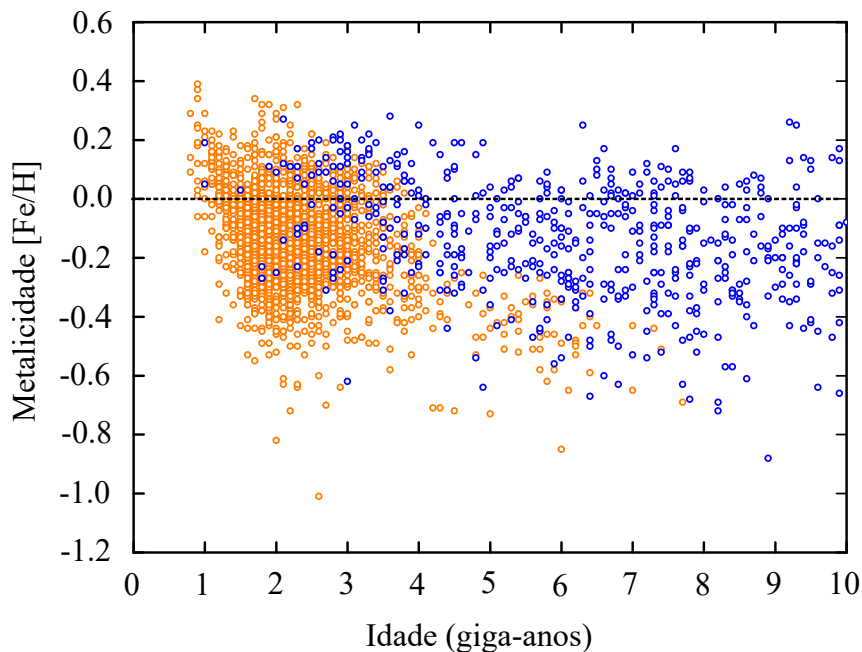
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Em face dos apontamentos teóricos e observacionais da literatura apresentada anteriormente, este capítulo tenciona a descrição da análise dos resultados obtidos da relação idade-metalicidade-distância que foram derivados dos dados fornecido pelo catálogo GCS III [32] cuja amostra foi filtrada (vide sec.3.2).

4.1 Relação idade-metalicidade

Com a proposta de averiguar, nesse primeiro momento, a relação idade *versus* metalicidade, dispomos da caracterização dessa relação mediante fig.(11) na qual inclui todas as estrelas da amostra final segregada por tipo espectral.

Figura 11: A relação idade-metalicidade.



Fonte: Autoria própria. Os pontos em laranja representam as estrelas do tipo F e os pontos em azul, do tipo G.

Deste modo, a fig.(11) nos permite visualizar a distribuição da metalicidade como uma função da idade e do tipo espectral. A referida figura mostra que as estrelas do tipo F (pontos laranjas) estão concentradas em uma pequena faixa de idade entre 1 e 3 giga-anos, enquanto as estrelas do tipo G (pontos azuis) parecem ter uma distribuição mais uniforme. Essa distribuição se deve ao fato de que estrelas do tipo G, por terem uma massa menor do que as F, permanecem por um tempo maior na sequência principal e, portanto, é mais provável encontrar estrelas do tipo G com idade maior do que a do Sol do que as do tipo F. Tendo como

base as estrelas com metalicidade solar ($[\text{Fe}/\text{H}] = 0$, em linha tracejada), é fácil observar que existe uma distribuição assimétrica entre as populações de estrelas mais ricas e mais pobres em metal. Consequentemente, nossa amostra é majoritariamente composta por estrelas mais pobres em metal. Esse espalhamento evidente corrobora com os trabalhos de Nordström *et al.* [30], Holmberg *et al.* [31, 32], Edvardsson *et al.* [68], Feltzing *et al.* [70] e Marsakov *et al.* [95].

A análise supracitada da fig.(11) ainda não evidencia um aspecto importante da relação idade-metalicidade, o que se faz necessário comparar com outros parâmetros, a saber, a média e dispersão da metalicidade como indicadas na tabela (1).

Tabela 1: Número de estrelas por intervalo de idade, média e dispersão na metalicidade por tipo espectral

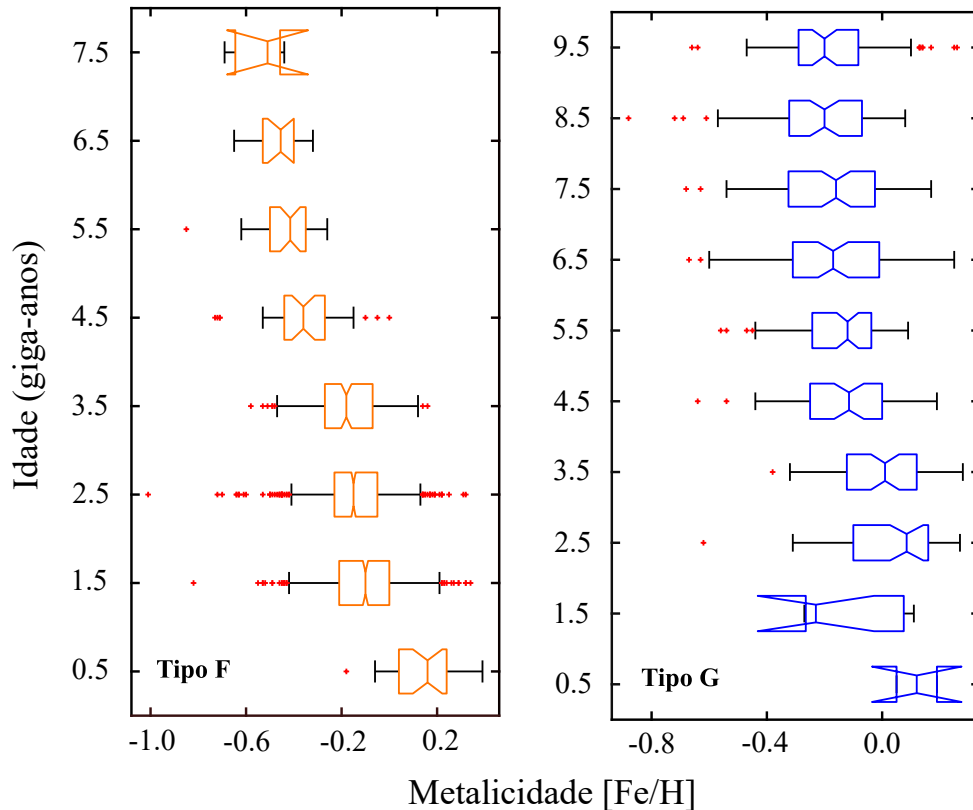
Idade (giga-anos)	Tipo F			Tipo G		
	N.º de dados	$\langle[\text{Fe}/\text{H}]\rangle$	$\sigma_{\langle[\text{Fe}/\text{H}]\rangle}$	N.º de dados	$\langle[\text{Fe}/\text{H}]\rangle$	$\sigma_{\langle[\text{Fe}/\text{H}]\rangle}$
0-1	26	+0.143	0.141	2	+0,12	0,098
1-2	904	-0.108	0.152	7	-0,113	0,179
2-3	995	-0.146	0.146	50	+0,021	0,178
3-4	210	-0.174	0,150	61	-0,009	0,159
4-5	31	-0.366	0.182	58	-0,121	0,178
5-6	32	-0.433	0.117	73	-0,153	0,157
6-7	14	-0.470	0.107	81	-0,177	0,201
7-8	3	-0.546	0.128	88	-0,181	0,193
8-9	–	–	–	61	-0,222	0,205
9-10	–	–	–	59	-0,175	0,201

Primeiramente, a tabela (1) mostra claramente a assimetria mencionada no parágrafo anterior, como indicado pelos valores negativos da média de $[\text{Fe}/\text{H}]$ a cada intervalo de idade. Em particular, o referido desvio padrão é um importante parâmetro que mensura o grau de espalhamento dos valores de $[\text{Fe}/\text{H}]$ em cada intervalo de idade. Os valores de σ indicam que a dispersão de metalicidade é praticamente constante para todos os valores de idade, como mencionado por Holmberg, Nordstrom e Andersen [31]. Como veremos mais tarde, esse comportamento é diferente quando relacionamos a dispersão com a posição.

Diante desses subgrupos de intervalos de 1 giga-ano, investigamos o diagrama idade-metalicidade para estrelas F e G na fig.(12). Apesar dos *outliers*, o boxplot das estrelas do tipo F promove uma evidência no decréscimo dos valores medianos da metalicidade com a gradação da idade estelar sistematicamente, em contraposição a do tipo G, que mostra uma relação relativamente plana entre a idade e $[\text{Fe}/\text{H}]$. Os resultados obtidos por Bensby *et al.* [71]

são similares ao encontrado no boxplot a esquerda da fig.(12), no entanto, a dissemelhança sutil entre ambas investigações ocorre no método, na qual Bensby *et al.* [71] usufruiu de uma subdivisão na amostra por 0.1 dex na metalicidade, e no prognóstico da diminuição de $[Fe/H]$ em função da idade, que acontece entre 5–7 giga-anos.

Figura 12: Diagrama da relação idade-metalicidade.



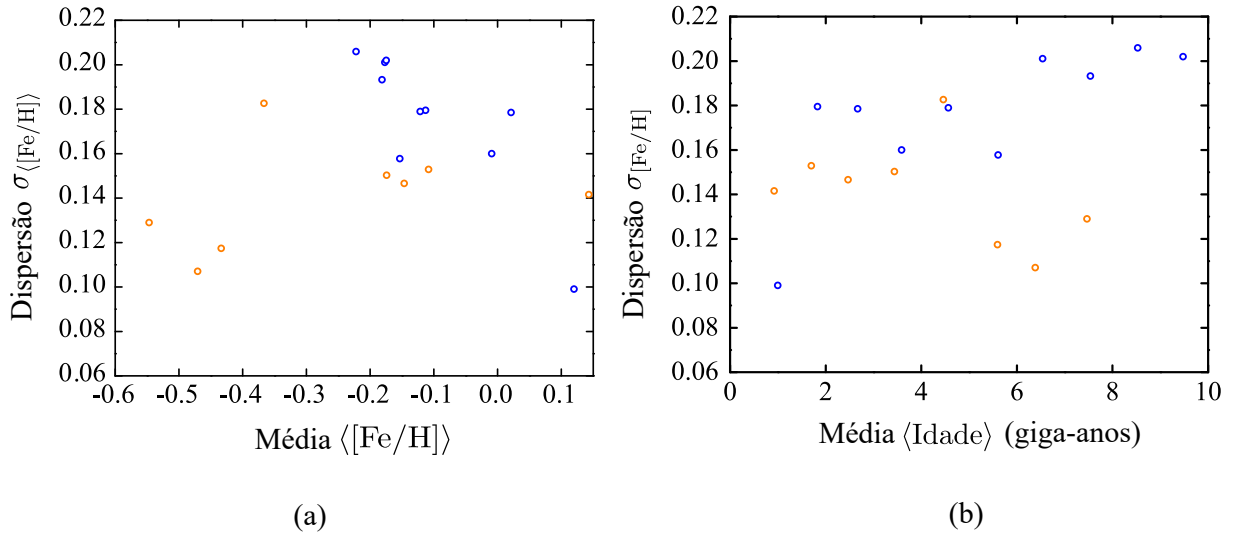
Fonte: Autoria própria. Os boxplots de ambos tipos espectrais ilustram a distribuição da metalicidade por idade no intervalo de 1 giga-anos.

Destarte, o comportamento da dispersão da metalicidade propende a ser maior para as estrelas pobres em metais do tipo G (ponto azul) do que para aquelas do tipo F (ponto laranja), como demonstra a fig.(13a) e tende a ser também maior para estrelas G mais velhas (vide fig.(13b)).

Esse comportamento também foi constatado no trabalho de Edvardsson *et al.* [68] para estrelas com 1, 5 e 10 giga-anos em que a dispersão na metalicidade para essas idades é em torno de 0.1, 0.2 e 0.3 dex respectivamente. Ao compararmos esses valores com os da tabela (1) e com as figs.(13), observamos que, apesar de próximos, estes são superiores aqueles encontrados nesse trabalho para estrelas de ambos tipos espectrais. Tais registros de baixa dispersão na relação idade-metalicidade é correlato com os estudos de Soubiran *et al.* [73], Rocha-Pinto *et al.* [96] e Pont e Eyer [97].

Na vitrine dessas análises a respeito da relação idade-metalicidade, a fig.(14) a es-

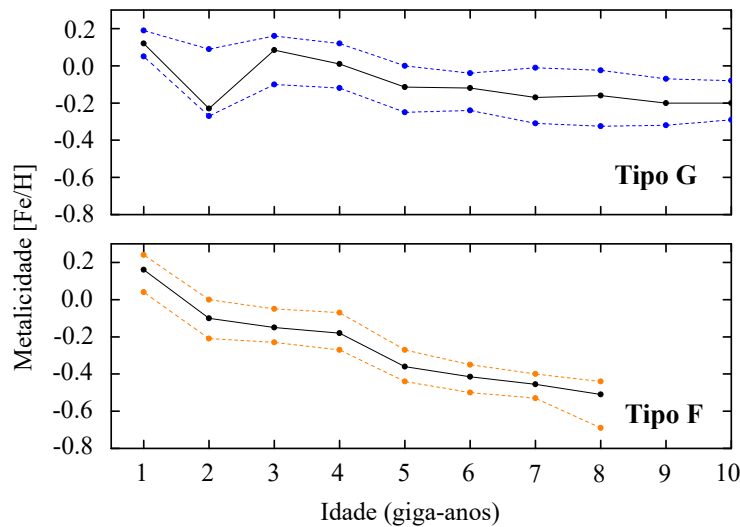
Figura 13: Dispersão da metalicidade em função da sua média e da idade estelar média.



Fonte: Autoria própria. (a) $\sigma_{\langle[\text{Fe}/\text{H}]\rangle}$ em função de $\langle[\text{Fe}/\text{H}]\rangle$ e (b) em função de $\langle\text{Idade}\rangle$, onde os pontos laranjas e azuis representam estrelas do tipo F e G, respectivamente.

tabelece conforme as medianas e quartis (1^o e 3^o) da amostra final separada por tipo espectral.

Figura 14: Mediana e 1^o e 3^o quartis da relação idade-[Fe/H] da amostra final.



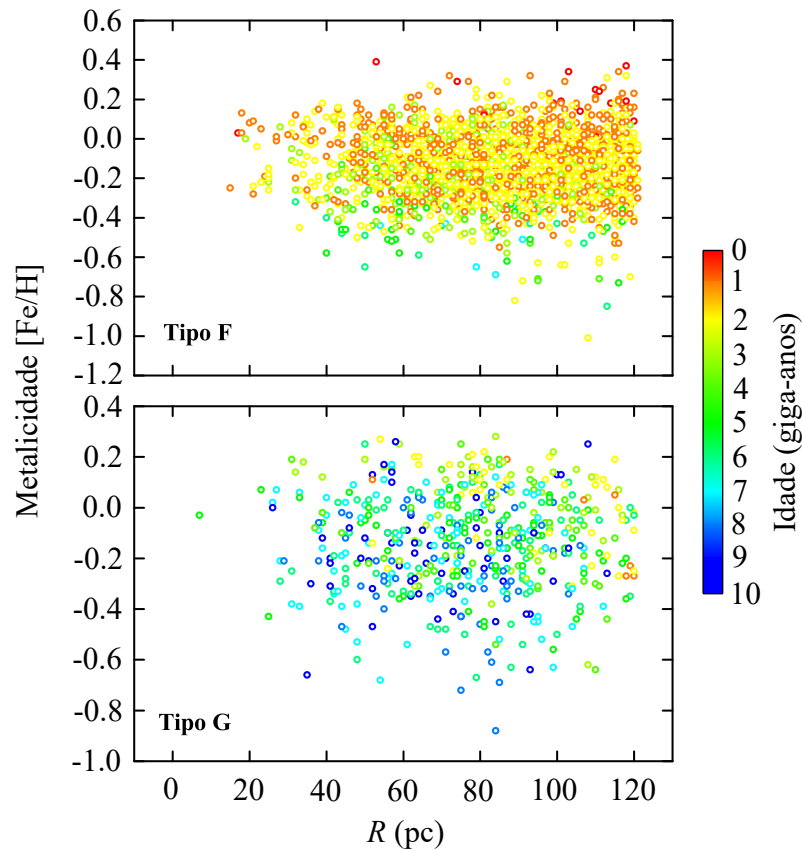
Fonte: Autoria própria. No gráfico superior reside as estrelas do tipo G e embaixo, as do tipo F, onde as linhas tracejadas indicam, de baixo para cima, os 1^o e 3^o quartis e a linha sólida, a mediana.

A linha sólida configura a mediana e as linhas tracejadas, os quartis. Notamos que, novamente, o gráfico superior é aproximadamente plano, com um decaimento excepcional acentuado em 2 giga-anos e metalicidade -0,2 dex. No gráfico inferior, que remete as estrelas do tipo F, apresenta um declínio com alguns *saltos* entre 1–2 e 4–5 giga-anos na metalicidade que vão de 0,2 a -0,2 dex e -0,2 a -0,4 dex, respectivamente.

4.2 Relação metalicidade-distância

Proferir o comportamento da metalicidade em função da distância no plano galáctico dispõe da oportunidade de entendermos quais foram os possíveis mecanismos que transcorreram para que houvesse a formação da nossa galáxia, como justificamos nos capítulos 1 e 2. Paralelo ao estudo de Garnett e Kobulnicky [78], investigamos a metalicidade, primeiramente, em função da distância R (pc) das estrelas da nossa amostra ao Sol (ver fig.(15)).

Figura 15: Comportamento da metalicidade em função da distância.



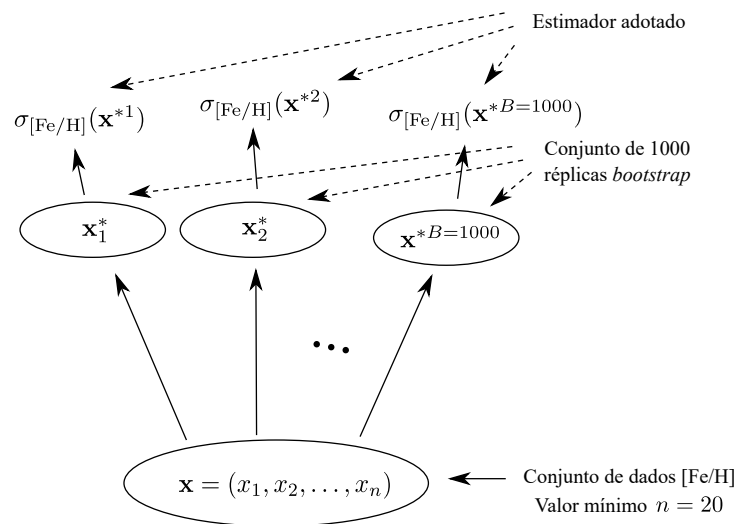
Fonte: Autoria própria. A intensidade de cores sinaliza a idade estelar de 0 à 10 giga-anos, onde dividimos a amostra final novamente em tipos espectrais.

Os gráficos da fig.(15) evidenciam a presença de estrelas pobres em metais tanto próximo quanto distante ao Sol, mas há uma manifestação de estrelas com $[Fe/H] < -0.4$ nas regiões entre $80 < R < 120$ para o tipo F e entre $70 < R < 90$ para o tipo G, ambas em menor volume. Ao afrontarmos a idade estelar, observamos que para as estrelas do tipo F, existe uma distribuição inconstante, diferentemente para as estrelas do tipo G, que salienta a assiduidade de jovens estrelas a distâncias maiores, observação que pode ser devido a menor representatividade estatística da amostragem. Garnett e Kobulnicky [78] alcançaram resultados semelhantes a este, mas consideraram que estrelas pobres em metal são incomuns na vizinhança solar, o que não é notório nos resultados encontrados nesse trabalho.

Dentro desse contexto, uma análise espacial do comportamento da metalicidade é extremamente necessário. É importante ressaltar que esse tipo de análise não tem precedente na literatura. Em primeiro lugar, tencionamos uma descrição do comportamento da dispersão de $[\text{Fe}/\text{H}]$ nos planos XY, XZ e ZY derivados das equações (2.4). No entanto, para que essa investigação seja mais robusta acerca de uma possível tendência na metalicidade sem *bias* observacionais que ainda se fazem presentes na amostra devido ao débil de estrelas em determinadas faixas de idade como mostramos na tabela 1, é necessário a aplicação do método estatístico, reamostragem *bootstrap* (ver apêndice B), que viabiliza um vislumbre satisfatório desse problema. Quando segregamos nossa amostra por idade, nós encontramos que existem algumas áreas que apresentam um número pequeno de dados. Essas áreas estão principalmente localizadas quando a distância é maior do que 40 pc. No entanto, isso depende ligeiramente do plano considerado, como pode ser visto na fig.(10). Vale lembrar que a amostra é completa em magnitude para um volume cujo o raio é 40 pc. Deste modo, essa ferramenta estatística é recomendada para eliminar os efeitos de magnitude que limitam encontrar estrelas G para valores de distância maior do que 40 pc.

A ideia básica do método *bootstrap* é gerar novas amostras aleatórias (reamostragens) a partir dos dados fornecidos da amostra original e determinar as estatísticas [98]. Desarte, foi usado o procedimento análogo adotado por Silva *et al.* [99], como mostra o esquema da fig.(16).

Figura 16: Esquema da reamostragem *bootstrap* aplicado neste trabalho.

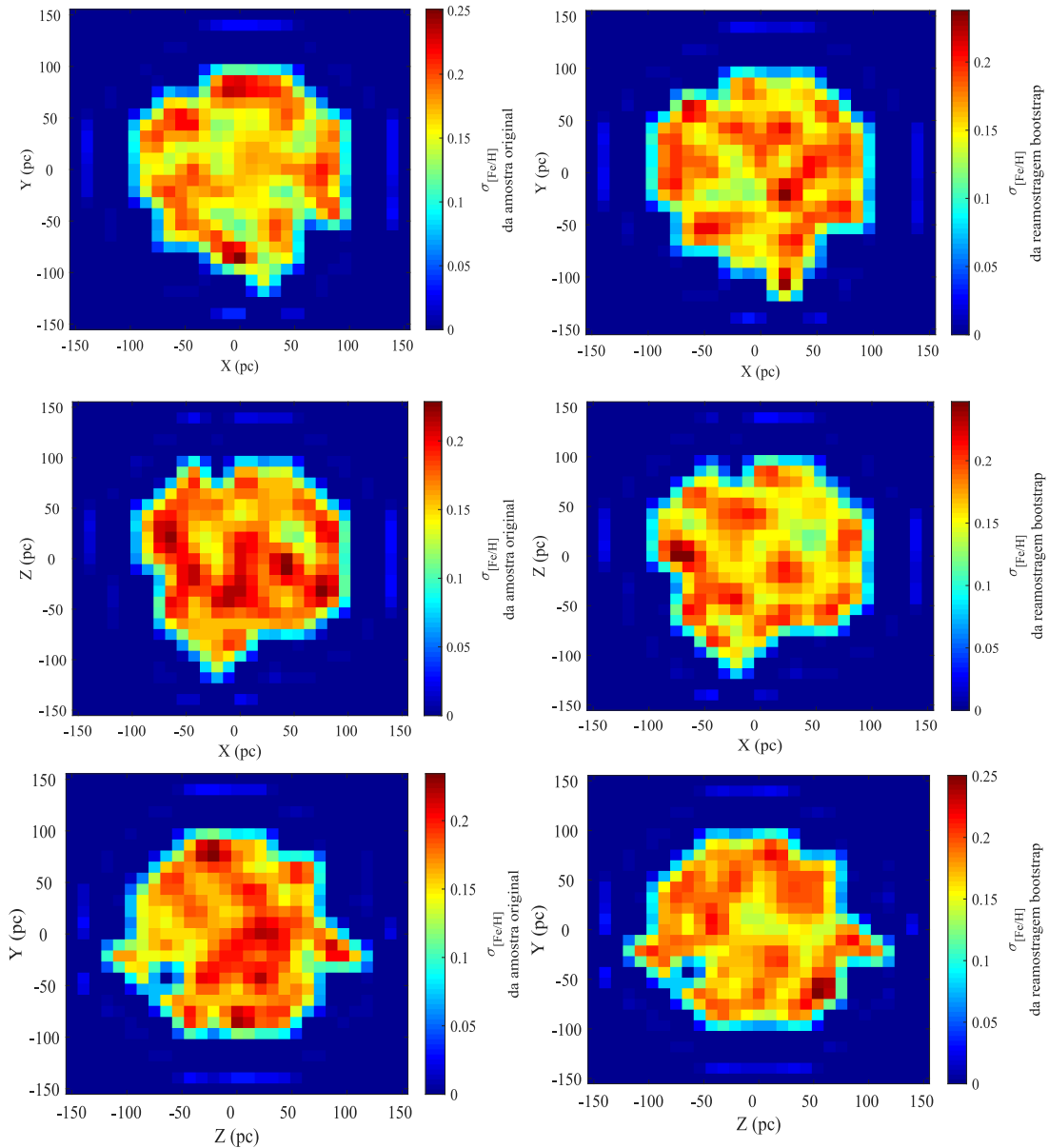


Fonte adaptada: Efron e Tibshirani [110]. Foi gerado um conjunto de 1000 réplicas *bootstrap* advindas dos dados originais da metalicidade, na qual adotamos um valor mínimo de $n = 20$ estrelas para que o método se efetive. Para cada amostra original e do *bootstrap*, foi calculado o estimador $\sigma_{[\text{Fe}/\text{H}]}$.

Posto essa consideração, os gráficos do desvio da metalicidade nos planos galáctico

(XY), meridiano (XZ) e rotacional (ZY) para a amostra original e a *bootstrapped* para estrelas do tipo F podem ser do apreciados pela fig.(17) e as do tipo G, pela fig.(18).

Figura 17: $\sigma_{[\text{Fe}/\text{H}]}$ da amostra original e da reamostragem *bootstrap* das estrelas do tipo F nos planos físicos.

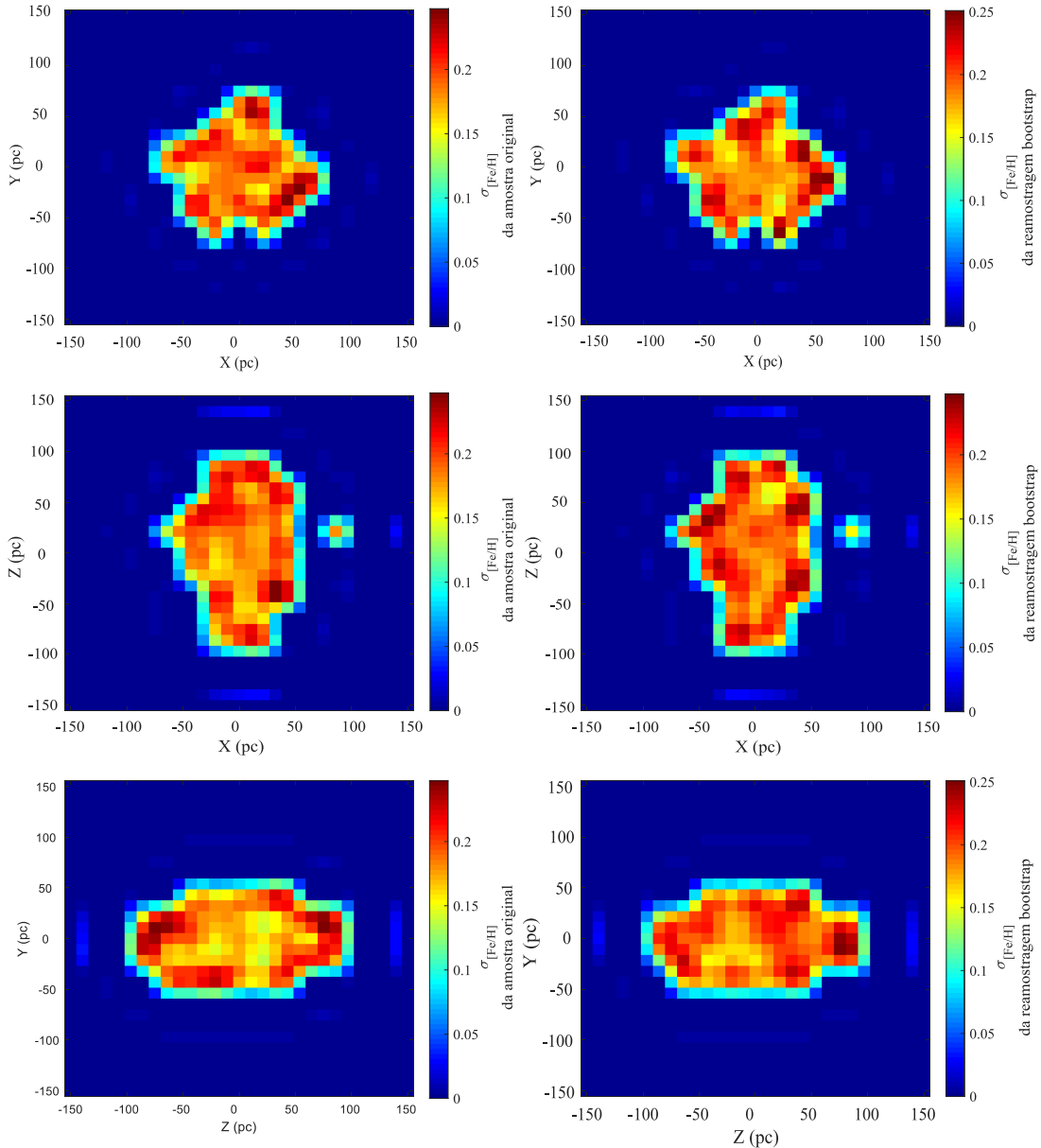


Fonte: Autoria própria. As três figuras à esquerda especificam a dispersão da metalicidade da amostra original nos planos XY , XZ e ZY (com a área de $300 \times 300 \text{ pc}^2$, limitados por uma porção de estrelas $n \geq 20$ em cada área estipulada por um quadrado $20 \times 20 \text{ pc}^2$), enquanto que as três à direita retratam a mesma investigação mas com a amostra *bootstrapped*, sendo o mapa de cores a intensidade, do mínimo ao máximo de $\sigma_{[\text{Fe}/\text{H}]}$.

Os gráficos da fig.(17) constataam que, ao avaliar a reamostragem, a tendência global de $\sigma_{[\text{Fe}/\text{H}]}$ da amostra original é modificada, dissociando regiões de $\sigma_{[\text{Fe}/\text{H}]} > 0.2$ próximas ao centro para áreas mais distantes do Sol. Alguns pontos em particular nos planos, como entre 0

e 50 do eixo horizontal e entre -50 e 0 do eixo vertical, se condicionam mesmo na ação do método estatístico. Já os gráficos da fig.(18) intensificaram ainda mais populações de diversas metalicidades em regiões mais distantes do Sol ao aplicarmos o método de reamostragem.

Figura 18: $\sigma_{[\text{Fe}/\text{H}]}$ da amostra original e da reamostragem *bootstrap* das estrelas do tipo G nos planos físicos.



Fonte: Autoria própria. Descrição análoga à fig.17.

Tais dispersões apresentadas pelos gráficos podem indicar um “fluxo de aquecimento” nas direções radiais nos planos, onde nas bordas é mais provável encontrar regiões de “aquecimento”. Esse espalhamento pode estar associado a contaminação pela massa ou outra propriedade que não temos informação como, por exemplo, se parte das estrelas tem um ou mais planeta que pode afetar a metalicidade da estrela. Além disso, os gráficos da dispersão

da idade do tipo F e G, apesar de não ilustrados, são bastante similares aos da fig.(17) e (18), respectivamente, o que sugere que as regiões de maiores desvios de $[Fe/H]$ são também as de alta dispersão na idade estelar. Em decorrência a essa análise, a presença de bias na amostra original da metalicidade pode remeter um parâmetro real de interferência para estrelas do tipo F, haja vista que instiga a presença de maiores dispersões próximas ao Sol, o que acontece, na verdade, em maiores distâncias na vizinhança solar.

Uma justificativa para essa presença de desvios na $[Fe/H]$ nos planos foi sugerida por Pilyugin e Edmunds [100]. Eles propuseram que essa dispersão deve-se a mistura dos produtos das nucleossíntese estelar com o gás interestelar, assentindo o enriquecimento em nuvens moleculares e o desenvolvimento de um meio heterogêneo. Essa teoria pode ser uma explicação para os resultados observados quando confrontamos a metalicidade com a distancia radial e nos planos cartesianos galácticos nas figs.(15),(17) e (18), uma vez que vemos algumas regiões com picos de $\sigma_{[Fe/H]}$ maiores que outras. François e Matteucci [101] corroboram essa teoria importando a concepção de difusão orbital, onde esse espalhamento deve-se ao efeito da justaposição de diferentes populações estelares na vizinhança solar. Essa teoria sinaliza ainda que as estrelas se afastam da sua gênese por conta da dispersão das nuvens moleculares, o que resultaria em uma distribuição de abundância química em um determinado raio que foi alterado da população nativa, fator que pode ser um indicativo para a heterogeneidade da dispersão da metalicidade nos planos físicos observados nas figuras deste trabalho.

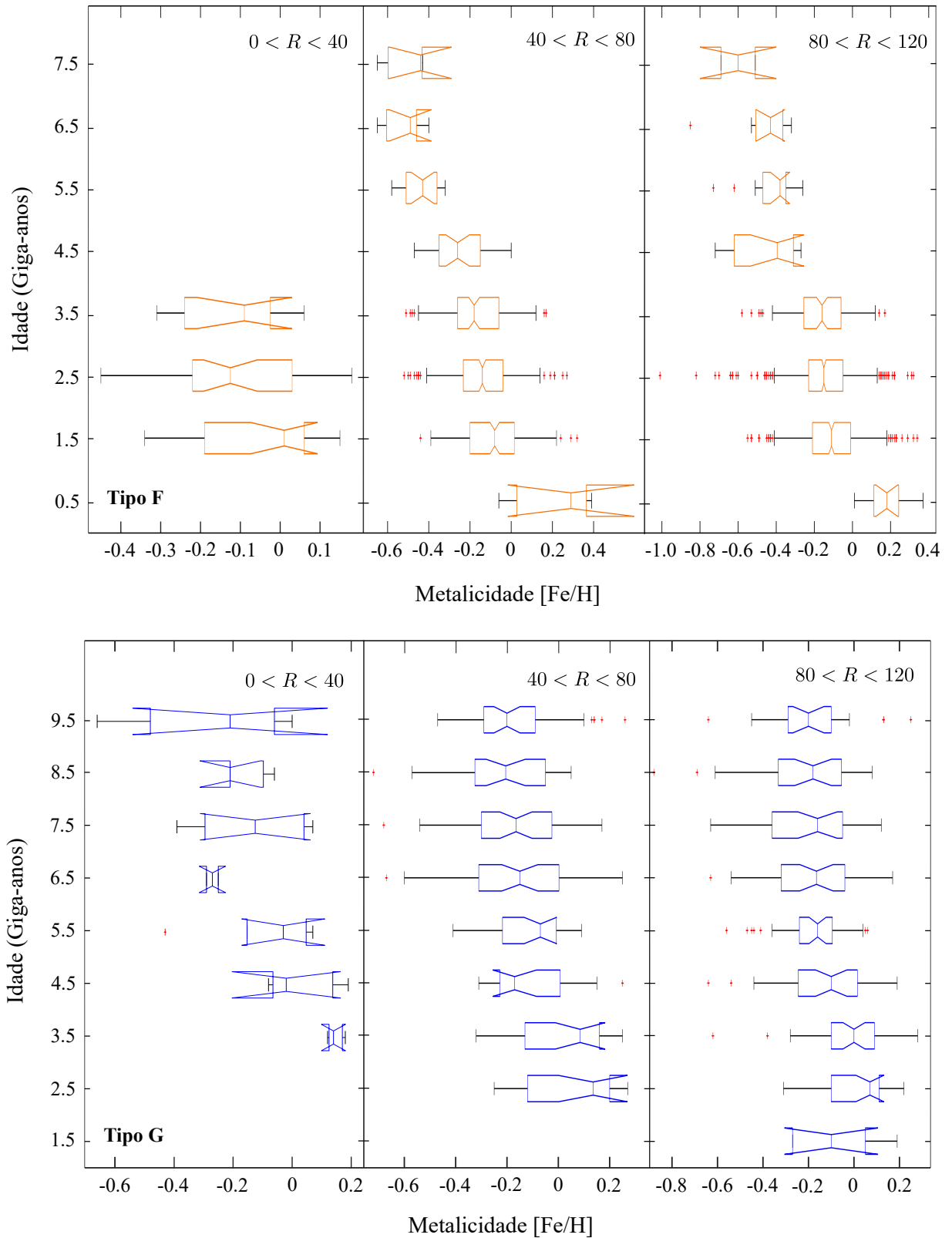
4.3 Relação idade-metalicidade-distância

O comportamento da relação idade-metalicidade em função de diferentes distâncias é mostrado na fig.(19). Assumimos uma segregação simples da nossa amostra em três grupos de regiões:

- Região mais próxima ($0 < R < 40$): contém 66 estrelas do tipo F e 28 do tipo G;
- Região “intermediária” ($40 < R < 80$): contém 767 estrelas do tipo F e 251 do tipo G;
- Região mais distante ($80 < R < 120$): contém 1382 estrelas do tipo F e 261 do tipo G.

Foi observado que na região mais próxima, existe uma escassa população de jovens estrelas de tipo espectral F, com idades entre 1 e 3,9 giga-anos. Como não apresenta uma variabilidade de idades estelares, não é possível inferir um comportamento da relação investigada, apesar de manifestar uma sutil redução de $[Fe/H] \sim -0.03$ à 1.5 giga-anos para $[Fe/H] \sim -0.12$ à 3.5 giga-anos. No que diz respeito àquelas do tipo G, que contempla idades de 3 a 9,9 giga-anos, percebemos um decaimento efetivo da metalicidade com o aumento da idade, de $[Fe/H] \sim 0.14$ à $[Fe/H] \sim -0.27$. Ao confrontarmos as regiões intermediárias e mais

Figura 19: [Fe/H]-idade para estrelas do tipo F e G em diferentes distâncias.



Fonte: Autoria própria. Diagrama da relação idade-metallicidade para estrelas do tipo F (gráficos superiores) e do tipo G (gráficos inferiores) para as distâncias em parsec, da esquerda para direita, $0 < R < 40$, $40 < R < 80$ e $80 < R < 120$.

distantes, vislumbramos a gradação da dispersão na $[Fe/H]$ especialmente em estrelas mais jovens (idades entre 1.5 e 3.5 giga-anos) de ambos os tipos espectrais, resultado já esperado após análises feitas nos gráficos (17) e (18). Apesar desses desvios, a relação idade-metalicidade é visível para os dois tipos, com diminuições na $[Fe/H]$ no mesmo intervalo etário estelar a maiores distâncias (por exemplo, para 7.5 giga-anos, $[Fe/H]$ decai de -0.5 dex para -0.6 dex em estrelas F da região intermediária para mais longe, enquanto que para estrelas G com idades de 9.5 giga-anos, diminui de -0.16 dex para -0.18 dex nestas regiões).

Assim como nossos resultados, Garnett e Kobulnicky [78] também obtiveram a notória redução de $\sigma_{[Fe/H]}$ em uma determinada idade ao compasso que se aproximamos do Sol. A justificativa deste fenômeno atribuída por eles foi que a amostra mais distante contém estrelas com propriedades químicas que não compactua com a evolução do disco na vizinhança solar.

Feltzing *et al.* [70] contra-argumentaram essas observações feitas por Garnett e Kobulnicky [78] (e conseqüentemente a nossa) alegando que, por considerar análises espectroscópicas, a amostra estelar está limitada em magnitude aparente. Conseqüentemente, as estrelas mais distantes são as mais brilhantes. Então se excluirmos as estrelas menos brilhantes (ricas em metal), preferencialmente estrelas velhas serão excluídas. Eles concluem que esses fatores confabulam para formar uma amostra em que estrelas velhas pobres em metal sejam encontradas em regiões mais distante do Sol, enquanto que estrelas velhas ricas em metais sejam suprimidas. No entanto, ao separarmos nossa amostra por tipo espectral, onde estrelas mais brilhantes são as do tipo F e mais fracas tipo G, nos permite analisar a relação $[Fe/H]$ -idade sem efeitos de contaminação apontada por Feltzing *et al.* [70]. Assim, não houve exclusão de populações estelares, onde encontramos estrelas mais brilhantes velhas pobre em metais a maiores distâncias ($80 < R < 120$) e também estrelas velhas menos brilhantes com metalicidade menor do que aquelas na mesma faixa etária a longas distâncias.

5 CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS

A relação idade-metalicidade é uma transcrição do enriquecimento químico no disco galáctico, uma vez que, se assumirmos que nossa galáxia, no início de seu desenvolvimento, tinha uma composição química com pouco metal, então a metalicidade deveria ser uma forte correlação com a da idade estelar. A cada nova geração de estrelas, mais metais são produzidos e alguns deles são liberados no meio interestelar por ventos solares e, principalmente, por explosões de supernovas. Estrelas que se formaram mais tarde deveriam, portanto, ter uma metalicidade maior do que aquelas que se formaram na fase inicial da galáxia.

Confrontamos este paradigma utilizando o catálogo GCS que contém estrelas anãs *single* do tipo espectral F e G na vizinhança solar em uma extensão de até 120 pc. Além disso, limitamos a nossa amostra a idades de 10 giga-anos (valor aproximado da idade do disco galáctico) com erro inferior a 25%. Com essas filtragens, desfrutamos de uma amostra de 2755 estrelas (80.4% dos dados estelares são do tipo F e o restante, do tipo G).

O objetivo dessa pesquisa era inferir o comportamento de tal relação, como foi discutido na primeira seção do capítulo 4. Assim, de acordo com nossos resultados, foi possível observar que estrelas F apresentam um declínio explícito da metalicidade em função da idade, enquanto que àquelas do tipo G, a dispersão se estende por toda faixa etária. Também efetuamos uma estatística trivial, onde computamos a média e desvio padrão da metalicidade para ambas as amostras no plano idade-metalicidade em intervalos de 1 giga-ano. Novamente o decréscimo da metalicidade em função da idade se faz presente para estrelas do tipo F, em contraposição às G, que ainda se mostra relativamente constante esta relação. Outro fator interessante elucidado por essa análise é que a amostra do GCS não dispõe de uma grande dispersão como ocorre em outros estudos (ver Edvardsson *et al.* [68] e Feltzing *et al.* [70]), um indicativo de que a dispersão observada nessas pesquisas espelha menor acuidade nas medições das abundâncias químicas, o que prejudicaria o vislumbre de uma relação.

Além disso, exprimimos o comportamento da metalicidade em função da distância R (distância da estrela observada até o Sol). Vimos que existem estrelas pobres em metais tanto próximo quanto distante ao Sol e para aquelas do tipo F, toda faixa etária estelar está distribuída assimetricamente, distinto às G, que demonstram a presença de jovens estrelas a distância maiores.

Com a finalidade de averiguarmos o comportamento de $\sigma_{[\text{Fe}/\text{H}]}$ nos planos XY , XZ e ZY , utilizou-se o método de reamostragem *bootstrap* para ambas amostras de tipo espectral. Após a aplicação dessa ferramenta estatística nos dados estelares, foi detectado que a tendência global de $\sigma_{[\text{Fe}/\text{H}]}$ da amostra original de tipo F é modificada no *bootstrap*, onde há um deslo-

camento de regiões de $\sigma_{[\text{Fe}/\text{H}]} > 0.2$ próximas ao centro para áreas mais distantes do Sol, salvo certos pontos, tais como entre 0 e 50 do eixo horizontal e -50 e 0 do eixo vertical, que mantiveram a mesma dispersão. Para a amostra do tipo G, a reamostragem intensificou ainda mais populações de diversas metalicidades em regiões mais distantes do Sol. Estas observações demonstram que as bordas dos planos são as regiões mais prováveis de efeitos de “aquecimento”, onde pode estar associado a contaminação pela massa ou outra propriedade, por exemplo, se parte das estrelas tem um ou mais planeta que pode afetar a metalicidade da estrela.

A relação idade-metalicidade-distância por fim foi analisada. Observamos que na região mais próxima, existe uma escassa população de jovens estrelas de tipo espectral F, com idades entre 1 e 3,9 giga-anos que manifestam uma sutil redução de $[\text{Fe}/\text{H}] \sim -0.03$ à 1.5 giga-anos para $[\text{Fe}/\text{H}] \sim -0.12$ à 3.5 giga-anos. Àquelas do tipo G, que contempla idades de 3 a 9,9 giga-anos, percebemos um decaimento efetivo da metalicidade com o aumento da idade, de $[\text{Fe}/\text{H}] \sim 0.14$ à $[\text{Fe}/\text{H}] \sim -0.27$. Ao confrontarmos as regiões intermediárias e mais distantes, vislumbramos a gradação da dispersão na $[\text{Fe}/\text{H}]$ especialmente em estrelas mais jovens (idades entre 1.5 e 3.5 giga-anos) de ambos os tipos espectrais. Apesar desses desvios, a relação idade-metalicidade é visível para os dois tipos, com diminuições na $[\text{Fe}/\text{H}]$ no mesmo intervalo etário estelar a maiores distâncias.

Em linhas conclusivas, observamos uma clara evidência de uma relação idade-metalicidade, tanto para estrelas mais brilhantes quanto para aquelas mais fracas. A dispersão de $[\text{Fe}/\text{H}]$ presente nessa relação, quando confrontada nos planos físicos intensifica a teoria do meio heterogêneo na vizinhança solar, incorporando a concepção de difusão orbital, fator que pode ser um dos mecanismos responsáveis pelo aparecimento da diminuição na metalicidade no mesmo intervalo etário de estrelas próximas a maiores distâncias.

No entanto no decorrer deste trabalho, pode-se observar algumas limitações que levam a lacunas para que pesquisas futuras sejam realizadas. Primeiramente, deve-se segregar a amostra estelar por populações do disco fino, grosso e halo, pois nessas regiões há diferenças na abundância química, fator que contribui para a análise da teoria da difusão orbital (ver Nidever, *et al.* [102], Masseron e Gilmore [103] e Mackereth, *et al.* [104]). Outro ponto a ser investigado é se a presença de sistemas planetários interfere no comportamento da relação idade-metalicidade para estrelas de alta e baixa massa, pois essa interferência ainda se faz inconclusiva na literatura (Haywood [105] e Maldonado *et al.* [106]). Por fim, sugerimos a criação de uma relação idade-metalicidade sintética em um modelo de evolução química, tal como o Chempy [107], controlando parâmetros como a função de massa inicial estelar, taxa de formação estelar e rendimentos de diferentes tipos de supernovas, com o intuito de restringir ao observado nos gráficos deste trabalho. Com essa ferramenta, será possível investigar quantas supernovas tipo I foram necessárias para que reproduzisse a dispersão observada nos planos

físicos e se de fato ocorreu uma difusão orbital no plano galáctico.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Elmegreen, D. M.. **Galaxies and galactic structure**. Prentice Hall Publishers, Upper Saddle River, 1998.
- [2] Combes, F., et al. **Galaxies and cosmology**. Springer Science & Business Media, 2004.
- [3] Belkora, Leila. **Minding the heavens: the story of our discovery of the Milky Way**. CRC Press, 2002.
- [4] Phillips, A. C. **The physics of stars**. John Wiley & Sons, 2013.
- [5] Englmaier, P.; Pohl, M.; Bissantz, N. **The Milky Way spiral arm pattern. 3D distribution of molecular gas**. Memorie della Societa Astronomica Italiana Supplementi 18, 199, 2011.
- [6] Carroll, B. W.; Dale A. O. **An introduction to modern astrophysics**. Cambridge University Press, 2017.
- [7] Zeilik, M. **Astronomy: the evolving universe**. Cambridge University Press, 2002.
- [8] Eggen, O. J.; Lynden-Bell, D.; Sandage, A. R. **Evidence from the motions of old stars that the Galaxy collapsed**. The Astrophysical Journal, 136, 748, 1962.
- [9] White, S. D.M.; Ress, M. J. **Core condensation in heavy halos: a two-stage theory for galaxy formation and clustering**. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 183.3: 341-358, 1978.
- [10] Combes, F.; Sanders, R. H. **Formation and properties of persisting stellar bars**. Astronomy and Astrophysics 96: 164-173, 1981.
- [11] Lee, Y. W. **Evidence for an old Galactic bulge from RR Lyrae stars in Baade's window-Implications for the formation of the Galaxy and the age of the universe**. The Astronomical Journal, 104, 1780-1789, 1992.
- [12] Ferreras, I.; Wyse, R. F.; Silk, J. **The formation history of the Galactic bulge**. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 345(4), 1381-1391, 2003.
- [13] Ramirez, I.; Prieto, C. A.; Lambert, D. L. **Oxygen abundances in nearby stars-Clues to the formation and evolution of the Galactic disk**. Astronomy & Astrophysics, 465(1), 271-289, 2007.
- [14] Gilmore, G.; Reid, N. **New light on faint stars-III. Galactic structure towards the South Pole and the Galactic thick disc**. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 202(4), 1025-1047, 1983.
- [15] Bland-Hawthorn, J.; Gerhard, O. **The galaxy in context: structural, kinematic, and integrated properties**. Annual Review of Astronomy and Astrophysics, 54, 529-596, 2016.
- [16] Jia, Y.; et. al. **Estimation of absolute magnitude-dependent Galactic model parameters in intermediate latitude with SDSS and SCUSS**. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 441(1), 503-512, 2014.

- [17] Lee, Y.; et al. **Formation and Evolution of the Disk System of the Milky Way:** $[\alpha/\text{Fe}]$ Ratios and Kinematics of the SEGUE G-dwarf Sample. *The Astrophysical Journal*, 738(2), 187, 2011.
- [18] Hayden, M. R.; et al. **Chemical cartography with APOGEE:** metallicity distribution functions and the chemical structure of the Milky Way disk. *The Astrophysical Journal*, 808(2), 132, 2015.
- [19] Yan, Y.; et al. **Chemical and Kinematic Properties of the Galactic Disk from the LAMOST and Gaia Sample Stars.** *The Astrophysical Journal*, 880(1), 36, 2019.
- [20] Carollo, D., et al. **Evidence for the Third Stellar Population in the Milky Way's Disk.** *The Astrophysical Journal* 887.1: 22, 2019.
- [21] Singh, D., et al. **An empirical metallicity tracer in CEMP and C-normal stars..** arXiv preprint arXiv:2001.02684, 2020.
- [22] Freeman, K. C. **The Galactic spheroid and old disk.** *Annual review of astronomy and astrophysics* 25.1: 603-632, 1987.
- [23] Abadi, M. G.; et al. **Simulations of galaxy formation in a Λ cold dark matter universe. II. The fine structure of simulated galactic disks.** *The Astrophysical Journal*, 597(1), 21, 2003.
- [24] Brook, C., et al. **Two disk components from a gas-rich disk-disk merger.** *The Astrophysical Journal* 658.1: 60, 2007.
- [25] Villalobos, Á.; Helmi, A. **Simulations of minor mergers—I. General properties of thick discs.** *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 391(4), 1806-1827, 2008.
- [26] Bournaud, F.; et al. **The thick disks of spiral galaxies as relics from gas-rich, turbulent, clumpy disks at high redshift.** *The Astrophysical Journal Letters*, 707(1), L1, 2009.
- [27] Roškar, R.; et al. **Radial migration in disc galaxies—I. Transient spiral structure and dynamics.** *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 426(3), 2089-2106, 2012.
- [28] Minchev, I.; et al. **Radial migration does little for Galactic disc thickening.** *Astronomy & Astrophysics* 548: A127, 2012.
- [29] Kawata, D.; et al. **Impacts of a flaring star-forming disc and stellar radial mixing on the vertical metallicity gradient.** *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 464(1), 702-712, 2017.
- [30] Nordström, B.; Mayor, M.; Andersen, J. **The Geneva-Copenhagen survey of the Solar neighbourhood—Ages, metallicities, and kinematic properties of $\sim 14\,000$ F and G dwarfs.** *Astronomy & Astrophysics*, 418(3), 989-1019, 2004.
- [31] Holmberg, J.; Nordström, B.; Andersen, J. **The Geneva-Copenhagen survey of the Solar neighbourhood II—new uvby calibrations and rediscussion of stellar ages, the G dwarf problem, age-metallicity diagram, and heating mechanisms of the disk.** *Astronomy & Astrophysics*, 475(2), 519-537, 2007.

- [32] Holmberg, J.; Nordström, B.; Andersen, J. **The Geneva-Copenhagen survey of the solar neighbourhood–III. Improved distances, ages, and kinematics.** *Astronomy & Astrophysics*, 501(3), 941-947, 2009.
- [33] Casagrande, L.; Schönrich, R.; Asplund, M.; Cassisi, S.; Ramirez, I.; Melendez, J.; Bensby, T.; Feltzing, S. **New constraints on the chemical evolution of the solar neighbourhood and Galactic disc (s)-Improved astrophysical parameters for the Geneva-Copenhagen Survey.** *Astronomy & Astrophysics* 530 (2011): A138, 2011.
- [34] Binney, J.; Tremaine, S. **Galactic dynamics.** Princeton university press, 2011.
- [35] Clayton, D. D. **Principles of stellar evolution and nucleosynthesis.** University of Chicago press, 1983.
- [36] Boesgaard, A. M.; Steigman, G. **Big Bang nucleosynthesis: Theories and observations.** *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 319-378, 1985.
- [37] Olive, K. A.; Steigman, G.; Walker, T. P. **Primordial nucleosynthesis: Theory and observations.** *Physics Reports*, 389-407, 2000.
- [38] Iliadis, C. **Nuclear physics of stars.** John Wiley & Sons, 2015.
- [39] Pagel, B. E. J. **Nucleosynthesis and Chemical Evolution of Galaxies.** Cambridge, University Press, 2009.
- [40] Woosley, S.; Janka, T. **The physics of core-collapse supernovae.** *Nature Physics*, 147-154, 2005.
- [41] Clifford, F. E.; Tayler, R. J. **The equilibrium distribution of nuclides in matter at high temperatures.** *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 1965.
- [42] Schramm, D. N.; Turner, M. S. **Big-bang nucleosynthesis enters the precision era.** *Reviews of Modern Physics*, 1998.
- [43] Burbidge, E. M.; Burbidge, G. R.; Fowler, W. A.; Hoyle, F. **Synthesis of the elements in stars.** *Reviews of modern physics*, 1957.
- [44] Salaris, M.; Santi C. **Evolution of stars and stellar populations.** Vol. 400. J. Wiley, 2005.
- [45] Kippenhahn, R.; Weigert A.; Weiss A. **Stellar structure and evolution.** Vol. 192. Berlin: Springer-Verlag, 1990.
- [46] Meyer, B. S. **Supernova nucleosynthesis.** In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 402, No. 1, pp. 155-178). American Institute of Physics, 1997.
- [47] Wallerstein, G.; et al. **Synthesis of the elements in stars: forty years of progress.** *Reviews of Modern Physics*, 1997.
- [48] Steigman, G.; Audouze, J.; Mathieu, N. (1985). **Nucleosynthesis and its implications on nuclear and particle physics.** *NATO ASI Series*, 163, 45, 1985.
- [49] Käppeler, F., et al. **The s process: Nuclear physics, stellar models, and observations.** *Reviews of Modern Physics*, 2011.

- [50] Burrows, A. **Supernova explosions in the universe**. *Nature*, 403(6771), 727-733, 2000.
- [51] Cowan, J. J.; Sneden C. **Heavy element synthesis in the oldest stars and the early Universe**. *Nature* 440.7088, 2006.
- [52] Matteucci, F. **The chemical evolution of the Galaxy**. Springer Science & Business Media, 2012.
- [53] Anders, E.; Grevesse, N. **Abundances of the elements: Meteoritic and solar**. *Geochimica et Cosmochimica acta*, 53(1), 197-214, 1989.
- [54] Grevesse, N.; Sauval, A. J. **Standard solar composition**. *Space Science Reviews*, 85(1-2), 161-174, 1998.
- [55] Di Mauro, M. P. **Helioseismology**. *Astrophys. Space Sci. Trans.*, 4, 13–17, 2008.
- [56] Lodders, K. **Solar system abundances and condensation temperatures of the elements**. *The Astrophysical Journal*, 591(2), 1220, 2003.
- [57] Grevesse, N.; Asplund, M.; Sauval, A. J. **The new solar chemical composition**. *EAS Publications Series*, 17, 21-30, 2005.
- [58] Grevesse, N.; Asplund, M.; Sauval, A. J. **The solar chemical composition**. *Space Science Reviews*, 130(1-4), 105-114, 2007.
- [59] Lodders, K.; Palme, H.; Gail, H. P. **Abundances of the elements in the Solar System**. In *Solar system* (pp. 712-770). Springer, Berlin, Heidelberg, 2009.
- [60] Asplund, M.; Grevesse, N.; Sauval, A. J.; Scott, P. **The chemical composition of the Sun**. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 47, 481-522, 2009.
- [61] von Steiger, R.; Zurbuchen, T. H. **Solar metallicity derived from in situ solar wind composition**. *The Astrophysical Journal*, 816(1), 13, 2015.
- [62] Twarog, B. A. **The chemical evolution of the solar neighborhood. II – The age-metallicity relation and the history of star formation in the galactic disk**. *The Astrophysical Journal*, 242-259, 1980.
- [63] Carlberg, R. G.; et al. **The age-velocity-dispersion relation in the solar neighborhood**. *The Astrophysical Journal*, 674-681, 1985.
- [64] Knude, J.; Winther, M.; Schnedler, N. H. **The planar age-velocity dispersion relation from a polar sample of F stars with solar composition**. *Astronomy and Astrophysics*, 179, 115-126, 1987.
- [65] Schuster, W. J.; Nissen, P. E. **Four-color uvby and H-beta photometry of high-velocity and metal-poor stars. I–The catalogue of observations**. *Astronomy and Astrophysics Supplement Series*, 73, 225-241, 1988.
- [66] Marsakov, V. A.; Shevelev, Y. G.; Suchkov, A. A. **F stars: Evidence for ‘two-dimensional’ age-metallicity relation and a new light on the enrichment history of the solar neighbourhood**. *Astrophysics and space science*, 172(1), 51-75, 1990.

- [67] Meusinger, H.; Reimann, H. G.; Stecklum, B. **The age-metallicity-velocity dispersion relation in the solar neighborhood and a simple evolution model.** *Astronomy and Astrophysics*, 245, 57-74, 1991.
- [68] Edvardsson, B.; Andersen, J.; Gustafsson, B.; Lambert, D. L.; Nissen, P. E.; Tomkin, J. **The chemical evolution of the galactic disk-part one-analysis and results.** *Astronomy and Astrophysics*, 275, 101, 1993.
- [69] Ng, Y. K.; Bertelli, G. **Revised ages for the stars in the solar neighbourhood.** arXiv preprint astro-ph/9707043, 1997.
- [70] Feltzing, S.; Holmberg, J.; Hurley, J. R. **The solar neighbourhood age-metallicity relation-Does it exist?.** *Astronomy & Astrophysics*, 377(3), 911-924, 2001.
- [71] Bensby, T.; Feltzing, S.; Lundström, I. **A possible age-metallicity relation in the Galactic thick disk?.** *Astronomy & Astrophysics*, 421(3), 969-976, 2004.
- [72] Haywood, M. **Revisiting two local constraints of the Galactic chemical evolution.** *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 371(4), 1760-1776, 2006.
- [73] Soubiran, C.; Bienaymé, O.; Mishenina, T. V.; Kovtyukh, V. V. **Vertical distribution of Galactic disk stars-IV. AMR and AVR from clump giants.** *Astronomy & Astrophysics*, 480(1), 91-101, 2008.
- [74] Ted Mackereth, J., et al. **The age-metallicity structure of the Milky Way disc using APOGEE.** *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 471.3, 2017.
- [75] Wojno, J.; Kordopatis, G.; Steinmetz, M.; McMillan, P. J.; RAVE collaboration. **The age-metallicity relation with RAVE and TGAS.** *Proceedings of the International Astronomical Union*, 12(S330), 279-280, 2017.
- [76] Döner, S.; Ak, S.; Bilir, S. **Age-metallicity relation in solar vicinity from RGB stars.** In *AIP Conference Proceedings (Vol. 2178, No. 1, p. 030021)*. AIP Publishing LLC, 2019.
- [77] Rebassa-Mansergas, A.; Anguiano, B.; García-Berro, E.; Freeman, K. C.; Cojocaru, R. **The age-metallicity relation in the solar neighbourhood from a pilot sample of white dwarf-main sequence binaries.** *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 463(2), 1137-1143, 2016.
- [78] Garnett, D. R.; Kobulnicky, H. A. **Distance dependence in the solar neighborhood age-metallicity relation.** *The Astrophysical Journal*, 532(2), 1192, 2000.
- [79] Blackwell, D. E.; Petford, A. D.; Shallis, M. J. **Use of the infra-red flux method for determining stellar effective temperatures and angular diameters-The stellar temperature scale.** *Astronomy & Astrophysics*, 82, 249-252, 1980.
- [80] Jørgensen, B. R.; Lindegren, L. **Determination of stellar ages from isochrones: Bayesian estimation versus isochrone fitting.** *Astronomy & Astrophysics*, 436(1), 127-143, 2005.
- [81] Burnett, B.; Binney, J. **Stellar distances from spectroscopic observations: a new technique.** *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 407(1), 339-354, 2010.

- [82] Schuster, W. J.; Nissen, P. E. **Uvby-beta photometry of high-velocity and metal-poor stars. II-Intrinsic color and metallicity calibrations.** *Astronomy and Astrophysics*, 221, 65-77, 1989.
- [83] Flynn, C.; Morell, O. **Metallicities and kinematics of G and K dwarfs.** *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 286(3), 617-625, 1997.
- [84] Tomkin, J.; Lambert, D. L. **Rubidium in metal-deficient disk and halo stars.** *The Astrophysical Journal*, 523(1), 234, 1999.
- [85] Thorén, P.; Feltzing, S. **Chemical abundances in cool metal rich disk dwarf stars.** arXiv preprint astro-ph/0010067, 2000.
- [86] Santos, N. C.; Israelian, G.; Mayor, M. **The metal-rich nature of stars with planets.** *Astronomy & Astrophysics*, 373(3), 1019-1031, 2001.
- [87] Perryman, M.; et al. **The HIPPARCOS catalogue**, 1997.
- [88] Høg, E.; Fabricius, C.; Makarov, V. V.; et al. **Construction and verification of the Tycho-2 Catalogue.** *Astronomy and Astrophysics*, 357, 367-386, 2000.
- [89] Crawford, D. L. **Empirical calibration of the uvby, beta systems. I. The F-type stars.** *The Astronomical Journal*, 80, 955-971, 1975.
- [90] Olsen, E. H. **Preliminary UVBY calibrations for G and K type dwarf stars.** *Astronomy and Astrophysics Supplement Series*, 57, 443-466, 1984.
- [91] Van Leeuwen, F. **Validation of the new Hipparcos reduction.** *Astronomy & Astrophysics*, 474(2), 653-664, 2007.
- [92] Vallado, D. A. **Fundamentals of astrodynamics and applications.** Vol. 12, Springer Science & Business Media, 2001.
- [93] Sanders, J. **Dynamics of the Milky Way: Tidal Streams and Extended Distribution Functions for the Galactic Disc.** Springer, 2015.
- [94] Sharma, Sanjib, et al. **Galaxia: A code to generate a synthetic survey of the Milky Way.** *The Astrophysical Journal* 730.1: 3, 2011.
- [95] Marsakov, V. A., et al. **The age-metallicity relation in the thin disk of the galaxy.** *Astronomy reports* 55.8: 667, 2011.
- [96] Rocha-Pinto, H. J., et al. **Chemical enrichment and star formation in the Milky Way disk; I. Sample description and chromospheric age-metallicity relation.** arXiv preprint astro-ph/000138, 2000.
- [97] Pont, F.; Eyer L. **Isochrone ages for field dwarfs: method and application to the age-metallicity relation.** *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 351.2: 487-504, 2004.
- [98] Chihara, L.; Hesterberg, T. **Mathematical statistics with resampling and R.** 2^a Edition, Hoboken, NJ: Wiley, 2018.

- [99] Silva, J. R. P.; Soares, B. B.; De Freitas, D. B. **Chandrasekhar's relation and stellar rotation in the Kepler field.** The Astrophysical Journal, 796(1), 69, 2014.
- [100] Pilyugin, L. S.; Edmunds M. G. **Chemical evolution of the Milky Way Galaxy. II. On the origin of scatter in the age-metallicity relation.** Astronomy and Astrophysics 313: 792-802, 1996.
- [101] François, P.; Matteucci F. **On the abundance spread in solar neighbourhood stars.** Astronomy and Astrophysics 280: 136-140, 1993.
- [102] Nidever, D. L., et al. **Tracing chemical evolution over the extent of the Milky Way's Disk with APOGEE Red Clump Stars.** The Astrophysical Journal 796.1: 38, 2014.
- [103] Masseron, T.; Gilmore G. **Carbon, nitrogen and α -element abundances determine the formation sequence of the Galactic thick and thin discs.** Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 453.2: 1855-1866, 2015.
- [104] Mackereth, J. T., et al. **Dynamical heating across the Milky Way disc using APOGEE and Gaia.** Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 489.1: 176-195, 2019.
- [105] Haywood, M. **On the correlation between metallicity and the presence of giant planets.** The Astrophysical Journal Letters 698.1: L1, 2009.
- [106] Maldonado, J.; Villaver E.; Eiroa C. **The metallicity signature of evolved stars with planets.** Astronomy & Astrophysics 554: A84, 2013.
- [107] Rybizki, Jan; Just, Andreas; Rix, Hans-Walter. **Chempy: A flexible chemical evolution model for abundance fitting-Do the Sun's abundances alone constrain chemical evolution models?.** Astronomy & Astrophysics, v. 605, p. A59, 2017.
- [108] Efron, B. **Bootstrap Methods: Another Look at the Jackknife.** The Annals of Statistics, 7, 1-26, 1979.
- [109] Efron, B. **Better bootstrap confidence intervals.** Journal of the American statistical Association 82.397: 171-185, 1987.
- [110] Efron, B.; Tibshirani, R. J. **An introduction to the bootstrap.** CRC press, 1994.
- [111] Manly, B. F. J. **Randomization, bootstrap and Monte Carlo methods in biology.** 3^a Edition, Chapman and Hall/CRC, 2006.
- [112] Chernick, M. R. **Bootstrap methods: A guide for practitioners and researchers.** Vol. 619. John Wiley & Sons, 2011.
- [113] Martinez, W. L.; Martinez, A. R. **Computational statistics handbook with MATLAB.** Vol. 22. CRC press, 2007.
- [114] Angus, J. E. **A note on the central limit theorem for the bootstrap mean.** Communications in Statistics-Theory and Methods, 18(5), 1979-1982, 1989.

APÊNDICE A – EXTRATO DA AMOSTRA FINAL

Os extratos da amostra final proveniente dos dados fornecidos pelo catálogo *Genebra-Copenhagen survey* [32] segregados por tipo espectral e filtrados de acordo com os critérios narrados na seção 3.2, podem ser apreciados nesse apêndice. A visualização completa dessa amostra está disponível no *link* do Google.doc: [〈https://bit.ly/3ci1gHS〉](https://bit.ly/3ci1gHS).

Viabilizamos os dados de 10 estrelas selecionadas do tipo F e do tipo G da nossa amostra, contendo parâmetros como o nome, idade (em giga-anos), o limite superior ($\sigma_{\text{idade}}^{\text{superior}}$) e inferior ($\sigma_{\text{idade}}^{\text{inferior}}$) da idade, metalicidade [Fe/H], distância (em pc), longitude e latitude galáctica que foram retiradas do catálogo do Casagrande *et al.* [33], as coordenadas cartesianas galácticas X, Y, Z^1 (em pc), magnitude absoluta M_v e por último, a temperatura efetiva T_{eff} em Kelvin (K).

Tabela 2: Extrato da amostra final contendo apenas estrelas do tipo F

Nome	Idade giga-anos	$\sigma_{\text{idade}}^{\text{inferior}}$ giga-anos	$\sigma_{\text{idade}}^{\text{superior}}$ giga-anos	[Fe/H] dex	Distância pc	Longitude graus	Latitude graus	X pc	Y pc	Z pc	M_v mag	T_{eff} K
HD 1000	2.9	2.7	3.1	-0.15	55	65.99	-79.67	4.01	9.01	-54.11	3.18	6237.348
HD 100066	1.8	1.6	2.0	-0.06	113	179.81	70.71	-37.33	0.12	106.66	2.73	6622.165
HD 100081	2.7	2.4	2.9	-0.08	114	297.1	-11.43	50.9	-99.47	-22.59	3.10	6251.727
HD 100255	2.4	1.9	2.7	-0.14	77	202.03	72.49	-21.48	-8.69	73.43	3.37	6441.693
HD 100372	2.9	2.7	3.3	-0.09	95	188.62	72.08	-28.9	-4.38	90.39	3.12	6123.504
HD 10039	2.9	2.7	3.2	-0.22	87	283.18	-67.05	7.73	-33.03	-80.11	3.20	6280.584
HD 1004	2.8	2.3	3.1	-0.15	45	314.02	-61.25	15.04	-15.56	-39.45	3.39	6353.309
HD 100446	6.2	5.3	7.0	-0.48	44	135.38	49.98	-20.14	19.87	33.70	4.10	6025.596
HD 100551	5.7	4.8	6.6	-0.51	92	275.38	45.84	6.01	-63.81	66.00	3.53	6109.42
HD 100604	1.8	1.7	1.9	-0.16	114	283.03	31.59	21.89	-94.61	59.72	2.41	6652.732

Tabela 3: Extrato da amostra final contendo apenas estrelas do tipo G

Nome	Idade giga-anos	$\sigma_{\text{idade}}^{\text{inferior}}$ giga-anos	$\sigma_{\text{idade}}^{\text{superior}}$ giga-anos	[Fe/H] dex	Distância pc	Longitude graus	Latitude graus	X pc	Y pc	Z pc	M_v mag	T_{eff} K
HD 100014	3.2	3.0	3.4	0.20	77	291.43	5.78	27.99	-71.31	7.75	3.40	5915.616
HD 100069	6.9	6.0	7.9	-0.06	75	251.83	64.18	-10.19	-31.04	67.51	3.60	5714.786
HD 10037	6.2	5.2	7.3	-0.35	119	206.97	-79.53	-19.27	-9.81	-117.02	3.61	5997.911
HD 100667	9.6	8.5	10.8	-0.15	67	145.73	60.06	-27.63	18.83	58.06	3.91	5623.413
HD 100796	5.9	5.0	6.8	-0.08	90	196.16	73.15	-25.06	-7.26	86.14	3.63	5915.616
HD 100850	9.9	8.7	11.1	-0.09	61	286.65	23.42	16.04	-53.63	24.25	4.09	5675.446
HD 101117	6.7	5.8	7.7	0.07	62	291.83	8.39	22.81	-56.94	9.05	3.91	5794.287
HD 101348	4.4	3.9	5.0	0.09	81	286.75	25.37	21.09	-70.08	34.71	3.26	5495.409
HD 102089	8.6	7.5	9.9	-0.18	102	298.08	-11.07	47.12	-88.32	-19.58	3.85	5741.165
HD 102161	7.5	6.5	8.6	-0.06	85	217.0	75.08	-17.48	-13.17	82.13	3.75	5741.165

¹Para obter esses valores, é necessário converter graus da latitude e longitude galáctica em radianos antes de computar as eqs.(2.4).

APÊNDICE B – REAMOSTRAGEM *BOOTSTRAP*

O método *Bootstrap* foi introduzido pela primeira vez em 1979 por Efron [108] (ver também [109]) e baseia-se na técnica de *reamostrar* diversas vezes a amostra original com o intuito de criar réplicas e inferir, a partir destas, estimativas das quantidades estatísticas de relevância. Assim, neste apêndice, iremos discutir brevemente sobre o método *Bootstrap* e como ele pode estabelecer soluções de inferência estatística em relação à estimativa de bias nos parâmetros. Para mais informações acerca desse método e outros de reamostragem, ver Efron e Tibshirani [110], Manly [111] e Chernick [112].

Breve descrição do método

Considere uma amostra de n dados independentes,

$$\mathbf{x} = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}, \quad (\text{B.1})$$

que retém de uma função de distribuição F desconhecida. O princípio da reamostragem *Bootstrap* consiste em coletar uma sequência de amostras aleatórias de tamanho n , *com substituição*, a partir dos dados (B.1) [110, 113]. Esse conjunto de dados reamostrados é designado por,

$$\mathbf{x}^* = (x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*), \quad (\text{B.2})$$

e podem conter, a partir da amostra original (B.1), alguns dados repetidos, como por exemplo,

$$\mathbf{x} = \{x_1, x_2, x_3\} \begin{cases} \rightarrow \mathbf{x}^{*(1)} = \{x_1, x_1, x_3\} \\ \rightarrow \mathbf{x}^{*(2)} = \{x_2, x_3, x_2\}. \end{cases}$$

Nesse exemplo expressamos o sobrescrito, $b = 1, 2, \dots, B$, como sendo o número para o b -ésimo conjunto de dados B vezes reamostrados, com cada um de tamanho n .

Ademais, o estimador de um determinado parâmetro estatístico (por exemplo, a média) a partir da amostra original \mathbf{x} , pode ser escrito como,

$$\hat{\theta} = f(x_1, x_2, \dots, x_n) = f(\mathbf{x}).$$

Para cada conjunto obtido por reamostragem, podemos traçar a mesma estatística da seguinte maneira,

$$\hat{\theta}^{*(b)} = f(\mathbf{x}^{*(b)}) \quad (b = 1, \dots, B).$$

Tais resultados obtidos por essa estatística dos B conjuntos de dados reamostrados, nos propicia, portanto, uma estimativa da distribuição de $\hat{\theta}$ da amostra original. Essa hipótese se faz consoante ao *teorema do limite central do Bootstrap* que nos informa que a medida que amplificamos o número de B , a média de \mathbf{x} se aproxima de uma distribuição normal (ver prova em [114]).