

**ESTUDO ESPECTROSCÓPICO EM ALTA RESOLUÇÃO DAS  
GIGANTES VERMELHAS DO AGLOMERADO ABERTO NGC 4349**

**VLADÍMIR JEARIM PEÑA-SUÁREZ**

**MINISTÉRIO DE CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÃO E  
COMUNICAÇÕES  
OBSERVATÓRIO NACIONAL  
PROGRAMA DE POSGRADUAÇÃO EM ASTRONOMIA  
2017**



**ESTUDO ESPECTROSCÓPICO EM ALTA RESOLUÇÃO DAS  
GIGANTES VERMELHAS NO AGLOMERADO ABERTO NGC 4349**

Tese para obter a titulação de Doutor em Astronomia apresentada por:

**VLADÍMIR JEARIM PEÑA-SUÁREZ**

Orientador:

**Dr. CLAUDIO BASTOS PEREIRA**


**MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÃO E  
COMUNICAÇÕES  
OBSERVATÓRIO NACIONAL  
PROGRAMA DE POSGRADUAÇÃO EM ASTRONOMIA  
2017**

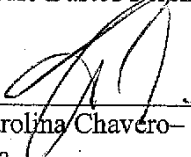
"ESTUDO ESPECTROSCÓPICO EM ALTA RESOLUÇÃO DAS  
GIGANTES VERMELHAS NO AGLOMERADO ABERTO NGC 4349".


VLADÍMIR JEARIM PEÑA SUÁREZ

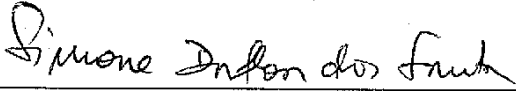
TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-  
GRADUAÇÃO EM ASTRONOMIA DO OBSERVATÓRIO NACIONAL COMO  
PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE  
DOUTOR EM ASTRONOMIA.

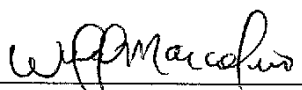
Aprovada por:

  
Dr. Claudio Bastos Pereira – ON/MCTIC (Orientador)

  
Dra. Carolina Chavero – Observatório Astronômico de  
Cordoba

  
Dra. Natália Drake – ON/MCTIC

  
Dra. Simone Daflon dos Santos- ON/MCTIC

  
Dr. Wagner Marcolino – OV/UFRJ

RIO DE JANEIRO – BRASIL

10 DE AGOSTO DE 2017

*"Atlantis o tésis?"*

*(Fufu Pequeno. Frases da mesa de jantar)*

\* \* \*

*"...O senhor doutor é um sábio, Meu caro amigo, não exagere, Quer ver as últimas provas, Não vale a pena, as correções de autor estão feitas, o resto é a rotina da revisão final, fica nas suas mãos,... Então o senhor doutor acha que a história é a vida real, Acho sim, Que a história foi a vida real, quero dizer, Não tenha a menor dúvida, Que seria de nós se não existisse o deletur, suspirou o revisor."*

*(José Saramago. "História do cerco de Lisboa")*

\* \* \*

*"..., Fiera brava, ven, ven a comerme, fiero brava ven,...*  
*ven a llevarme, fiero brava ven, ven a acabarme...*  
*Ven y ven y ven..."*

*(Arsénio Rodríguez. "No quiero". Son cubano)*

## AGRADECIMENTOS

*Cadeira vermelha ou cadeira capenga, qualquer superfície plana é a pista da corrida, essa monótona dança sobre as letras e os números, buscando um sentido ou pelo menos um bon senso. Longas colunas e filas extenuantes atizam um silencioso chamado e começam a aparecer entidades... Aparece ela, que se doi, ri e supera a dor, convencida de que de qualquer canto sai correndo um rato. Aparece ele, seu sorriso que ilumina qualquer escuridão, seu brilho de estrela que sempre vence as trevas. Desfila também ela, sua serenidade e suas dores, sua infinita generosidade e sua curiosidade longeva e silenciosa... Teria sido mais difícil esta viagem sem o amor da minha mãe, do Fufu Pequeno e da minha avó.*

*Em qualquer corredor e qualquer travessa, os anjos que a gente escolhe, acreditando em anjos ou não, porque o melhor acontece quando não esperamos que o bom tenha lugar. Meu irmãozinho Dieguips, sempre com a paciência necessária para não desistir de mim; Rodrigo, meu primeiro amigo na pátria mãe gentil... Meus queridos amigos que são exemplo da beleza do acaso, Ricardo, Carolina, Natália, Josina, Kátia, Carlips, João Vitor, Nancy María, Alberto, Andrea, Wilmer, Orlando, Suze, Denise, Lina, Danith e aqueles que vêm e vêm entre tanta crise e tanto riso sarador. Tem planetário esta semana, de novo verei meus coleguinhas do Caravana da Ciência...*

*Aparecem na bruma dessa procrastinação carinhosa meus Maestros eternos, como Bernardo, Vladimir, Ilya, Ramiro, Natália... Meus outros profes queridos daqui e de lá. Ouço as vozes dos meus coleguinhas do ON: Sandro, Ximena, Filipe, Flora, Eduardo, Plúcida, Cintia, Carmen, Mário... abro o "feisibuqui" e vejo as*

---

*postagens dos meus queridos amigos e colegas do Valongo, dos meus queridos ex-estudantes do colégio de La Cumbre, de La UIS, da UFRJ... Vibra o telefone, é meu pai com aquelas-suas-piadas, lembro que tenho tão esquecida minha gente de Guayaquil e o sabor do ceviche.*

*Preciso ouvir algo para ficar mais a vontade, focar mais no trabalho... Audios de chuva, mar ou cachoeiras, Coltrane, Buena Vista Social Club, Angel Canales, Thelonius Monk, Smetana, Herencia de Timbiquí, Petrona Martínez, Camaron de la Isla, Villa-Lobos, Susana Baca, Martha Gómez, Pelaez & Gardeazabal, a Pérola Negra, Adriana Varela, Earth, Wind & Fire, System of a Down, Mongo Santamaria... sei não, viu... Tanta música tão necessária para não se sentir sozinho quando se está a sós, e tão pouco tempo para ouvi-la. Fazer o que.*

*Entra o Cláudio para me lembrar que tem muito para fazer e pouco tempo e com ele vem Simone. Só posso me sentir feliz por tantas coisas e continuar semeando palavras sinceras para sempre recolher belas flores e saborosos frutos.*

# Sumário

<b>Resumo</b>	<b>xix</b>
<b>Abstract</b>	<b>xxi</b>
<b>1 INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
1.1 Aglomerados abertos: linhas de tempo da evolução do disco galáctico . . . . .	1
1.2 Motivação desta tese . . . . .	12
<b>2 FOTOMETRIA E PARÂMETROS ATMOSFÉRICOS DAS GIGANTES VERMELHAS DE NGC 4349</b>	<b>16</b>
2.1 Espectros da amostra . . . . .	23
2.2 Determinação dos parâmetros atmosféricos estelares . . . . .	24
2.3 Equilíbrio de ionização entre Fe I e Fe II . . . . .	26
2.4 Comparação dos valores obtidos dos parâmetros com a literatura . . . . .	29

2.5	Gravidade superficial espectroscópica <i>versus</i> Gravidade evolutiva . . . . .	37
<b>3</b>	<b>ANÁLISE E DISCUSSÃO SOBRE AS ABUNDÂNCIAS QUÍMICAS</b>	
	<b>DAS ESTRELAS DE NGC 4349</b>	<b>42</b>
3.1	Metalicidade e sistemas planetários de gigantes vermelhas . . . . .	43
3.2	Velocidade rotacional . . . . .	47
3.3	Elementos leves . . . . .	52
3.3.1	Lítio . . . . .	53
3.3.2	Carbono, Nitrogênio e Oxigênio . . . . .	55
3.3.3	Razão isotópica $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ e razões $[\text{N}/\text{C}]$ , $\text{C}/\text{N}$ e $\text{C}/\text{O}$ . . . . .	61
3.4	Elementos refratários: do sódio até o níquel . . . . .	69
3.4.1	Sódio e alumínio . . . . .	69
3.4.2	Magnésio e silício . . . . .	79
3.4.3	Do cálcio até o níquel . . . . .	82
3.4.4	A dependência das abundâncias de elementos com a temperatura de condensação $T_c$ . . . . .	84
3.5	Elementos do processo-s: Y, Zr, La, Ce e Nd . . . . .	87
3.6	Incertezas nas abundâncias . . . . .	97



---

<b>4 CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS</b>	<b>100</b>
4.1 Conclusões . . . . .	100
4.2 Perspectivas . . . . .	105
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>107</b>
<b>APÊNDICE</b>	<b>122</b>
4.3 Parâmetros atômicos das linhas estudadas . . . . .	122
4.4 Artigo aceito: “High resolution spectroscopic observations of single red giants in three open clusters : NGC 2360, NGC 3680 and NGC 5822” .	130

# LISTA DE FIGURAS

1.1	Representação da Vía Láctea, ilustrando alguns dos elementos das suas componentes estruturais, como os aglomerados globulares do halo e do bojo e os aglomerados abertos do disco galáctico. Os raios galactocêntricos $R_g$ se encontram medidos em anos-luz ( $R_{g\odot} = 8.5$ kpc). . . . .	2
1.2	Gradientes de abundância dos elementos- $\alpha$ ao longo do disco fino da Galáxia. As tendências previstas por Cescutti et al. (2007) para os elementos são comparadas com diferentes conjuntos de dados. Os círculos vazios pequenos são as cefeidas de Andrievsky et al. (2002a,b,c;2004) e Luck et al. (2003). Os triângulos cheios são as estrelas OB de Daflon & Cunha (2004), os quadrados vazios são as gigantes vermelhas de Carney et al. (2005), os hexágonos são as cefeidas de Yong et al. (2006), os triângulos vazios são os aglomerados abertos de Yong et al. (2005) e os quadrados cheios os aglomerados abertos de Carraro et al. (2004). As linhas contínuas finas representam as previsões para o tempo atual normalizadas com o valor médio para as cefeidas a 8 kpc; as linhas tracejadas, as previsões para a época em que se formou o sistema solar, normalizadas de acordo com Asplund et al. (2005). As previsões devem ser comparadas com as gigantes vermelhas e os aglomerados abertos incluídos no gráfico. Figura tomada de Matteucci (2012) . . . . .	4

- 1.3 Região  $\lambda 6125\text{--}6145\text{\AA}$  do espectro da gigante vermelha NGC 4349-5. Em azul são mostradas as linhas de titânio ( $\lambda 6126.22\text{\AA}$ ), zircônio ( $\lambda 6127.46$ ,  $6134.57$ ,  $6140.46$  e  $6143.18\text{\AA}$ ), níquel ( $\lambda 6128.98$ ,  $6134.57$  e  $6130.14\text{\AA}$ ), silício ( $\lambda 6126.22\text{\AA}$ ) e ferro ( $\lambda 6136.61$  e  $6137.69\text{\AA}$ ). . . . . 5
- 1.4 Evolução das razões  $[Ba/Fe]$  (painel esquerdo) e  $[Eu/Fe]$  (painel direito) versus  $[Fe/H]$  com os modelos de evolução química de Cescutti et al. (2006). As barras nas abundâncias medidas representam a dispersão dos valores respeito à média representada (François et al. 2007). Figura tomada de Matteucci (2012). . . . . 7
- 1.5  $A(Li)$  em função da magnitude  $V$  para três diferentes aglomerados abertos velhos. Os círculos e triângulos azuis representam as estrelas analisadas em NGC 3680 e NGC 752, respectivamente. Os símbolos vermelhos, as correspondentes a IC 4651. A linha continua é o ajuste da mesma relação obtida para os aglomerados das Hyades e Praesepe. Figura tomada de Anthony Twarog et al. (2009) . . . . . 9
- 1.6 Composição química de uma estrela de massa intermediária ( $4M_{\odot}$ ) no turn-off, calculada sem considerar a rotação (painel superior) e com uma velocidade de rotação inicial  $v_{ZAMS} = 300 \text{ km s}^{-1}$  (painel inferior). As frações de massa são multiplicadas por 600 no caso do  ${}^3\text{He}$ , por 100 no  ${}^{12}\text{C}$  e no  ${}^{14}\text{N}$ , por 2500 no  ${}^{13}\text{C}$ , por 50, 5000 e  $6 \times 10^4$  para o  ${}^{16}\text{O}$ ,  ${}^{17}\text{O}$  e  ${}^{18}\text{O}$ , respectivamente. Por fim, no caso do  ${}^{23}\text{Na}$  multiplica-se por 1500. A seta vertical indica em ambos casos a máxima profundidade atingida pela envoltória convectiva na sua máxima extensão, durante a primeira dragagem. A figura foi tomada de Charbonnel & Lagarde (2010). . . . . 11
- 2.1 Diagrama cor-magnitude do aglomerado aberto NGC 4349, de acordo com as correções de Majaess et al. (2012) da fotometria de Lohmann (1961). Os quadrados em laranja são as gigantes vermelhas do aglomerado . . . . . 22

- 2.2 Espectros em alta resolução normalizados na região  $\lambda 5193\text{-}5207 \text{ \AA}$  para as estrelas binárias NGC 4349-79, 168 e 203 da amostra analisada. São mostradas linhas de níquel, ferro e ítrio. . . . . 25
- 2.3 Inclinação do gráfico entre abundância de Fe I vs. potencial de excitação das linhas medidas ( $\alpha_1$ ) versus a inclinação do gráfico de Fe I vs. largura equivalente reduzida  $W_\lambda/\lambda$ , ( $\alpha_2$ ) para a estrela NGC 4349-5. As linhas marrom, turquesa e púrpura correspondem às correlações geradas usando as temperaturas  $T_{ef} = 4900, 5000$  e  $5100 \text{ K}$ , respectivamente. Os pontos indicados com  $\xi_i$  correspondem, aos valores de microturbulência  $\xi = 1.6, 1.5$  e  $1.4 \text{ km s}^{-1}$ . O ponto preto indica o zero do gráfico. Os valores obtidos foram  $\alpha_1 = -0.008$  e  $\alpha_2 = 0.001$ , correspondentes a  $T_{ef} = 5000 \text{ K}$  e  $\xi = 1.5 \text{ km s}^{-1}$  . . . . . 28
- 2.4 Isócrona adotada do PARSEC (Marigo et al. (2017) para o aglomerado NGC 4349 em função da metalicidade média derivada das gigantes vermelhas para uma distância  $d = 1.63 \text{ kpc}$ ,  $idade = 0.35 \text{ Gano}$  e a extinção visual  $A_V = 0.99$ . Os quadrados cheios em laranja representam as gigantes vermelhas do aglomerado. As estrelas anãs do diagrama foram tiradas de Lohmann (1961) e corregidas de acordo a Majaess et al. (2012) . . . . . 38
- 2.5 Gráfico  $\log g$  versus  $T_{ef}$  da comparação dos valores de gravidade superficial espectroscópica e evolutiva com os correspondentes à isócrona adotada (curva verde) de PARSEC (Marigo et al. 2017). Os quadrados cheios em laranja representam os valores espectroscópicos e os quadrados vazios os valores evolutivos. . . . . 39

- 3.1 Distribuição de metalicidade das gigantes vermelhas e subgigantes analisadas por Ghezzi et al. (2010). No painel superior, a comparação exclusivamente entre as estrelas hospedeiras analisadas pelos autores. O histograma em vermelho corresponde às gigantes hospedeiras e o que está em preto às subgigantes. No painel inferior, a comparação incluindo as gigantes hospedeiras de outros estudos até a época. O histograma azul representa a amostra de gigantes hospedeiras ampliada. . . . . 46
- 3.2 Velocidade rotacional projetada  $v \sin i$  como função da temperatura efetiva. As cruzes pretas representam as estrelas estudadas por Carlberg et al. (2011). Os quadrados cheios azuis, as gigantes vermelhas com  $M > 2.5M_{\odot}$  dos aglomerados NGC 3114, IC 2714, NGC 2539, NGC 2360 e NGC 6633. Os quadrados vazios azuis, as estrelas com  $M < 2.5M_{\odot}$  dos aglomerados IC 4756, NGC 2423, IC 4651 e NGC 2682, do estudo de DM2016 e dos aglomerados NGC 3680 e NGC 5822 estudados por Santrich et al. (2013), DM2016 e Peña Suárez et al. (2017). Os quadrados cheios em laranja representam as gigantes vermelhas do aglomerado NGC 4349. . . . . 50
- 3.3 Comparação dos espectros normalizados das estrelas NGC 4349-9 ( $v \sin i = 9.2 \text{ km s}^{-1}$ ), 53 ( $v \sin i = 3.2 \text{ km s}^{-1}$ ) e 127 ( $v \sin i = 5.80 \text{ km s}^{-1}$ ) (figura da esquerda) com os espectros de algumas das estrelas analisadas por Santrich et al. (2013), cujas velocidades, na ordem descendente da figura são  $v \sin i = 4.5, 8.0, 11.0$  e  $15 \text{ km s}^{-1}$  (figura da direita). . . . . 51
- 3.4 Espectro observado da estrela NGC 4349-203 na região próxima da linha proibida de oxigênio  $\lambda 6300 \text{ \AA}$  (curva laranja), comparado com o espectro de uma estrela quente (curva verde), que mostra as linhas de contaminação telúrica. . . . . 57

- 3.5 Espectro observado da estrela NGC 4349-174 na região  $\lambda 8003 \text{ \AA}$ , que contém uma banda molecular de CN (pontos laranja), e quatro espectros sintéticos para estimar a abundância de nitrogênio, com  $[N/H] = 0.00, 0.05, 0.10$  e  $0.15$  (curvas azul, verde, turquesa e amarelo). . . . . 58
- 3.6 Razões de abundância  $[X/Fe]$  versus  $[Fe/H]$ . As gigantes vermelhas de NGC 4349 estão representadas pelos quadrados laranja. As médias dos aglomerados com idade inferior a 2 Gano e  $M_{TO}$  entre  $1.5$  e  $5.0 M_{\odot}$  são os quadrados magenta. As abundâncias das gigantes de campo analisadas por Mishenina et al. (2006) e Luck & Heiter (2007) são as cruzeiras azuis. Aglomerados incluídos: NGC 7789 (Tautvaišiene et al. 2005); IC 4756, NGC 3532, NGC 6281 e NGC 6633 (Smiljanic et al. 2009); NGC 6134 (Mikolaitis et al. 2010); IC 4651 e NGC 2506 (Mikolaitis et al. 2011a, b); NGC 3114 (Santrich et al. 2013); NGC 5316 (Drazdauskas et al. 2016); NGC 6940 e Hyades (Bocek Topcu et al. 2016); NGC 2360, NGC 3680 e NGC 5822 (Peña Suárez et al. 2017, aceito) . . . . . 59
- 3.7  $A(Li)$  versus a razão isotópica  $^{12}C/^{13}C$  da amostra de gigantes analisadas por Carlberg et al. (2016). Os círculos cheios representam as hospedeiras NGC 2423-3, NGC 4349-127 e BD+12 1917 (M67) . . . . . 63

- 3.8 Razões médias  $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$  e  $C/N$  em função da massa do turn-off ( $M_{TO}$ ) -painéis (a) e (b)- das gigantes vermelhas de aglomerados abertos. O quadrado laranja representa o valor das gigantes de NGC 4349. Os quadrados verdes menores são dos aglomerados com  $M_{TO} < 2.5M_{\odot}$  e os maiores, dos aglomerados com  $M_{TO}$  entre 2.5 e  $5M_{TO}$ . A amostra de aglomerados da literatura é mesma da figura 3.6. As linhas em preto e azul são os modelos de Charbonnel & Lagarde (2010) e Lagarde et al (2012) das razões  $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$  e  $C/N$  para estrelas na primeira dragagem. As linhas contínuas, o modelo padrão da mistura. As linhas tracejadas, preta quando é considerada a mistura termohalina e azul quando são incluídos os efeitos termohalino e rotacional de mistura, respectivamente. . . . . 65
- 3.9 Observações de  $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$  em função da razão  $[N/C]$ . Os ícones verdes, azuis e vermelhos representam as estrelas do ramo gigante, do topo do ramo gigantes e do clump de vários aglomerados abertos da literatura. Os ícones laranja, as gigantes de NGC 4349. Os modelos teóricos de Charbonnel & Lagarde (2010) correspondem às previsões para estrelas no topo do ramo gigante a após a segunda dragagem (linhas pretas e azuis). Os modelos da mistura padrão são as linhas pontilhadas, os modelos com mistura termohalina são as linhas contínuas e os modelos que incluem mistura termohalina e rotação são as linhas tracejadas, indicando três velocidades de rotação de idade zero da sequência principal  $V_{ZAMS}$ . . . . . 67
- 3.10 Razões  $C/O$  versus  $[Fe/H]$  das estrelas hospedeiras estudadas por Delgado Mena et al. (2010)(asteriscos cinza), Nissen et al. (2013) (asteriscos azuis) e Teske et al. (2014) (círculos vermelhos) comparadas com as de estrelas não hospedeiras (Delgado Mena et al. 2010, quadrados vazios cinza). As linhas tracejadas indicam as médias de  $C/O$  de cada amostra. O gráfico foi tomado de Teske et al. (2014). . . . . 68

- 3.11 Razões  $[X/Fe]$  versus  $[Fe/H]$  dos elementos Na até Si das gigantes vermelhas de NGC 4349 (quadrados laranja) comparadas com as das gigantes de campo analisadas por Mishenina et al. (2006) e Luck & Heiter (2007) (cruzes azuis) e as gigantes de aglomerados com idades entre 0.2 e 2 Ganos (quadrados pretos vazios). Aglomerados incluídos: NGC 7789 (Tautvaisiene et al. 2005); NGC 752, 1817, 2506; NGC 2527, 2682, 2482, 2539, 2335, 2251, 2266; NGC 1342, 1662, 1912, 2354, 2447 (Reddy et al. 2012; 2013; 2015); NGC 6134 (Mikolaitis et al. 2010); NGC 3114 (Santrich et al. 2013); NGC 6940 e Hyades (Bocek Topcu et al. 2015); NGC 5316 (Drazdauskas et al. 2016a); NGC 2360, 3680 e 5822 (Peña Suárez et al. 2017, artigo aceito) . . . . . 70
- 3.12 Razões  $[X/Fe]$  versus  $[Fe/H]$  dos elementos Ca até Ni das gigantes vermelhas de NGC 4349 (quadrados laranja) comparadas com as das gigantes de campo analisadas por Mishenina et al. (2006) e Luck & Heiter (2007) (cruzes azuis) e as gigantes de aglomerados com idades entre 0.2 e 2 Ganos (Quadrados pretos vazios). Os aglomerados incluídos são os mesmos da figura 3.11 . . . . . 71
- 3.13 Razão média  $[Na/Fe]$  das gigantes vermelhas de NGC 4349 (quadrado laranja) versus  $M_{TO}$ , comparada com os modelos de Lagarde et al. (2012) para mistura convectiva convencional e afetada pela rotação, para duas metalicidades diferentes (linhas azuis:  $[Fe/H] = 0.0$  dex, linhas pretas:  $[Fe/H] = -0.54$  dex). As linhas contínuas representam a mistura padrão e as tracejadas o regime de mistura incluindo o efeito da rotação. Os ícones verdes representam as  $[Na/Fe]$  médias dos aglomerados selecionados da literatura. As cruzes representam as abundâncias de sódio sem incluir efeitos NETL e os quadrados os valores destas após as correções. Aglomerados incluídos: NGC 6705, NGC 4815, Hyades (só  $[Na/Fe]_{NETL}$ ), Berkeley 81 e Trumpler 20 (Smiljanic et al. 2016); NGC 3114 (Santrich et al, (2013); NGC 5316 (Drazdauskas et al. 2016); NGC 6940 e Hyades (só  $[Na/Fe]_{ETL}$ ) (Bocek Topcu et al. 2016) . . . . . 75



- 3.14 Razões médias  $[O/Fe]$  e  $[Na/Fe]$  versus  $[Fe/H]$  das gigantes vermelhas de NGC 4349 (quadrado laranja), nos painéis (a) e (b), respectivamente, comparadas com os resultados da amostra de aglomerados com idades superiores a 1 Gano analisada por De Silva et al. (2009) (quadrados verdes), com uma amostra de aglomerados com idade inferior a 1 Gano (círculos vermelhos) e com as gigantes vermelhas de campo analisadas por Mishenina et al. (2006). Aglomerados incluídos: Be 17 (Friel et al. 2005); Be 20, Be 29, Be 31 e NGC 2141 (Yong et al. 2005); Cr 261 (Carretta et al. 2005); Mel 66, NGC 2243 (Gratton & Contarini 1994); Mel 71, NGC 2112 (Brown et al. 1996); NGC 6253 e NGC 6791 (Carretta et al. 2007); NGC 6939, NGC 7142 (Jacobson et al. 2007); NGC 7789 (Tautvaišiene et al. 2005); IC 4725, NGC 6067 e NGC 6087 (Luck 1994); IC 4756, NGC 2447, NGC 3532, NGC 6281 e NGC 6633 (Smiljanic et al. 2009); NGC 6475 (Villanova et al. 2009); NGC 2099 (Pancino et al. 2010); Hyades, Praesepe, (Carrera & Pancino, 2011); NGC 1245 e NGC 1817 (Jacobson et al. 2011); NGC 1545 e Tr 2 (Začs et al. 2011); NGC 3114 (Santrich et al. 2013); NGC 6940 (Bocek Topcu et al. 2016); NGC 5316 (Drazdauskas et al. 2016); NGC 5822 (Peña Suárez et al. (2017, aceito). . . . . 77
- 3.15  $[Mg/Si]$  versus  $[Fe/H]$  para estrelas sem planetas detectados (pontos pretos), estrelas hospedeiras de planetas de baixa massa (quadrados azuis) e hospedeiras de planetas mais massivos (círculos vermelhos). O gráfico foi tomado de Adibekyan et al. (2015). 80
- 3.16 Distribuição das razões  $[X/Fe]$  em função do número atômico nas gigantes de NGC 4349 (ícones laranja). Os círculos azuis e verdes representam as médias destas razões nos aglomerados NGC 3114 e NGC 6940, respectivamente. Os triângulos correspondem às razões de abundância dos elementos leves de  $Z$  ímpar (Na (*NETL*) e Al), os quadrados representam os elementos- $\alpha$  (Mg, Si e Ca) e os losangos, os elementos do grupo do ferro (Ti, Cr e Ni). . . . . 83

- 3.17 Distribuição das razões  $[X/Fe]$  em função da temperatura de condensação  $T_c$  (Lodders, 2003) dos elementos refratários analisados nas estrelas do aglomerado NGC 4349. Os quadrados verdes representam os valores médios das razões  $[X/Fe]$  para as gigantes não hospedeiras, os quadrados laranja, os valores destas razões exclusivamente da estrela NGC 4349-127. A linha azul continua corresponde ao melhor ajuste para as não hospedeiras e a linha tracejada o ajuste respectivo da hospedeira. 86
- 3.18 Razões  $[X/Fe]$  versus  $[Fe/H]$  dos elementos do processo-s das gigantes vermelhas de NGC 4349 (quadrados laranja) comparadas com as das gigantes de campo analisadas por Mishenina et al. (2006) e Luck & Heiter (2007) (cruzes azuis) e as gigantes de aglomerados com idades entre 0.1 e 4.5 Ganos (Quadrados verdes vazios). Aglomerados incluídos: NGC 2224, NGC 3960, NGC 2660, NGC 2477, Be 29 e Be 20 (Maiorca et al. 2011); NGC 752, NGC 1817 e NGC 2506 (Reddy et al. 2012); NGC 2527, NGC 2282, NGC 2335, NGC 2482, NGC 2251, NGC 2539 e NGC 2266 (Reddy et al. 2013); NGC 3114 (Santrich et al. 2013); NGC 6940 e Hyades (Bocek Topcu et al. 2016); NGC 5316 (Drazdauskas et al. 2016), NGC 2360, NGC 3680, NGC 5822 (Peña Suárez et al. 2017, aceito). . . . . 90
- 3.19 Razões  $[X/Fe]$  das estrelas binárias NGC 4349-79, 168 e 203 e da estrela hospedeira NGC 4349 (quadrados e triângulo laranja), comparadas com as abundâncias médias  $\langle [X/Fe] \rangle$  e  $\langle [X/Fe] \rangle_{n-bin}$  (linhas azuis contínuas e tracejadas, respectivamente). Os pontos verdes correspondem aos resultados de Van der Swaelmen et al. (2016) para a estrela NGC 4349-203. . . . . 92

- 3.20 Razões  $[s/Fe]$  em função da idade do aglomerado, em Ganos. No painel (a) o valor correspondente ao aglomerado NGC 4349 (quadrado laranja) e em quadrados verdes, os aglomerados selecionados para a comparação. A linha contínua em marrom é o ajuste linear exclusivamente de tais pontos. No painel (b) as cruces azuis representam os valores correspondentes às estrelas de campo analisadas por Luck & Heiter (2007). A linha preta corresponde ao ajuste linear desses pontos. . . . . 93
- 3.21 Razões  $[Y/Mg]$  em função da metalicidade  $[Fe/H]$  da amostra de estrelas FGK com temperaturas superiores a 5300 K analisadas por Delgado Mena et al. (2017). Os ícones laranja representam estrelas do disco fino, os azuis, estrelas do disco espesso e os roxos, estrelas do halo da Galáxia. Os ícones vermelhos correspondem às estrelas  $h\alpha mr$  e o ícone verde representa a estrela enriquecida HD11397. O gráfico foi tomada de Delgado Mena et al. (2017). . . . . 95

## LISTA DE TABELAS

2.1	Parâmetros fotométricos das gigantes vermelhas de NGC 4349. Nas colunas 2 e 3, os valores fotométricos de Lohmann (1961) e nas colunas 4 e 5 os valores após a calibração de Majaess et al. (2012). Nas colunas 6 e 7, os valores de Mermilliod et al. (2008). . . . .	23
2.2	Informação dos espectros observados, velocidade radial (VR) e binaridade das gigantes estudadas. Na coluna 5, as velocidades radiais de Mermilliod et al. (2008). Na coluna 6 a binaridade da estrela NGC 4349-127 é referida como <i>SP: Sistema planetário</i> . . .	24
2.3	Parâmetros atmosféricos obtidos ( $T_{ef}$ , $\log g$ , $\xi$ e metalicidade) das gigantes vermelhas de NGC 4349. Nas últimas colunas, as abundâncias $A(Fe)$ de Fe I e Fe II com suas incertezas e o número de linhas usadas. . . . .	29
2.4	Parâmetros atmosféricos das gigantes vermelhas de NGC 4349, comparados com outros valores reportados na literatura. 1: Este trabalho, 2: Delgado Mena et al. (2016); 3: Carlberg et al. (2016); 4: Mortier et al. (2013); 5: Ghezzi et al. (2010); 6: Santos et al. (2009) ; 7: Clariá & Lapasset (1989) ; 8: Dawson (1978) . . . . .	35
2.5	Comparação entre os valores de gravidade superficial espectroscópica e evolutiva. . .	40

2.6	Informações relevantes e principais resultados derivados no Capítulo 2 para as gigantes vermelhas de NGC 4349 . . . . .	41
3.1	Velocidades rotacionais projetadas das gigantes vermelhas de NGC 4349 (coluna 2), comparadas com as correspondentes estudadas por Carlberg et al. (2016) e Delgado Mena et al. (2016), nas colunas 4 e 5. Na tabela também se incluem as temperaturas das estrelas. . . . .	49
3.2	Abundancia de lítio $A(Li)$ das gigantes vermelhas do aglomerado aberto NGC 4349 derivadas neste estudo (segunda coluna). Na terceira e quarta colunas, as abundâncias de Li fornecidas por Carlberg et al. (2016) e Delgado Mena et al. (2016) . . . . .	54
3.3	Razões de abundância $[X/Fe]$ de elementos C, N e O das gigantes vermelhas do aglomerado aberto NGC 4349. . . . .	56
3.4	Razões de abundância $[N/C]$ , isotópica $^{12}C/^{13}C$ e $C/N$ e $C/O$ das gigantes vermelhas do aglomerado aberto NGC 4349. . . . .	62
3.5	Razões de abundância $[X/Fe]$ dos elementos Na ao Si das gigantes vermelhas de NGC 4349. Na coluna 3, as abundâncias de sódio corrigidas de acordo com os modelos NETL de Lind et al. (2011). Para cada estrela se inclui entre parênteses o número de linhas usadas para a determinação da abundância. . . . .	72
3.6	Razões de abundância $[X/Fe]$ dos elementos Ca ao Ni das gigantes vermelhas de NGC 4349. Para cada estrela se inclui entre parênteses o número de linhas usadas para a determinação da abundância. . . . .	72
3.7	Razões de abundância $[X/Fe]$ para os elementos do ítrio até o lantânio nas gigantes vermelhas de NGC 4349. Para cada estrela se inclui entre parênteses o número de linhas usadas na determinação da abundância respectiva. . . . .	88

3.8	Razões de abundância $[X/Fe]$ para os elementos do cério até o neodímio nas gigantes vermelhas de NGC 4349. Para cada estrela se inclui entre parênteses o número de linhas usadas na determinação da abundância respectiva. Na última coluna, a média de abundância dos elementos de processo-s para cada estrela . . . . .	88
3.9	Incertezas nas abundâncias calculadas para a estrela NGC 4349-5. A segunda coluna fornece a variação da abundância causada pela variação na temperatura efetiva $T_{eff}$ . As outras colunas mostram as variações nas abundâncias causadas pelas modificações em $\log g$ , $\xi$ , $[Fe/H]$ , and $W_\lambda$ . A sétima coluna mostra a incerteza $rms$ . A última coluna fornece a dispersão observada entre as abundâncias de cada linha para os elementos com mais de três linhas estudadas. . . . .	97
3.10	Efeito dos erros dos parâmetros atmosféricos nas abundâncias de carbono, nitrogênio e oxigênio para a estrela NGC 4349-5. . . . .	98
3.11	Principais resultados derivados no Capítulo 3 para as gigantes vermelhas de NGC 4349	98
3.12	Principais resultados derivados no Capítulo 3 para as gigantes vermelhas de NGC 4349	98
3.13	Principais resultados derivados no Capítulo 3 para as gigantes vermelhas de NGC 4349	99
4.1	Larguras equivalentes das linhas espectrais de Fe I e Fe II medidas nas estrelas do aglomerado NGC 4349 da amostra. . . . .	123
4.2	Larguras equivalentes das linhas espectrais dos elementos Na $\rightarrow$ Nd medidas nas estrelas do aglomerado NGC 4349 da amostra. . . . .	126

## Resumo

Usando uma amostra de oito espectros de alta resolução das gigantes vermelhas do aglomerado aberto NGC 4349, são determinados os parâmetros atmosféricos, as abundâncias dos elementos leves LiCNO, dos elementos refratários (Na, Mg, Al, Si, Ca, Ti, Cr e Ni) e dos elementos pesados, gerados pelo processo-s (Y, Zr, La, Ce e Nd) destas estrelas. São discutidas várias correlações entre tais abundâncias e parâmetros como a metalicidade, a idade, e a massa do turn-off do aglomerado, entre outros. Também são calculados alguns indicadores da evolução das estrelas gigantes, como a razão isotópica de carbono ou a razão  $C/N$ . Uma das gigantes estudadas, NGC 4349-127, possui um objeto subestelar, pelo qual são discutidos diferentes indicadores relativos à análise de sistemas planetários extrasolares, tais como as razões  $C/O$ ,  $[Mg/Si]$  e a correlação entre as abundâncias  $[X/Fe]$  dos elementos refratários e sua temperatura de condensação.

A literatura sobre este aglomerado tem focado no estudo da abundância de lítio da estrela hospedeira, no intuito de descobrir a relação entre a evolução de tal sistema planetário, a abundância deste elemento e a rotação da estrela. Os resultados obtidos nesta análise permitem afirmar que as estrelas do aglomerado NGC 4349 possuem abundâncias das espécies químicas estudadas em concordância com as encontradas nas estrelas de campo do disco fino e nas estrelas gigantes de aglomerados abertos de idade e massa de turn-off semelhantes ( $idade_{NGC4349} = 0.35 \text{ Gano}$ ;  $M_{turn-off} = 3.15 M_{\odot}$ ). Se mostra que a presença do objeto subestelar não representou uma mudança significativa das abundâncias químicas da estrela NGC 4349-127 respeito às encontradas no aglom-

erado, salvo um leve aumento da abundância de elementos- $\alpha$ . Na discussão sobre as abundâncias de lítio, sugere-se que a abundância deste elemento na estrela hospedeira não foge da tendência da abundância encontrada em gigantes vermelhas de aglomerados abertos semelhantes, nos quais se evidencia um amplo espalhamento da abundância de lítio.

Se mostra que a abundância média de elementos de processo-s  $[s/Fe]$  das gigantes analisadas se ajusta à tendência desta razão de abundância com a idade, verificada em estrelas de campo e de aglomerados. Se comprova que as gigantes não hospedeiras do aglomerado NGC 4349 seguem as tendências de abundância de elementos- $\alpha$  das gigantes do disco fino da Galáxia, de acordo com a razão  $[Y/Mg]$ , cujo valor na estrela NGC 4349-127 permite confirmar o efeito da presença do objeto subestelar na composição da estrela, na sua sobreabundância de elementos- $\alpha$ .

**Palavras-Chave:** aglomerados abertos, estrelas gigantes vermelhas, atmosferas estelares, correções fotométricas, isocronas teóricas, planetas extrasolares, estrelas de campo, abundâncias químicas.



## Abstract

Using a sample of eight high resolution spectra of the red giants in the open cluster NGC 4349, we determined its atmospheric parameters and the chemical abundances of the light elements LiCNO, the refractory elements (Na, Mg, Al, Si, Ca, Ti, Cr e Ni), and the heavy elements produced by the s-process (Y, Zr, La, Ce e Nd) of those stars. We discussed several abundance correlations with parameters as the metallicity, age and the turn-off mass, among others. We calculate also some stellar evolution indicators, as the carbon isotopic ratio or the  $C/N$  ratio. Among the analyzed stars, NGC 4349-127 has a sub-stellar object, then we calculate different ratios referred in the exoplanet studies, as the  $C/O$ ,  $[Mg/Si]$  ratios, and the correlation between the abundance ratios  $[X/Fe]$  of the refractory elements and their condensation temperature.

The previous literature about NGC 4349 focussed on studying the lithium abundance of the host star NGC 4349-127, trying to explain the relation between the evolution of this planetary system, the lithium abundance and the rotation of this star. The results obtained in this study shows that the chemical abundances of the red giants of NGC 4349 are in good agreement with the ones found on the field stars of the thin disk, and in the stars of several open clusters with similar ages and turn-off masses ( $age_{NGC4349} = 0.35$  Gyr;  $M_{turn-off} = 3.15M_{\odot}$ ). We showed that the sub-stellar object is not a relevant reason to produce large discrepancies of the chemical abundances of the host star, considering the trends found in the open cluster NGC 4349, maybe except for a slight increase in the  $\alpha$ -elements abundance of the host star. Regarding the lithium

abundance of the host star, we suggest that its value is not out of the trend of the abundances of this element in the red giants of similar open clusters that show a large dispersion of the lithium abundances.

We show that the mean abundance value of the s-process elements  $[s/Fe]$  of the analyzed stars is consistent with the trend of this abundance with the age, found in field stars and open clusters. It is verified that the abundance of the  $\alpha$ -elements of the non-host red giants of NGC 4349 are in agreement with the ones found in the thin disk stars, regarding the  $[Y/Mg]$  ratio. Considering this ratio for the host star NGC 4349-127, we suggest that its overabundance of  $\alpha$ -elements is a consequence of the presence of its sub-stellar object.

**Key words:** open clusters, red giant stars, stellar atmospheres, photometric corrections, theoretical isochrones, extrasolar planets, field stars, chemical abundances.

---

## Capítulo **1**

# INTRODUÇÃO

### 1.1 Aglomerados abertos: linhas de tempo da evolução do disco galáctico

A pesquisa sobre aglomerados abertos tem crescido nas últimas duas décadas tanto em número de publicações quanto na amplitude dos seus tópicos de interesse. Atualmente se considera que estes objetos são protagônicos na definição da estrutura e da dinâmica da Galáxia e seu estudo permite estabelecer as condições da formação estelar, a composição química do meio interestelar e o teste e aprimoramento dos modelos que pretendem explicar a evolução estelar. Um dos problemas centrais do estudo das regiões estruturais da galáxia (figura 1.1) é a determinação da idade das estrelas, que no caso das estrelas do halo, o disco espesso e o bojo é estabelecida com o estudo dos aglomerados globulares. No caso das estrelas do disco fino, os principais referentes para fixar a idade estelar são os aglomerados abertos, cuja faixa etária não supera 10 Ganos.

Os aglomerados abertos oferecem um cenário ideal para determinar a idade das estrelas, pois estes são um exemplo único de agrupamento estelar com idade comum e composição química semelhante das estrelas que os compõem, cujas distâncias podem ser determinadas com uma boa precisão. Estes fatos favorecem a geração de um

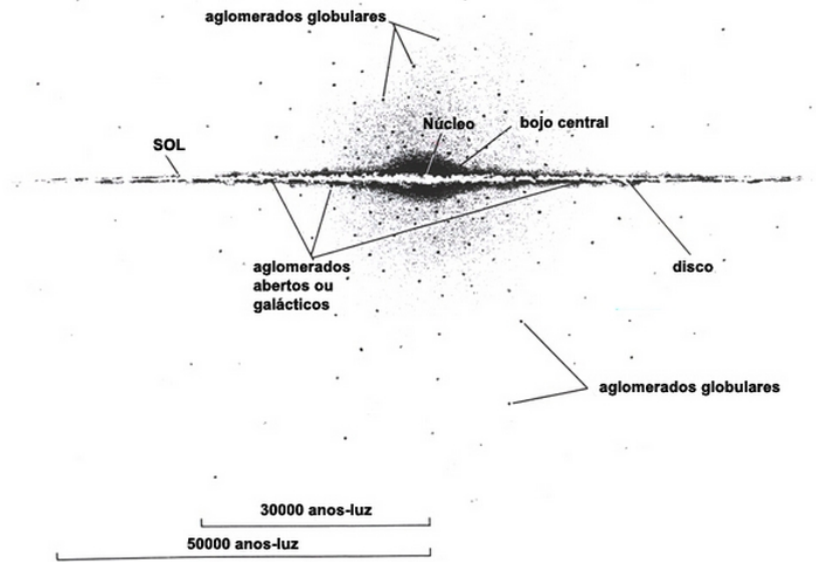


Figura 1.1: Representação da Via Láctea, ilustrando alguns dos elementos das suas componentes estruturais, como os aglomerados globulares do halo e do bojo e os aglomerados abertos do disco galáctico. Os raios galactocêntricos  $R_g$  se encontram medidos em anos-luz ( $R_{g\odot} = 8.5$  kpc).

conjunto de modelos que, com base em condições observacionais, permitem estimar a idade e evolução das estrelas do campo no disco fino, cujo estudo é mais complexo, porém muito esclarecedor da evolução do disco fino, uma vez têm sido determinadas tais características. No que diz respeito à composição química, as estrelas do disco fino apresentam uma metalicidade maior em média do que o resto das componentes estruturais da galáxia, com um mínimo de  $[Fe/H] > -0.7$ , segundo Bensby et al. (2014), com um máximo na distribuição da metalicidade ao redor de  $-0.2$  (Reddy et al. 2003).

Sendo um número considerável, acima de 1500 aglomerados abertos distribuídos em um intervalo de distâncias galactocêntricas  $R_g$  que vai desde 5 até 20 kpc (Salaris, 2014), a distribuição das suas abundâncias químicas tem sido um dos principais alvos da pesquisa recente sobre tais aglomerados, dada a vantagem que tal amplitude amostral oferece. Os estudos de diferentes objetos astrofísicos ao longo do disco fino -aglomerados abertos, regiões HII, nebulosas planetárias, estrelas O, B e cefeidas- mostram que o conteúdo

metálico decresce desde as regiões mais internas para as mais externas, como se ilustra na figura 1.2 para os elementos- $\alpha$  (Matteucci, 2012). Os gradientes de abundância observados nem sempre reproduzem os modelos de evolução química formulados para determinados elementos (Matteucci, 2012), em parte pelas hipóteses formuladas sobre as fontes de enriquecimento do gás interestelar da Galáxia, tais como as explosões de supernova, mas principalmente pela limitação para fazer uma estimativa realista da taxa de formação estelar, particularmente nas regiões periféricas do disco galáctico (Matteucci, 2012).

Assim, uma compreensão mais completa e abrangente da evolução do disco da Galáxia depende fortemente da análise da composição química localizada, visando a “reconstrução” da história das populações estelares do disco. A espectroscopia de alta resolução tem permitido nos últimos 20 anos estudar as abundâncias de elementos cujas linhas de absorção são consideradas fracas, como é o caso do elemento zircônio, sintetizado na captura lenta de nêutrons (processo-s) durante a passagem das estrelas pela fase da queima do hélio, tanto em estrelas massivas ( $M > 8M_{\odot}$ ) quanto em estrelas de massas inferiores (Matteucci, 2012). Na figura 1.3 se mostra a região  $\lambda 6125-6145\text{\AA}$  do espectro de uma gigante vermelha, nesta janela se encontram quatro linhas de  $Zr\ I^1$ , entre várias de outros elementos do grupo do ferro. Nesta figura pode ser conferida a diferença entre linhas fracas, típicas de elementos de processo-s como o zircônio e as linhas de elementos como o ferro ou o titânio.

Quanto às abundâncias dos elementos de processo-s, alguns estudos indicam que os aglomerados abertos mostram uma sobreabundância nas razões relativas  $[X/Fe]$  de cada elemento, respeito às correspondentes determinadas em estrelas de campo. De outra parte, D’Orazi et al. (2009) e Maiorca et al. (2011) mostram que as abundâncias

---

<sup>1</sup>O conjunto de linhas de zircônio estudadas nesta pesquisa foi de 9 linhas, adotadas das listas de linhas de Antipova et al. (2005) e Smith et al. (1996)

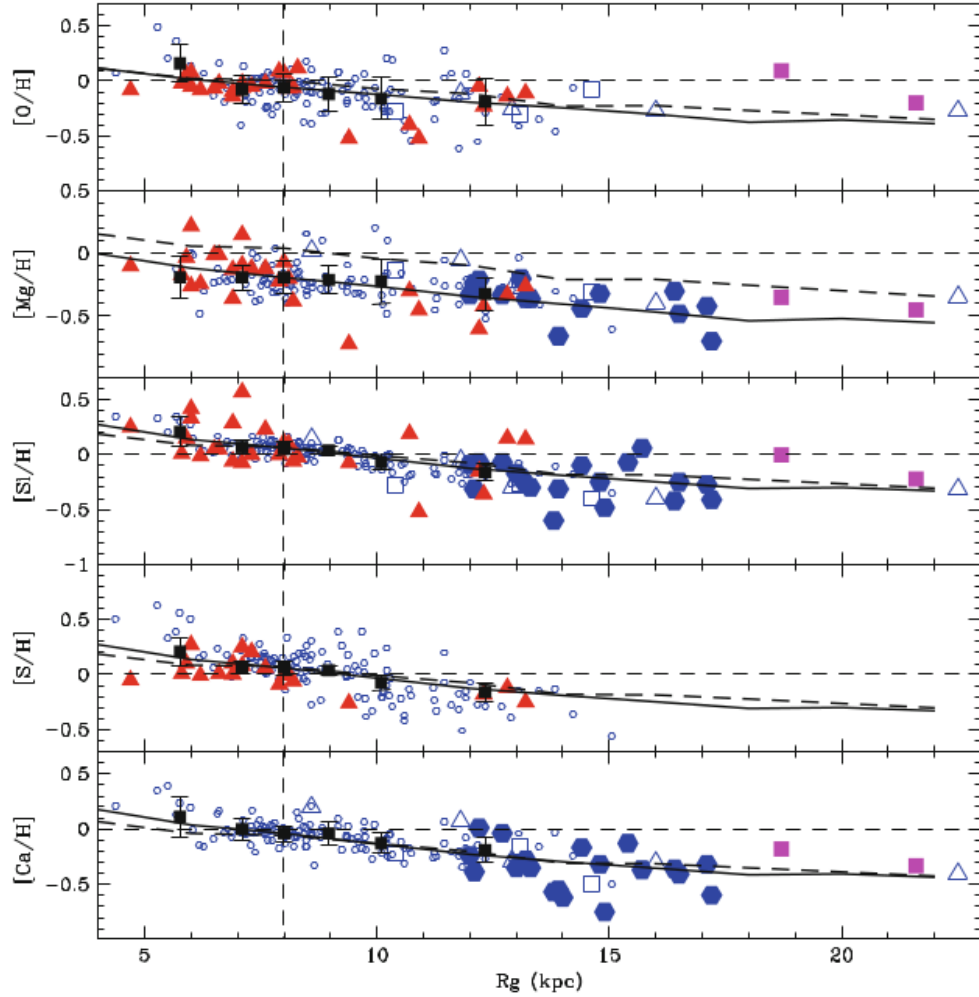


Figura 1.2: Gradientes de abundância dos elementos- $\alpha$  ao longo do disco fino da Galáxia. As tendências previstas por Cescutti et al. (2007) para os elementos são comparadas com diferentes conjuntos de dados. Os círculos vazios pequenos são as cefeidas de Andrievsky et al. (2002a,b,c;2004) e Luck et al. (2003). Os triângulos cheios são as estrelas OB de Daflon & Cunha (2004), os quadrados vazios são as gigantes vermelhas de Carney et al. (2005), os hexágonos são as cefeidas de Yong et al. (2006), os triângulos vazios são os aglomerados abertos de Yong et al. (2005) e os quadrados cheios os aglomerados abertos de Carraro et al. (2004). As linhas contínuas finas representam as previsões para o tempo atual normalizadas com o valor médio para as cefeidas a 8 kpc; as linhas tracejadas, as previsões para a época em que se formou o sistema solar, normalizadas de acordo com Asplund et al. (2005). As previsões devem ser comparadas com as gigantes vermelhas e os aglomerados abertos incluídos no gráfico. Figura tomada de Matteucci (2012)

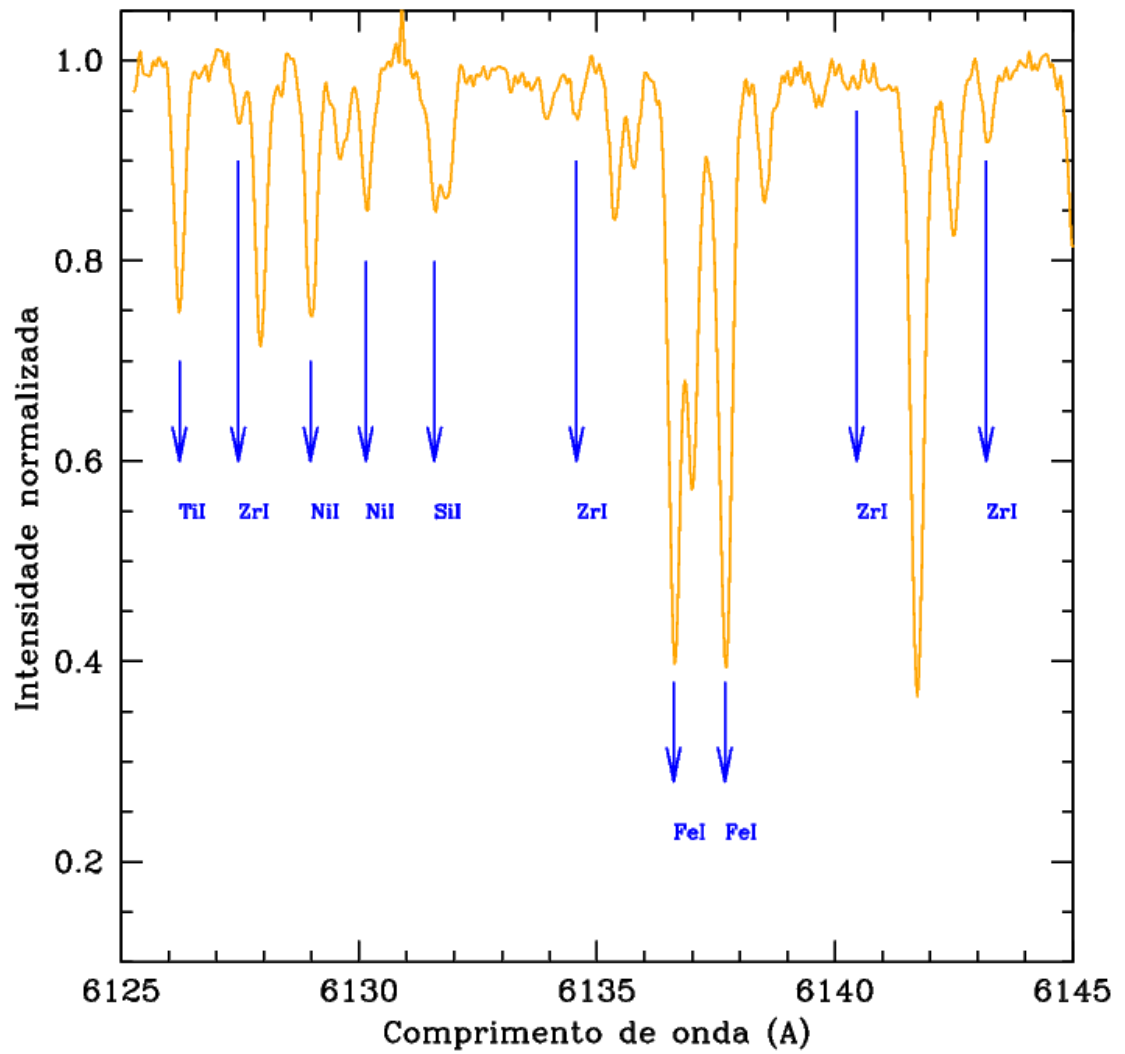


Figura 1.3: Região  $\lambda 6125\text{--}6145\text{\AA}$  do espectro da gigante vermelha NGC 4349-5. Em azul são mostradas as linhas de titânio ( $\lambda 6126.22\text{\AA}$ ), zircônio ( $\lambda 6127.46$ ,  $6134.57$ ,  $6140.46$  e  $6143.18\text{\AA}$ ), níquel ( $\lambda 6128.98$ ,  $6134.57$  e  $6130.14\text{\AA}$ ), silício ( $\lambda 6126.22\text{\AA}$ ) e ferro ( $\lambda 6136.61$  e  $6137.69\text{\AA}$ ).

relativas médias destes elementos,  $\langle [s/Fe] \rangle$  aumentam com a diminuição da idade. Esta tendência pareceria revelar uma maior contribuição ao enriquecimento do meio interestelar por parte de uma grande quantidade de estrelas com massa inferior a  $1.5M_{\odot}$  que já atingiram a fase gigante assintótica e contribuíram ao enriquecimento dos aglomerados. Este resultado foi conferido por Mishenina et al. (2013, 2015), que encontram além disso um excesso de abundância de bário em vários aglomerados jovens, ao tempo que abundâncias sem excesso de ítrio e zircônio, os denominados *elementos leves do processo-s, ls*.

A análise de espectros de alta resolução vêm permitindo melhorar a compreensão dos fenômenos relacionados com a produção de elementos pesados, como os elementos do processo-s já mencionados e os elementos do processo-r, sintetizados nos eventos explosivos de supernovas tipo II, tais como uma proporção do bário observado e európio. Estudos sobre as abundâncias de bário e európio em estrelas de metalicidade extremamente baixa da Galáxia mostram uma ampla dispersão das razões abundância destes elementos respeito ao ferro (Matteucci, 2012). Em um gráfico das abundâncias encontradas em estrelas do disco galáctico das razões  $[Ba/Fe]$  e  $[Eu/Fe]$  versus  $[Fe/H]$ , na figura 1.4, comparadas com os modelos de evolução química para tais elementos (Cescutti et al. 2006), se mostra a grande dispersão dos valores das abundâncias (François et al. 2007), principalmente para estrelas de baixa metalicidade. Matteucci (2012) mostra que o tamanho de tal dispersão é muito maior que os respectivos das estimativas de abundância de outras espécies, como os elementos- $\alpha$ .

Matteucci (2012) menciona como possíveis fontes de tal incerteza fatos como não ter estimativas esclarecedoras da contribuição do processo-s e do processo-r na produção de bário da Galáxia, ou as hipóteses com que foi adotada a função inicial de massa (IMF, pela sua sigla em inglês) das fases iniciais da consolidação da estrutura do disco galáctico, entre outros fatores. Sobre estes aspectos, Marsakov et al. (2016) sugerem que, considerando as órbitas muito alongadas e elevadas sobre o plano galáctico de



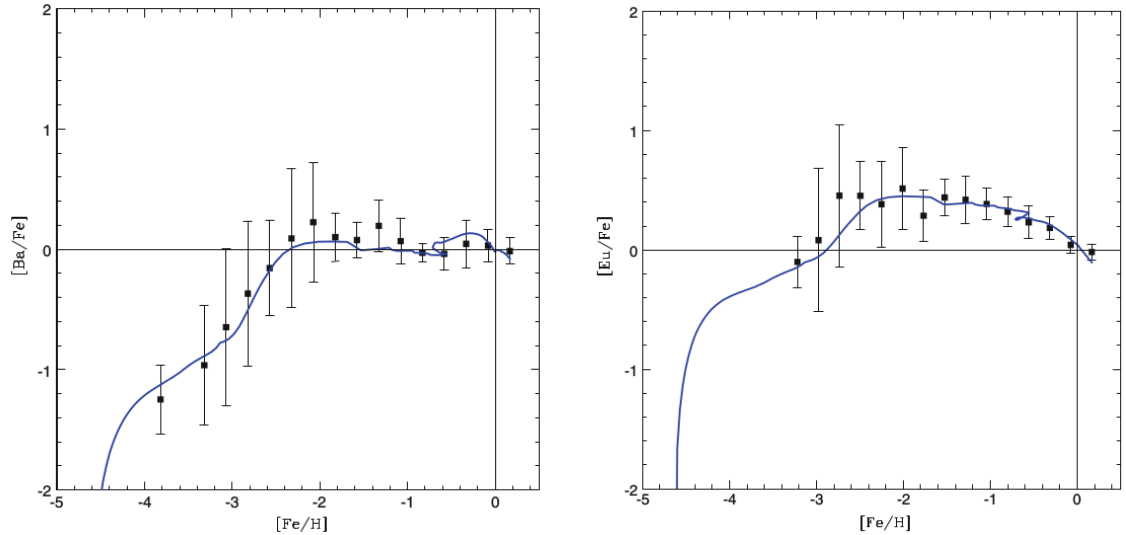


Figura 1.4: Evolução das razões  $[Ba/Fe]$  (painel esquerdo) e  $[Eu/Fe]$  (painel direito) versus  $[Fe/H]$  com os modelos de evolução química de Cescutti et al. (2006). As barras nas abundâncias medidas representam a dispersão dos valores respeito à média representada (François et al. 2007). Figura tomada de Matteucci (2012).

muitas estrelas de baixa metalicidade, a grande dispersão está relacionada com uma pobre mistura do material enriquecido de tais elementos pesados com as nuvens que geraram tais aglomerados de baixa metalicidade. Assim, os modelos reproduzem bem a tendência das abundâncias, porém com uma grande dispersão, que poderia ser uma chave para melhorar a compreensão da evolução química das estrelas empobrecidas em metais, assim como para reconstruir em forma mais precisa a história evolutiva da Galáxia.

Dentro dos alvos da pesquisa sobre a composição química das estrelas do disco estão as abundâncias dos elementos leves, lítio, carbono, nitrogênio e oxigênio. Apesar da origem cosmológica do lítio esteja suficientemente bem estabelecida, a análise da sua abundância em aglomerados abertos mostra uma complexidade atrelada ao estágio evolutivo da amostra de estrelas estudada dentro de um mesmo aglomerado (Anthony Twarog et al. 2009). Sendo o núcleo de lítio muito sensível às variações da temperatura,

as mudanças estruturais internas ao longo do tempo de vida das estrelas produzem alteração da proporção deste elemento nas camadas externas da estrela. A abundância superficial de lítio das estrelas, de acordo com os modelos padrão de evolução estelar, depende da massa, da idade e da composição química estelares. Estrelas de baixa massa desenvolvem ao longo do seu caminho evolutivo uma zona de convecção superficial, em cuja base a temperatura cresce o suficiente para gerar um processo de destruição do lítio, ocasionando a depleção superficial do elemento. Tal depleção será mais severa em estrelas frias dos tipos K e M (Pinsonneault, 1997).

Os estudos da abundância de lítio em aglomerados como as Pléiades são ajustados às previsões teóricas sobre a depleção deste elemento, mas em muitos aglomerados abertos há um desvio significativo respeito a tal tendência, como afirmam Anthony Twarog et al. (2009). Randich et al. (1999) e Pasquini et al. (2004) encontram estrelas que apresentam abundâncias de lítio próximas das abundâncias originais<sup>2</sup> entre os sistemas binários com estrelas de alta rotação. Outras observações, como as de Boesgaard & Tripicco (1986) no aglomerado das Hyades, mostram que para estrelas com temperaturas superiores a 6500 K são encontradas depleções muito severas de lítio, que não são condizentes com a teoria convectiva padrão mencionada. A descoberta de estrelas gigantes com abundâncias mensuráveis de lítio em aglomerados velhos, como se ilustra na figura 1.5, mostra que uma teoria geral e consistente para explicar as tendências anômalas do processamento do lítio ao longo da evolução estelar deve fornecer um novo ponto de vista sobre a convecção (Balachandran, 1995; Pasquini et al. 2001).

Comparando as abundâncias químicas das estrelas de campo do disco galáctico com as de aglomerados abertos, pode se afirmar que no geral estas são semelhantes, salvo no caso de alguns elementos como os mencionados. A análise de estrelas evoluídas

---

<sup>2</sup>Tais abundâncias padrão se estimam de acordo com o modelo de abundância solar considerado e/ou a metalicidade de idade zero da sequência principal adotada.

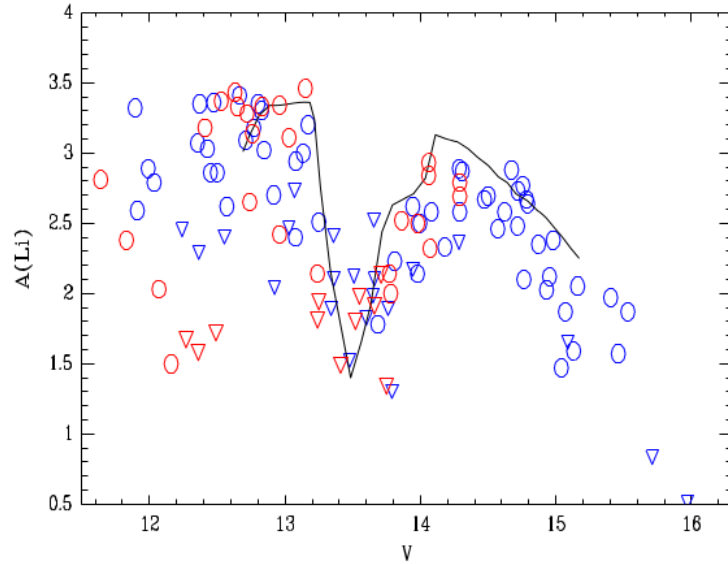


Figura 1.5:  $A(Li)$  em função da magnitude  $V$  para três diferentes aglomerados abertos velhos. Os círculos e triângulos azuis representam as estrelas analisadas em NGC 3680 e NGC 752, respectivamente. Os símbolos vermelhos, as correspondentes a IC 4651. A linha contínua é o ajuste da mesma relação obtida para os aglomerados das Hyades e Praesepe. Figura tomada de Anthony Twarog et al. (2009)

com massa inferior a  $8M_{\odot}$  mostra tendências não ajustadas ao padrão convectivo que explica a produção de carbono, nitrogênio e oxigênio, que manifestam a existência de mecanismos alternativos de mistura destas espécies químicas até a conclusão da primeira dragagem (Začs et al. 2011). Este episódio da evolução estelar é responsável do aumento das abundâncias fotosféricas de  ${}^3He$ ,  ${}^{13}C$  e  ${}^{14}N$  e da diminuição da proporção de  ${}^{12}C$  e  ${}^{16}O$ , em função da massa estelar inicial e a metalicidade da estrela (Smiljanic et al. 2009). Particularmente, em estrelas gigantes de baixa massa tanto de aglomerados abertos como de campo e de aglomerados globulares se observa um forte aumento do nitrogênio e uma diminuição considerável do lítio, carbono e da razão isotópica de carbono  ${}^{12}C/{}^{13}C$  que não são contemplados na mistura da primeira dragagem (Smiljanic et al. 2009).

O caráter aparentemente universal dos processos que alteram as abundâncias dos *el-*

*ementos leves* em estrelas evoluidas de baixa massa tem motivado a formulação de modelos que visam explicar a interação entre a circulação meridional do material no interior da estrela com a turbulência induzida pela rotação (Zahn, 1992; Charbonnel, 1995) como um fator não convencional de mistura. De outro lado, Smiljanic et al. (2009) mostram que os efeitos da rotação não fornecem explicações suficientemente consistentes das anomalias observadas nas abundâncias de estrelas do ramo gigante em geral. Eggleton et al. (2006) propõem que para estrelas de massa solar há uma inversão do peso molecular  $\mu$  do material interno da estrela, após o *bump de luminosidade* do ramo gigante, que favoreceria a reação  ${}^3\text{He}({}^3\text{He}, 2p){}^4\text{He}$  na interface entre a camada externa da queima de hidrogênio com a parte quimicamente homogênea da envoltória convectiva.

Charbonnel & Zahn (2007) tomam a ideia de Eggleton et al. (2006) e conseguem modelar uma instabilidade difusiva chamada *convecção termohalina* que permitiria conectar a parte superior da camada externa da queima de hidrogênio com a envoltória convectiva e que reproduz as tendências observadas das abundâncias dos elementos Li, C e N, assim como a razão isotópica  ${}^{12}\text{C}/{}^{13}\text{C}$  após o *bump*. Finalmente, Charbonnel & Lagarde (2010) e Lagarde (2012) conseguem sistematizar os efeitos da mistura convencional, termohalina e a associada à rotação da estrela na sequência principal de idade zero, para explicar as abundâncias dos elementos leves, incluindo o sódio. A aplicação destes modelos será intensiva ao longo do desenvolvimento desta tese, pelo qual seus detalhes teóricos serão ampliados no capítulo 3. Na figura 1.6 são ilustradas as tendências da composição química interna de uma estrela de  $4M_{\odot}$  no turn-off, de acordo com o modelo de Charbonnel & Lagarde (2010).

Até este ponto tem sido esboçada uma síntese de fatos relevantes da pesquisa sobre a evolução química dos aglomerados abertos, mas seu estudo têm outros campos de interesse muito amplos. De um lado, a estimativa de distâncias, relacionada com a estimativa de idade, através de técnicas fotométricas e estatísticas cada vez mais robustas.

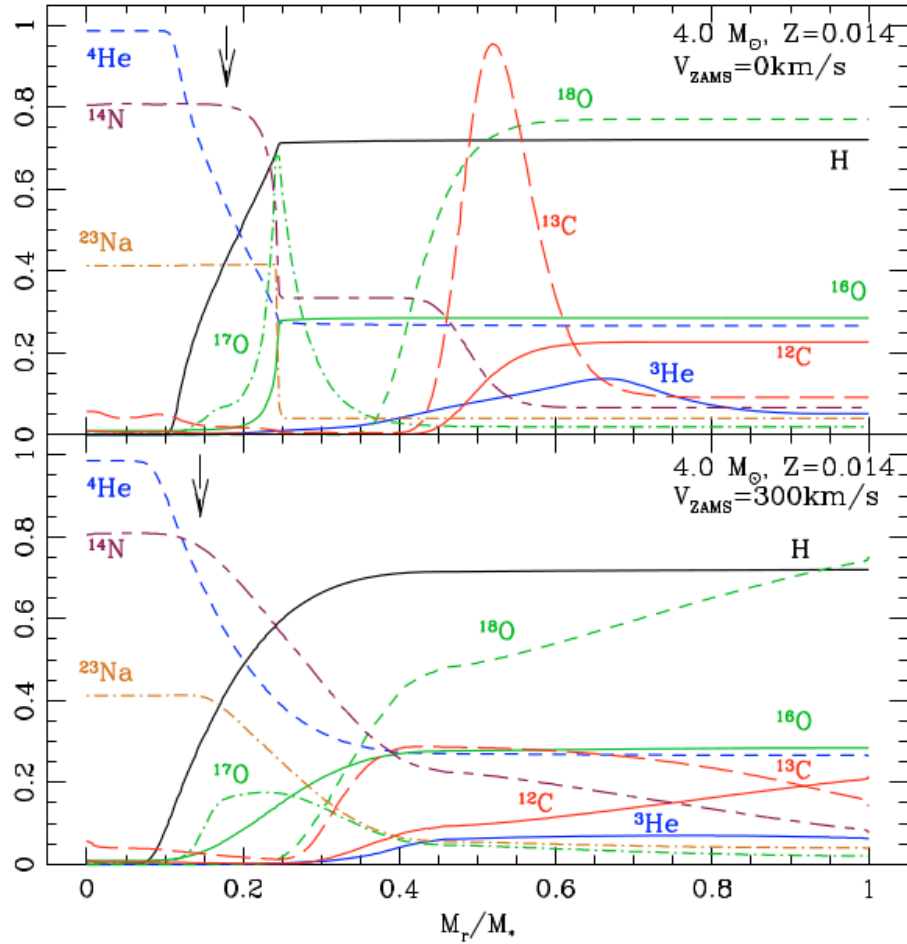


Figura 1.6: Composição química de uma estrela de massa intermediária ( $4M_\odot$ ) no turn-off, calculada sem considerar a rotação (painel superior) e com uma velocidade de rotação inicial  $v_{ZAMS} = 300 \text{ km s}^{-1}$  (painel inferior). As frações de massa são multiplicadas por 600 no caso do  $^3\text{He}$ , por 100 no  $^{12}\text{C}$  e no  $^{14}\text{N}$ , por 2500 no  $^{13}\text{C}$ , por 50, 5000 e  $6 \times 10^4$  para o  $^{16}\text{O}$ ,  $^{17}\text{O}$  e  $^{18}\text{O}$ , respectivamente. Por fim, no caso do  $^{23}\text{Na}$  multiplica-se por 1500. A seta vertical indica em ambos casos a máxima profundidade atingida pela envoltória convectiva na sua máxima extensão, durante a primeira dragagem. A figura foi tomada de Charbonnel & Lagarde (2010).

De outro, a definição das características dinâmicas dos aglomerados, sua delimitação e a identificação das estrelas que fazem parte deles. As promissoras expectativas dos grandes surveys como o *APOGEE: Apache Point Observatory Galactic Evolution Experiment* e o *OCCAM: Open Cluster Chemical Analysis and Mapping survey* permitem pensar que será possível ter futuramente maior conhecimento das tendências das abundâncias das estrelas do bojo, o que permitiria otimizar os modelos do gradiente de abundância da Galáxia. Outro tópico, entre vários beneficiados pelos grandes surveys, será uma melhor compreensão da subestrutura do disco galáctico, tópico de intenso debate na literatura (Schonrich & Binney, 2009; Navarro et al. 2011; Lee et al. 2011; Bovy et al. 2012; Liu & van de Ven, 2012).

## 1.2 Motivação desta tese

Na seção 1.1 foi apresentado um esboço da pesquisa atual sobre abundâncias químicas em aglomerados abertos. Nesta tese será analisada a composição química do aglomerado aberto NGC 4349, cuja idade é inferior a 0.5 Ganos segundo a literatura. Este aglomerado oferece características que o tornaram um alvo de pesquisa bastante citado na última década. Lovis & Mayor (2007) fizeram um estudo sobre sistemas planetários extrasolares, no intuito de entender melhor os mecanismos da formação dos planetas nestes sistemas. Procurando fatos sobre a dinâmica do sistema planeta-estrela hospedeira, particularmente no caso de gigantes vermelhas de massa intermediária ( $1.5M_{\odot} < M_{\star} < 4M_{\odot}$ ), os autores criaram um survey de aglomerados abertos utilizando o espectrógrafo HARPS, no telescópio de 3.6 m do ESO, em La Silla (Chile). Entre os objetos observados, através da análise das curvas de velocidade radial das estrelas NGC 2423-3 e NGC 4349-127 descobriram um planeta de  $10.6M_{Jup}$  orbitando a primeira e um objeto subestelar de  $19.8M_{Jupiter}$  (NGC 4349-127b) ao redor da segunda.

Posteriormente, várias pesquisas sobre este aglomerado se referiram à análise da relação

entre a metalicidade e a presença do objeto subestelar referido, como Ghezzi et al. (2010) ou Mortier et al. (2013). As mais recentes publicações sobre NGC 4349, Carlberg et al. (2016) e Delgado Mena et al. (2016), dizem respeito da relação entre a abundância de lítio na estrela NGC 4349-127 e a existência objeto subestelar, que apresenta uma fonte de interessantes debates por parte destes autores sobre o efeito da presença de tal objeto na evolução química desta estrela, à luz da análise da sua rotação e dos modelos de mistura que determinam a abundância deste elemento, contextualizando tais debates com a comparação de algumas outras das estrelas gigantes do aglomerado, assim como de algumas estrelas com planetas estudadas na literatura.

Assim, entre os objetivos desta tese está a determinação dos parâmetros atmosféricos das gigantes vermelhas de NGC 4349 e determinar as abundâncias químicas dos elementos leves: lítio, carbono, nitrogênio e oxigênio; dos elementos refratários: sódio, magnésio, alumínio, silício, cálcio, titânio, cromo e nitrogênio; e dos elementos gerados pelo processo-s: ítrio, zircônio, lantânio, cério e neodímio nessas estrelas. A determinação de abundâncias fornece importantes indicadores evolutivos das estrelas gigantes, como por exemplo a razão isotópica de carbono,  $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$  e as razões  $\text{C}/\text{N}$  e  $\text{C}/\text{O}$ . Outro dos objetivos é discutir a relação entre a rotação e as abundâncias de elementos leves das estrelas estudadas, considerando em particular o caso da estrela NGC 4349-127, hospedeira de um planeta massivo, à luz da literatura sobre sistemas de planetas extrasolares. Por fim, será discutido como se insere o aglomerado estudado em diferentes tendências das abundâncias químicas, respeito de parâmetros como a metalicidade, a idade, a massa do turn-off e a temperatura de condensação, no caso dos elementos refratários.

Outro aspecto motivante desta pesquisa é a continuidade no estudo de gigantes vermelhas em aglomerados abertos, realizada ao longo do curso do mestrado e doutorado nos aglomerados NGC 2360, NGC 3680 e NGC 5822, de idade intermediária, tendo analisado 11 estrelas binárias (Sales Silva et al. 2014) e 29 estrelas não binárias (Peña

Suárez et al. 2017<sup>3</sup>). Nestes dois estudos foi feita a estimativa de abundâncias químicas dos elementos mencionados e a interpretação dessas abundâncias em tais estrelas desde três pontos de vista: os efeitos da binaridade na composição química e na rotação das estrelas, a análise de estrelas binárias que apresentam velamento espectral e a inferência do tipo espectral da estrela secundária, com base nas características de tal velamento e, por fim, a comparação dos padrões de abundâncias das gigantes não binárias com os correspondentes das binárias. Particularmente, na análise de não binárias foi incluída a razão  $[Y/Mg]$ , um indicador bastante citado na literatura recente, como parâmetro para caracterizar a idade das estrelas de campo, mas também para interpretar de maneira abrangente o padrão de abundâncias dos elementos pesados nas estrelas. Tal indicador será estudado nas estrelas alvo desta tese.

O conteúdo desta tese será desenvolvido nos próximos três capítulos: No capítulo 2 será apresentada uma síntese dos fatos marcantes da pesquisa sobre o aglomerado aberto NGC 4349, assim como a análise das suas características fotométricas, a descrição dos métodos de análise espectroscópica que permitem a determinação dos parâmetros atmosféricos das gigantes do aglomerado e a discussão de tais resultados desde o ponto de vista evolutivo, considerando os resultados prévios da literatura sobre tais estrelas. No Capítulo 3 será desenvolvida a análise de abundâncias dos elementos mencionados, considerando as características evolutivas do aglomerado, desde o ponto de vista das diferentes correlações em que pode ser avaliada a tendência da composição química do aglomerado, e considerando a circunstância específica da estrela gigantes hospedeira NGC 4349-127, procurando estabelecer a relevância deste fato na evolução da estrela. Para finalizar, no Capítulo 4 as conclusões tiradas desta análise e as perspectivas para futuras pesquisas dentro do campo da análise de abundâncias químicas em aglomerados

---

<sup>3</sup>No Apêndice 2 é incluída a versão corrigida do artigo “High resolution observations of single red giants in NGC 2360, NGC 3680 and NGC 5822”, aceito para ser publicado no *Astrophysical Journal*



abertos.

No intuito de facilitar a leitura da tese, no final dos capítulos 2 e 3 são incluídas tabelas que sintetizam os resultados e informações relevantes tratados ao longo de cada capítulo.

---

## Capítulo **2**

# FOTOMETRIA E PARÂMETROS ATMOSFÉRICOS DAS GIGANTES VERMELHAS DE NGC 4349

Como foi mencionado na Introdução, o aglomerado NGC 4349 é um objeto interessante para pesquisar as tendências evolutivas das estrelas gigantes de massa intermediária, assim como o efeito da presença de um objeto subestelar orbitando uma delas. A literatura sobre planetas ao redor de gigantes vermelhas é escassa. Posterior à pesquisa onde Lovis & Mayor (2007) descobriram um objeto subestelar massivo ( $19.8M_{Jupiter}$ ) orbitando a estrela NGC 4349-127, Carlberg et al. (2016) e Delgado Mena et al. (2016) fizeram estudos sobre as abundâncias de lítio em estrelas com companheiros subestelares, incluindo a estrela mencionada, se encontrando em ambas pesquisas que tal estrela apresentava uma abundância de lítio superior a 0.94, sendo este valor considerado alto respeito ao esperado em gigantes vermelhas.

Carlberg et al. (2016) analisaram 8 estrelas em 3 aglomerados abertos e fizeram a comparação das abundâncias de lítio da estrela NGC 4349-127 com as abundâncias das outras três gigantes vermelhas do aglomerado incluídas em tal estudo, e encontraram que a estrela NGC 4349-9 também apresentava uma abundância acima de 1.0 deste elemento. Os autores calcularam também a razão isotópica  $^{12}C/^{13}C$  e as velocidades rotacionais projetadas,  $v \sin i$  a fim de investigar a sobreabundância de Li em algumas

das estrelas da sua amostra. Como será comentado posteriormente, os autores não conseguem um argumento suficientemente consistente que possa ser considerado “a causa” da sobreabundância de Li nas estrelas que possuem companheiro subestelar na amostra.

Delgado Mena et al. (2016) estudam uma amostra de 67 gigantes vermelhas em 12 diferentes aglomerados, incluindo o aglomerado NGC 4349. Estes autores determinaram, entre outros parâmetros, os mesmos calculados por Carlberg et al. (2016) e encontram tendências semelhantes da abundância de lítio e a razão isotópica de carbono  $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$  das estrelas de NGC 4349, focando no caso da estrela NGC 4349-127. Posteriormente serão comentados os argumentos com que estes autores tentam explicar a abundância anômala de Li desta estrela como uma consequência do “*planetary engulfment scenario*”<sup>1</sup> que a estrela teria experimentado em fases prévias da sua história de nucleossíntese, levando em conta que seu estágio evolutivo não seria a explicação mais consistente desta sobreabundância.

A literatura recente sobre este aglomerado apresenta várias questões ainda em aberto que começaram desde as primeiras pesquisas. Lohmann (1961) fez a primeira análise fotométrica UBV para 206 estrelas do aglomerado, na qual foi estimada sua idade em 0.6 Ganos. Dawson (1978) estuda as gigantes vermelhas de 4 aglomerados abertos incluindo NGC 4349 e encontra valores de avermelhamento  $E(B - V)$  e módulo de distância  $(m - M)_0$  de  $0.30 \pm 0.02$  e  $10.93 \pm 0.36$  respectivamente, em concordância com os reportados por Lohmann (1961). Dawson (1978) destaca o fato do aglomerado estar localizado *essencialmente* no plano galáctico, pelo qual a medida do seu avermelhamento poderia apresentar variações, apesar de se ter uma correlação evidente entre  $E(B - V)$  e a posição do aglomerado, todavia sem verificar faixas escurecidas pela poeira nos atlas

---

<sup>1</sup> A melhor interpretação desta expressão seria “acrecção planetária”. Contudo, será usada a expressão em inglês quando for necessário.

da época (Haffner & Novak, 1969).

Usando fotometria DDO, Dawson (1978) estima a anomalia na abundância de CN, cujo valor permite sugerir que o aglomerado poderia ser levemente mais enriquecido em metais do que as gigantes de campo do tipo K próximas dele. O autor determinou valores de gravidade superficial, temperatura efetiva e massa das 6 estrelas gigantes que estudou em NGC 4349, sugerindo um valor da ordem de  $2.3M_{\odot}$  como representativo da massa das estrelas no ramo gigante do aglomerado, de acordo com sua localização no diagrama cor-magnitude.

Posteriormente, Clariá & Lapasset (1989) fazem um estudo fotométrico das gigantes vermelhas de três aglomerados abertos com idades inferiores a 1 Gano, entre os quais está NGC 4349. As estrelas analisadas foram as mesmas de Dawson (1978) e a metodologia foi similar, obtendo valores de temperatura efetiva e gravidade superficial semelhantes aos reportados em tal estudo, através das mesmas correlações fotométricas. Neste estudo de 1989 surgem várias das questões que ainda motivam interesse sobre este aglomerado, começando pela grande divergência do valor de massa estimado para a estrela NGC 4349-127 ( $1.4M_{\odot}$ ) comparado com o derivado por Dawson (1978) ( $3.31M_{\odot}$ ). Os autores calculam a metalicidade do aglomerado através de três diferentes correlações fotométricas, adotando o valor  $[Fe/H] = -0.23 \pm 0.08$ , com o qual aparece como um conjunto de estrelas de baixa metalicidade.

Na análise de isócronas que Clariá & Lapasset (1989) apresentam, fixando limites de massa entre 3 e  $5M_{\odot}$ , eles destacam que duas estrelas do aglomerado (NGC 4349-127 e 174) estão bem sobrepostas na isocrona de  $5M_{\odot}$ , enquanto que as outras 4 estrelas pertenceriam ao clump e aparecem bastante isoladas da isocrona mencionada. Os autores tratam esta inconsistência sugerindo que as temperaturas das estrelas podem ter sido sobre-estimadas ou que houve erros na estimativa teórica das massas, possivelmente causados por ter sido desconsiderada a perda de massa que as estrelas do *clump* teriam

sofrido até atingir a ignição do núcleo de hélio.

Interpretando as motivações do já citado trabalho de Lovis & Mayor (2007), para incluir este aglomerado na sua procura de planetas orbitando estrelas de massa intermediária, os rumos promissores que esta área de pesquisa teve nos primeiros anos da década de 2000 tiveram uma realização concreta com a descoberta de um planeta gigante orbitando a gigante vermelha  $\varepsilon$  Tauri ( $2.7M_{\odot}$ ) no aglomerado das Hyades (Sato et al. 2007). Este aglomerado é uma referência da pesquisa sobre aglomerados abertos, fazendo parte da classificação etária de Mermilliod (1981), na qual as Hyades foi considerado o “representante” do grupo dos aglomerados cuja idade é  $\log t = 8.82$  (0.66 Ganos) dentro do qual o autor incluiu também Praesepe, NGC 2539 e NGC 6633. Mermilliod (1981) incluiu NGC 4349 dentro do grupo etário representado pelo aglomerado aberto NGC 6475, com  $\log t = 8.35$  (0.22 Ganos). Assim, a ideia de encontrar planetas orbitando gigantes vermelhas em outros aglomerados jovens motivou a pesquisa sobre a estrela NGC 4349-127.

Relativo à metalicidade do aglomerado, Santos et al. (2009) oferecem um estudo de 39 gigantes vermelhas e 16 subgigantes em 13 aglomerados abertos da vizinhança solar, incluindo NGC 4349. A finalidade de tal estudo parte da referência às pesquisas sobre a relação entre a metalicidade dos aglomerados e a probabilidade de encontrar planetas gigantes ao redor de estrelas. Pasquini et al. (2007) apresentam argumentos para questionar a validade da aparente correlação entre uma alta metalicidade *versus* uma alta probabilidade de achar planetas, no que diz respeito às estrelas de massa intermediária, colocando a massa estelar em destaque como um fator que influencia fortemente os processos de formação planetária, como também sugerem Hekker & Meléndez (2007).

Santos et al. (2009) examinam as estrelas gigantes NGC 4349-5, 127 e 168, determinando seus parâmetros atmosféricos e adotando uma média da metalicidade do aglomerado de  $-0.12 \pm 0.06$ , destacando que este aglomerado tem a menor metalicidade dentre

os estudados, porém possuindo as estrelas de maior massa da amostra ( $3.9M_{\odot}$ ). Os autores comparam estes achados com os correspondentes ao aglomerado NGC 2423, cujas gigantes são menos massivas ( $2.4M_{\odot}$ ) e uma maior metalicidade ( $0.14\pm 0.06$ ) e sugerem que o excesso de massa pode ser uma compensação da baixa metalidade no caso das gigantes de NGC 4349. Os autores também se referem ao fato das estrelas NGC 2423-3 e NGC 4349-127 serem as mais frias da amostra e as de menor metalicidade dos seus respectivos aglomerados. Esta observação é apresentada com ressalva pelos autores, citando os erros sistemáticos na derivação da metalicidade de estrelas frias, relacionados com o *blending* das linhas, e insistindo na conveniência de estudar a metalicidade de uma amostra maior de estrelas frias.

Posteriormente, Majaess et al. (2012) focaram na grande dispersão nos valores de distância achados na literatura para vários aglomerados, entre eles NGC 4349, cuja distância e idade aparecem reportadas na literatura com valores espalhados entre 0.9-2.2 kpc e 0.2-0.6 Ganos, respectivamente. Os autores desenvolvem uma síntese dos fatos “históricos e contraditórios” da pesquisa sobre a distância e a fotometria do aglomerado. Kholopov (1956) e Kraft (1957) sugeriam que a cefeida *R Cru* pertenceria a NGC 4349. Lohmann (1961) calculou uma distância de 1700 pc e posteriormente Fernie (1963) consegue estimar uma distância de 900 pc e um excesso de cor  $E(B - V) = 0.31$ , descartando a associação de *R Cru* com o aglomerado. Lotkin & Matkin (1994) obtiveram valores de distância e avermelhamento de 2176 pc e  $E(B - V) = 0.384$ , e estes resultados aparecem reportados como os valores de referência na página do aglomerado na base de dados WEBDA (<https://www.univie.ac.at/webda>).

Majaess et al. (2012) utilizam o trabalho de Straižys & Laugalys (2008), que fizeram um estudo fotométrico de gigantes vermelhas do *clump* localizadas dentro ou atrás de regiões densas dos braços da galáxia, através de 26 áreas da Vía Láctea, obtendo diagramas  $(J - H)$  versus  $(H - K_S)$  e valores da razão  $\frac{E(J-H)}{E(H-K_S)}$  para estrelas com valores de extinção  $A_V < 12$  mag. A partir de tais resultados, Majaess et al. (2012)

determinam um excesso de cor  $E(J - H) = 0.09 \pm 0.02$  para o aglomerado NGC 4349 com base nas observações de Lohmann (1961) e uma nova fotometria UBV, através das quais obtiveram um conjunto de calibrações que permitem corrigir a fotometria BV derivada desse estudo

$$(B - V) = (1.02 \pm 0.02) \times (B - V)_{L61} - (0.02 \pm 0.02) \quad (2.1)$$

$$V = (-0.015 \pm 0.03) \times (B - V)_{L61} + (0.06 \pm 0.02) + V_{L61} \quad (2.2)$$

Com base em seu estudo fotométrico, Majaess et al. (2012) concluem que o aglomerado NGC 4349 apresenta um excesso de cor  $E(B - V) = 0.32 \pm 0.03$ , uma distância  $d = 1.63 \pm 0.13$  kpc e uma idade de 0.35 Gano, de acordo com a isocrona de Padova adotada pelos autores (Bonatto et al. 2004). Usando tais resultados, estes autores corrigem os valores de massa da estrela NGC 4349-127 e seu companheiro subestelar (NGC 4349-127b), fixando-os em  $3.1M_{\odot}$  e  $17M_{Jupiter}$ , respectivamente. Estes valores diferem cerca de 20% dos obtidos por Lovis Mayor (2007). Majaess et al. (2012) fornecem mais um argumento para confirmar que a *R Cru* não é membro do aglomerado, notando que o excesso de cor na direção deste é quase o dobro do estimado para a cefeida mencionada.

A tabela 2.1 mostra os valores  $(B - V)$  e  $V$  originais de Lohmann (1961) e os corrigidos de acordo com as equações 2.1 e 2.2. O diagrama cor-magnitude na figura 2.1 está ajustado às correções fotométricas referidas. A história da pesquisa sobre NGC 4349 mostra que há muitas questões em aberto que podem ser abordadas a partir da análise espectroscópica de alta resolução, como será visto em seguida.

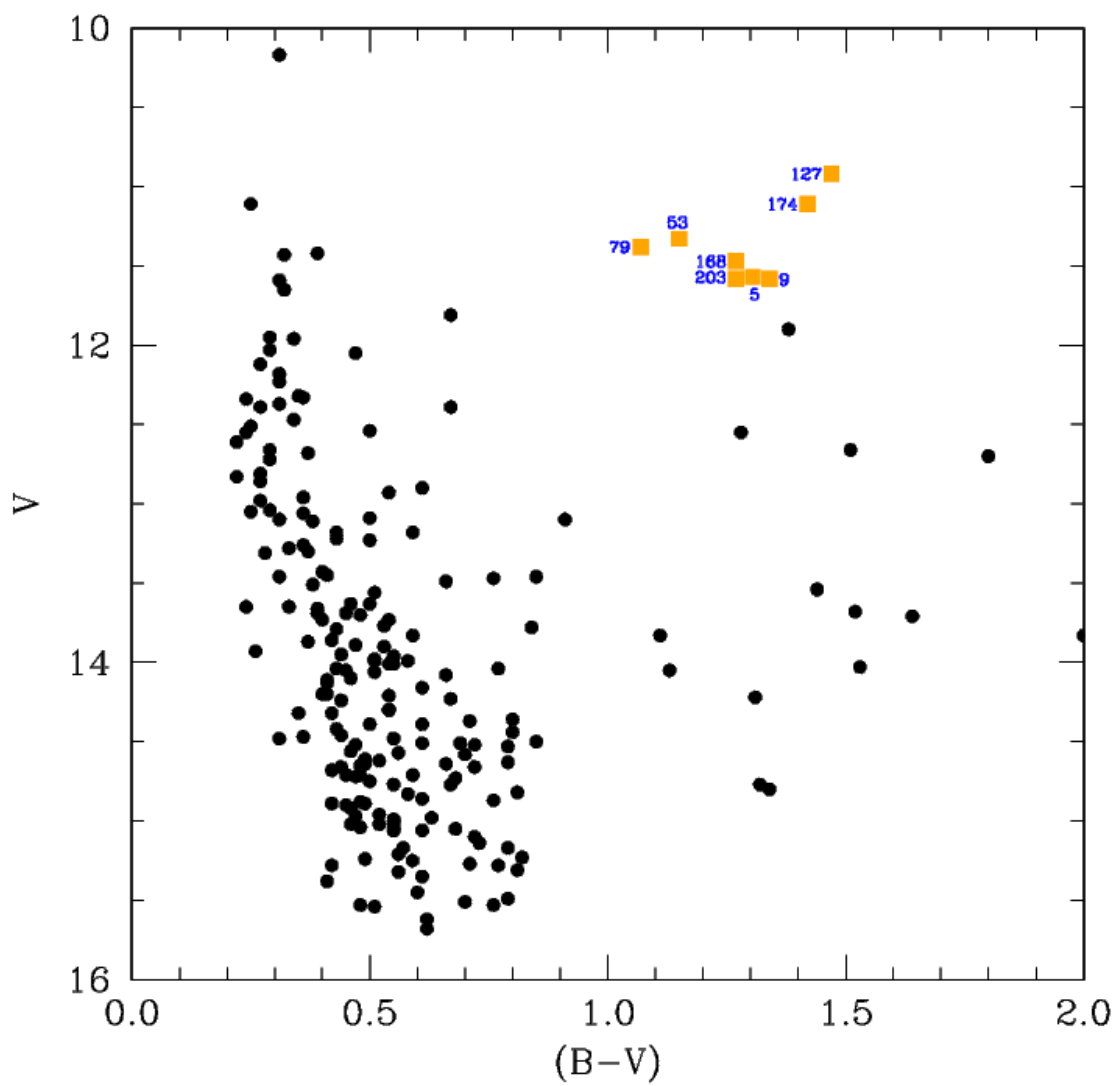


Figura 2.1: Diagrama cor-magnitude do aglomerado aberto NGC 4349, de acordo com as correções de Majaess et al. (2012) da fotometria de Lohmann (1961). Os quadrados em laranja são as gigantes vermelhas do aglomerado



Estrela	$(B - V)_{L61}$	$V_{L61}$	$(B - V)$	$V$	$(B - V)_{M08}$	$V_{M08}$
NGC 4349 - 5	1.28	11.53	1.29	11.57	1.34	11.51
NGC 4349 - 9	1.32	11.54	1.33	11.58	1.33	11.59
NGC 4349 - 53	1.15	11.29	1.15	11.33	1.12	11.33
NGC 4349 - 79	1.07	11.34	1.07	11.38	1.07	11.34
NGC 4349 - 127	1.46	10.88	1.47	10.92	1.56	10.83
NGC 4349 - 168	1.26	11.43	1.27	11.47	1.29	11.48
NGC 4349 - 174	1.41	11.07	1.42	11.11	1.46	10.99
NGC 4349 - 203	1.26	11.53	1.27	11.57	1.29	11.52

Tabela 2.1: Parâmetros fotométricos das gigantes vermelhas de NGC 4349. Nas colunas 2 e 3, os valores fotométricos de Lohmann (1961) e nas colunas 4 e 5 os valores após a calibração de Majaess et al. (2012). Nas colunas 6 e 7, os valores de Mermilliod et al. (2008).

## 2.1 Espectros da amostra

Os espectros de alta resolução estudados nesta tese foram obtidos no telescópio de 2.2m do Observatório Europeu Austral ESO em La Silla, Chile, através do espectrógrafo **FEROS** (Fiberfed extended range optical spectrograph). A resolução espectral do espectrógrafo é 48000, que corresponde a a 2.2 pixels de  $15\mu\text{m}$  para comprimentos de onda entre  $3800\text{ \AA}$  e  $9200\text{ \AA}$  (Kaufer et al. 1999). A amostra de estrelas analisadas foi selecionada do survey de Mermilliod et al. (2008). A razão sinal–ruído ( $S/N$ ) dos espectros estudados foi estimada determinando a variação do fluxo rms do contínuo para diferentes janelas selecionadas do espectro, encontrando-se um intervalo de valores entre 100 e 150.

Dentre os espectros analisados, o mais recente observado é o correspondente à estrela NGC 4349-9, em uma missão observacional em março de 2016, com um tempo de exposição de 3600 segundos. Os espectros das sete estrelas restantes foram observados em 2009 (tabela 2.2). O método de análise dos espectros, visando a determinação dos parâmetros atmosféricos das estrelas e sua metalicidade, consiste na medida das larguras equivalentes ( $W_\lambda$ ) de uma série de linhas correspondentes às transições do ferro neutro (Fe I) e as linhas de ferro ionizado uma vez (Fe II) no espectro visível, usando o

ID	T. exp. [s]	Data de Observação	VR km s <sup>-1</sup>	VR <sup>M</sup> km s <sup>-1</sup>	Binaridade
NGC 4349 - 5	2400	09/03/2009	-10.95±1.32	-12.27±0.23	
NGC 4349 - 9	3600	20/03/2016	-11.18±1.30	-11.75±0.19	
NGC 4349 - 53	1800	10/03/2009	-9.88±1.67	-10.44±0.18	
NGC 4349 - 79	1800	10/03/2009	-5.45±1.18	-12.86±0.13	SB 1O
NGC 4349 - 127	1800	10/03/2009	-11.32±0.97	-12.12±0.25	SP
NGC 4349 - 168	2400	10/03/2009	-11.45±1.25	-13.84±0.36	SB
NGC 4349 - 174	1800	11/03/2009	-11.06±0.65	-11.95±0.19	
NGC 4349 - 203	2400	11/03/2009	-20.88±0.80	-11.38±0.10	SB 1O

Tabela 2.2: Informação dos espectros observados, velocidade radial (VR) e binaridade das gigantes estudadas. Na coluna 5, as velocidades radiais de Mermilliod et al. (2008). Na coluna 6 a binaridade da estrela NGC 4349 - 127 é referida como *SP*: *Sistema planetário*

pacote **IRAF**, particularmente a rotina de tarefas **oned** e especificamente entre estas a tarefa **splot**.

O cálculo da velocidade radial das estrelas foi feito através da medida do deslocamento Doppler  $\Delta\lambda$  das linhas observadas. Usando os valores correspondentes do  $\Delta\lambda$  medidos para as estrelas, obtiveram-se os valores de velocidade radial incluídos na coluna 4 da tabela 2.2. Comparados com os valores dados por Mermilliod et al. (2008), na coluna 5, pode se enxergar a coerência dos resultados de velocidade radial derivados em esta análise respeito à literatura, se destacando as diferenças nas estrelas NGC 4349-79, 168 e 203, consistentes com o fato destas estrelas serem as binárias da amostra. Na figura 2.2 se mostra a janela  $\lambda 5195\text{-}5210 \text{ \AA}$  dos espectros das gigantes binárias do aglomerado.

## 2.2 Determinação dos parâmetros atmosféricos estelares

A análise espectroscópica proposta nesta tese parte da hipótese do equilíbrio termodinâmico local (ETL). Esta aproximação se baseia nas leis de Boltzmann e de Saha, para descrever os estados de excitação e ionização do gás, a lei de Maxwell que descreve a

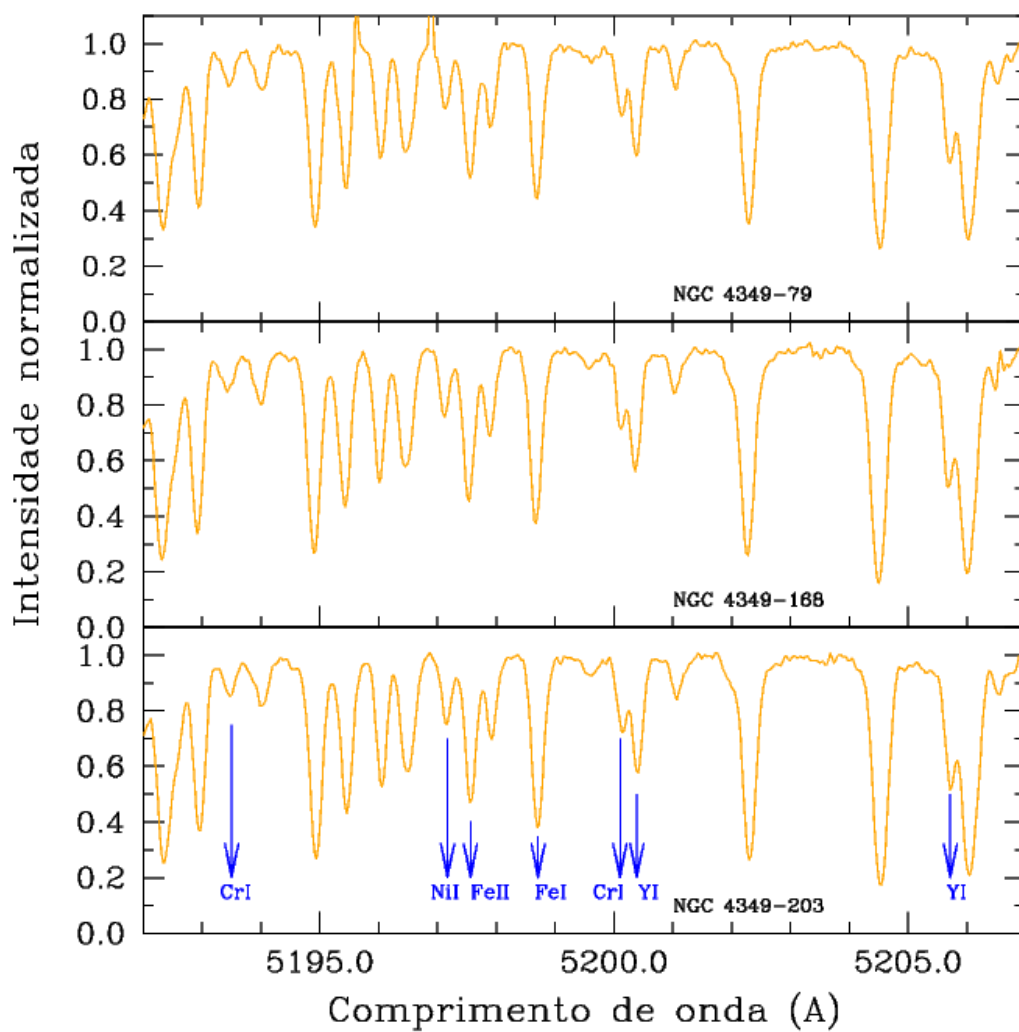


Figura 2.2: Espectros em alta resolução normalizados na região  $\lambda$ 5193-5207 Å para as estrelas binárias NGC 4349-79, 168 e 203 da amostra analisada. São mostradas linhas de níquel, ferro e ítrio.

distribuição de velocidades das partículas do gás e a distribuição de intensidade da radiação, através da lei de Kirchhoff-Planck. Outra das condições para estabelecer o ETL é o equilíbrio hidrostático das camadas atmosféricas. Para fixar os valores de temperatura efetiva ( $T_{ef}$ ), gravidade superficial ( $\log g$ ), metalicidade ( $[Me/H]$ ) e velocidade de microturbulência ( $\xi$ ) [ $\text{km s}^{-1}$ ] das estrelas do presente estudo será adotado um modelo de atmosfera ajustado a essas leis.

As atmosferas estelares possuem uma distribuição de temperatura em função da profundidade ótica e da opacidade, entre outros parâmetros. Os modelos de atmosfera estelar utilizados nesta pesquisa são unidimensionais (1D), considerando que independentemente do tempo e correspondem a atmosferas em equilíbrio hidrostático. Os primeiros modelos atmosféricos assumiam que o fluxo de energia (radiativa e convectiva) era constante através da atmosfera, sendo que o fluxo radiativo estava descrito pela equação de transferência radiativa (sob ETL) e o transporte convectivo através da teoria de comprimentos de mistura (Bohm-Vitense, 1989).

Modelos atmosféricos como os desenvolvidos por Kurucz (1993) são aplicáveis para estrelas de várias metalicidades, incluindo efeitos como o velamento ou sua sobreposição. Modelos tridimensionais (3D) incluem dependência temporal e efeitos hidrodinâmicos, assim como um tratamento menos ideal da equação de estado do gás atmosférico e da opacidade e permitem ter uma medida mais precisa de efeitos como a granulação (Asplund, Grevesse & Sauval, 2009). Nesta tese serão adotados os modelos atmosféricos de Kurucz (1993).

### 2.3 Equilíbrio de ionização entre Fe I e Fe II

A partir do ponto de vista conceitual, assumir o ETL como hipótese de trabalho da análise espectral traz consigo a necessidade de avaliar o equilíbrio de excitação através

da equação de Boltzmann e o equilíbrio de ionização através da equação de Saha. O desenvolvimento numérico desta análise é feito aqui através do código *MOOG* (Snedden, 1973), que permite não apenas selecionar um modelo de atmosfera para um conjunto de linhas de ferro (neutro e uma vez ionizado), mas também calcular posteriormente abundâncias de diferentes espécies químicas, com base em processos de síntese ajustados a espectros de referência fixados graças ao modelo atmosférico adotado.

As listas de linhas do ferro neutro e uma vez ionizado incluem os valores do potencial de excitação  $\chi$  [eV] e o termo  $\log gf$  que inclui o peso estatístico  $g$  da transição e a força de oscilador  $f$  da mesma. A medida da largura equivalente de uma linha espectral está diretamente relacionada com estes parâmetros. Para esta análise foram adotadas as listas de linhas de Fe I e Fe II de Lambert et al. (1996) e Castro et al. (1997) e as larguras medidas nas estrelas estudadas podem ser conferidas no Apêndice 4.1.

O algoritmo implementado para selecionar um modelo atmosférico no *MOOG* toma as medidas de largura equivalente correspondentes a uma lista de linhas e, com base nos parâmetros atômicos de cada linha, estabelece a resposta de abundância do conjunto de linhas para um modelo atmosférico adotado, correspondente a um conjunto de valores de teste dos quatro parâmetros atmosféricos. O primeiro destes para ser fixado é a temperatura efetiva através do equilíbrio de excitação, considerando a independência das abundâncias de ferro respeito ao potencial de excitação das linhas. Obtendo uma correlação próxima de zero entre estas grandezas, tem-se o primeiro dos parâmetros determinado. A velocidade de microturbulência  $\xi$  é estabelecida levando em conta a correlação nula entre as abundâncias de ferro e as larguras equivalentes reduzidas do conjunto de linhas ( $W_\lambda/\lambda$ ). O procedimento numérico para tal fim é ilustrado na figura 2.3.

O processo iterativo descrito permite a primeira aproximação aos parâmetros atmosféricos da estrela. Conhecidos  $T_{ef}$  e  $\xi$ , a gravidade superficial pode ser derivada testando val-

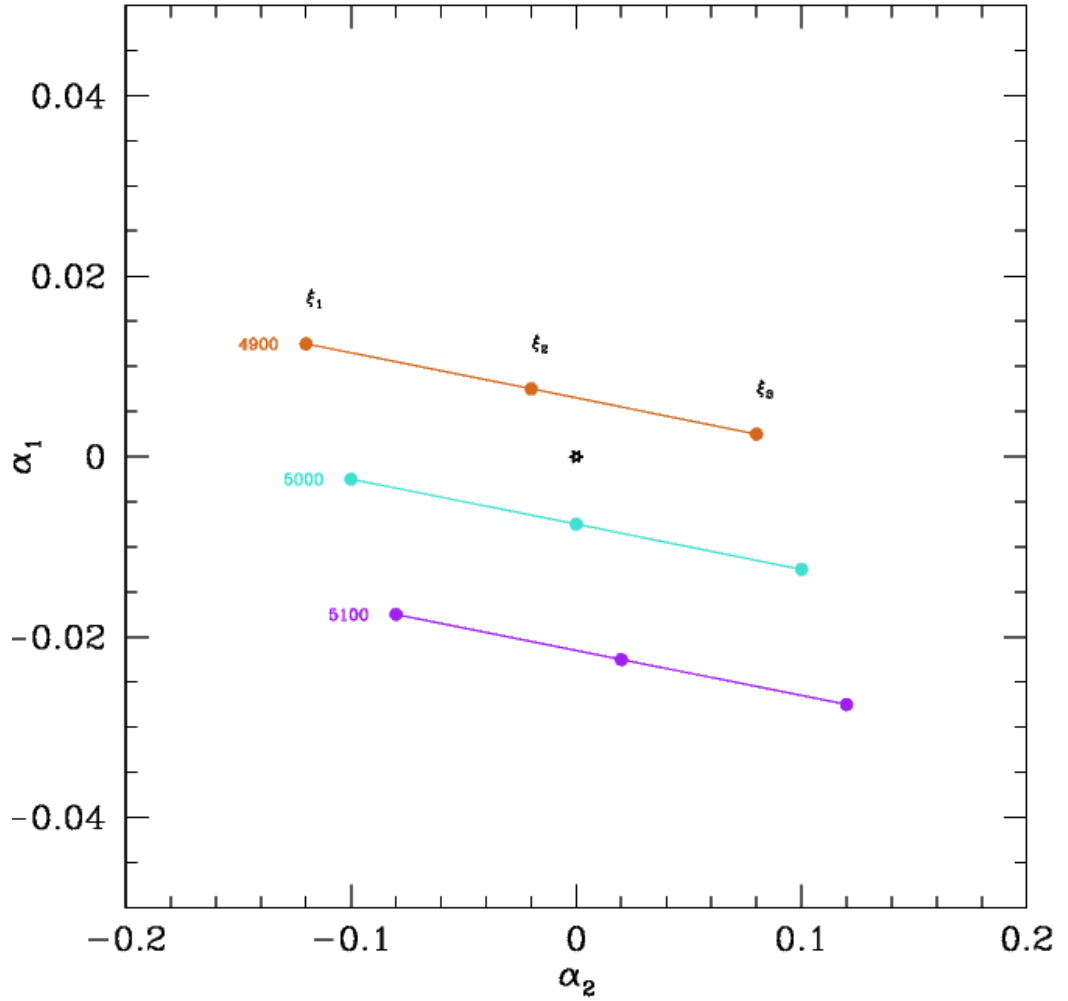


Figura 2.3: Inclinação do gráfico entre abundância de FeI vs. potencial de excitação das linhas medidas ( $\alpha_1$ ) versus a inclinação do gráfico de FeI vs. largura equivalente reduzida  $W_\lambda/\lambda$ , ( $\alpha_2$ ) para a estrela NGC 4349-5. As linhas marrom, turquesa e púrpura correspondem às correlações geradas usando as temperaturas  $T_{ef} = 4900, 5000$  e  $5100$  K, respectivamente. Os pontos indicados com  $\xi_i$  correspondem, aos valores de microturbulência  $\xi = 1.6, 1.5$  e  $1.4$  km s<sup>-1</sup>. O ponto preto indica o zero do gráfico. Os valores obtidos foram  $\alpha_1 = -0.008$  e  $\alpha_2 = 0.001$ , correspondentes a  $T_{ef} = 5000$  K e  $\xi = 1.5$  km s<sup>-1</sup>

Estrela	$T_{ef}$ (K)	$\log g$ (dex)	$\xi$ $\text{km s}^{-1}$	$A(\text{Fe I} \pm \sigma(\#linhas))$	$A(\text{Fe II} \pm \sigma(\#linhas))$
NGC 4349 - 5	5 000	2.30	1.50	$7.51 \pm 0.12$ (46)	$7.54 \pm 0.14$ (11)
NGC 4349 - 9	5 100	2.60	1.70	$7.49 \pm 0.12$ (60)	$7.47 \pm 0.09$ (11)
NGC 4349 - 53	4 800	2.40	1.30	$7.40 \pm 0.12$ (46)	$7.40 \pm 0.10$ (10)
NGC 4349 - 79	4 900	2.00	1.10	$7.41 \pm 0.11$ (48)	$7.40 \pm 0.11$ (11)
NGC 4349 - 127	4 400	1.40	1.50	$7.40 \pm 0.11$ (28)	$7.40 \pm 0.09$ (09)
NGC 4349 - 168	5 000	2.30	1.60	$7.43 \pm 0.11$ (47)	$7.45 \pm 0.11$ (12)
NGC 4349 - 174	4 500	1.50	1.50	$7.30 \pm 0.12$ (41)	$7.31 \pm 0.09$ (10)
NGC 4349 - 203	5 000	2.10	1.60	$7.38 \pm 0.09$ (48)	$7.37 \pm 0.10$ (10)

Tabela 2.3: Parâmetros atmosféricos obtidos ( $T_{ef}$ ,  $\log g$ ,  $\xi$  e metalicidade) das gigantes vermelhas de NGC 4349. Nas últimas colunas, as abundâncias  $A(Fe)$  de Fe I e Fe II com suas incertezas e o número de linhas usadas.

ores deste parâmetro até obter a igualdade aproximada de abundâncias de Fe I e Fe II, que é a imposição do equilíbrio de ionização. Finalmente, a metalicidade  $[A/H]$  é obtida otimizando a igualdade entre as abundâncias do ferro neutro e o ionizado. O conjunto de parâmetros atmosféricos adotados, incluindo as abundâncias de ferro neutro e ionizado, assim como o número de linhas usadas aparecem na tabela 2.3. O valor de abundância solar do ferro usado como referência é  $Ab(Fe)_{\odot} = 7.52$ , o valor da abundância deste elemento adotada por defeito no código MOOG.

## 2.4 Comparação dos valores obtidos dos parâmetros com a literatura

No começo deste capítulo foi feita uma síntese das pesquisas realizadas sobre o aglomerado NGC 4349, na qual foram mencionados diferentes aspectos da estimativa de parâmetros como a metalicidade ou a temperatura efetiva das gigantes vermelhas do aglomerado. O objetivo da presente seção será comparar os resultados da literatura, em comum com os derivados neste trabalho, mencionando as diferenças nas metodologias empregadas. A comparação de resultados é apresentada na tabela 2.4. A metalicidade, dada como  $[Fe/H] = Ab(Fe) - Ab(Fe)_{\odot}$  e calculada para cada estrela permite obter

que a metalicidade média do aglomerado é  $\langle [Fe/H] \rangle = -0.11 \pm 0.07$ .

Como já foi mencionado, Dawson (1978) derivou seus resultados de  $\log g$  e  $T_{ef}$  usando fotometria DDO (McClure & van der Bergh, 1968), empregada principalmente para estrelas tardias. Os índices de cor DDO permitem obter vários parâmetros de estrelas das classes G e K, entre eles os quatro já calculados na seção 2.3, com base nos cinco filtros do sistema onde se estudam bandas moleculares de CN em cinco comprimentos de onda de referência. A comparação entre parâmetros obtidos através de correlações fotométricas e através de análise espectroscópica já envolve uma incompatibilidade metodológica que poderia explicar as diferenças entre os resultados derivados em cada caso. Contudo, examinando a tabela 2.4 pode-se afirmar que os valores obtidos neste trabalho para as estrelas NGC 4349-5, 9, 127, 168, 174 e 203 são semelhantes aos derivados por Dawson (1978), principalmente no que diz respeito a  $\log g$ , com diferenças inferiores a 0.3 dex. As diferenças em temperatura efetiva não superam os 200 K.

Clariá & Lapasset (1989) determinaram também  $\log g$  e  $T_{ef}$  e a metalicidade média do aglomerado e ainda fornecem a classe espectral da mesma amostra de estrelas de NGC 4349 analisada por Dawson (1978). Os autores fazem um estudo comparativo incluindo mais dois aglomerados abertos, NGC 5316 e NGC 6494, com base em três sistemas fotométricos: UBV, DDO e Washington (Canterna, 1976). Sobre este último, fundamentado na análise de 4 bandas espectrais, se destaca a vantagem que oferece tal filtragem para obter metalicidade e temperaturas efetivas de estrelas frias e/ou avermelhadas principalmente de tipo G. O valor de metalicidade estimado nesta tese,  $\langle [Fe/H] \rangle = -0.11$ , é superior ao derivado pelos autores, calculado como valor médio dos obtidos usando os três sistemas fotométricos,  $\langle [Fe/H] \rangle = -0.23 \pm 0.08$ , embora seja possível considerar ambos os valores próximos, considerando o tamanho das suas incertezas.

No caso dos parâmetros derivados por Clariá & Lapasset (1989), na média dos resultados



estimados para cada filtro observa-se na tabela 2.4 também grande semelhança dos valores calculados neste trabalho e os correspondentes a estes autores, principalmente na temperatura efetiva. Entre os valores de gravidade superficial obtidos por estes autores e obtidos nesta tese há uma diferença máxima de 0.6 dex, que pode ser explicada pelo fato de estarmos comparando valores derivados usando metodologias distintas. Caberia citar por fim os tipos espectrais que estes autores atribuem às estrelas da amostra: NGC 4349-5: G8III, NGC 4349-9: G5/8III, NGC 4349-127: K1II, NGC 4349-168: G8II, NGC 4349-174: K0II e NGC 4349-203: G5II.

No seu trabalho sobre este aglomerado, Lovis Mayor (2007) usaram os resultados de metalicidade derivados por Piatti et al. (1995), onde se derivaram novas calibrações a partir de fotometria DDO e se estudou o gradiente de metalicidade do plano galáctico para uma amostra de 233 gigantes vermelhas em 63 aglomerados abertos, incluído NGC 4349, para o qual estimaram uma metalicidade de  $\langle [Fe/H] \rangle = -0.12 \pm 0.04$ , bastante semelhante ao valor encontrado nesta tese. Resulta interessante examinar o argumento com que estes autores derivam o valor de metalicidade referido: assumindo que a metalicidade é uma função do raio galactocêntrico  $R_{gc}$ , da altura respeito ao plano galáctico  $\mathbf{Z}$  e da idade,  $[Fe/H] = f(R_{gc}, \mathbf{Z}, idade)$ , os autores fornecem uma correlação para ajustar o gradiente,  $[Fe/H] = (0.58 \pm 0.12) - (0.07 \pm 0.01) \times R_{gc} - (0.34 \pm 0.03) \times |\mathbf{Z}| - (0.0002 \pm 0.0005) \times Idade$ , onde é possível ver que o maior peso da correlação está no primeiro termo e no coeficiente que acompanha à altura  $\mathbf{Z}$ .

Este fato tem um sentido especial, considerando os argumentos apresentados na introdução do capítulo, lembrando a dispersão de valores de distância que mostrava a literatura para o aglomerado. Estes autores estimaram uma distância de 1.70 kpc, bastante próximo do valor reportado por Majaess et al. (2012). Assim, a semelhança entre o valor de metalicidade calculado nessa tese e o reportado por Piatti et al. (1995) ganha um valor adicional quando considerados os argumentos pelos quais adotamos a calibração fotométrica de Majaess et al. (2012).

Os resultados obtidos por Santos et al. (2009) oferecem o interesse de serem os primeiros avaliados por espectroscopia de alta resolução ( $\lambda/\delta\lambda = 50000$ ), observados com o espectrógrafo UVES, incluindo as estrelas NGC 4349-5, 127 e 168. Como foi mencionado no começo deste capítulo, estes autores estudaram a relação entre a metalicidade e a presença de planetas orbitando estrelas gigantes vermelhas de 13 aglomerados abertos. A análise espectroscópica que apresentam é feita com base em duas listas de linhas de ferro dadas por Hekker & Melendez (2007) e Sousa et al. (2008), usando uma rotina computacional baseada nos modelos de atmosfera ETL de Kurucz (1993) e o código ARES (Sousa et al. 2007, 2008). Os autores terminam adotando os resultados dos parâmetros atmosféricos obtidos com a lista de Hekker & Melendez. (2007), relacionados na tabela 2.4, considerando que tal lista é mais adequada para o estudo de estrelas frias G e K.

A comparação com esses resultados sugere discrepâncias principalmente nos valores de gravidade superficial e velocidade de microturbulência, sendo que as maiores diferenças nos valores dos autores e os nossos são 0.54 dex e  $0.31 \text{ km s}^{-1}$ , respectivamente. Como é usual de se advertir, os resultados de análises espectroscópicas baseadas em diferentes listas de parâmetros atômicos podem ser diferentes, como pode ser sugerido neste caso, visando o fato de que a resolução dos espectros usados por Santos et al. (2009) é semelhante à empregada nesta pesquisa.

No que diz respeito a temperatura, as discrepâncias são menores e chama a atenção que a temperatura derivada aqui para a estrela NGC 4349-127 (4400 K) é a menor da amostra, em forma análoga a Santos et al. (2009), que obtêm  $T_{ef} = 4394 \pm 105 \text{ K}$ . Estes autores relacionaram tal situação com o fato desta estrela apresentar a menor metalicidade da amostra por eles analisada,  $[Fe/H] = -0.14 \pm 0.12 \text{ dex}$ , sendo  $-0.11 \pm 0.07$  nosso valor estimado. Contudo, estes autores advertem que relacionar a coincidência da menor temperatura com a menor metalicidade em estrelas com eventos como a presença de objetos subestelares orbitando tais estrelas precisa de mais estudos comparativos.

No nosso caso, com uma amostra maior encontramos a menor metalicidade na estrela NGC 4349-174,  $[Fe/H] = -0.22 \pm 0.12$  dex e cuja temperatura efetiva é 4500 K, aproximadamente igual à calculada para NGC 4349-127 se considerarmos as incertezas típicas nos valores de temperatura efetiva em estrelas frias.

Na literatura se percebe que a estrela NGC 4349-127 tem sido a mais estudada do aglomerado. Tal é o caso de pesquisas como a de Ghezzi et al. (2010), que obteve os valores dos parâmetros incluídos na tabela 2.4, a partir de um espectro observado no mesmo espectrógrafo e com a mesma resolução dos espectros da nossa amostra. A obtenção dos parâmetros foi feita através do código ARES já mencionado, tendo feito a comparação com o procedimento manual utilizado nesta tese. Tal comparação mostrou resultados consistentes em ambos os métodos. Comparando os parâmetros derivados aqui para esta estrela com os de Ghezzi et al. (2010) encontra-se consistência nos valores de temperatura efetiva, mas discrepâncias nos outros parâmetros, que podem ser explicadas como já foi mencionado pela diferença nas listas de linhas adotadas pelos autores.

Mortier et al. (2013) também usaram um espectro da estrela NGC 4349-127 observado com o espectrógrafo FEROS e determinaram seus parâmetros atmosféricos aplicando os modelos atmosféricos de Kurucz (1993), com três listas de linhas espectrais, Hekker & Melendez (2007), Sousa et al. (2008) e Tsantaki et al. (2013), adotando valores diferentes de abundância solar de ferro de referência,  $Ab(Fe)_{\odot} = 7.49$  no caso do primeiro destes artigos e  $Ab(Fe)_{\odot} = 7.47$  para dois restantes. Na tabela 2.4 pode se ver a semelhança dos valores temperatura efetiva derivados aqui com os adotados por estes autores (usando a lista de Tsantaki et al. 2013), com pequenas diferenças em  $\log g$  (inferior 0.2 dex) e  $\xi$  (inferior a  $0.34 \text{ km s}^{-1}$ ). No caso de  $[Fe/H]$  é possível considerar que o valor diferente de referência da metalicidade solar também contribui à diferença observada. Uma das conclusões de Mortier et al. (2013) sugere que os valores de gravidade superficial, microturbulência e metalicidade não experimentam mudanças significativas por

causa do uso de diferentes listas de linhas, embora seja possível atribuir as pequenas diferenças encontradas a este item.

Os trabalhos mencionados apresentam a mesma discussão sobre a metalicidade dos sistemas planeta-estrela hospedeira. No caso de Ghezzi et al. (2010), para uma amostra de 15 estrelas subgigantes e 16 gigantes com companheiros subestelares, que apresentam as maiores massas ( $2M_{\odot} < M < 4M_{\odot}$ ) e as menores metalicidades da amostra, o que garantiria a possibilidade de ter discos protoplanetários com a massa necessária para formar planetas gigantes, no critério dos autores e várias outras referências. No caso de Mortier et al. (2013), com 71 estrelas hospedeiras evoluídas, os autores concluem também que as estrelas hospedeiras subgigantes apresentam alta metalicidade e as mais evoluídas apresentam empobrecimento metálico.

Contudo, sobre este aspecto, Mortier et al. (2013) consideram que a diferença média em metalicidade é estreita ( $\simeq 0.24$  dex). Comparando as estrelas hospedeiras com as que não têm objetos orbitando, os autores encontram uma distribuição de metalicidade plana, sendo mais destacáveis as diferenças em  $\log g$ , com os menores valores no caso das estrelas hospedeiras. Delgado Mena et al. (2016) fornecem estimativas das massas das estrelas do aglomerado, salvo para NGC 4349-79, e mostram que a maior massa estimada corresponde à estrela NGC 4349-127 ( $M = 3.81 \pm 0.23 M_{\odot}$ ), contudo a diferença com respeito à massa calculada para NGC 4349-174 ( $M = 3.81 \pm 0.23 M_{\odot}$ ), a de menor metalicidade do aglomerado (Tabela 2.4), não é significativa atentando para a incerteza que os autores reportam. A discussão sobre a possível relação entre a massa e a metalicidade precisa ainda de mais estudos com amostras amplas de estrelas hospedeiras novas para ter argumentos conclusivos.

Carlberg et al. (2016) no seu estudo sobre o lítio em estrelas hospedeiras de aglomerados abertos determinam os parâmetros estelares para as estrelas NGC 4349-5, 9, 127 e 174, observadas no espectrógrafo *Magellan Inamori Kyocera Echelle* (MIKE) do telescópio

Estrela	$T_{\text{eff}}$ (K)	$\log g$ (dex)	$\xi$ $\text{km s}^{-1}$	$[\text{Fe I}/\text{H}] \pm \sigma$	Ref.
NGC 4349 - 5	5 000	2.30	1.50	$-0.01 \pm 0.12$ (46)	1
NGC 4349 - 5	5 166	3.16	2.24	$-0.08 \pm 0.07$ (120)	2
NGC 4349 - 5	5 030	2.50	1.62	$-0.06 \pm 0.10$ (72)	3
NGC 4349 - 5	4 970	2.54	1.69	$-0.09 \pm 0.12$ (16)	6
NGC 4349 - 5	5 000	2.00	—	—	7
NGC 4349 - 5	4 850	2.20	—	—	8
NGC 4349 - 9	5 100	2.80	1.70	$-0.03 \pm 0.12$ (60)	1
NGC 4349 - 9	5 382	3.95	2.52	$-0.08 \pm 0.10$ (120)	2
NGC 4349 - 9	4 960	2.90	1.53	$-0.18 \pm 0.11$ (72)	3
NGC 4349 - 9	5 110	3.07	—	—	7
NGC 4349 - 9	4 900	3.16	—	—	8
NGC 4349 - 53	4 800	2.40	1.30	$-0.12 \pm 0.12$ (46)	1
NGC 4349 - 53	4 880	2.66	1.49	$-0.11 \pm 0.03$ (120)	2
NGC 4349 - 79	4 900	2.00	1.10	$-0.11 \pm 0.11$ (48)	1
NGC 4349 - 127	4 400	1.40	1.50	$-0.12 \pm 0.11$ (28)	1
NGC 4349 - 127	4 503	1.99	1.77	$-0.13 \pm 0.04$ (120)	2
NGC 4349 - 127	4 370	1.70	1.70	$-0.20 \pm 0.11$ (72)	3
NGC 4349 - 127	5 030	1.64	1.84	$-0.25 \pm 0.06$ (72)	4
NGC 4349 - 127	4 519	1.92	2.08	$-0.21 \pm 0.12$ (46)	5
NGC 4349 - 127	4 394	1.91	1.81	$-0.14 \pm 0.12$ (16)	6
NGC 4349 - 127	4 550	1.50	—	—	7
NGC 4349 - 127	4 900	2.30	—	—	8
NGC 4349 - 168	5 000	2.30	1.60	$-0.09 \pm 0.11$ (47)	1
NGC 4349 - 168	5 186	2.93	1.95	$-0.01 \pm 0.05$ (120)	2
NGC 4349 - 168	5 092	2.76	1.75	$-0.00 \pm 0.08$ (16)	6
NGC 4349 - 168	5 050	2.00	—	—	7
NGC 4349 - 168	4 850	2.50	—	—	8
NGC 4349 - 174	4 500	1.50	1.50	$-0.22 \pm 0.12$ (41)	1
NGC 4349 - 174	4 676	2.25	1.85	$-0.15 \pm 0.06$ (120)	2
NGC 4349 - 174	4 570	2.05	1.69	$-0.15 \pm 0.11$ (72)	3
NGC 4349 - 174	4 710	1.90	—	—	7
NGC 4349 - 174	4 540	1.80	—	—	8
NGC 4349 - 203	5 000	2.10	1.60	$-0.14 \pm 0.09$ (48)	1
NGC 4349 - 203	5 271	3.35	2.01	$0.04 \pm 0.06$ (120)	2
NGC 4349 - 203	5 230	1.80	—	—	7
NGC 4349 - 203	5 600	2.00	—	—	8

Tabela 2.4: Parâmetros atmosféricos das gigantes vermelhas de NGC 4349, comparados com outros valores reportados na literatura. 1: Este trabalho, 2: Delgado Mena et al. (2016); 3: Carlberg et al. (2016); 4: Mortier et al. (2013); 5: Ghezzi et al. (2010); 6: Santos et al. (2009) ; 7: Clariá & Lapasset (1989) ; 8: Dawson (1978)

Magellan (6.5 m) de Las Campanas (Chile) com uma resolução de 44000. Os parâmetros foram derivados através do MOOG (Snedden 1973) e os modelos atmosféricos MARCS (Gustafsson et al. 2008; Plez 2008). Os autores determinaram uma metalicidade média do aglomerado de  $\langle [Fe/H] \rangle = -0.15 \pm 0.06$  dex, consistente com o que foi determinado nesta tese e valores de parâmetros atmosféricos bastante próximos, considerando as incertezas associadas, como se mostra na tabela 2.4.

Finalmente, Delgado Mena et al. (2016), também investigando o lítio em aglomerados abertos utilizam espectros de resolução 115000 observados através do espectrógrafo HARPS do telescópio de 3.6 m do ESO para derivar os parâmetros das gigantes vermelhas já mencionadas. Os autores utilizam o código ARES2 (Sousa et al. 2015), a lista de linhas de Tsantaki et al. (2013), os modelos atmosféricos de Kurucz (1993) e o código MOOG para obter os valores de  $T_{ef}$ ,  $\log g$ ,  $\xi$  e  $[Fe/H]$  que aparecem na tabela 2.4. A comparação dos resultados mostra uma aceitável coincidência nos valores de temperatura, com diferenças inferiores a 270 K, e a metalicidade, com diferenças inferiores a  $\pm 0.1$ . No que diz respeito à microturbulência e à gravidade superficial as discrepâncias são maiores. Os autores fazem uma consideração da consistência dos seus resultados em comparação com a literatura, e aproveitando o ajuste de isócronas de PARSEC v1.3 (Bressan et al. 2012), adotam para suas análises posteriores os valores de  $\log g$  derivados das isócronas correspondentes aos aglomerados da amostra que analisaram.

Em síntese, os valores derivados para os parâmetros atmosféricos das gigantes de NGC 4349 são confiáveis, na medida que não mostram grandes discrepâncias com resultados prévios da literatura, se destacando o fato de que estes são os primeiros derivados para a gigante binária NGC 4349-79.

## 2.5 Gravidade superficial espectroscópica *versus* Gravidade evolutiva

De acordo com a discussão apresentada sobre a definição da distância e avermelhamento do aglomerado NGC 4349 e a metalicidade média derivada da análise espectroscópica é possível adotar uma curva isócrona que represente a evolução do aglomerado. Na figura 2.4, usando as isócronas de PARSEC (PARSEC release v1.2S + COLIBRI release PR16, Marigo et al. 2017) com a metalicidade  $\langle [Fe/H] \rangle = -0.11$  dex, tem-se que o valor da massa do turn-off do aglomerado é  $M_{TO} = 3.15 M_{\odot}$ .

Um teste interessante dos valores dos parâmetros atmosféricos obtidos através da análise espectroscópica é feito através do cálculo da gravidade superficial a partir de parâmetros evolutivos ou a partir da análise da isócrona correspondente ao aglomerado aberto que está sendo estudado. Usando a Lei de Stefan-Boltzmann da radiação de corpo negro para obter uma relação entre  $\log g_{\star}$  e  $T_{ef}$  e considerando parâmetros como a massa do turn-off do aglomerado  $M_{TO}$ , a correção bolométrica BC, a extinção visual  $A_V$  e distância do aglomerado,  $r$  (kpc), é derivada a equação

$$\log g_{\star} = \log(M_{TO}/M_{\odot}) + 0.4(V - A_V + BC) + 4 \log T_{ef} - 2 \log r - 16.5 \quad (2.3)$$

Sendo  $T_{ef}$  a temperatura efetiva e  $V$  a magnitude aparente de cada estrela. As correções bolométricas para as estrelas foram tomadas de Alonso et al. (1999). A aplicação das correções correspondentes e os valores respectivos na equação 2.3 permite obter os valores mostrados na tabela 2.5

Na comparação feita na tabela 2.5 pode se ver uma tendência diferente à mostrada por Delgado Mena et al. (2016), que encontram valores de  $\log g$  altos para as estrelas do aglomerado NGC 4349 (excluindo à estrela NGC 4349-79), atingindo uma média de

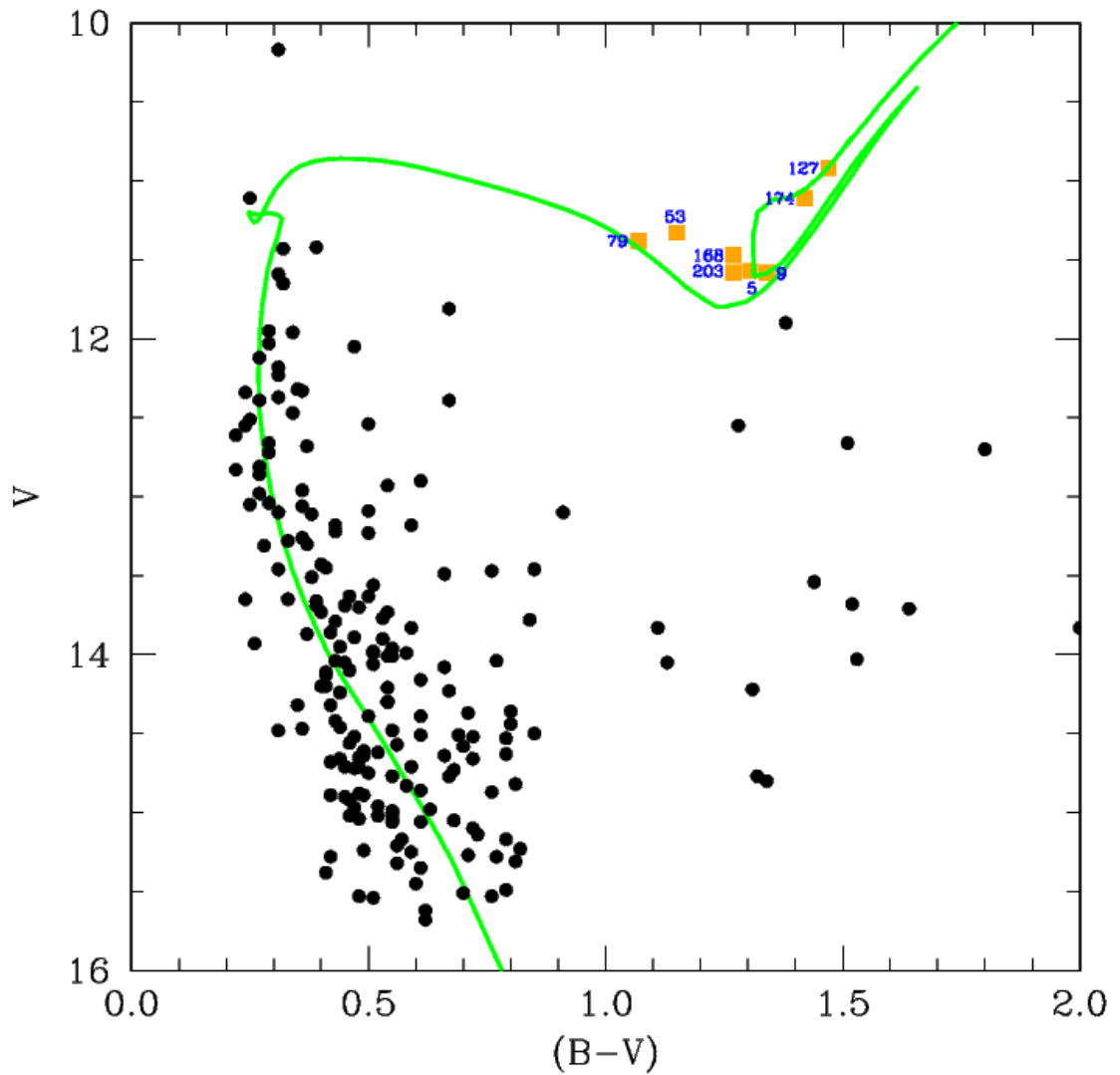


Figura 2.4: Isócrona adotada do PARSEC (Marigo et al. (2017) para o aglomerado NGC 4349 em função da metalicidade média derivada das gigantes vermelhas para uma distância  $d = 1.63$  kpc,  $idade = 0.35$  Gano e a extinção visual  $A_V = 0.99$ . Os quadrados cheios em laranja representam as gigantes vermelhas do aglomerado. As estrelas anãs do diagrama foram tiradas de Lohmann (1961) e corrigidas de acordo a Majaess et al. (2012)



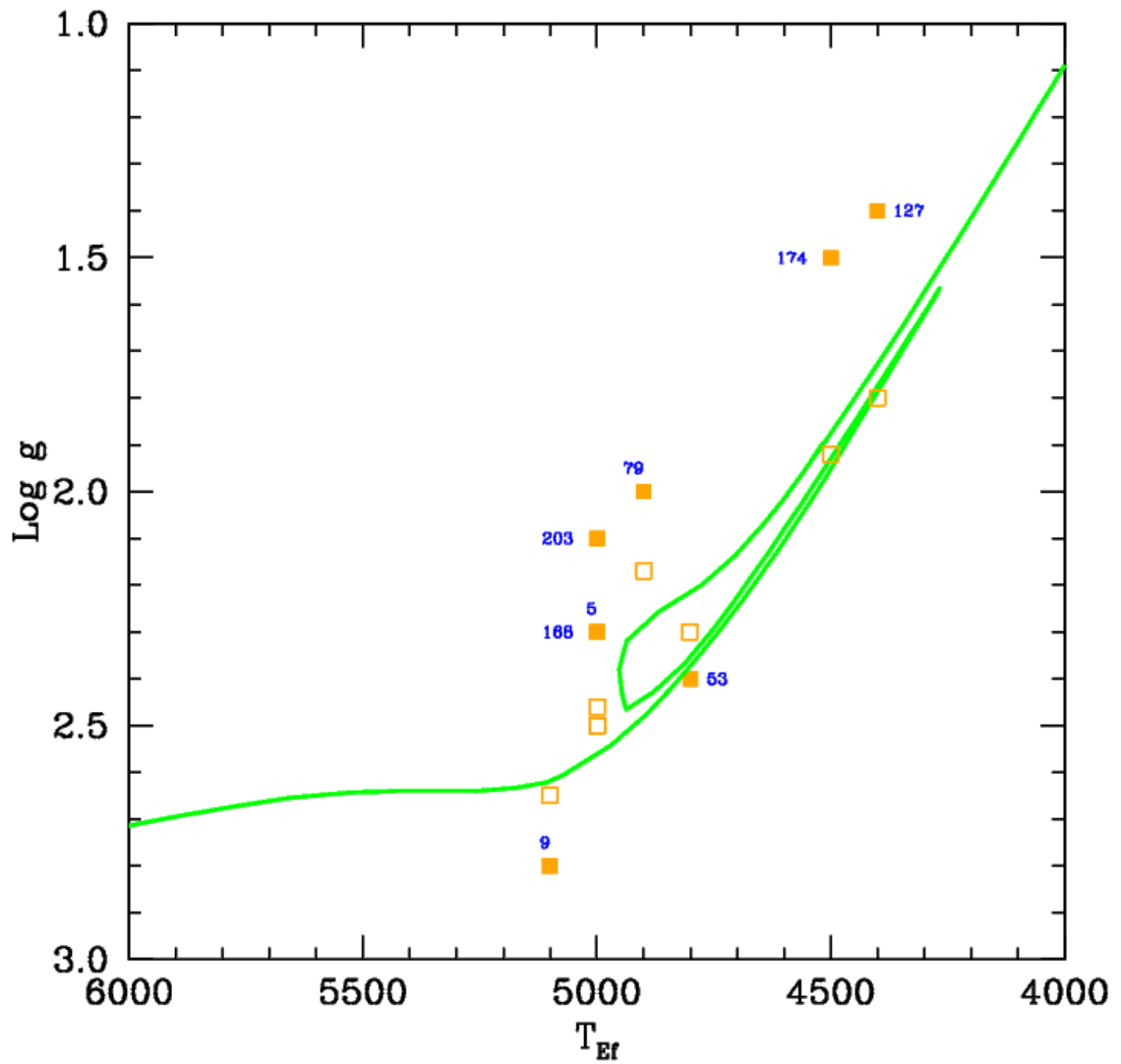


Figura 2.5: Gráfico  $\log g$  versus  $T_{ef}$  da comparação dos valores de gravidade superficial espectroscópica e evolutiva com os correspondentes à isócrona adotada (curva verde) de PARSEC (Marigo et al. 2017). Os quadrados cheios em laranja representam os valores espectroscópicos e os quadrados vazios os valores evolutivos.

Estrela	$T_{\text{eff}}$ (K)	$\log g$ espect.	$\log g$ evol.	$\Delta \log g$
NGC 4349 - 5	5 000	2.30	2.50	-0.20
NGC 4349 - 9	5 100	2.80	2.65	+0.15
NGC 4349 - 53	4 800	2.40	2.30	+0.10
NGC 4349 - 79	4 900	2.00	2.17	-0.17
NGC 4349 - 127	4 400	1.40	1.80	-0.40
NGC 4349 - 168	5 000	2.30	2.46	-0.16
NGC 4349 - 174	4 500	1.50	1.92	-0.42
NGC 4349 - 203	5 000	2.10	2.50	-0.40

Tabela 2.5: Comparação entre os valores de gravidade superficial espectroscópica e evolutiva.

$2.90 \pm 0.7$  dex. Estes autores adotam para suas análises posteriores os valores fornecidos pelas isócronas de PARSEC v1.3 (Bressan et al. 2012), mais compatíveis com os obtidos nesta pesquisa, com uma diferença média de 0.12 dex. Os valores de  $\log g$  derivados da análise espectroscópica são inferiores aos calculados considerando a equação 2.3, sendo sua diferença média de  $-0.18 \pm 0.22$ . Na figura 2.5 pode se ver que os valores de gravidade evolutiva se assemelham mais aos correspondentes à isocrona adotada. Considerando que o valor padrão da incerteza associada a este parâmetro na literatura é da ordem de  $\pm 0.3$ , e a média da diferença na comparação exposta na tabela 2.5, a figura 2.5 permite afirmar que os valores de  $\log g$  derivados da análise espectroscópica são confiáveis.

Como foi anunciado na seção 1.2, a tabela 2.6 resume os dados dos resultados e informações relevantes discutidos ao longo do Capítulo 2.

Est. #	$(B - V)$	$V$	$VR$ ( $\text{km s}^{-1}$ )	Bin.	$T_{ef}$ (K)	$\log g$ (dex)	$\xi$ ( $\text{km s}^{-1}$ )	$[Fe/H]$ (dex)
5	1.28	11.53	$-10.95 \pm 1.32$		5 000	2.30	1.50	$-0.01 \pm 0.12$
9	1.32	11.54	$-11.18 \pm 1.30$		5 100	2.80	1.70	$-0.03 \pm 0.12$
53	1.15	11.29	$-9.88 \pm 1.67$		4 800	2.40	1.30	$-0.12 \pm 0.12$
79	1.07	11.34	$-5.45 \pm 1.18$	SB 1O	4 900	2.00	1.10	$-0.11 \pm 0.11$
127	1.46	10.88	$-11.32 \pm 0.97$	SP	4 400	1.40	1.50	$-0.12 \pm 0.11$
168	1.26	11.43	$-11.45 \pm 1.25$	SB	5 000	2.30	1.60	$-0.09 \pm 0.11$
174	1.41	11.07	$-11.06 \pm 0.65$		4 500	1.50	1.50	$-0.22 \pm 0.12$
203	1.26	11.53	$-20.88 \pm 0.80$	SB 1O	5 000	2.10	1.60	$-0.14 \pm 0.09$

Tabela 2.6: Informações relevantes e principais resultados derivados no Capítulo 2 para as gigantes vermelhas de NGC 4349

---

## Capítulo **3**

# ANÁLISE E DISCUSSÃO SOBRE AS ABUNDÂNCIAS QUÍMICAS DAS ESTRELAS DE NGC 4349

Dada sua alta resolução, os espectros da amostra oferecem a possibilidade de estudar um número considerável de linhas de absorção, através da medida direta das suas larguras equivalentes, ou aplicando as técnicas de síntese espectral utilizando o código MOOG. Particularmente estas são de interesse no estudo de elementos considerados leves como o lítio, o carbono, o nitrogênio e o oxigênio.

Na seção 2.4 pode ser conferido que na literatura sobre as gigantes vermelhas de NGC 4349 os parâmetros atmosféricos destas estrelas há uma incerteza que varia de um estudo para outro. Um aspecto discutido particularmente sobre a estrela NGC 4349-127 é a eventual relação entre a existência do objeto subestelar e as abundâncias químicas estudadas na sua atmosfera. O estudo comparado dos sistemas estrela hospedeira-objeto subestelar descobertos em aglomerados abertos oferece amplas discussões respeito a relação entre a metalicidade de uma amostra de estrelas e a probabilidade delas serem hospedeiras de planetas, assim como a relação entre tal probabilidade e a massa das estrelas ou seu estágio evolutivo.

As abundâncias de elementos “pesados” como o cálcio ou o silício são testes interessantes para estudar a coerência entre as abundâncias medidas nas estrelas analisadas com as

abundâncias do disco galáctico, o que diz respeito da análise dos aglomerados abertos como componentes da evolução da Galáxia, como foi exposto na seção 1.1. Entretanto, a estimativa de abundâncias de elementos de processos de captura de nêutrons, como o ítrio ou o neodímio fornece dois pontos de vista: As abundâncias destes elementos dizem respeito dos processos evolutivos individuais das estrelas, mas também estão relacionadas com os processos de enriquecimento do meio interestelar em que estas se formaram e os processos que podem influir em tal enriquecimento.

A análise proposta neste capítulo terá cinco componentes: (i) comentário sobre os estudos da metalicidade em aglomerados que possuem estrelas hospedeiras; (ii) a discussão sobre os valores de velocidade rotacional obtidos para as estrelas da amostra; (iii) a derivação das abundâncias dos elementos leves através da metodologia da síntese espectral; (iv) a estimativa de abundâncias dos elementos sódio, magnésio, alumínio, silício, cálcio, titânio, cromo e níquel; (v) a determinação das abundâncias dos elementos itrio, zircônio, lantânio, cério e neodímio, gerados pelo processo-s.

### 3.1 Metalicidade e sistemas planetários de gigantes vermelhas

Os resultados de metalicidade discutidos na seção 2.4 e apresentados na tabela 2.4 mostram coincidência com a literatura, no que diz respeito ser NGC 4349 um aglomerado com uma metalicidade inferior à solar. Apesar do valor médio de metalicidade de  $\langle [Fe/H] \rangle = -0.11$  dex não ser suficiente para afirmar que este aglomerado é pobre em metais, este resultado ganha relevância quando é considerada a estrela NGC 4349-127, hospedeira de um sistema planetário cujo objeto subestelar possui uma massa de  $17M_{Júpiter}$ , que é alta em comparação com a tendência apresentada por outras descobertas de planetas ao redor de gigantes vermelhas, tanto de campo como em aglomerados abertos.

No capítulo 2 foram mencionados alguns tópicos discutidos na literatura sobre os problemas abertos na pesquisa destes sistemas: a frequência de uma estrela ter planetas e a relação desta com a metalicidade dessa hospedeira e a relação entre a massa de tal estrela e a massa do objeto subestelar. As gigantes de NGC 4349 têm massa intermediária ( $M_{TO} = 3.15M_{\odot}$ ) e antes do estudo de Lovis & Mayor (2007) não se tinha notícia de um objeto subestelar orbitando uma estrela com uma tal massa e dentro de um aglomerado tão jovem (0.35 Gano). Vários estudos sobre estrelas hospedeiras de sequência principal como Gonzalez et al. (1997), Santos et al. (2001), Ida & Lin (2004) ou Fischer & Valenti (2005) mostram que tais estrelas apresentam altas metalicidades. Os resultados para sistemas com gigantes hospedeiras não se ajustavam nessa tendência, e ainda mais naquelas de massa intermediária.

Pasquini et al. (2007) propõem uma explicação, assumindo que a metalicidade de uma estrela hospedeira não é uma característica do disco protoplanetário primordial e sim resultado de um processo de *poluição* que inclui a queda de material como planetessimais e núcleos planetários dentro da estrela, aumentando sua metalicidade nas camadas externas. Uma vez começada a evolução da estrela depois da sequência principal, o desenvolvimento das suas envoltórias convectivas favorece a diluição dessa metalicidade excedente, com o qual a estrela hospedeira na fase gigante teria uma metalicidade mais baixa. Esta explicação permitiria também afirmar que a metalicidade das gigantes e a frequência de objetos substelares orbitando estas não têm correlação.

Ghezzi et al. (2010) estudam e comparam as metalicidades de duas amostras de 15 estrelas subgigantes e 16 gigantes hospedeiras de planetas, nas quais obtêm valores dentro das tendências comentadas, com  $\langle [Fe/H] \rangle_{sub} = 0.11$  dex e  $\langle [Fe/H] \rangle_{gig} = -0.06$  dex. Estes autores reforçam na sua análise a argumentação sobre a relação entre a metalicidade e a massa da estrela hospedeira, particularmente no caso das gigantes de massa intermediária, no sentido de que grandes massas de discos protoplanetários podem ter a quantidade crítica de metais necessária para formar planetas gigantes, mesmo

com baixas metalicidades. Na figura 3.1, tomada do artigo citado, são ilustrados estes aspectos: a tendência de baixas metalicidades das gigantes hospedeiras, comparadas com as subgigantes, mas também a ausência de correlação entre o número de gigantes hospedeiras e sua metalicidade, em contraste com a relativa correlação mostrada pelas estrelas anãs. Tal contraste é reiterativo em outros estudos como Mortier et al. (2013) ou Jones et al. (2014).

Sobre a massa estelar da hospedeira como parâmetro da formação planetária, trabalhos como Sato et al. (2007), Niedzielski et al. (2009) e Bowler et al. (2010) reportam descobertas de planetas que mostram uma tendência de massas dos objetos orbitantes superiores a  $1.5M_{Júpiter}$  para estrelas com massas intermediárias e altas, nas quais foi conferida também uma frequente ocorrência de objetos tipo anã marrom. Assim, as estrelas hospedeiras mais massivas teriam maior probabilidade de ter planetas mais massivos. Contudo, fatores como a perda de massa estelar influiriam na construção de um modelo mais preciso da relação entre a massa da estrela e do planeta (Niedzielski et al. 2015).

Dentro das limitações para ter conclusões sobre tais relações, Santos et al. (2009) citam fontes de incerteza no estudo destes tópicos como a lista de linhas espectrais através da qual se determinam a temperatura e metalicidade da estrela hospedeira. Mortier et al. (2013) sugerem que as inconsistências achadas podem obedecer a um viés causado por um maior número de estrelas de baixa metalicidade observados até agora ou mais estrelas de baixa massa com planetas, mais fáceis de estudar.

No que diz respeito às estrelas do aglomerado NGC 4349, pode se afirmar que a estrela hospedeira NGC 4349-127 não apresenta uma metalicidade fora da média da amostra, sendo que a menor metalicidade é a da estrela NGC 4349-174 ( $[Fe/H] = -0.22$  dex). Este fato por si só permitiria concluir que o sistema de NGC4349-127 está dentro da tendência mencionada por Mortier et al. (2013), pois o sistema não apresenta indi-

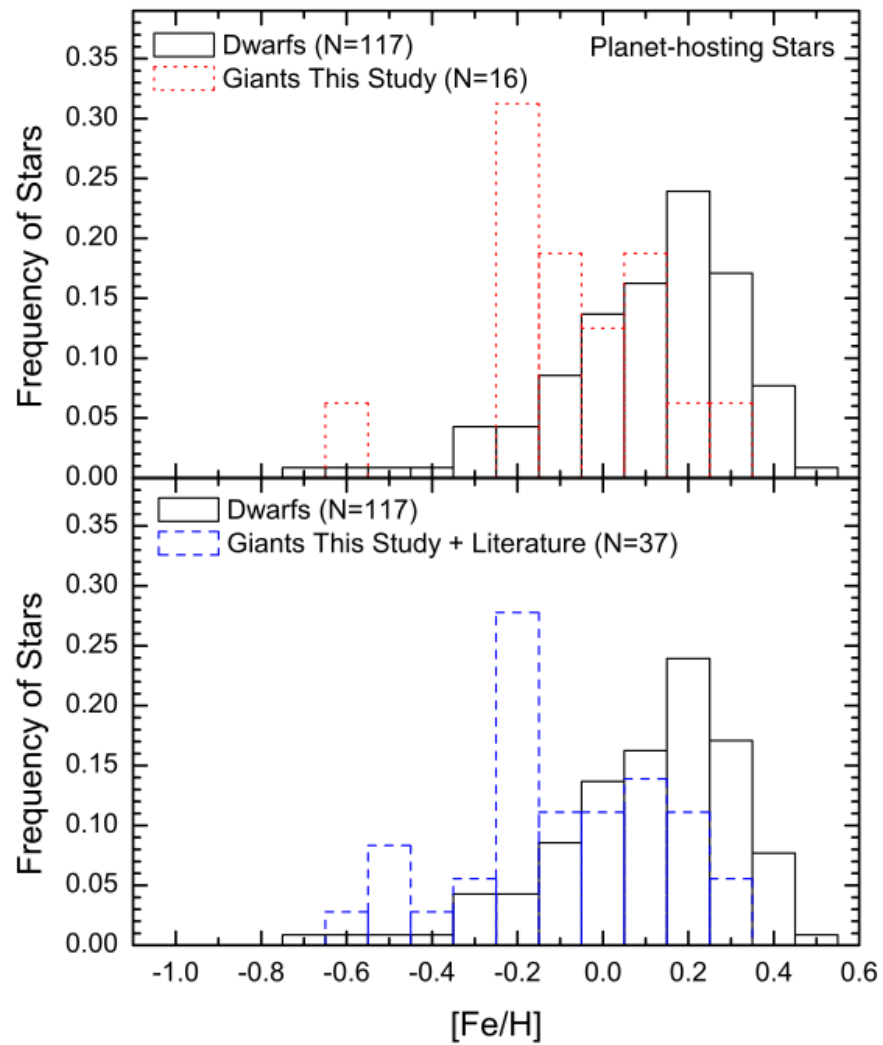


Figura 3.1: Distribuição de metalicidade das gigantes vermelhas e subgigantes analisadas por Ghezzi et al. (2010). No painel superior, a comparação exclusivamente entre as estrelas hospedeiras analisadas pelos autores. O histograma em vermelho corresponde às gigantes hospedeiras e o que está em preto às subgigantes. No painel inferior, a comparação incluindo as gigantes hospedeiras de outros estudos até a época. O histograma azul representa a amostra de gigantes hospedeiras ampliada.



vidualmente um padrão diferente da metalicidade das outras gigantes do aglomerado. Assim, a evolução química destes não tem tido mudanças singulares de metalicidade das que poderiam ter experimentado as outras estrelas analisadas.

O estudo da relação da metalicidade e da massa estelar com a frequência de planetas e a massa destes é um tópico aberto à discussão como foi mencionado. A base de dados de sistemas planetários com gigantes hospedeiras continua crescendo e seguramente essa disponibilidade de dados facilitará abordar com maior robustez estatística outras questões como a comparação entre a frequência de sistemas planetários em aglomerados abertos com a correspondente em estrelas de campo, entre outras.

### 3.2 Velocidade rotacional

A velocidade rotacional das estrelas é uma grandeza importante quando são considerados os processos de mistura das diferentes espécies químicas do interior estelar. A literatura mostra que há menores *yields* dos elementos do processo-s nas estrelas como efeito da alta rotação (Piersanti et al. 2013), também se verifica a tendência de baixas velocidades rotacionais em estrelas gigantes frias, mostrada por Carlberg et al. (2011) com uma amostra de 1287 estrelas de tipos F, G e K, cujos valores  $v \sin i$  são inferiores a  $5 \text{ km s}^{-1}$  para a maior parte das estrelas de tal amostra. O limiar da alta rotação é um ítem discutido por diferentes autores, como Drake et al. (2002) que adotam o valor de  $8 \text{ km s}^{-1}$  ou Massarotti et al. (2008), que assumem que velocidades de  $7 \text{ km s}^{-1}$  podem ser consideradas de alta rotação. Nesta pesquisa usa-se o mesmo valor adotado por Carlberg et al. (2011) de  $10 \text{ km s}^{-1}$ .

Diversos fatores podem alterar a velocidade rotacional de uma estrela: processos convectivos nas camadas externas da estrela (Massarotti et al. 2008), processos de interação gravitacional em sistemas binários (Zamanov et al. 2006, Massarotti et al. 2008, Carl-

berg et al. 2011) e instabilidades magnéticas (Gray 1981, 1982) que podem aumentar este parâmetro. De outra parte Melo et al. (2001) encontram que as estrelas do aglomerado aberto M67 na sua passagem desde o turn-off até o ramo gigante experimentam uma redução sistemática da velocidade de rotação. Assim, as estrelas no ramo gigante têm baixa abundância de lítio, mas autores como Yong et al. (2005) encontram estrelas de alta rotação com alta abundância de lítio, o que sugere uma relação entre a rotação e os processos de mistura que intervêm na produção de lítio nas camadas externas da estrela, sendo que nem todas as estrelas enriquecidas em lítio estudadas na literatura têm alta velocidade de rotação.

Uma hipótese para entender a aparente relação entre alta rotação e alta abundância de lítio é a contaminação por acreção de um objeto subestelar (Alexander 1967, Siess & Livio 1999). Carlberg et al. (2012) estudam uma ampla amostra de estrelas gigantes, assumindo que a sobreabundância de lítio e uma alta razão isotópica  $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$  podem ser indicadores do cenário de *engulfment* citado. A existência de estrelas enriquecidas em lítio sem alta rotação, como no caso da estrela T33 do aglomerado Berkeley 21, analisada por Hill & Pasquini (1999) e as estrelas com alta rotação sem enriquecimento de lítio são restrições que fazem mais complexa a descrição da relação entre estes aspectos, como será comentado posteriormente.

As velocidades rotacionais das estrelas da amostra foram calculadas usando o código MOOG através da síntese espectral de linhas de ferro ou níquel livres dos efeitos de sobreposição como  $\lambda 6108.1 \text{ \AA}$ ,  $\lambda 6151.6 \text{ \AA}$  ou  $\lambda 6301.5 \text{ \AA}$ . A tabela 3.1 fornece os valores de  $v \sin i$  derivados e a comparação destas velocidades com as obtidas por Carlberg et al. (2016) e Delgado Mena et al. (2016).

As velocidades rotacionais das gigantes vermelhas de NGC 4349 mostram uma relativa dispersão, que pode ser conferida na comparação dos valores  $v \sin i$  versus  $T_{ef}$  com os resultados das estrelas analisadas por Carlberg et al. (2011), na figura 3.2. Nesta

Estrela	$v \sin i$ km s <sup>-1</sup>	$T_{\text{ef}}$ K	$v \sin i^{C2016}$ km s <sup>-1</sup>	$v \sin i^{D2016}$ km s <sup>-1</sup>
NGC 4349 - 5	7.30	5 000	4.7	7.96
NGC 4349 - 9	9.20	5 100	7.5	9.97
NGC 4349 - 53	3.20	4 800	—	3.79
NGC 4349 - 79	4.80	4 900	—	—
NGC 4349 - 127	5.80	4 400	<2	6.13
NGC 4349 - 168	6.00	5 000	—	6.50
NGC 4349 - 174	4.40	4 500	<2	4.83
NGC 4349 - 203	6.20	5 000	—	6.47

Tabela 3.1: Velocidades rotacionais projetadas das gigantes vermelhas de NGC 4349 (coluna 2), comparadas com as correspondentes estudadas por Carlberg et al. (2016) e Delgado Mena et al. (2016), nas colunas 4 e 5. Na tabela também se incluem as temperaturas das estrelas.

figura se incluem adicionalmente os valores correspondentes a algumas das gigantes em aglomerados abertos analisadas por Santrich et al. (2013), Delgado Mena et al. (2016) e Peña Suárez et al. (2017). Separando estas estrelas entre aquelas cuja massa é superior a  $2.5M_{\odot}$  e as que tem massa inferior, na figura 3.2 se observa que as estrelas com massas superiores apresentam maior dispersão de velocidade rotacional que aquelas de massa inferior, e uma maior tendência a ter velocidades rotacionais altas.

Na figura 3.3 pode ser conferida a comparação dos efeitos da rotação no alargamento das linhas de absorção dos espectros das estrelas NGC 4349-9, 53 e 127. No painel direito da figura 3.3 foi incluída a comparação da velocidade rotacional de 4 das gigantes do aglomerado NGC 3114 estudadas por Santrich et al. (2013), onde são evidentes os efeitos da alta rotação para a estrela HD 87479 ( $v \sin i = 15 \text{ km s}^{-1}$ ). No caso da estrela NGC 4349-9 não há alargamento do perfil das linhas, como aquela observada no caso da estrela HD 87479. A partir da comparação qualitativa destes espectros da amostra com os analisados por Santrich et al. (2013), pode se ver mais semelhança do espectro da estrela NGC 4349-9 com o correspondente à estrela HD 87833, cuja velocidade de rotação é de  $8 \text{ km s}^{-1}$ .

Sobre a rotação da estrela NGC 4349-9, Carlberg et al. (2016) afirmam que sua posição

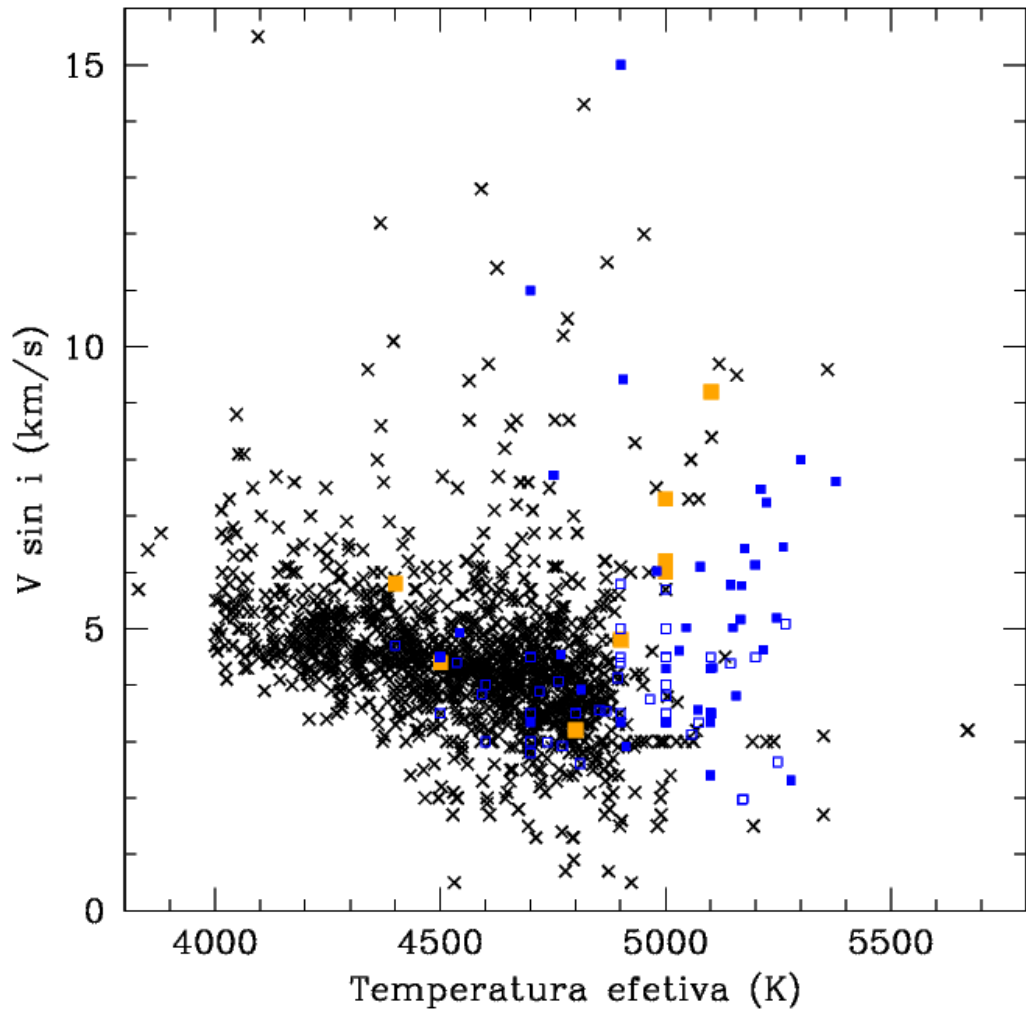


Figura 3.2: Velocidade rotacional projetada  $v \sin i$  como função da temperatura efetiva. As cruces pretas representam as estrelas estudadas por Carlberg et al. (2011). Os quadrados cheios azuis, as gigantes vermelhas com  $M > 2.5 M_{\odot}$  dos aglomerados NGC 3114, IC 2714, NGC 2539, NGC 2360 e NGC 6633. Os quadrados vazios azuis, as estrelas com  $M < 2.5 M_{\odot}$  dos aglomerados IC 4756, NGC 2423, IC 4651 e NGC 2682, do estudo de DM2016 e dos aglomerados NGC 3680 e NGC 5822 estudados por Santrich et al. (2013), DM2016 e Peña Suárez et al. (2017). Os quadrados cheios em laranja representam as gigantes vermelhas do aglomerado NGC 4349.

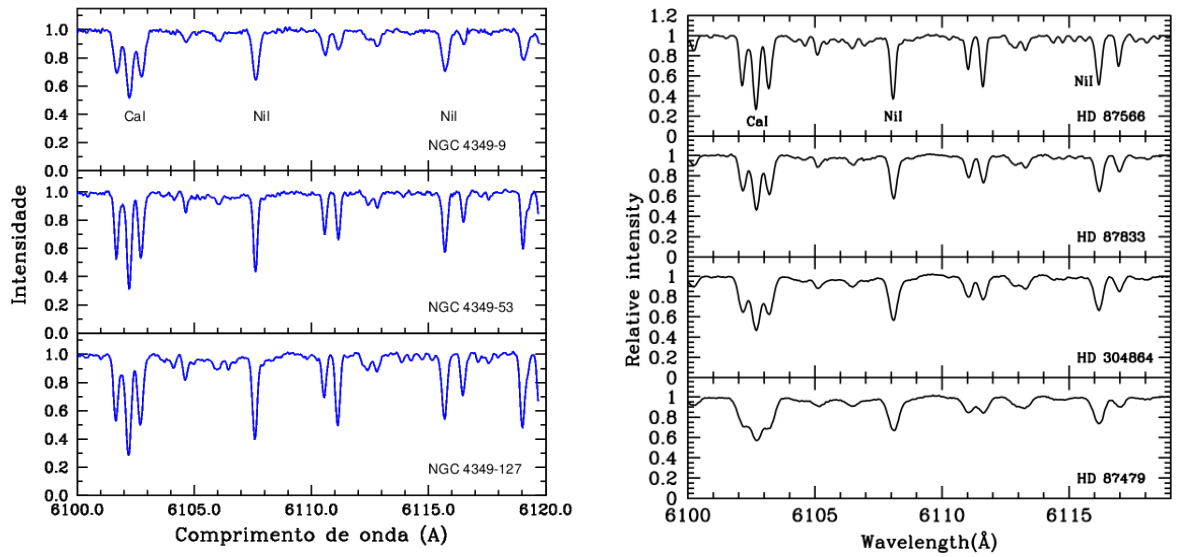


Figura 3.3: Comparação dos espectros normalizados das estrelas NGC 4349-9 ( $v \sin i = 9.2 \text{ km s}^{-1}$ ), 53 ( $v \sin i = 3.2 \text{ km s}^{-1}$ ) e 127 ( $v \sin i = 5.80 \text{ km s}^{-1}$ ) (figura da esquerda) com os espectros de algumas das estrelas analisadas por Santrich et al. (2013), cujas velocidades, na ordem descendente da figura são  $v \sin i = 4.5, 8.0, 11.0$  e  $15 \text{ km s}^{-1}$  (figura da direita).

no diagrama  $T_{ef} - \log g$  (semelhante ao apresentado na figura 2.5) estaria deixando a fase subgigante, e se tratando de estrelas de massa intermediária, que deixam a sequência principal com rotações mais altas do que as estrelas de baixa massa, a aparente alta rotação da estrela NGC 4349-9 está de acordo com as previsões dos modelos padrão da evolução de estrelas semelhantes. O mesmo critério permitiria explicar a velocidade rotacional relativamente alta da estrela NGC 4349-5 ( $7.3 \text{ km s}^{-1}$ ). As estrelas binárias da amostra, NGC 4349-79, 168 e 203 também não apresentam velocidades de rotação discrepantes com às calculadas nas não binárias. Pode se concluir que a rotação das estrelas gigantes de NGC 4349 não mostra anomalias que pudessem indicar a ocorrência de alterações do momento angular das estrelas por causa de interações gravitacionais, tanto associadas à condição de binaridade de três das estrelas, quanto pelas interações referentes a um processo de *engulfment* de um objeto subestelar no passado, no caso da gigante hospedeira NGC 4349-127.

### 3.3 Elementos leves

A síntese espectral foi a técnica usada para determinar as abundâncias dos elementos Li, C, N e O. No caso do lítio foi estudada a linha dupla em  $\lambda 6708 \text{ \AA}$ , usando os parâmetros eletrônicos de Smith et al. (1998) e Hobbs et al. (1999). Para calcular as abundâncias de carbono e nitrogênio foram consideradas as bandas moleculares de  $\text{C}_2$  em  $5086 \text{ \AA}$  e  $5635 \text{ \AA}$  e as linhas da molécula CN entre  $\lambda 8000 - 8020 \text{ \AA}$ , respectivamente. Nesta região, onde acontece a sobreposição de três linhas de  $^{12}\text{CN}$  em  $\lambda 8004 \text{ \AA}$  é também possível derivar a razão isotópica  $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ . Por fim, as abundâncias de oxigênio se obtêm através da síntese da linha proibida [O I]  $\lambda 6300 \text{ \AA}$ . As abundâncias solares de referência neste estudo são tomadas de Grevesse & Sauval (1998).

### 3.3.1 Lítio

O lítio é o elemento mais estudado nas gigantes vermelhas do aglomerado NGC 4349. Carlberg et al. (2012) sugerem que as estrelas gigantes hospedeiras de objetos subestelares podem apresentar altas abundâncias deste elemento e Delgado Mena et al. (2015) encontram duas estrelas enriquecidas em lítio. Posteriormente, Carlberg et al. (2016) estudaram as estrelas NGC 4349-5, 9, 127 e 174, obtendo valores de  $A(Li)$  entre 0.49 e 1.00, como pode ser visto na tabela 3.2, sem incluir as correções de não equilíbrio termodinâmico (NETL), após as quais os valores são superiores. Os autores mostram que a maior abundância de Li corresponde à estrela NGC 4349-9, o que se explicaria afirmando que tal estrela não teria completado ainda a primeira dragagem.

Delgado Mena et al. (2016) estudam uma amostra maior de estrelas de NGC 4349, com o mesmo objetivo de buscar aquelas enriquecidas de lítio. Os autores usaram a mesma técnica de síntese espectral empregada nesta tese e estudaram 7 das 8 gigantes vermelhas do aglomerado NGC 4349. Encontrando resultados semelhantes aos reportados por Carlberg et al. (2016) para as estrelas em comum com tal estudo (ver tabela 3.2), os autores citam alguns resultados da literatura (Charbonnel & Balachandran, 2000; Kumar et al. 2011) que relatam a tendência das estrelas de baixa massa de apresentar alta abundância deste elemento após o *bump* de luminosidade, não sendo contudo uma regra geral.

Os resultados obtidos neste estudo, vistos na tabela 3.2 mostram concordância com a literatura citada. Sobre as estrelas com a maior abundância de lítio, NGC 4349-9, 127 e 168 é importante comentar o valor destas abundâncias do elemento considerando o que foi discutido na seção 3.2 sobre a rotação estelar. Considerando a estrela NGC 4349-9, com o maior valor de abundância de lítio, a rotação e o estágio evolutivo estrela, pode se afirmar em concordância com Carlberg et al. (2016) que sua temperatura a

Estrela	$A(Li)$	$A(Li)_{C2016}$	$A(Li)_{D2016}$
NGC 4349 - 5	0.31	<0.49	<0.45
NGC 4349 - 9	1.31	1.00	$1.48 \pm 0.18$
NGC 4349 - 53	0.00	—	<0.30
NGC 4349 - 79	0.86	—	—
NGC 4349 - 127	1.06	0.94	$1.10 \pm 0.14$
NGC 4349 - 168	0.95	—	$1.12 \pm 0.22$
NGC 4349 - 174	0.65	0.59	$0.79 \pm 0.12$
NGC 4349 - 203	—	—	$1.25 \pm 0.13$
Média	$0.74 \pm 0.44$	$0.76 \pm 0.25$	$0.93 \pm 0.43$

Tabela 3.2: Abundancia de lítio  $A(Li)$  das gigantes vermelhas do aglomerado aberto NGC 4349 derivadas neste estudo (segunda coluna). Na terceira e quarta colunas, as abundâncias de Li fornecidas por Carlberg et al. (2016) e Delgado Mena et al. (2016)

mostra como a estrela “mais quente” das gigantes do aglomerado, e isto significaria que a estrela tem tido uma menor diluição do lítio por se encontrar na fase preliminar da primeira dragagem.

Semelhante explicação poderia ser usada se referindo às estrelas NGC 4349 - 79 e 168, cujas abundâncias de lítio não são muito altas, porém superiores à média do aglomerado. Lembrando que estas estrelas são binárias (SB 10 e SB, na tabela 2.2) poderia se discutir sobre o quanto a binaridade poderia ser um fator a considerar para interpretar as abundâncias de lítio destas estrelas. Da tabela 3.1 se tem que as velocidades de rotação destas estrelas não parecem significativamente afetadas ainda por interações gravitacionais entre as estrelas de tais sistemas binários, portanto não comportariam efeitos de mistura rotacional que gerassem o leve enriquecimento que tais estrelas mostram em lítio.

Na tabela 2.4 pode ser conferida a semelhança evolutiva das estrelas NGC 4349-127 e 174, que são as mais frias e as de menor gravidade superficial. Estas estrelas apresentam baixa rotação, como pode ser conferido na tabela 3.1, e contudo mostram uma diferença expressiva (0.41 dex) na abundância de Li, sendo o destaque para a primeira delas,



uma estrela hospedeira de um objeto subestelar de aproximadamente  $17M_{Júpiter}$  como já foi mencionado. Carlberg et al. (2016) discutem esta dualidade, considerando os dois cenários em que uma delas é uma estrela do ramo gigante assintótico, enquanto a outra ainda se encontra no ramo gigante. Particularmente supondo que NGC 4349-127 seja uma estrela do ramo gigante assintótico, este já seria um argumento suficiente para explicar sua sobreabundância de lítio, de acordo com Charbonnel & Balachandran (2000).

O outro cenário, em que NGC 4349-174 é a estrela mais evoluída dentre as duas, permite citar a hipótese do *engulfment* de um planeta como mecanismo que desencadeia um enriquecimento inesperado deste elemento. Perante uma condição evolutiva “pouco definida” semelhante, Charbonnel & Balachandran (2000) sugerem que é necessário considerar em qualquer caso a ocorrência de um fator adicional que tivesse ativado os mecanismos de mistura que favoreceram uma maior abundância de lítio. Siess & Livio (1999) nos seus modelos de acreção de objetos substelares por parte de gigantes vermelhas mostram a relação estreita entre três condições que seriam indicadores do eventual *engulfment*: alta rotação, aumento na abundância de lítio e incremento da razão isotópica de carbono  $^{12}C/^{13}C$ . Por tanto, esta discussão será complementada posteriormente, quando comentados os resultados desse parâmetro obtidos neste estudo.

### 3.3.2 Carbono, Nitrogênio e Oxigênio

Na síntese espectral feita com os 8 espectros da amostra foi encontrado que o correspondente à estrela NGC 4349-203 apresentava contaminação de linhas telúricas de oxigênio, como se mostra na figura 3.4, o que determinou a exclusão desta da análise de elementos leves. Os resultados apresentados na tabela 3.3 mostram as abundâncias  $[X/Fe]$  dos elementos C, N e O calculadas através da síntese dos sete espectros das gigantes vermelhas de NGC 4349. Salvo no caso dos valores da razão isotópica  $^{12}C/^{13}C$

Estrela	$[C/Fe]$	$[N/Fe]$	$[O/Fe]$
NGC 4349 - 5	-0.29	$0.39 \pm 0.02$	-0.23
NGC 4349 - 9	-0.17	$0.50 \pm 0.08$	-0.14
NGC 4349 - 53	-0.12	$0.47 \pm 0.07$	-0.03
NGC 4349 - 79	-0.35	$0.49 \pm 0.09$	-0.29
NGC 4349 - 127	-0.43	$0.28 \pm 0.08$	-0.46
NGC 4349 - 168	-0.21	$0.39 \pm 0.09$	-0.16
NGC 4349 - 174	-0.32	$0.30 \pm 0.08$	-0.43
Média	$-0.27 \pm 0.11$	$0.42 \pm 0.08$	$-0.25 \pm 0.16$

Tabela 3.3: Razões de abundância  $[X/Fe]$  de elementos C, N e O das gigantes vermelhas do aglomerado aberto NGC 4349.

das estrelas NGC 4349 - 5, 9, 127 e 174, derivados também por Carlberg et al. (2016), pode se afirmar que estes resultados dos elementos leves são os primeiros obtidos para estas estrelas.

Não se tendo referências prévias das abundâncias destes elementos nas gigantes vermelhas de NGC 4349, sua comparação com as tendências já estabelecidas nas estrelas de campo do disco e nas estrelas gigantes de aglomerados com idade e massa do turn-off semelhantes a NGC 4349 têm um valor referencial adicional. Na figura 3.6 é apresentada a comparação das abundâncias dos elementos leves com respeito à metalicidade das estrelas deste estudo com as correspondentes às gigantes vermelhas de campo analisadas por Mishenina et al. (2006) e Luck & Heiter (2007), assim como com as médias de abundância destes elementos das gigantes vermelhas em uma amostra de aglomerados cujas abundâncias dos elementos C, N e O foram obtidas da análise de espectros de alta resolução, com idades inferiores a 2 Ganos e massas de turn off  $M_{TO}$  entre 1.5 e 5  $M_{\odot}$ . A síntese espectral de uma banda molecular de CN na região  $\lambda 8003 \text{ \AA}$ , usada para derivar a abundância de nitrogênio da estrela NGC 4349-174, é ilustrada na figura 3.5.

Da figura 3.6 pode se concluir que as razões de abundâncias  $[X/Fe]$  de nitrogênio

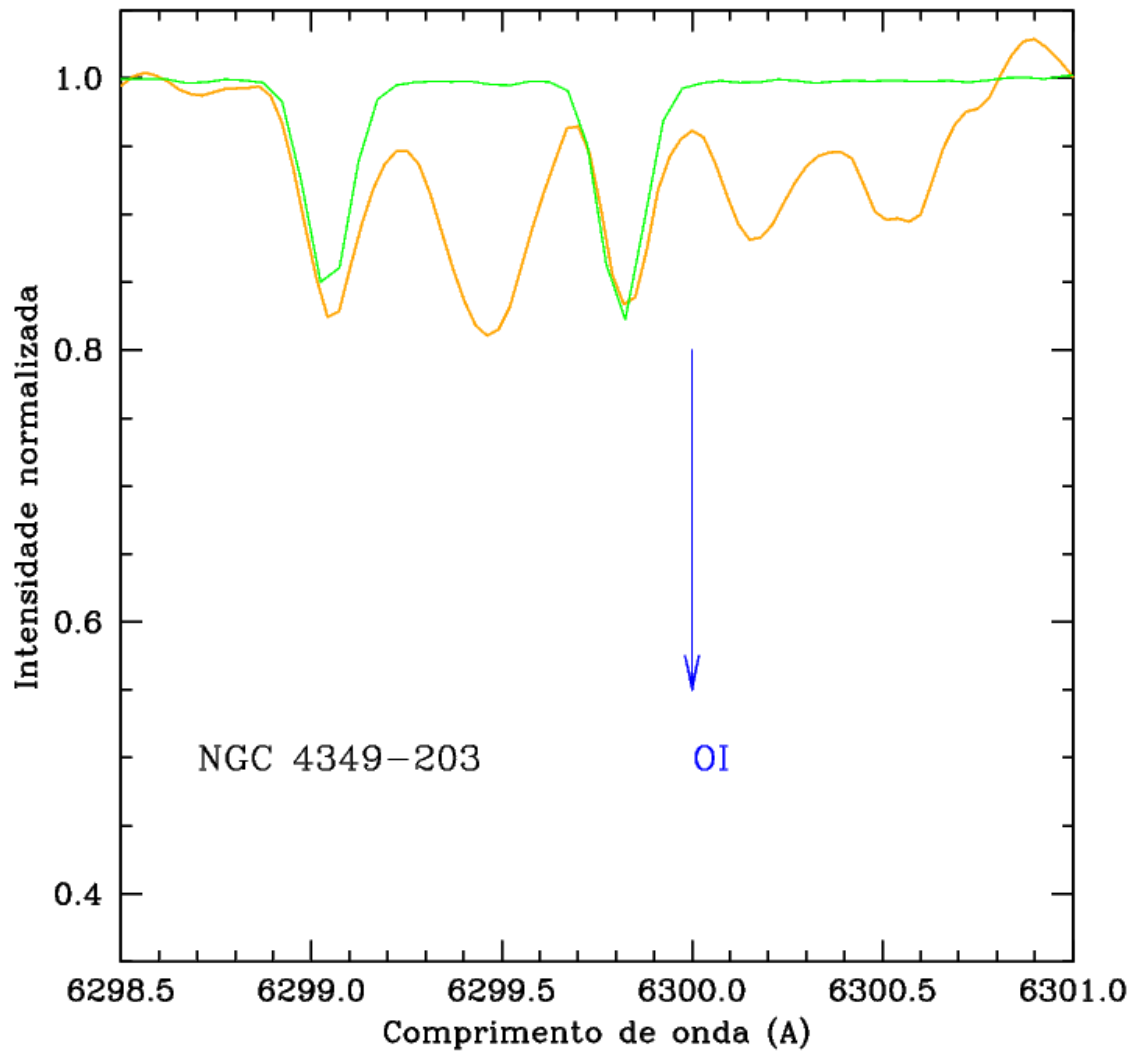


Figura 3.4: Espectro observado da estrela NGC 4349-203 na região próxima da linha proibida de oxigênio  $\lambda 6300 \text{ \AA}$  (curva laranja), comparado com o espectro de uma estrela quente (curva verde), que mostra as linhas de contaminação telúrica.

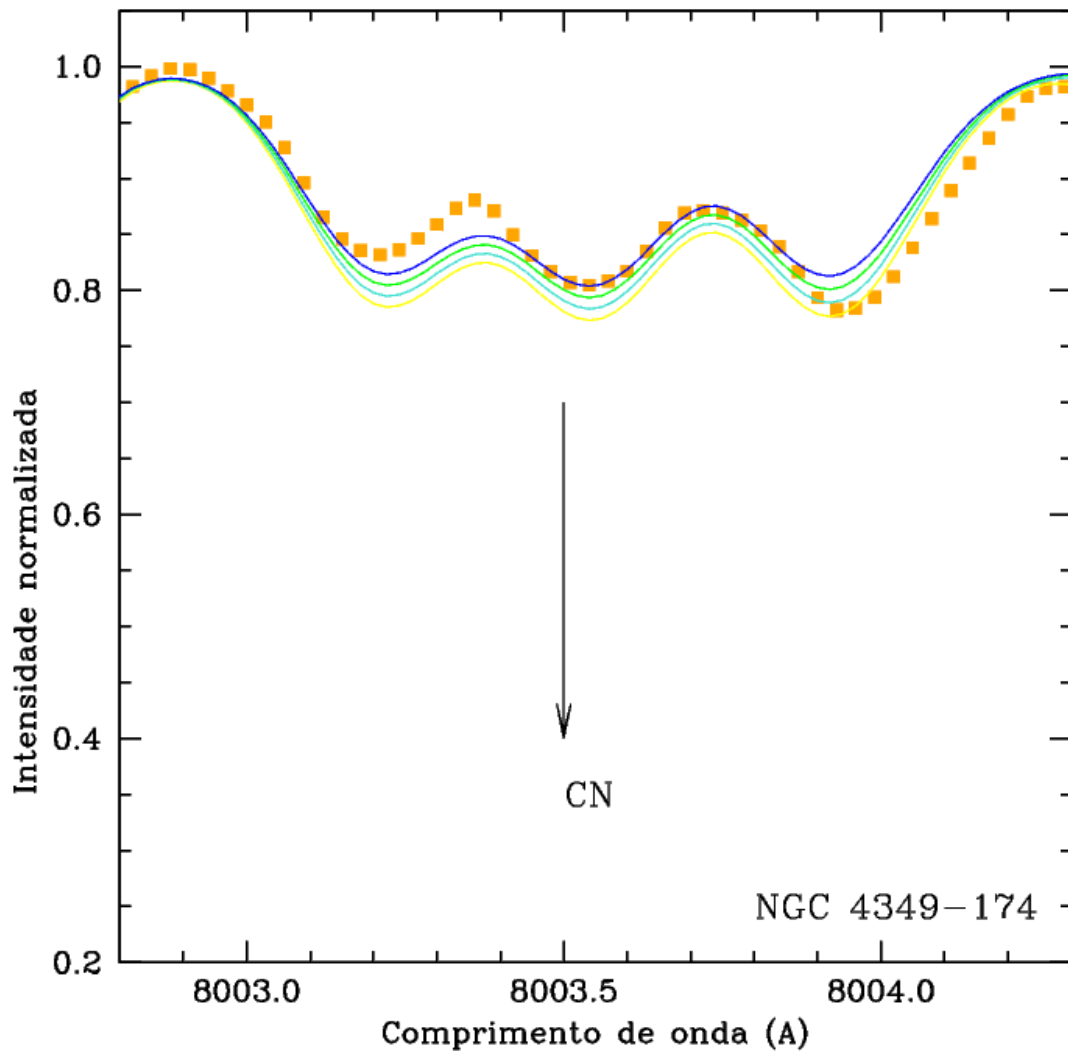


Figura 3.5: Espectro observado da estrela NGC 4349-174 na região  $\lambda 8003 \text{ \AA}$ , que contém uma banda molecular de CN (pontos laranja), e quatro espectros sintéticos para estimar a abundância de nitrogênio, com  $[N/H] = 0.00, 0.05, 0.10$  e  $0.15$  (curvas azul, verde, turquesa e amarelo).

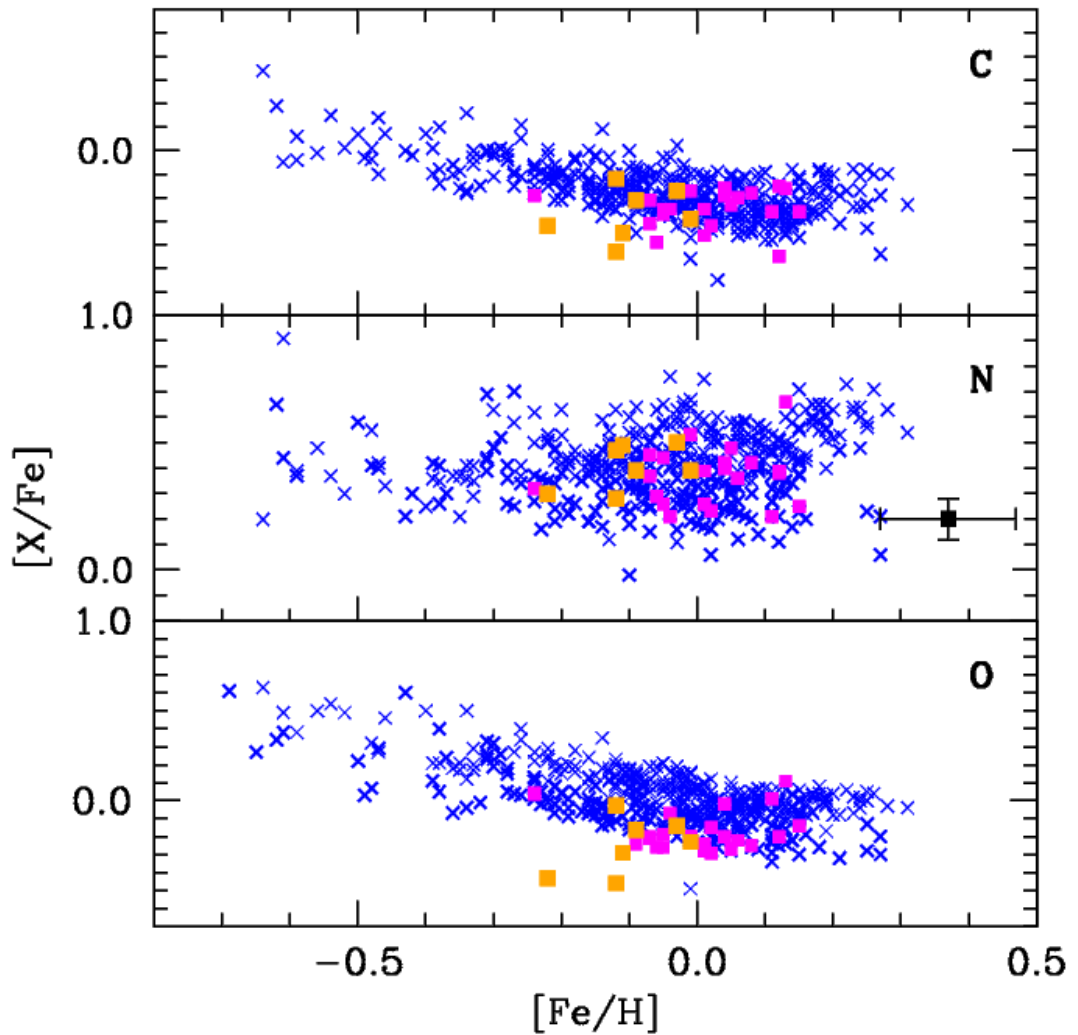


Figura 3.6: Razões de abundância  $[X/Fe]$  versus  $[Fe/H]$ . As gigantes vermelhas de NGC 4349 estão representadas pelos quadrados laranja. As médias dos aglomerados com idade inferior a 2 Gano e  $M_{TO}$  entre  $1.5$  e  $5.0 M_{\odot}$  são os quadrados magenta. As abundâncias das gigantes de campo analisadas por Mishenina et al. (2006) e Luck & Heiter (2007) são as cruzeiras azuis. Aglomerados incluídos: NGC 7789 (Tautvaišiene et al. 2005); IC 4756, NGC 3532, NGC 6281 e NGC 6633 (Smiljanic et al. 2009); NGC 6134 (Mikolaitis et al. 2010); IC 4651 e NGC 2506 (Mikolaitis et al. 2011a, b); NGC 3114 (Santrich et al. 2013); NGC 5316 (Drazdauskas et al. 2016); NGC 6940 e Hyades (Bocek Topcu et al. 2016); NGC 2360, NGC 3680 e NGC 5822 (Peña Suárez et al. 2017, aceito)

das gigantes do aglomerado NGC 4349 estão bastante bem abrangidas dentro das respectivas das estrelas de campo mencionadas e àquelas dos aglomerados abertos considerados, apresentando uma média  $\langle [N/Fe] \rangle = 0.42 \pm 0.08$  dex. No que diz respeito ao carbono e oxigênio, as médias calculadas foram  $\langle [C/Fe] \rangle = -0.27 \pm 0.11$  dex e  $\langle [O/Fe] \rangle = -0.25 \pm 0.16$  dex. Observa-se que há duas estrelas, NGC 4349-127 e 174 com abundâncias relativamente inferiores a tais médias. Os espectros destas estrelas não apresentam nenhuma particularidade que permitisse questionar a validade dos valores obtidos na síntese de tais espectros. Estas estrelas são as mais evoluídas da amostra, de acordo com o diagrama cor magnitude (Figura 2.1). A análise das incertezas nas abundâncias derivadas será feita na seção 3.6. Na figura 3.6 é mostrada a barra de erro só para a abundância de nitrogênio, pelo fato dela ter sido medida usando várias linhas, como foi mencionado, a diferença do carbono e o oxigênio.

Dentre os efeitos esperados na evolução das estrelas de massa intermediária ao longo do ramo gigante, e particularmente após a primeira dragagem está a redução da abundância de  $^{12}\text{C}$  e o enriquecimento em  $^{14}\text{N}$  (Lambert 1981), o que permitiria enxergar com relativa confiança tais resultados dessas estrelas. Contudo, tal afirmação poderia ser feita sobre todas as estrelas analisadas, de acordo com os resultados da tabela 3.3. Mesmo, considerando só uma comparação das médias de C e O do aglomerado com as dos aglomerados selecionados da literatura, já se percebe que são baixas respeito às encontradas nas amostras de Mishenina et al. (2006) e Luck & Heiter (2007), e condizentes com abundâncias de outros aglomerados abertos citados.

Santrich et al. (2013) mostram na análise das gigantes vermelhas do aglomerado aberto NGC 3114 (*idade* = 0.16 Gano,  $M_{TO} = 4.2 M_{\odot}$ ) um padrão de abundâncias dos elementos leves bastante semelhante ao encontrado nesta análise, destacando que tais abundâncias inferiores à média das estrelas de campo podem ser explicadas considerando a tendência crescente das abundâncias de oxigênio com a idade, como afirmam Friel et al. (2010). Assim, as abundâncias determinadas não estão fora do padrão es-

perado para gigantes em aglomerados abertos jovens, como o caso de NGC 4349. Uma ampliação desta discussão sobre a razão  $\langle [O/Fe] \rangle$  será feita posteriormente, quando considerada a relação entre esta e a abundância de sódio.

### 3.3.3 Razão isotópica $^{12}C/^{13}C$ e razões $[N/C]$ , $C/N$ e $C/O$

A análise de abundâncias de elementos leves encontra um bom complemento no estudo de diferentes razões de espécies isotópicas e espécies neutras que são alteradas ao longo da evolução da estrela posterior à sequência principal. Neste estudo foram estimadas as razões  $^{12}C/^{13}C$ ,  $[N/C]$  e  $C/N^1$ , relacionadas fundamentalmente com o estudo do estágio evolutivo e das mudanças na composição química após a primeira dragagem da estrela. A primeira parte desta discussão será referida a estes indicadores. Por outro lado, a razão  $C/O$ , também um indicador da evolução química da estrela, tem importância nos estudos que visam diagnosticar os procesos de formação planetária e a estrutura dos planeta extrasolares (Israelian et al. 2013). O último segmento desta discussão comentará a respeito deste ítem.

Na tabela 3.4 são sintetizados os resultados das razões mencionadas, incluindo também a estimativa da razão isotópica de carbono feita por Carlberg et al. (2016) para 4 das gigantes vermelhas do aglomerado NGC 4349. Estes autores calcularam as abundâncias de lítio e as razões isotópicas de 9 gigantes vermelhas de três aglomerados, sendo uma delas NGC 4349-127. Adicionalmente os autores incluíram as estrelas NGC 4349-5,9 e 174 como estrelas de controle. A comparação dos resultados deste trabalho com os obtidos por estes autores mostra coincidência nos valores da razão isotópica  $^{12}C/^{13}C$  das estrelas em comum em ambos os estudos. A média da razão para NGC 4349 mostra

---

<sup>1</sup> $X/Y$ , a razão de átomos de X respeito aos de Y é calculada na análise de abundâncias como  $X/Y = \frac{10^{(A(X)-12)}}{10^{(A(Y)-12)}}$

Estrela	$[N/C]$	$^{12}C/^{13}C$	$^{12}C/^{13}C^{2016}$	$C/N$	$C/O$
NGC 4349 - 5	0.68	20	20	0.83	0.43
NGC 4349 - 9	0.67	20	20	0.85	0.46
NGC 4349 - 53	0.59	24	—	1.02	0.40
NGC 4349 - 79	0.84	18	—	0.58	0.43
NGC 4349 - 127	0.71	18	23	0.78	0.52
NGC 4349 - 168	0.60	18	—	1.00	0.44
NGC 4349 - 174	0.62	18	21	0.95	0.63
Média	$0.67 \pm 0.09$	$19 \pm 2$	$21 \pm 2$	$0.86 \pm 0.15$	$0.47 \pm 0.08$

Tabela 3.4: Razões de abundância  $[N/C]$ , isotópica  $^{12}C/^{13}C$  e  $C/N$  e  $C/O$  das gigantes vermelhas do aglomerado aberto NGC 4349.

que não há evidências significativas de processos de mistura extra nas gigantes deste aglomerado.

A ideia de que a análise da razão isotópica de carbono pode ajudar no esclarecimento de tal relação é considerar esta razão como um indicador da história evolutiva de uma estrela ao longo do ramo gigante, vinculado aos processos de mistura em forma análoga à produção do lítio. Assim, as estimativas da abundância de lítio e da razão isotópica e sua comparação com as previsões dos modelos teóricos de mistura como os de Charbonnel & Lagarde (2010) e Lagarde et al. (2012) permitiriam uma conclusão a respeito. Carlberg et al. (2016) conseguiram mostrar uma correlação explícita entre as abundâncias de lítio e a razão isotópica  $^{12}C/^{13}C$  para as estrelas da sua amostra, como se ilustra na figura 3.7. A perspectiva desta correlação, comparada com outras medições da literatura, tanto de gigantes de aglomerados como de campo não permitiu concluir a respeito de alguma tendência destas grandezas relacionada com a condição de hospedeiras dos objetos subestelares.

A maior dificuldade na interpretação rigorosa das comparações de resultados destas grandezas é a falta de homogeneidade das análises feitas por diferentes autores, segundo Carlberg et al. (2016). A amostra das gigantes analisadas nesta tese apresenta uma



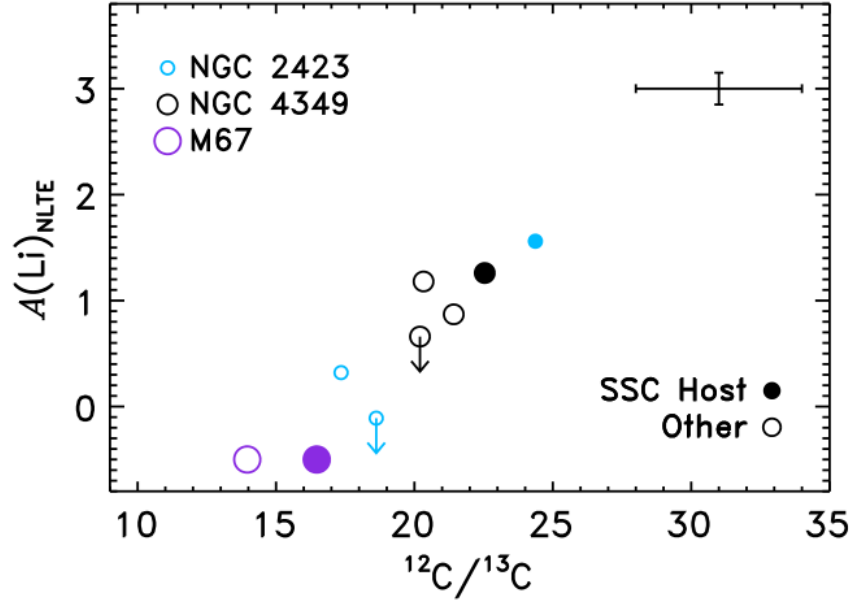


Figura 3.7:  $A(\text{Li})$  versus a razão isotópica  $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$  da amostra de gigantes analisadas por Carlberg et al. (2016). Os círculos cheios representam as hospedeiras NGC 2423-3, NGC 4349-127 e BD+12 1917 (M67)

baixa dispersão dos valores de  $A(\text{Li})$  ao redor do valor da razão  $^{12}\text{C}/^{13}\text{C} = 18$  ( $0.88 \pm 0.17$  dex) e uma maior ao redor de  $^{12}\text{C}/^{13}\text{C} > 20$  ( $0.54 \pm 0.68$  dex), o que leva a considerar de novo o caso da estrela NGC 4349-9, cujas abundância de lítio e alta rotação, como foi explicado na seção 3.3.1, poderiam ser indícios de que a estrela ainda têm baixa diluição nas camadas convectivas e de que se encontra na transição para o ramo gigante. O lítio é mais sensível do que a razão isotópica  $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$  aos processos de mistura interna, pelo qual uma ampla dispersão da abundância de lítio estaria relacionada com diferentes graus de mistura interna, como parece ser o caso de NGC 4349-9.

Carlberg et al. (2016) concluem seu estudo argumentando que as abundâncias de lítio observadas em gigantes hospedeiras apresentam uma alta dispersão, o que se explicaria especificamente por histórias de mistura individuais das estrelas e não por uma tendência nas hospedeiras. Citando Chanamé et al. (2005), os autores sugerem que as altas abundância de lítio e razão  $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$  obedecem mais a uma consequência da rotação

diferencial superficial do que a um processo lento de mistura ao longo da evolução da estrela.

A comparação dos resultados desta tese com os modelos de mistura convectiva de Charbonnel & Lagarde (2010) e Lagarde et al. (2012), vistos na figura 3.8, mostram bom acordo com os critérios comentados que desconsideram o efeito de eventuais mecanismos de mistura extra, como os associados a rotação ou a inclusão do referido *engulfment*. Também se encontram bem abrangidos dentro da tendência verificada para aglomerados abertos com massa intermediária da amostra de referência<sup>2</sup>.

De acordo com os gráficos da figura 3.8, pode se afirmar que os valores médios das razões  $C/N$  e  $^{12}C/^{13}C$  das gigantes do aglomerado aberto NGC 4349 não apresentam nenhuma anomalia significativa respeito às tendências esperadas para estrelas com massa superior a  $3M_{\odot}$  na transição nos estágios próximos à primeira dragagem, sem um claro mecanismo extra de mistura convectiva. O painel inferior da figura 3.8 sugeriria um regime de transição entre o padrão e o que inclui efeitos termohalinos e rotacionais, que condiz com algumas das observações já feitas sobre estas tendências nas gigantes vermelhas de NGC 4349.

Uma inspeção da relação entre a razão isotópica de carbono e a razão  $[N/C]$  das gigantes de NGC 4349, comparadas com outras estrelas individuais de aglomerados semelhantes e classificadas de acordo com sua fase evolutiva (figura 3.9), mostra consistência com a classificação evolutiva fornecida por Delgado Mena et al. (2016) para as estrelas estudadas, encontrando-se elas na transição entre o *clump* do ramo gigante e o topo do mesmo<sup>3</sup>. As gigantes de NGC 4349 e as tomadas da literatura são comparadas

---

<sup>2</sup>A amostra de aglomerados é a mesma que foi usada na figura 3.3

<sup>3</sup>As estrelas de referência foram tomadas de Smiljanic et al. (2009), Mikolaitis et al. (2010, 2011a,b) e Bocek Topcu et al. (2015)

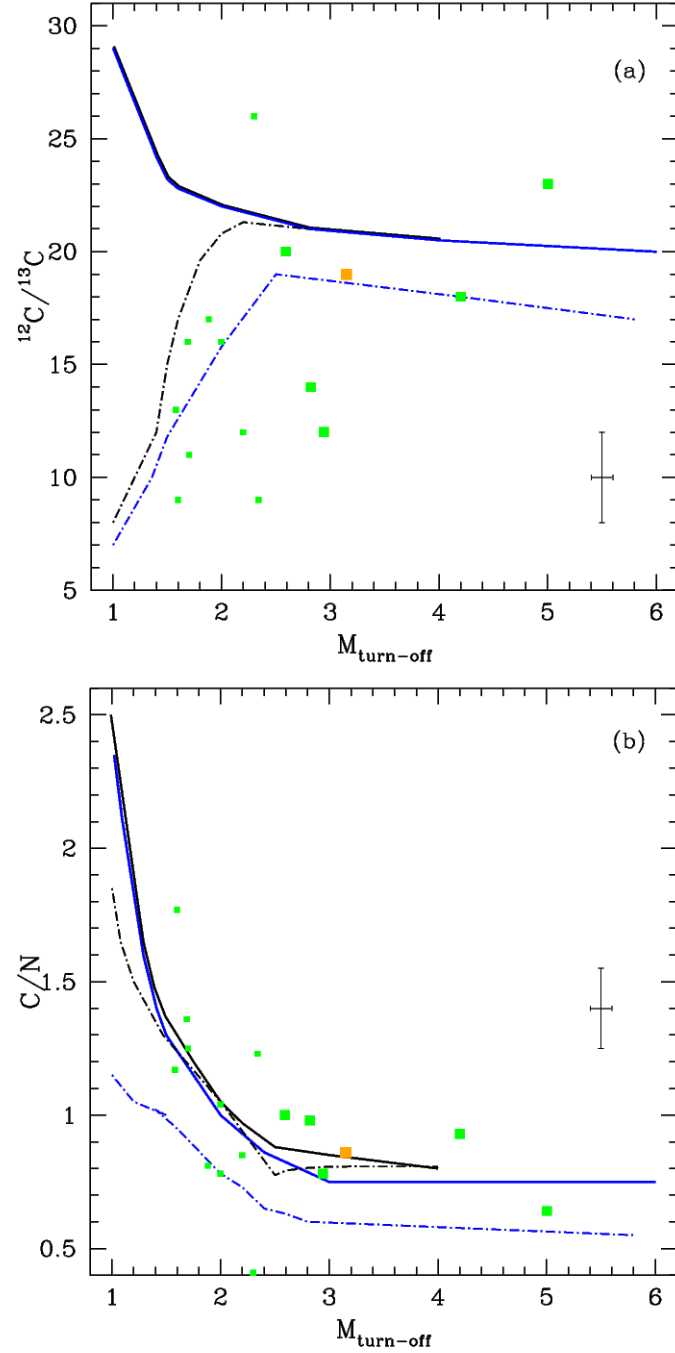


Figura 3.8: Razões médias  $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$  e  $C/N$  em função da massa do turn-off ( $M_{TO}$ ) - painéis (a) e (b)- das gigantes vermelhas de aglomerados abertos. O quadrado laranja representa o valor das gigantes de NGC 4349. Os quadrados verdes menores são dos aglomerados com  $M_{TO} < 2.5M_{\odot}$  e os maiores, dos aglomerados com  $M_{TO}$  entre  $2.5$  e  $5M_{TO}$ . A amostra de aglomerados da literatura é mesma da figura 3.6. As linhas em preto e azul são os modelos de Charbonnel & Lagarde (2010) e Lagarde et al (2012) das razões  $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$  e  $C/N$  para estrelas na primeira dragagem. As linhas contínuas, o modelo padrão da mistura. As linhas tracejadas, preta quando é considerada a mistura termohalina e azul quando são incluídos os efeitos termohalino e rotacional de mistura, respectivamente.

novamente com os modelos de Charbonnel & Lagarde (2010) e Lagarde et al. (2012), especificamente no caso destes últimos, incluindo a mistura termohalina e o efeito de diferentes velocidades de rotação estimadas da sequência principal de idade zero. Considerando tais modelos, se verifica novamente que as gigantes de NGC 4349 não se afastam significativamente dos modelos de mistura convectiva padrão.

Relativo ao estudo da razão  $C/O$  nas atmosferas de estrelas hospedeiras, Israelian et al. (2013) apresentam uma discussão sobre o estudo desta razão para diagnosticar globalmente as tendências da composição química do material sólido do disco primordial dos planetas extrasolares. Segundo a literatura, se esta razão apresentar um valor superior a 0.8, provavelmente o elemento silício existirá inicialmente formando moléculas de  $SiC$  e o disco possuiria abundantes elementos sólidos de carbono. Se  $C/O < 0.8$ , a composição primordial do disco protoplanetário teria silício na forma de  $SiO_2$  (Bond et al. 2010). A literatura recente sobre estudos de exoplanetas refere a comparação de abundâncias químicas de estrelas hospedeiras com aquelas que não o são, pelo qual resulta adequado comentar a comparação dos resultados desta razão (tabela 3.4) para as 6 gigantes restantes com os derivados para a estrela hospedeira.

Nesse sentido, Teske et al. (2014) mostram na figura 3.10 uma tendência de valores da  $\langle C/O \rangle_{Teske} = 0.54$  para um conjunto de 16 estrelas hospedeiras de campo, que comparativamente está dentro do esperado para esta razão, tanto em estrelas hospedeiras previamente analisadas por Delgado Mena et al. (2010) e Nissen et al. (2013), como na amostra de estrelas não hospedeiras também estudada por Delgado Mena et al. (2010), como se ilustra na figura 3.10. As estrelas dos estudos referidos são estrelas não evoluídas, com temperaturas e gravidades superficiais semelhantes às solares. Considerando os valores  $[Fe/H]$  e  $C/O$  determinados para as gigantes não hospedeiras analisadas nesta tese (Tabelas 2.4 e 3.4), poderia se afirmar que são coerentes com a tendência mostrada na figura 3.10, com uma média  $\langle C/O \rangle_{n\tilde{a}o-hosp} = 0.47 \pm 0.08$ . Para a estrela hospedeira NGC 4349-127,  $C/O = 0.52$ , praticamente igual à média derivada

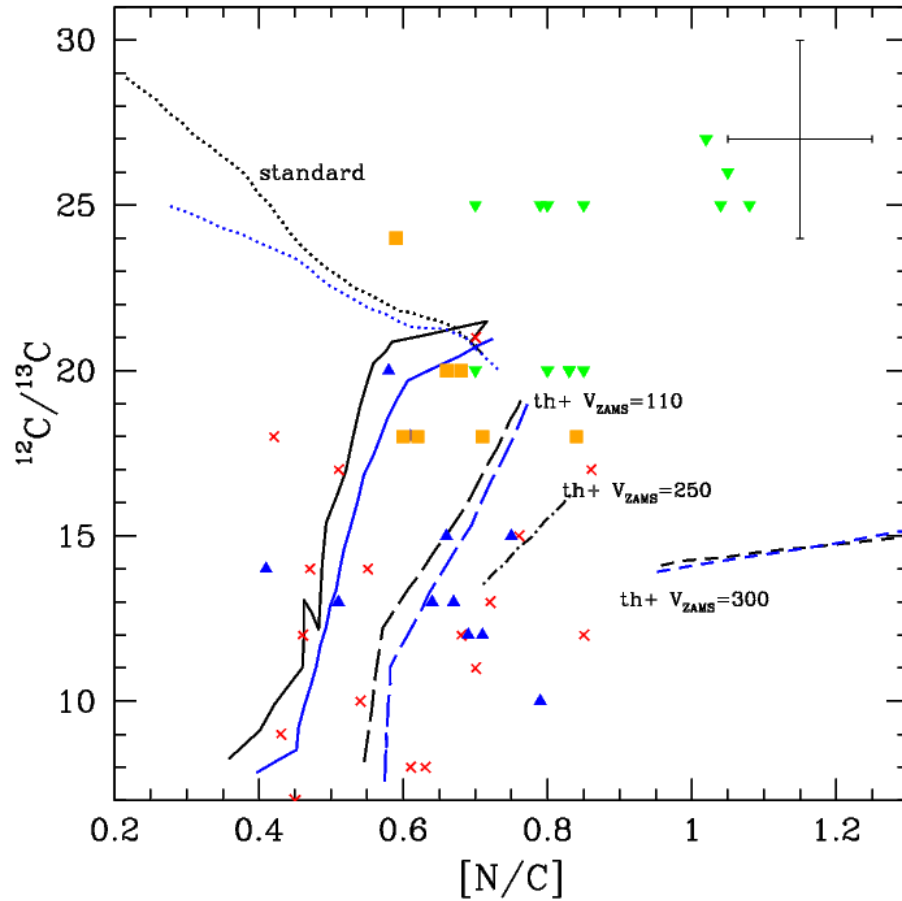


Figura 3.9: Observações de  $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$  em função da razão  $[\text{N}/\text{C}]$ . Os ícones verdes, azuis e vermelhos representam as estrelas do ramo gigante, do topo do ramo gigantes e do clump de vários aglomerados abertos da literatura. Os ícones laranja, as gigantes de NGC 4349. Os modelos teóricos de Charbonnel & Lagarde (2010) correspondem às previsões para estrelas no topo do ramo gigante a após a segunda dragagem (linhas pretas e azuis). Os modelos da mistura padrão são as linhas pontilhadas, os modelos com mistura termohalina são as linhas contínuas e os modelos que incluem mistura termohalina e rotação são as linhas tracejadas, indicando três velocidades de rotação de idade zero da sequência principal  $V_{\text{ZAMS}}$ .

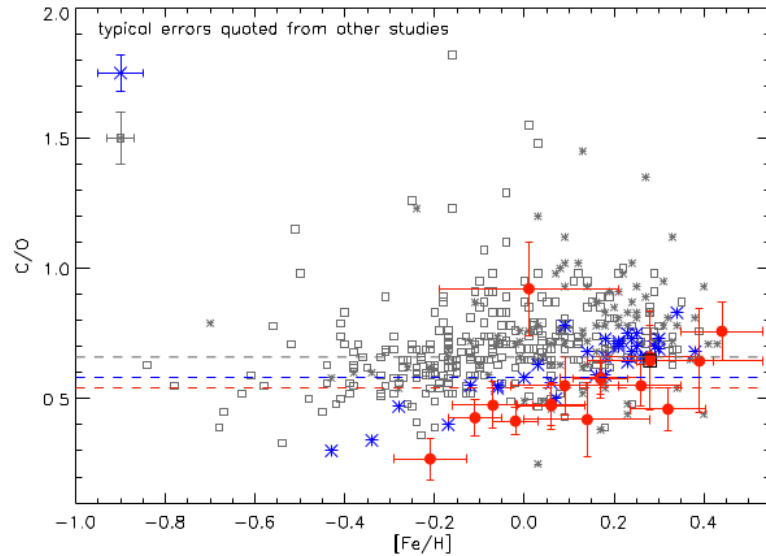


Figura 3.10: Razões  $C/O$  versus  $[Fe/H]$  das estrelas hospedeiras estudadas por Delgado Mena et al. (2010) (asteriscos cinza), Nissen et al. (2013) (asteriscos azuis) e Teske et al. (2014) (círculos vermelhos) comparadas com as de estrelas não hospedeiras (Delgado Mena et al. 2010, quadrados vazios cinza). As linhas tracejadas indicam as médias de  $C/O$  de cada amostra. O gráfico foi tomado de Teske et al. (2014).

por Teske et al. (2014) para sua amostra.

Embora a comparação feita tenha uma relativa inconsistência de definição, devido à falta de estimativas da razão  $C/O$  em gigantes hospedeiras, esta análise contribui com a discussão deste tópico relevante da pesquisa em exoplanetas, dando um ponto de vista coerente com os resultados da literatura. O objeto subestelar que acompanha a estrela NGC 4349-127 é um dos mais massivos dos que já foram encontrados e a razão  $C/O$  derivada da análise desta estrela é coerente com esse fato, de acordo com a literatura. A maior parte dos estudos da composição química em sistemas planetários extrasolares tem focado na estimativa de abundâncias dos elementos refratários: Na, Mg, Al, Si, Ca, Ti, Cr, Ni, Co, Sc, Mn e V. A próxima seção será dedicada à análise dos oito primeiros deles.

### 3.4 Elementos refratários: do sódio até o níquel

A análise dos elementos refratários, particularmente Na, Mg, Al, Si, Ca, Ti, Cr e Ni tem sido um tópico frequentemente citado na pesquisa sobre abundâncias químicas em estrelas gigantes, tanto em aglomerados como em estrelas do campo. Nas últimas décadas têm sido verificadas correlações entre espécies químicas que envolvem pelo menos um destes elementos e que são indicadores evolutivos. As abundâncias de tais elementos calculadas nas gigantes vermelhas de NGC 4349 são ilustradas nas figuras 3.11 e 3.12, sendo as primeiras estimativas de abundância destes elementos para estas estrelas.

Nestas figuras foram incluídas as abundâncias encontradas em duas amostras de gigantes vermelhas de campo por Mishenina et al. (2006) e Luck & Heiter (2007). Também se incluíram as abundâncias médias das gigantes em aglomerados com idades e massas similares às de NGC 4349, em forma análoga a como foi feito na seção 3.3.2. Os valores de tais abundâncias são mostradas nas tabelas 3.5 e 3.6.

Das figuras 3.11 e 3.12 pode se inferir que as abundâncias destes elementos refratários nas gigantes analisadas estão bem abrangidas dentro das tendências das gigantes de campo e de aglomerados abertos selecionados da literatura. Estas estrelas não apresentam qualquer tendência fora do esperado para as abundâncias dos elementos refratários em gigantes jovens de massa intermediária.

#### 3.4.1 Sódio e alumínio

Particularmente, as abundâncias de sódio calculadas sob hipótese de equilíbrio termodinâmico local (ETL) têm uma média  $\langle [Na/Fe] \rangle_{LTE} = 0.22 \pm 0.08$ , o que mostra um enriquecimento das estrelas analisadas, de acordo com a previsão de Denisenkov et

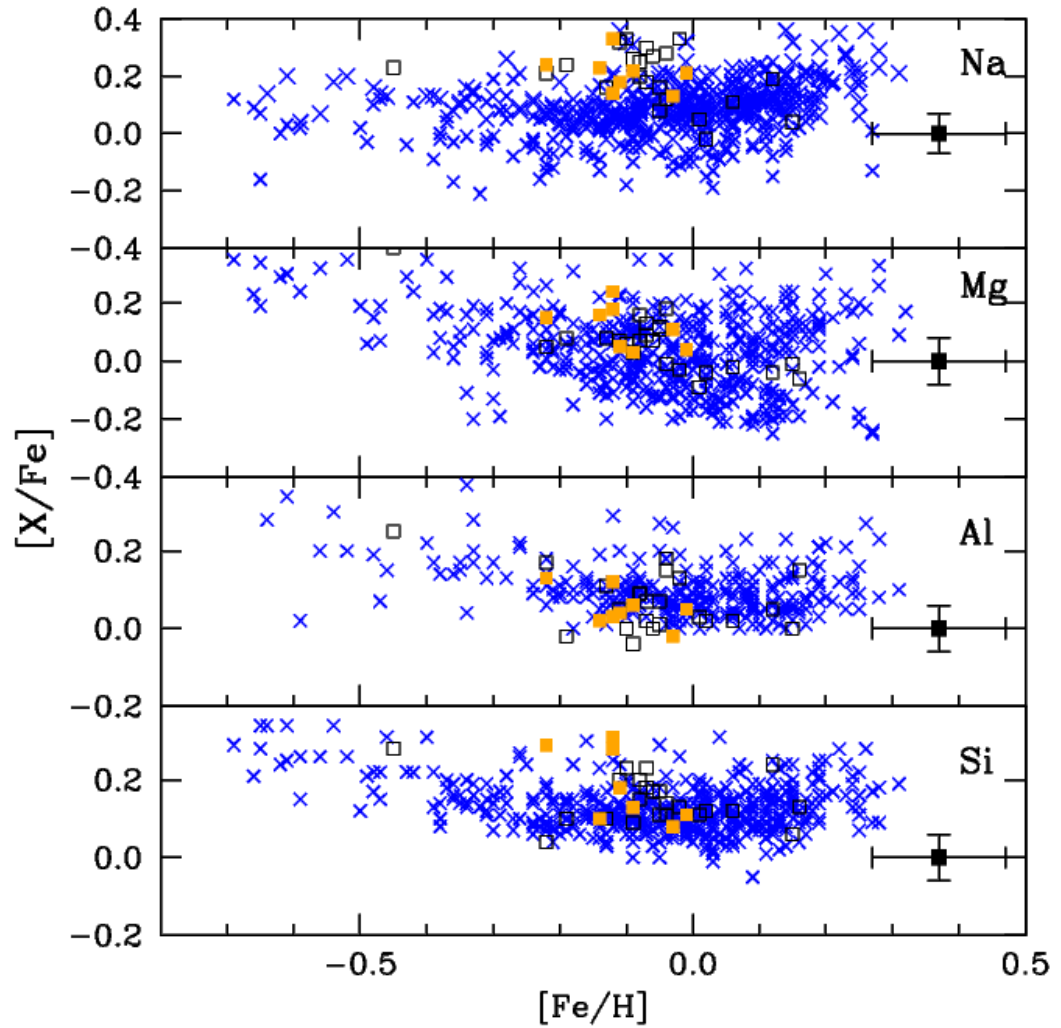


Figura 3.11: Razões  $[X/Fe]$  versus  $[Fe/H]$  dos elementos Na até Si das gigantes vermelhas de NGC 4349 (quadrados laranja) comparadas com as das gigantes de campo analisadas por Mishenina et al. (2006) e Luck & Heiter (2007) (cruzes azuis) e as gigantes de aglomerados com idades entre 0.2 e 2 Ganos (quadrados pretos vazios). Aglomerados incluídos: NGC 7789 (Tautvaisiene et al. 2005); NGC 752, 1817, 2506; NGC 2527, 2682, 2482, 2539, 2335, 2251, 2266; NGC 1342, 1662, 1912, 2354, 2447 (Reddy et al. 2012; 2013; 2015); NGC 6134 (Mikolaitis et al. 2010); NGC 3114 (Santrich et al. 2013); NGC 6940 e Hyades (Bocek Topcu et al. 2015); NGC 5316 (Drazdauskas et al. 2016a); NGC 2360, 3680 e 5822 (Peña Suárez et al. 2017, artigo aceito)



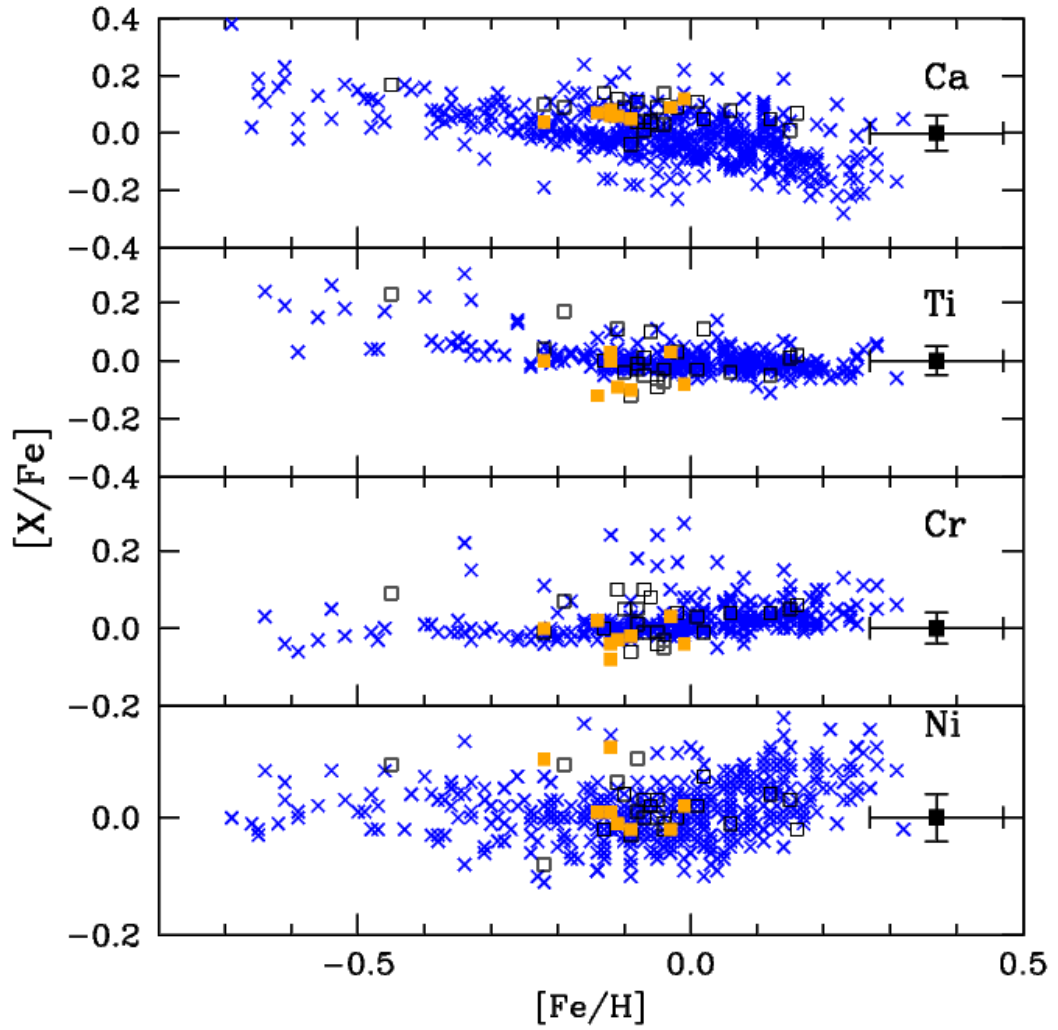


Figura 3.12: Razões  $[X/Fe]$  versus  $[Fe/H]$  dos elementos Ca até Ni das gigantes vermelhas de NGC 4349 (quadrados laranja) comparadas com as das gigantes de campo analisadas por Mishenina et al. (2006) e Luck & Heiter (2007) (cruzes azuis) e as gigantes de aglomerados com idades entre 0.2 e 2 Ganos (Quadrados pretos vazios). Os aglomerados incluídos são os mesmos da figura 3.11

Estrela	$[Na/Fe]_{ETL}$	$[Na/Fe]_{NETL}$	$[Mg/Fe]$	$[Al/Fe]$	$[Si/Fe]$
NGC 4349 - 5	0.21(2)	0.15±0.06	0.04±0.10(6)	0.05±0.10(4)	0.11±0.07(7)
NGC 4349 - 9	0.13(2)	0.09±0.04	0.11±0.04(5)	-0.05±0.04(5)	0.08±0.07(7)
NGC 4349 - 53	0.14(2)	0.10±0.04	0.18±0.10(7)	0.12±0.09(5)	0.24±0.08(9)
NGC 4349 - 79	0.18(2)	0.13±0.05	0.05±0.07(5)	0.04±0.10(5)	0.18±0.08(9)
NGC 4349 - 127	0.38(2)	0.27±0.06	0.29±0.07(5)	0.03±0.10(4)	0.28±0.07(7)
NGC 4349 - 168	0.22(2)	0.16±0.04	0.03±0.11(6)	0.06±0.10(6)	0.13±0.07(7)
NGC 4349 - 174	0.24(2)	0.17±0.06	0.15±0.12(7)	0.13±0.12(5)	0.25±0.10(7)
NGC 4349 - 203	0.23(2)	0.16±0.04	0.16±0.10(7)	0.02±0.12(5)	0.10±0.07(7)
Média	0.22±0.09	0.15±0.06	0.13±0.08	0.05±0.07	0.17±0.08

Tabela 3.5: Razões de abundância  $[X/Fe]$  dos elementos Na ao Si das gigantes vermelhas de NGC 4349. Na coluna 3, as abundâncias de sódio corrigidas de acordo com os modelos NETL de Lind et al. (2011). Para cada estrela se inclui entre parênteses o número de linhas usadas para a determinação da abundância.

Estrela	$[Ca/Fe]$	$[Ti/Fe]$	$[Cr/Fe]$	$[Ni/Fe]$
NGC 4349 - 5	0.12±0.07(5)	-0.08±0.12(26)	-0.07±0.13(17)	0.02±0.12(33)
NGC 4349 - 9	0.09±0.13(4)	0.03±0.16(18)	0.03±0.12(15)	-0.02±0.11(32)
NGC 4349 - 53	0.08±0.06(4)	0.03±0.08(27)	-0.04±0.12(18)	0.14±0.10(37)
NGC 4349 - 79	0.06±0.04(4)	-0.09±0.10(23)	-0.03±0.13(16)	-0.01±0.11(34)
NGC 4349 - 127	0.06±0.09(3)	0.00±0.10(15)	-0.11±0.14(14)	0.01±0.09(29)
NGC 4349 - 168	0.05±0.04(4)	-0.12±0.07(22)	-0.02±0.07(18)	-0.02±0.09(38)
NGC 4349 - 174	0.04±0.05(4)	0.00±0.10(19)	0.00±0.12(19)	0.12±0.11(34)
NGC 4349 - 203	0.07±0.12(4)	-0.14±0.13(23)	0.02±0.12(17)	0.01±0.13(30)
Média	0.07±0.02	-0.03±0.07	-0.02±0.05	0.04±0.07

Tabela 3.6: Razões de abundância  $[X/Fe]$  dos elementos Ca ao Ni das gigantes vermelhas de NGC 4349. Para cada estrela se inclui entre parênteses o número de linhas usadas para a determinação da abundância.

al. (1987) e estudos posteriores da abundância deste elemento em estrelas de massa intermediária em gigantes vermelhas.

A abundância de sódio em estrelas de massa superior a  $1.5M_{\odot}$  depende das reações de captura de prótons do processo NeNa,  $^{22}\text{Ne}(p, \gamma)^{23}\text{Na}$ , durante a queima de hidrogênio através do ciclo CNO (Woosley & Weaver 1995; Denisenkov & Denisenkova 1990). A análise rigorosa da abundância deste elemento deve considerar as consequências da eficiência dos processos de ionização, devidos à baixa energia de ionização do sódio, dependentes da gravidade superficial principalmente em estrelas frias. Estes processos alteram a conservação do equilíbrio termodinâmico local, pelo qual é necessário quantificar o efeito destes desvios do ETL na abundância do elemento, usando correções como as propostas por Lind et al. (2011).

A abundância de sódio foi obtida utilizando as linhas  $\lambda 6154.22 \text{ \AA}$  e  $\lambda 6160.75 \text{ \AA}$  cujas larguras equivalentes<sup>4</sup> estão entre 75 e 132 mÅ. A comparação entre as abundâncias de sódio corrigidas e as abundâncias ETL, na tabela 3.5 mostram que os efeitos NETL são maiores nas estrelas com gravidades superficiais menores. Outra previsão a respeito é que a contribuição de efeitos NETL é maior nas linhas espectrais de maior largura equivalente, como é o caso particular das larguras na estrela NGC 4349-127,  $W_{\lambda 6154} = 118 \text{ mÅ}$  e  $W_{\lambda 6160} = 132 \text{ mÅ}$  que apresenta uma correção NETL de 0.11 dex respeito ao valor LTE. Considerando a incerteza associada às correções NETL, como se mostra na tabela 3.5, o efeito das correções produz uma redução de até 30% nos valores da abundância de sódio sob ETL.

A figura 3.13 mostra a comparação da abundância média de sódio de NGC 4349 com e sem as correções do ETL, com os modelos teóricos de Lagarde et al. (2012) para a análise do efeito da mistura convectiva na abundância deste elemento. Em um parágrafo

---

<sup>4</sup>Os parâmetros atômicos e as larguras equivalentes medidas destas linhas, no Apêndice 4.2

anterior foi explicado que a abundância de sódio depende da eficiência da queima de carbono e do ciclo NeNa, mas os fenômenos de mistura no interior estelar incidem diretamente na razão  $[Na/Fe]$  na superfície estelar. Foram incluídos também os resultados desta abundância para diferentes aglomerados abertos com idades inferiores a 2 Ganos e massas de turn-off entre  $1.5$  e  $4M_{\odot}$ . Os modelos de Lagarde et al. (2012) foram adotados para valores de metalicidade solar e  $[Fe/H] = -0.54$  dex e ambos os casos em que a rotação estelar incide ou não na mistura. A mistura termohalina não afeta a abundância de sódio.

Considerando os resultados da figura 3.13, a abundância de sódio ETL ajusta com o modelo padrão de mistura convectiva a uma metalicidade próxima da solar, se confirmando que os efeitos de mistura convectiva têm uma contribuição importante na pequena sobreabundância de sódio verificada nas gigantes (Smiljanic et al. 2016). No que diz respeito às correções NETL, poderia se dizer que ampliam a incerteza na interpretação do tipo de mistura que incide na produção de sódio, mas oferecem uma visão mais conservadora sobre a grandeza da sobreabundância deste elemento em estrelas gigantes, como afirmam Adibekyan et al. (2015). Ambas as abundâncias (ETL e NETL) são coerentes com a tendência que mostram outros aglomerados dentro da faixa de massa e metalicidade consideradas.

A incerteza associada à razão  $[Na/Fe]$  atinge um valor médio de 0.06 dex, atentando às incertezas obtidas para  $[Na/Fe]$  nas gigantes de NGC 4349, nos regimes ETL e NETL, assim como as incertezas nos resultados da literatura citada. Como já foi mencionado, a incerteza nos resultados de ambos os regimes tem um intervalo de valores em comum, coerente com o fato de que as correções NETL sejam significativas para metalicidades bastante inferiores da solar, que não é o caso do aglomerado NGC 4349. Tal incerteza no geral limitaria a precisão na definição do efeito de um determinado regime de mistura convectiva na abundância de sódio. Contudo, neste caso, o resultado obtido parece ser claro em descartar a contribuição da rotação na abundância de sódio, o que é coerente

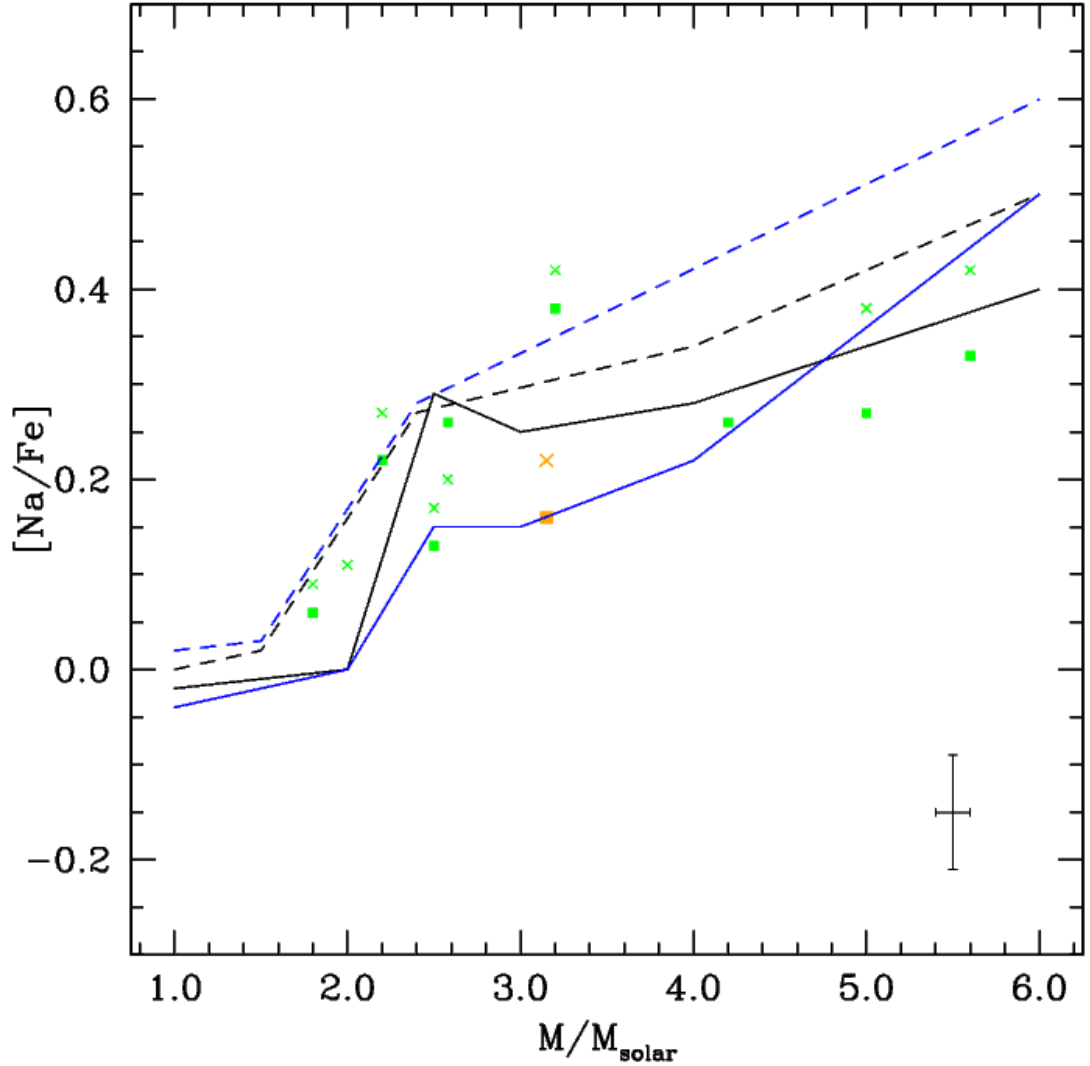


Figura 3.13: Razão média  $[Na/Fe]$  das gigantes vermelhas de NGC 4349 (quadrado laranja) versus  $M_{TO}$ , comparada com os modelos de Lagarde et al. (2012) para mistura convectiva convencional e afetada pela rotação, para duas metalicidades diferentes (linhas azuis:  $[Fe/H] = 0.0$  dex, linhas pretas:  $[Fe/H] = -0.54$  dex). As linhas contínuas representam a mistura padrão e as tracejadas o regime de mistura incluindo o efeito da rotação. Os ícones verdes representam as  $[Na/Fe]$  médias dos aglomerados selecionados da literatura. As cruces representam as abundâncias de sódio sem incluir efeitos NETL e os quadrados os valores destas após as correções. Aglomerados incluídos: NGC 6705, NGC 4815, Hyades (só  $[Na/Fe]_{NETL}$ ), Berkeley 81 e Trumpler 20 (Smiljanic et al. 2016); NGC 3114 (Santrich et al, (2013); NGC 5316 (Drazdauskas et al. 2016); NGC 6940 e Hyades (só  $[Na/Fe]_{ETL}$ ) (Bocek Topcu et al. 2016)

com os resultados discutidos nas seções 3.3.1 e 3.3.3.

Na seção 3.3.2 foi sugerida a conveniência de estabelecer uma análise comparativa entre as abundâncias de sódio e oxigênio das estrelas da amostra. De Silva et al. (2009) analisam a tendência das abundâncias de oxigênio e sódio de uma amostra de aglomerados abertos com idade superior a 1 Gano, comparando-as com a anticorrelação O–Na, bem estabelecida em aglomerados globulares e com as gigantes do campo analisadas por Mishenina et al. (2006). Nos aglomerados abertos não tem sido conferida uma tendência entre as abundâncias destes elementos, análoga à anticorrelação O–Na mencionada. De Silva et al. (2009) comparam as razões de abundância  $[O/Fe]$  e  $[Na/Fe]$  da amostra de aglomerados abertos com a tendência correlacionada das estrelas do aglomerado globular NGC 2808, encontrando que os aglomerados abertos não se ajustam a alguma tendência, o que dificulta a análise evolutiva do disco galáctico a partir das abundâncias destes elementos.

Na figura 3.14 se reproduz parte da análise de De Silva et al. (2009), comparando separada e simultaneamente as tendências das razões  $[O/Fe]$  e  $[Na/Fe]$  com respeito à metalicidade. Nesta figura foram incluídos vários aglomerados com idades inferiores a 1 Gano, com os quais é possível ver que as abundâncias de oxigênio em aglomerados abertos reproduzem o padrão achado nas estrelas de campo de referência, independentemente da idade. A abundância de oxigênio pareceria estar anticorrelacionada com a metalicidade e o caso particular do aglomerado NGC 4349 se ajusta a tal tendência. Por outro lado, as abundâncias de sódio das amostras não apresentam uma dependência clara em relação à metalicidade, tanto nas estrelas de campo como nos aglomerados, independentemente da idade. Contudo, é possível ver que as abundâncias de sódio em aglomerados são levemente superiores às abundâncias deste elemento nas estrelas de campo.

De Silva et al. (2009) sugerem que os efeitos NETL poderiam ser a causa da so-

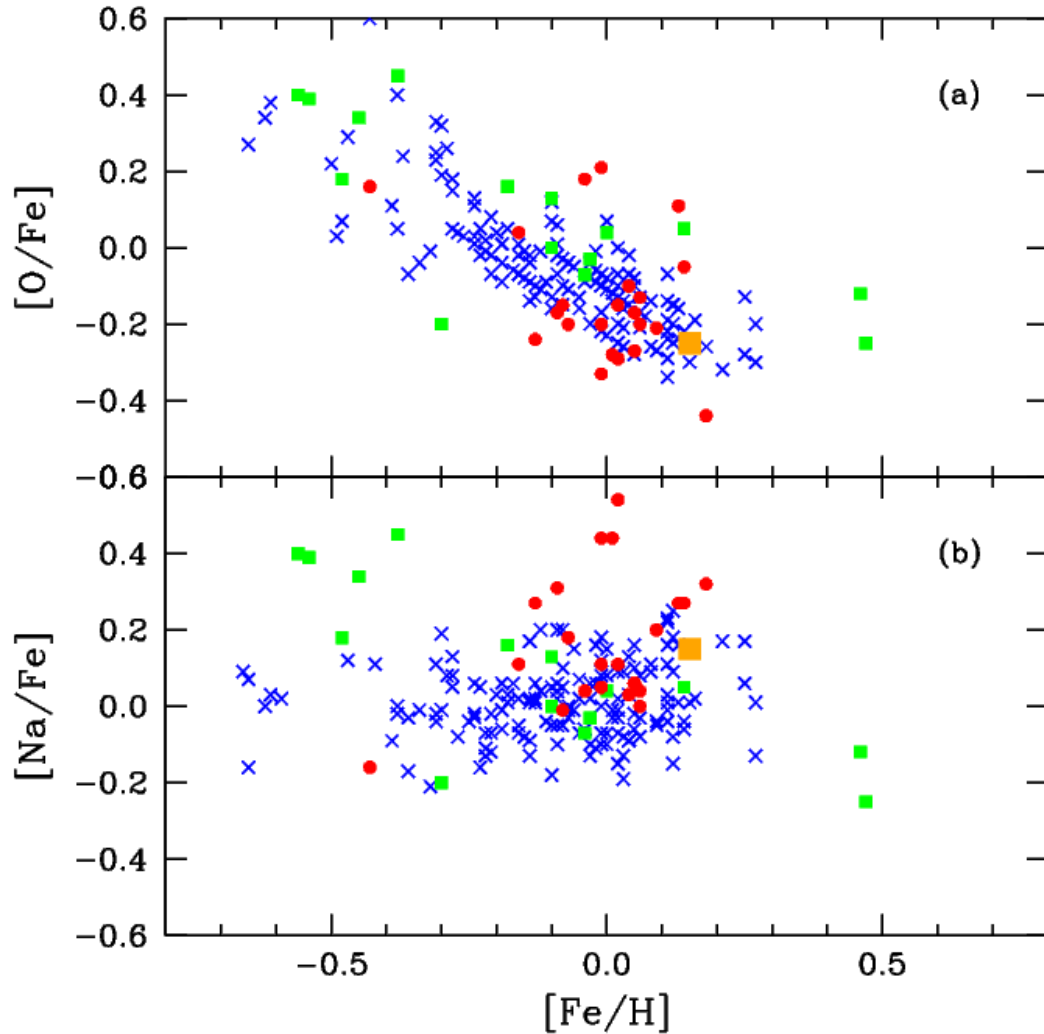


Figura 3.14: Razões médias  $[O/Fe]$  e  $[Na/Fe]$  versus  $[Fe/H]$  das gigantes vermelhas de NGC 4349 (quadrado laranja), nos painéis (a) e (b), respectivamente, comparadas com os resultados da amostra de aglomerados com idades superiores a 1 Gano analisada por De Silva et al. (2009) (quadrados verdes), com uma amostra de aglomerados com idade inferior a 1 Gano (círculos vermelhos) e com as gigantes vermelhas de campo analisadas por Mishenina et al. (2006). Aglomerados incluídos: Be 17 (Friel et al. 2005); Be 20, Be 29, Be 31 e NGC 2141 (Yong et al. 2005); Cr 261 (Carretta et al. 2005); Mel 66, NGC 2243 (Gratton & Contarini 1994); Mel 71, NGC 2112 (Brown et al. 1996); NGC 6253 e NGC 6791 (Carretta et al. 2007); NGC 6939, NGC 7142 (Jacobson et al. 2007); NGC 7789 (Tautvaišiene et al. 2005); IC 4725, NGC 6067 e NGC 6087 (Luck 1994); IC 4756, NGC 2447, NGC 3532, NGC 6281 e NGC 6633 (Smiljanic et al. 2009); NGC 6475 (Villanova et al. 2009); NGC 2099 (Pancino et al. 2010); Hyades, Praesepe, (Carrera & Pancino, 2011); NGC 1245 e NGC 1817 (Jacobson et al. 2011); NGC 1545 e Tr 2 (Začs et al. 2011); NGC 3114 (Santrich et al. 2013); NGC 6940 (Bocek Topcu et al. 2016); NGC 5316 (Drazdauskas et al. 2016); NGC 5822 (Peña Suárez et al. (2017, aceito).

breabundância aparente de sódio. Os autores tomaram as abundâncias das estrelas de campo de Mishenina et al. (2006) atentando que estes autores incluíram as correções NETL na sua amostra. No caso do aglomerado NGC 4349 foi considerada a razão de abundância corrigida,  $\langle [Na/Fe] \rangle_{NETL}$ , cujo valor parece consistente com as abundâncias de outros aglomerados jovens. Apesar da ausência de correlação entre a razão  $[Na/Fe]$  e a metalicidade, se distingue um maior espalhamento dos valores desta razão nos aglomerados mais velhos do que nos mais jovens. A razão da incompatibilidade entre as abundâncias de sódio em gigantes de campo e gigantes em aglomerados não é clara e, como manifestam De Silva et al. (2009), o estudo deste tópico permite questionar os modelos sobre a formação do disco galáctico, nos quais os aglomerados abertos são considerados elementos centrais. Resultados como o da figura 3.14 reforçam a ideia de que a análise evolutiva de sistemas estelares através do estudo da abundância de sódio é uma matéria ainda com muitas questões não suficientemente esclarecidas.

No que diz respeito às abundâncias de alumínio das estrelas analisadas, foi derivada uma abundância média  $\langle [Al/Fe] \rangle = 0.05 \pm 0.07$  dex, em concordância com as abundâncias de referência usadas na figura 3.5, tanto para gigantes de campo como as que se encontram nos aglomerados selecionados da literatura. As abundâncias deste elemento são eventualmente alvo de correções NETL, como afirmam Smiljanic et al. (2016) e Adibekyan et al. (2015). Contudo, tais correções são geralmente inferiores a  $-0.05$  dex para estrelas de massa intermediária com metalicidades próximas da solar, o que mostra que este elemento não é afetado pelos processos de mistura da primeira dragagem. Os modelos teóricos, como os empregados na figura 3.13 mostram a ausência de qualquer correlação entre a abundância deste elemento e a massa do turn-off do aglomerado. Quando investigada a tendência entre as abundâncias deste elemento com a idade o resultado é semelhante.



### 3.4.2 Magnésio e silício

As abundâncias de magnésio das estrelas estudadas mostram uma média da razão  $\langle[Mg/Fe]\rangle = 0.13 \pm 0.08$  dex, bem abrangida dentro da tendência seguida pelas gigantes de campo citadas de Mishenina et al. (2006) e Luck & Heiter (2007) e a mostrada pelos aglomerados abertos incluídos na comparação da figura 3.5. A abundância deste elemento não mostra nenhuma correlação com parâmetros como a idade, segundo a literatura. No que diz respeito às abundâncias de silício, a média calculada nas gigantes vermelhas de NGC 4349 é  $\langle[Si/Fe]\rangle = 0.17 \pm 0.08$  dex, levemente acima da média que apresentam as estrelas de comparação citadas na figura 3.5.

Um aspecto interessante da discussão sobre a abundância destes elementos se refere a fatos como o sugerido por Adibekyan et al. (2012), que mostram que as estrelas hospedeiras de planetas apresentam enriquecimentos em elementos como silício e magnésio, relativos às abundâncias destes elementos encontradas em estrelas sem planetas, particularmente em aquelas de metalicidade menor que a solar. Já foi comentado que no contexto dos estudos de planetas extrasolares algumas razões de abundância têm um significado relevante na inferência das propriedades do objeto orbitante, como a razão  $C/O$ , calculada na seção 3.3.3, e outras razões mineralógicas, como mostram Delgado Mena et al. (2010), entre outros autores.

Especificamente, a razão  $[Mg/Si]$  tem sido recente alvo de pesquisa, como mostram Adibekyan et al. (2015), que estudaram tal relação para várias amostras de estrelas gêmeas do Sol (temperatura efetiva e gravidade superficial semelhantes aos solares), entre as quais algumas hospedeiras de planetas com um amplo intervalo de massas, e estrelas sem planetas. Dentre os resultados dessa pesquisa, na figura 3.15 pode se ver a razão  $[Mg/Si]$  em função da metalicidade, discriminada para estrelas com planetas de massa inferior/superior a  $30M_{\oplus}$  e estrelas não hospedeiras. Os autores mostram que

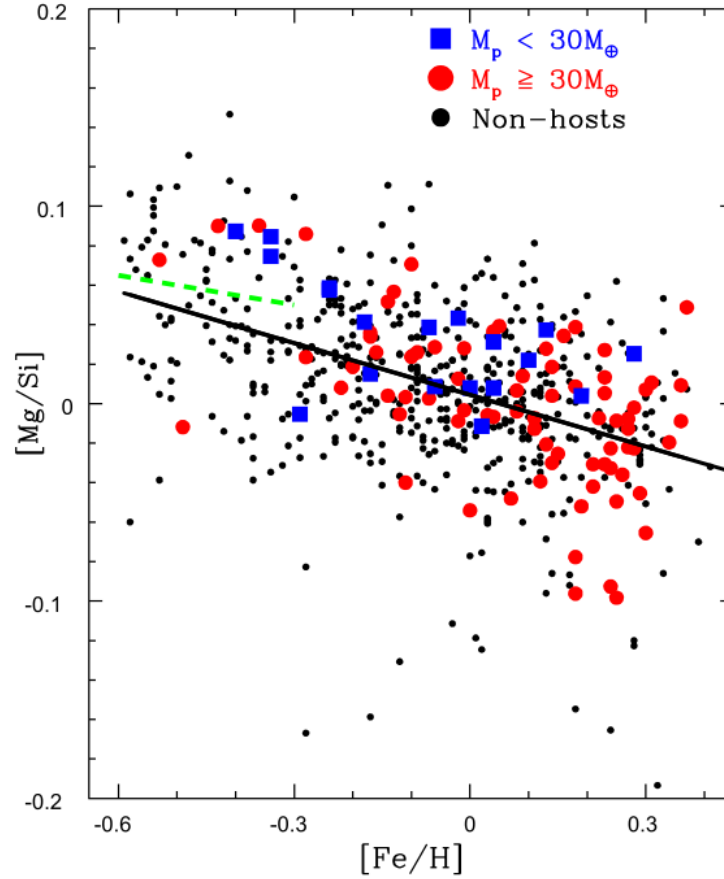


Figura 3.15:  $[Mg/Si]$  versus  $[Fe/H]$  para estrelas sem planetas detectados (pontos pretos), estrelas hospedeiras de planetas de baixa massa (quadrados azuis) e hospedeiras de planetas mais massivos (círculos vermelhos). O gráfico foi tomado de Adibekyan et al. (2015).

as hospedeiras com planetas de baixa massa tendem a ter uma razão  $[Mg/Si]$  alta, enquanto que as hospedeiras de planetas mais massivos apresentam valores inferiores deste indicador.

A razão magnésio-silício das gigantes de NGC 4349 fornece os valores  $[Mg/Si]_h = 0.01$  dex para a estrela NGC 4349-127 e  $\langle [Mg/Si] \rangle_{n-h} = -0.06$  dex para o resto da amostra. Tendo que a metalicidade da estrela hospedeira é  $[Fe/H] = -0.12$  dex e a metalicidade média das não hospedeiras é  $-0.10$  dex, tais valores localizados na figura 3.15 permitiriam afirmar que o sistema estrela hospedeira-planeta do aglomerado NGC 4349 adere

bem à tendência da razão magnésio-silício vs. metalicidade das estrelas com planetas de massa superior, e as gigantes não hospedeiras à tendência global das estrelas não hospedeiras estudadas por Adibekyan et al. (2015). Tal resultado não fornece um critério conclusivo sobre a composição do objeto subestelar, mas o excedente de abundância de elementos  $\alpha$  em estrelas hospedeiras é um fato documentado na literatura (Israelian et al. 2013).

Os autores advertem sobre as restrições da análise da figura 3.15, que inclui apenas estrelas anãs de sequência principal sob o regime ETL, sendo que os efeitos NETL poderiam afetar as abundâncias de magnésio e silício, particularmente no caso de estrelas evoluídas, quentes ou de metalicidade inferior a  $-1.0$  dex. Sobre as correções NLTE do magnésio, Gratton et al. (1999) mostram que a correção NETL para a linha  $\lambda 4730.04$  Å seria da ordem de  $0.3$  dex à metalicidade solar e inferior a  $0.2$  dex para metalicidade de  $-1.0$  dex, porém não fornecem correções para linhas com comprimentos superiores a  $\lambda 5183$  Å, que foram as mais usadas na estimativa das abundâncias das estrelas deste estudo.

O diagnóstico feito na comparação entre as gigantes de NGC 4349 e as estrelas estudadas por Adibekyan et al. (2015) tem apenas um intuito qualitativo, pois as amostras não são homogêneas nem compatíveis. A literatura sobre este tópico é bastante escassa, particularmente para planetas em estrelas gigantes. Lembrando do resultado obtido para a razão  $C/O$  no aglomerado NGC 4349, poderia se fazer a mesma ponderação que foi colocada então: Novos resultados podem dar um melhor contexto para discutir estes tópicos com mais precisão. Pode se concluir que os valores das abundâncias de magnésio e silício da estrela NGC 4349-127, acima da média do aglomerado, poderiam estar relacionados com a presença do objeto subestelar associado, de acordo com a literatura, quando a afirma que as estrelas hospedeiras apresentam enriquecimento de elementos- $\alpha$ . Outros indicadores relacionados com essa discussão serão apresentados nas seções seguintes.

### 3.4.3 Do cálcio até o níquel

A análise destes elementos em gigantes vermelhas mostra um comportamento bastante regular enquanto a evolução química do disco galáctico, como se afirma no geral na literatura. Na figura 3.6 são mostradas as tendências das abundâncias do cálcio - elemento  $\alpha$ - e os três elementos do pico do ferro, titânio<sup>5</sup>, cromo e níquel, comparados com as estrelas de campo e de aglomerados já referidas ao longo da seção 3.4. As razões  $[X/Fe]$  médias destes elementos nas gigantes de NGC 4349 não ultrapassam em nenhuma delas o valor  $\pm 0.08$  dex, o que mostra que de fato o conteúdo destas espécies nas estrelas estudadas é dominado pela evolução global do disco e não alterado por qualquer outro processo derivado da acreção de material externo.

As abundâncias das gigantes de NGC 4349 se ajustam a tendência reportada por autores como Bocek Topcu et al. (2015, 2016) que mostram a comparação entre as abundâncias  $[X/Fe]$  dos elementos por grupos: As abundâncias de Na, Al e dos elementos- $\alpha$  sempre são superiores que as abundâncias dos elementos do grupo do ferro (incluindo Sc, V, Mn, Co, Cu e Zn, que não são estudados nesta tese). Na figura 3.16 se mostra a distribuição da razão  $[X/Fe]$  das estrelas analisadas respeito às espécies químicas, comparada com as médias desta razão reportadas por Santrich et al. (2013) e Bocek Topcu et al. (2016) para os aglomerados NGC 3114 e NGC 6940, cujas massas de turn-off correspondem também às de gigantes de massa intermediária, e cujas idades são semelhantes com a de NGC 4349.

A literatura sobre as abundâncias de espécies do grupo do ferro e dos elementos- $\alpha$  em sistemas planetários mostra que estas merecem um tratamento especial em estrelas empobrecidas em metais, como mostram Adibekyan et al. (2012). Estes autores

---

<sup>5</sup>Este elemento é considerado também como elemento- $\alpha$

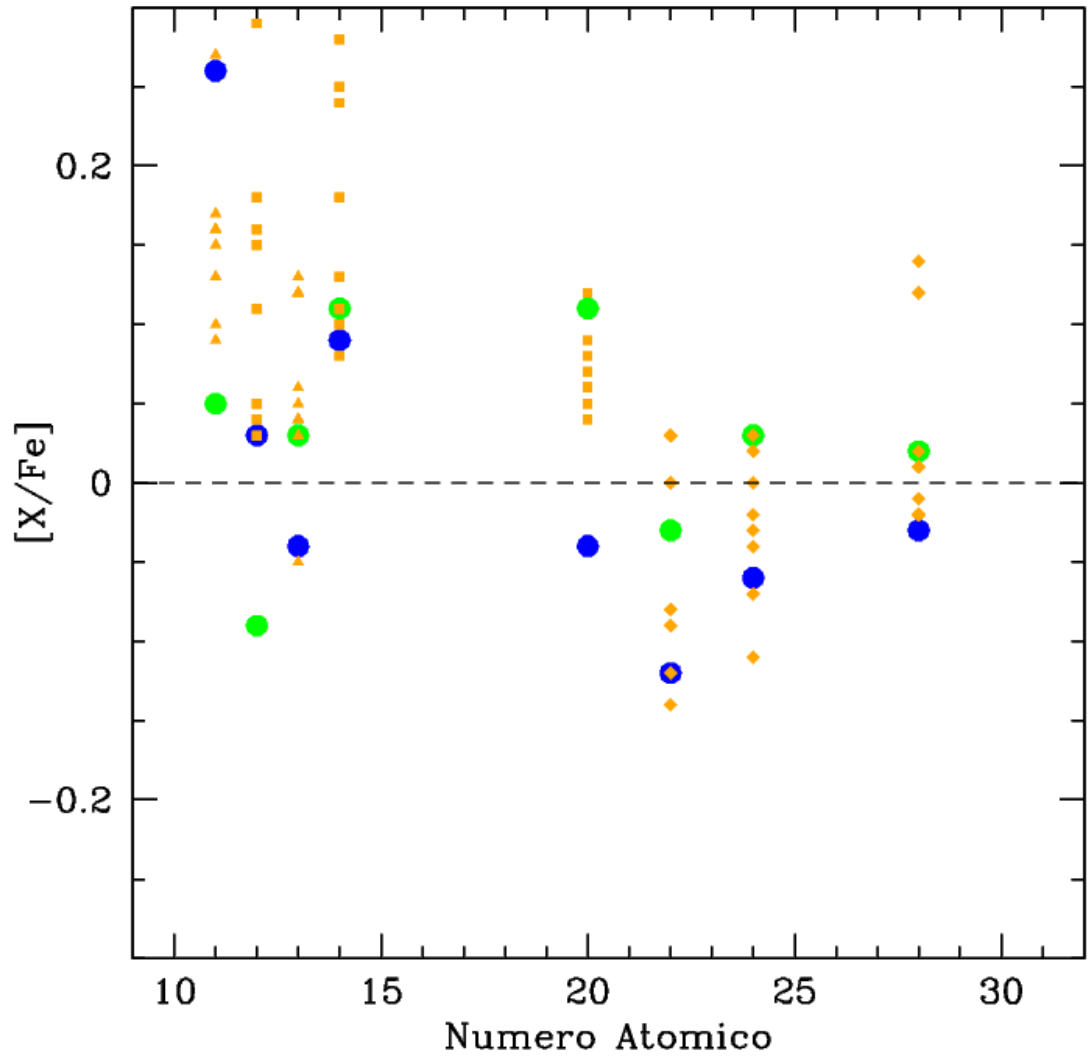


Figura 3.16: Distribuição das razões  $[X/Fe]$  em função do número atômico nas gigantes de NGC 4349 (ícones laranja). Os círculos azuis e verdes representam as médias destas razões nos aglomerados NGC 3114 e NGC 6940, respectivamente. Os triângulos correspondem às razões de abundância dos elementos leves de  $Z$  ímpar (Na (*NETL*) e Al), os quadrados representam os elementos- $\alpha$  (Mg, Si e Ca) e os losangos, os elementos do grupo do ferro (Ti, Cr e Ni).

encontram que as estrelas hospedeiras de planetas jovianos e neptunianos com baixa metalicidade ( $< -1.0$  dex) apresentam abundâncias mais altas de elementos- $\alpha$  que as não hospedeiras. Contudo, estabelecer o critério de distribuição destes elementos como partes proporcionais da composição dos planetas que orbitam aquelas estrelas é ainda difícil. Alguns elementos como o silício, o cálcio e o titânio seriam “estimuladores” dos processos de formação planetária (Israelian et al. 2013). No entanto, as observações ainda não registram sobreabundâncias em cálcio significativas em estrelas hospedeiras e, como mostram Mishenina et al. (2016) em um estudo de uma ampla amostra de estrelas hospedeiras e não hospedeiras semelhantes ao Sol, não há diferença significativa entre as abundâncias dos elementos do grupo do ferro entre umas e outras.

#### **3.4.4 A dependência das abundâncias de elementos com a temperatura de condensação $T_c$**

Meléndez et al. (2009) mostraram que existe um déficit de elementos refratários na composição química solar, considerando as abundâncias estudadas em outros sistemas planetários com estrelas gêmeas do Sol, e que tal anomalia estava relacionada com a formação de planetas rochosos. Este resultado foi confirmado posteriormente em outros sistemas com planetas terrestres e estrelas hospedeiras gêmeas do Sol. Contudo, a perspectiva desta questão tem se aprofundado, mostrando a relação entre a formação de determinado tipo de planeta e a região da galáxia onde é realizado o estudo, ou a faixa etária das estrelas alvo, entre outros aspectos (Maldonado & Villaver, 2016). De outra parte, a comparação das abundâncias de elementos refratários em estrelas com planetas jovianos e terrestres tem sugerido correlações de tais abundâncias com parâmetros da evolução estelar como a idade ou a metalicidade.

Os estudos sobre a relação entre as abundâncias de elementos refratários e a temperatura de condensação  $T_c$  tem tido por objeto principal o estudo de sistemas com planetas

terrestres e estrelas semelhantes ao Sol, como mostram Nissen (2015) ou Mishenina et al. (2016). Mas o estudo de tal relação em hospedeiras gigantes é mais uma tentativa de elaborar um *big picture* sobre tais sistemas planetários, um tópico ainda pouco explorado, como vem sendo comentado ao longo desta tese. Maldonado & Villaver (2016) fizeram um estudo abrangente de estrelas anãs, subgigantes e gigantes com e sem planetas, com um total de 341 estrelas analisadas. A análise da relação mencionada,  $\langle [X/Fe] \rangle$  versus  $T_c$ , consistente em determinar a inclinação da distribuição de pontos para um conjunto de estrelas alvo, mostrou que as diferenças entre hospedeiras e não hospedeiras aparecem principalmente quando se restringe à análise dos elementos refratários, no caso das estrelas anãs e subgigantes.

Relativo às gigantes analisadas pelos autores Maldonado e Villaver, estes encontraram que não há diferença expressiva entre as inclinações de tal correlação nas estrelas hospedeiras e nas não hospedeiras de planetas, considerando só elementos refratários, mas que tal inclinação é mais positiva quando consideradas por separado as estrelas com massa inferior a  $1.5M_{\odot}$ , respeito às mais massivas. Assim, a diferença entre as abundâncias de gigantes hospedeiras e não hospedeiras é relevante só quando o estudo está referido a estrelas de baixa massa. Esta observação simples parece sintetizar os resultados da análise de abundâncias apresentada das gigantes vermelhas do aglomerado aberto NGC 4349 até agora, no que diz respeito à estrela NGC 4349-127.

Na figura 3.17 são ilustradas as correlações entre a temperatura de condensação (Lodders, 2003) e as razões de abundância  $\langle [X/Fe] \rangle$  médias do aglomerado aberto estudado e a razão da estrela hospedeira NGC 4349-127 para os elementos refratários estudados na seção 3.4. Pesquisas como as de Maldonado & Villaver (2013), Nissen (2015) e Mishenina et al. (2016) mostram que estas correlações têm inclinações cujos valores são da ordem de grandeza  $10^{-5} \text{ dex} K^{-1}$ ; no caso das gigantes não hospedeiras de NGC 4349 a inclinação é  $(-17.38 \pm 13.36) \times 10^{-5}$ , para a estrela hospedeira é  $(-33.36 \pm 26.15) \times 10^{-5}$ . Os coeficientes de correlação são  $-0.46$  e  $-0.48$ , respetivamente, se tendo assim uma

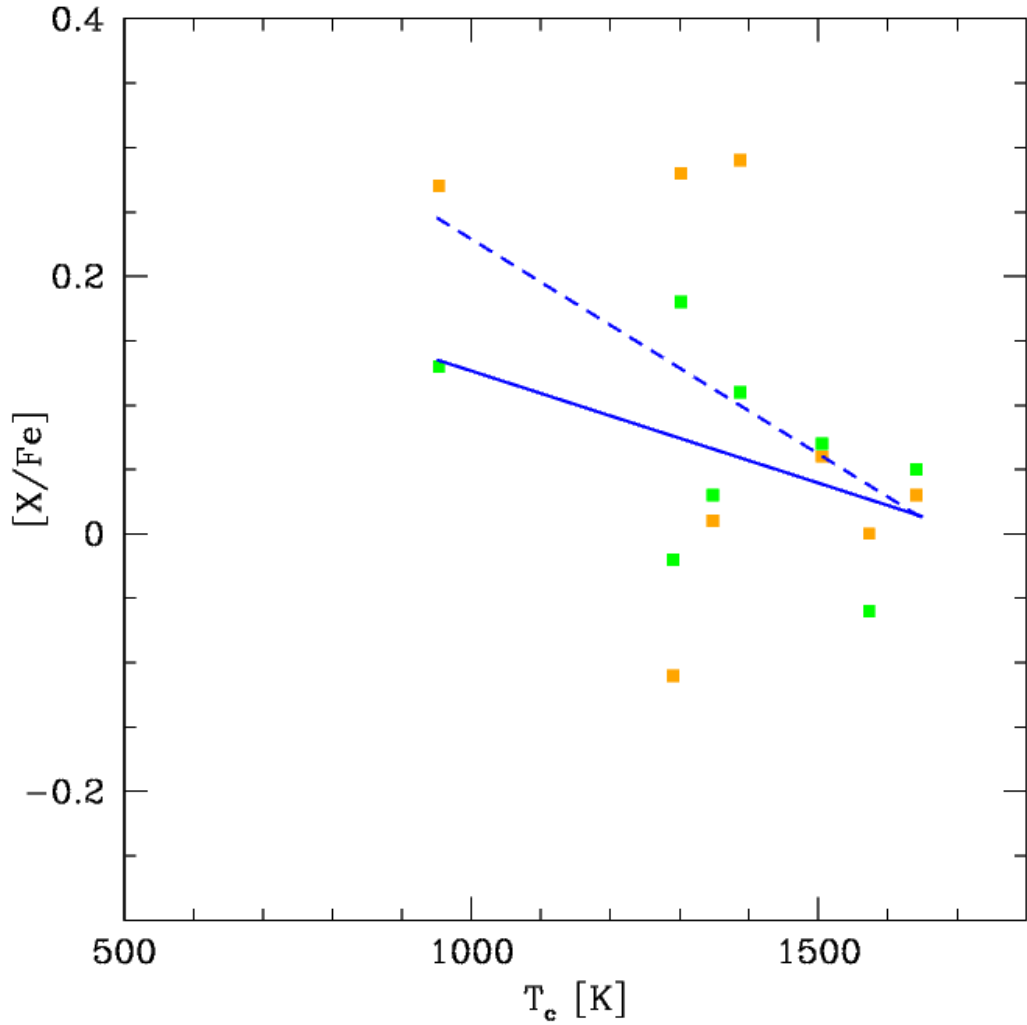


Figura 3.17: Distribuição das razões  $[X/Fe]$  em função da temperatura de condensação  $T_c$  (Lodders, 2003) dos elementos refratários analisados nas estrelas do aglomerado NGC 4349. Os quadrados verdes representam os valores médios das razões  $[X/Fe]$  para as gigantes não hospedeiras, os quadrados laranja, os valores destas razões exclusivamente da estrela NGC 4349-127. A linha azul continua corresponde ao melhor ajuste para as não hospedeiras e a linha tracejada o ajuste respectivo da hospedeira.



tendência fraca-moderada de correlação entre as abundâncias derivadas e a temperatura de condensação dos elementos nas estrelas estudadas.

A análise de elementos refratários feita nas estrelas do aglomerado NGC 4349 mostra valores concordantes com as tendências reportadas na literatura, no que diz respeito a relação entre as razões de abundância  $[X/Fe]$  e a temperatura de condensação  $T_c$  desses elementos. Particularmente, no caso da estrela hospedeira observa-se um pequeno enriquecimento em elementos- $\alpha$  que causa um desvio na inclinação de tal relação para esta estrela, equivalente ao dobro da encontrada nas gigantes não hospedeiras. Esse fato tem sido verificado em estrelas hospedeiras de planetas gigantes (Adibekyan et al. 2012). Tal enriquecimento não se afasta significativamente das tendências encontradas em gigantes de campo, como as analisadas por Mishenina et al. (2006) e Luck & Heiter (2007), assim como as gigantes de aglomerados com histórias evolutivas semelhantes à de NGC 4349. Essas sobreabundâncias poderiam ser devidas à condição de hospedeira da estrela NGC 4349-127, mas seu efeito não representa uma anomalia na composição química da estrela

### 3.5 Elementos do processo-s: Y, Zr, La, Ce e Nd

O estudo de abundâncias de elementos do processo-s como ítrio, zircônio, lantânio, cério e neodímio permite testar os modelos de nucleossíntese estelar, particularmente na fase pulsante do ramo assintótico das estrelas gigantes de massa inferior a  $4M_{\odot}$ , assim como os modelos de mistura convectiva após a terceira dragagem (Busso et al. 1999). Nas tabelas 3.7 e 3.8 os valores das razões  $[X/Fe]$  para tais elementos mostram um padrão bastante regular de abundâncias levemente superiores as solares nas gigantes vermelhas de NGC 4349. A diferença na abundância entre os elementos leves ( $ls$ : Y, Zr) e os pesados ( $hs$ : La, Ce e Nd) do processo-s é um indicador da eficiência do processo de captura de nêutros que gera estes elementos (Gallino et al. 1998). Nas gigantes

Estrela	$[Y/Fe]$	$[Zr/Fe]$	$[La/Fe]$
NGC 4349 - 5	$0.07 \pm 0.05(5)$	$0.13 \pm 0.05(5)$	$0.18 \pm 0.09(7)$
NGC 4349 - 9	$0.18 \pm 0.05(4)$	$0.12 \pm 0.12(4)$	$0.16 \pm 0.09(7)$
NGC 4349 - 53	$0.18 \pm 0.06(5)$	$0.02 \pm 0.06(6)$	$0.30 \pm 0.07(5)$
NGC 4349 - 79	$0.12 \pm 0.04(5)$	$-0.01 \pm 0.05(5)$	$0.10 \pm 0.09(4)$
NGC 4349 - 127	$0.08 \pm 0.07(4)$	$-0.02 \pm 0.06(7)$	$0.31 \pm 0.05(5)$
NGC 4349 - 168	$0.07 \pm 0.05(5)$	$0.09 \pm 0.07(5)$	$0.12 \pm 0.11(7)$
NGC 4349 - 174	$0.03 \pm 0.09(5)$	$0.13 \pm 0.12(6)$	$0.25 \pm 0.13(6)$
NGC 4349 - 203	$0.05 \pm 0.09(5)$	$0.25 \pm 0.04(5)$	$0.10 \pm 0.13(5)$
Média	$0.10 \pm 0.06$	$0.09 \pm 0.09$	$0.18 \pm 0.08$

Tabela 3.7: Razões de abundância  $[X/Fe]$  para os elementos do ítrio até o lantânio nas gigantes vermelhas de NGC 4349. Para cada estrela se inclui entre parênteses o número de linhas usadas na determinação da abundância respectiva.

Estrela	$[Ce/Fe]$	$[Nd/Fe]$	$[s/Fe]$
NGC 4349 - 5	$0.24 \pm 0.11(7)$	$0.23 \pm 0.13(12)$	$0.17 \pm 0.07$
NGC 4349 - 9	$0.18 \pm 0.10(10)$	$0.20 \pm 0.14(8)$	$0.17 \pm 0.03$
NGC 4349 - 53	$0.16 \pm 0.10(9)$	$0.33 \pm 0.10(13)$	$0.20 \pm 0.12$
NGC 4349 - 79	$0.26 \pm 0.13(9)$	$0.10 \pm 0.11(11)$	$0.11 \pm 0.10$
NGC 4349 - 127	$0.14 \pm 0.10(7)$	$0.09 \pm 0.10(9)$	$0.12 \pm 0.12$
NGC 4349 - 168	$0.11 \pm 0.08(9)$	$0.09 \pm 0.06(10)$	$0.10 \pm 0.02$
NGC 4349 - 174	$0.06 \pm 0.09(7)$	$0.07 \pm 0.14(9)$	$0.09 \pm 0.05$
NGC 4349 - 203	$0.11 \pm 0.11(7)$	$0.11 \pm 0.11(10)$	$0.12 \pm 0.07$
Média	$0.16 \pm 0.07$	$0.15 \pm 0.09$	$0.14 \pm 0.04$

Tabela 3.8: Razões de abundância  $[X/Fe]$  para os elementos do cério até o neodímio nas gigantes vermelhas de NGC 4349. Para cada estrela se inclui entre parênteses o número de linhas usadas na determinação da abundância respectiva. Na última coluna, a média de abundância dos elementos de processo-s para cada estrela

vermelhas de NGC 4349 tem-se que  $\langle [ls/Fe] \rangle = 0.10 \pm 0.01$  dex e  $\langle [hs/Fe] \rangle = 0.16 \pm 0.02$  dex, com o qual pode se afirmar que o processo-s é relativamente eficiente, pois as abundâncias de elementos pesados  $hs$  são levemente maiores que as calculadas em elementos leves  $ls$ .

Na figura 3.18 é ilustrada a comparação entre as razões de abundância  $[X/Fe]$  destes elementos (exceto zircônio) das estrelas gigantes da amostra, com as derivadas da análise de gigantes de campo de Mishenina et al. (2006) e Luck & Heiter, (2007), e os valores

médios de tais razões, obtidos em uma amostra de aglomerados abertos da literatura. Nesta figura pode se concluir que não há enriquecimento das abundâncias de elementos do processo-s, respeito à tendência dada pela evolução química, e que as abundâncias encontradas correspondem bem com as esperadas para alguns destes aglomerados, cujas idades e massas de turn-off são comparáveis às das estrelas analisadas.

Na pesquisa sobre abundâncias de elementos de processo-s há um tópico explorado só recentemente, relativo à comparação entre as abundâncias das gigantes binárias e das gigantes não binárias em aglomerados abertos. Novamente, o fato de se ter estimativas mais precisas da distância e luminosidade das estrelas em aglomerados favorece os estudos sobre estrelas químicamente peculiares. Algumas anomalias químicas como a sobreabundância de bário em estrelas podem ser explicadas considerando as interações gravitacionais em sistemas binários. As estrelas de bário não são tão energéticas quanto as estrelas do ramo assintótico para sintetizar elementos com número atômico superior a 30, como o bário ou o estrôncio. A melhor explicação para tais enriquecimentos em estrelas gigantes é a transferência de massa dentro do sistema binário, desde uma estrela que já experimentou sua fase de pulsos térmicos, agora anã branca, e a estrela observada, que ainda não evoluiu além da segunda dragagem (Sales Silva et al. 2014).

Assim, a análise de abundâncias de elementos pesados em gigantes de sistemas binários em aglomerados abertos é um tópico importante, tanto para otimizar os modelos da nucleossíntese estelar, quanto para identificar a natureza das estrelas secundárias destes sistemas, geralmente até cinco magnitudes mais fracas do que as principais. Uma estrela binária que apresenta uma média de abundância dos elementos de processo-s alta ( $[s/Fe] > 0.3$ ) poderia ser uma potencial candidata a ser uma estrela de bário, se tendo então uma fonte indireta de informação sobre a estrela companheira. No aglomerado NGC 4349 têm 3 estrelas binárias, NGC 4349-79, 168 e 203, além do sistema de NGC 4349. Usando as abundâncias das tabelas 3.7 e 3.8 se determinaram as abundâncias médias  $\langle [X/Fe] \rangle_{n-bin}$  dos elementos de processo-s estudados e se compararam com as

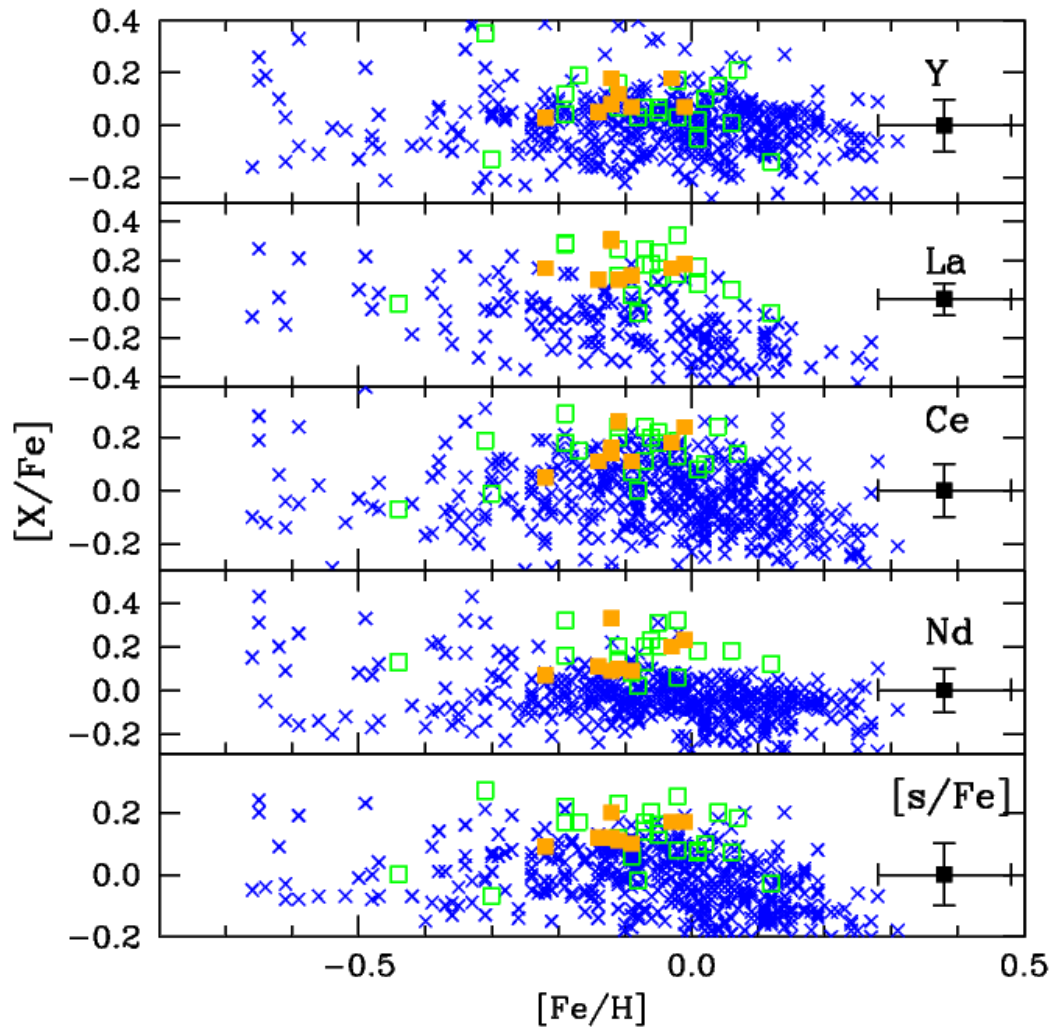


Figura 3.18: Razões  $[X/Fe]$  versus  $[Fe/H]$  dos elementos do processo-s das gigantes vermelhas de NGC 4349 (quadrados laranja) comparadas com as das gigantes de campo analisadas por Mishenina et al. (2006) e Luck & Heiter (2007) (cruzes azuis) e as gigantes de aglomerados com idades entre 0.1 e 4.5 Ganos (Quadrados verdes vazios). Aglomerados incluídos: NGC 2224, NGC 3960, NGC 2660, NGC 2477, Be 29 e Be 20 (Maiorca et al. 2011); NGC 752, NGC 1817 e NGC 2506 (Reddy et al. 2012); NGC 2527, NGC 2282, NGC 2335, NGC 2482, NGC 2251, NGC 2539 e NGC 2266 (Reddy et al. 2013); NGC 3114 (Santrich et al. 2013); NGC 6940 e Hyades (Bocek Topcu et al. 2016); NGC 5316 (Drazdauskas et al. 2016), NGC 2360, NGC 3680, NGC 5822 (Peña Suárez et al. 2017, aceito).

abundâncias individuais das binárias da amostra e com a média de abundância de cada elemento para a amostra completa  $\langle [X/Fe] \rangle$ . Os resultados, na figura 3.19 permitem concluir que não há processos de enriquecimento associados à binaridade nas estrelas estudadas, o que fornece um critério para desestimar a existência de anãs brancas em NGC 4349 (Sales Silva et al. 2014).

Considerando as idades dos aglomerados selecionados da literatura para comparação, alguns são mais velhos que 1.5 Ganos, como é o caso de NGC 3680 (1.78 Ganos) ou Berkeley 20 (4.3 Ganos). Maiorca et al. (2011) mostram que os aglomerados com idade superior a este valor têm abundâncias médias  $[s/Fe]$  próximas ou inferiores de zero, enquanto os aglomerados jovens apresentam abundâncias acima de 0.1 dex. Segundo estes autores, tal tendência está relacionada com uma maior quantidade de estrelas de baixa massa que atingiram a fase gigante assintótica e enriqueceram os aglomerados com elementos gerados pelo processo-s, como foi mencionado na seção 1.1. Reddy et al. (2015) sugerem que as diferenças de abundância destes elementos entre os aglomerados do disco galáctico poderiam ser explicadas considerando as diferentes condições da mistura nos diferentes lugares onde os aglomerados se formaram, que poderiam ter escalas de tempo diferentes, pelo qual em alguns aglomerados essa mistura teria sido mais eficiente do que em outros.

Considerando as estrelas de campo adotadas como referência e tomando as estrelas analisadas por Luck & Heiter (2007), cujas idades estão disponíveis, é possível estudar a razão  $[s/Fe]$  como função da idade, tanto para estas como para as estrelas dos aglomerados selecionados. Na figura 3.20 são mostradas as distribuições da abundância média dos elementos do processo-s com a idade para as amostras de gigantes mencionadas e os respectivos ajustes lineares de cada uma delas<sup>6</sup>. Esta figura permite ver que a razão

---

<sup>6</sup> Inclinação do ajuste linear para aglomerados:  $-0.024 \pm 0.014$ , inclinação do ajuste das estrelas de campo:  $-0.028 \pm 0.004$ . Os coeficientes de correlação são  $-0.16$  e  $0.36$ , respectivamente

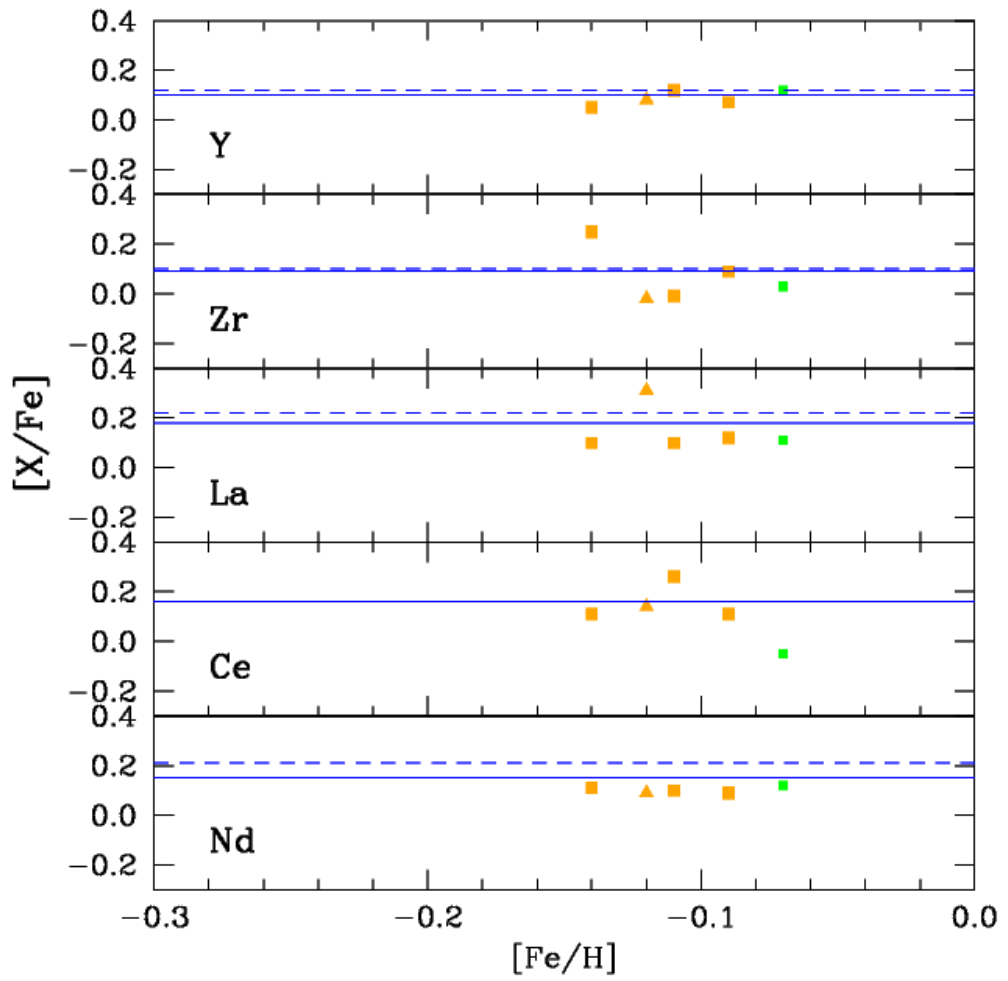


Figura 3.19: Razões  $[X/Fe]$  das estrelas binárias NGC 4349-79, 168 e 203 e da estrela hospedeira NGC 4349 (quadrados e triângulo laranja), comparadas com as abundâncias médias  $\langle [X/Fe] \rangle$  e  $\langle [X/Fe] \rangle_{n-bin}$  (linhas azuis contínuas e tracejadas, respectivamente). Os pontos verdes correspondem aos resultados de Van der Swaelmen et al. (2016) para a estrela NGC 4349-203.

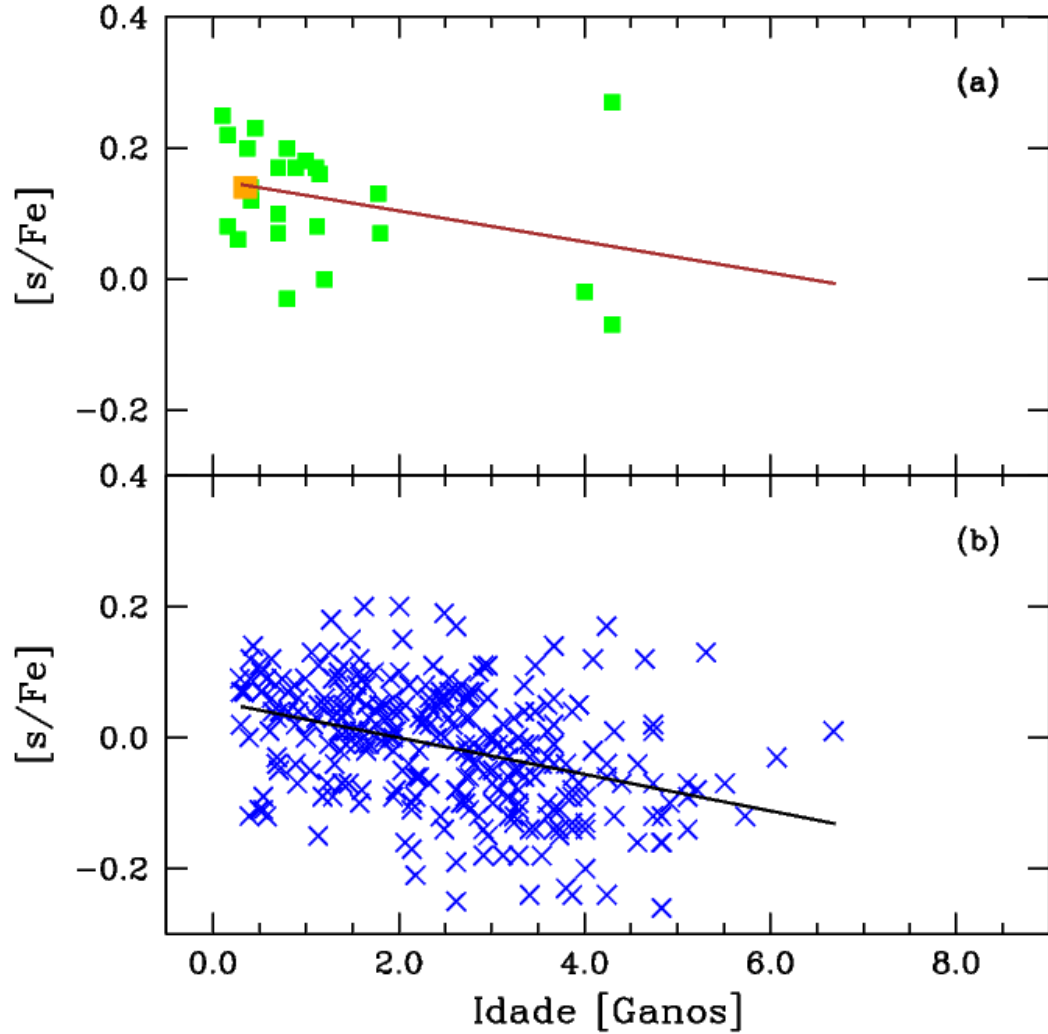


Figura 3.20: Razões  $[s/Fe]$  em função da idade do aglomerado, em Ganos. No painel (a) o valor correspondente ao aglomerado NGC 4349 (quadrado laranja) e em quadrados verdes, os aglomerados selecionados para a comparação. A linha contínua em marrom é o ajuste linear exclusivamente de tais pontos. No painel (b) as cruces azuis representam os valores correspondentes às estrelas de campo analisadas por Luck & Heiter (2007). A linha preta corresponde ao ajuste linear desses pontos.

$[s/Fe]$  do aglomerado NGC 4349 se encontra de acordo com a abundância observada tanto em aglomerados abertos como em estrelas de campo, embora exista uma discrepância entre os coeficientes de correlação respectivos, associada com a diferença na quantidade de dados em ambas as amostras de referência mencionadas.

Novamente pode se afirmar que as abundâncias destes elementos não indicam a ocorrência de eventos que pudessem ter provocado mudanças na abundância destes elementos. Na análise evolutiva de populações de estrelas geralmente a idade não é um parâmetro fácil de ser fixado com precisão. Assim, outros indicadores evolutivos como a razão  $[Y/Mg]$  recebem especial interesse na literatura. De Silva et al. (2012) encontram uma correlação entre esta razão de abundância e a idade estelar para uma amostra de 25 estrelas de tipo solar. Posteriormente, este achado seria confirmado por Nissen et al. (2015), estudando uma amostra de estrelas gêmeas solares. Trabalhos mais recentes como Feltzing et al. (2017) fornecem um estudo mais geral desta relação, questionando sua sensibilidade respeito a parâmetros como a metalicidade ou ainda a distância e o fato das estrelas pertencerem a uma determinada região estrutural da galáxia (disco fino ou espesso).

Delgado Mena et al. (2017) analisam uma amostra de 1111 estrelas FGK nas diferentes regiões da Galáxia: halo, disco espesso e fino, e identificam entre elas uma “população estelar” denominada de estrelas *h $\alpha$ mr*: *high  $\alpha$ -elements, metal rich*, estrelas de metalicidade comparável com a solar e sobreabundância de elementos- $\alpha$ . Os autores estudam a composição química das estrelas da amostra, usando espectros do HARPS, focando nos elementos pesados, desde o cobre até o európio, e particularmente no caso dos elementos de processo-s (com exceção do lantânio) fazem uma triagem, selecionando os espectros menos afetados por efeitos de *blending*, que dificultam o estudo das linhas fracas destes elementos, analisando finalmente os espectros das estrelas com temperatura superior a 5300 K. A figura 3.21 mostra a razão  $[Y/Mg]$  versus metalicidade das estrelas estudadas por Delgado Mena et al. (2017).



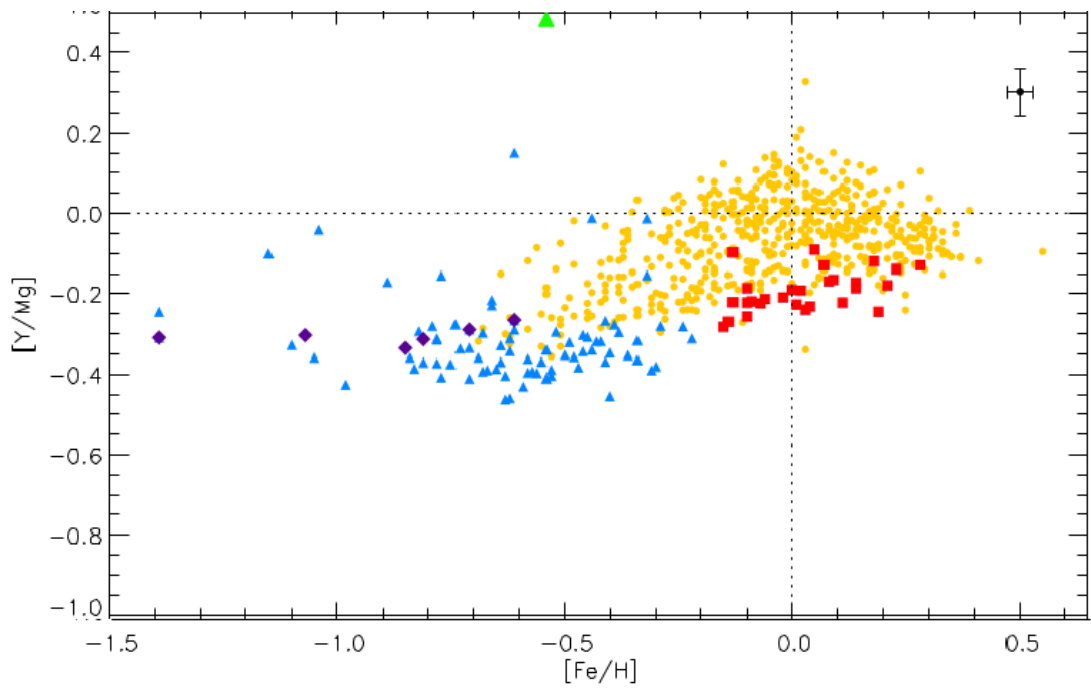


Figura 3.21: Razões  $[Y/Mg]$  em função da metalicidade  $[Fe/H]$  da amostra de estrelas FGK com temperaturas superiores a 5300 K analisadas por Delgado Mena et al. (2017). Os ícones laranja representam estrelas do disco fino, os azuis, estrelas do disco espesso e os roxos, estrelas do halo da Galáxia. Os ícones vermelhos correspondem às estrelas  $\alpha$  e o ícone verde representa a estrela enriquecida HD11397. O gráfico foi tomada de Delgado Mena et al. (2017).

Considerando os valores das razões  $[Mg/Fe]$  e  $[Y/Fe]$ , nas tabelas 3.5 e 3.7, o valor medio da razão  $\langle[Y/Mg]\rangle = -0.02\pm 0.10$  dex para as estrelas do aglomerado NGC 4349. Com esta média o aglomerado, cuja metalicidade é  $\langle[Fe/H]\rangle = -0.11\pm 0.06$  dex, estaria dentro da tendência que os resultados de Delgado Mena et al. (2017) atribuem às estrelas do disco fino. Merece especial atenção a estrela NGC 4349-127, cuja razão  $[Y/Mg] = -0.21$  dex, o que faria com que pudesse inicialmente ser incluída na população *h $\alpha$ mr*. Adibekyan et al. (2011, 2013) encontraram que uma parte das estrelas analisadas tinha metalicidade superior a  $-0.2$  dex e um enriquecimento em elementos refratários, particularmente Mg I, Si I, Ti I and Ti II, sendo tais estrelas parte do disco fino da galáxia, porém com tendências de abundância destes elementos fora do padrão. Por tal motivo foram catalogadas como uma população estelar.

A estimativa da razão  $[Y/Mg]$  tem neste caso também um intuito qualitativo. Delgado Mena et al. (2017) restringiram a amostra analisada na figura 3.21 em função da temperatura, evitando as grandes incertezas da análise das linhas fracas dos elementos de processo-s em estrelas frias e tal critério deixaria fora as gigantes vermelhas de NGC 4349, pois sua temperatura é inferior a 5300 K. Contudo, esta análise qualitativa possui um caráter mais definitivo, pelo fato do estudo mencionado tratar sobre estrelas gigantes. Delgado Mena et al. (2017) concluem, relativo às estrelas *h $\alpha$ mr* que estas se distinguem por terem abundâncias claramente maiores em elementos como Cu, Zn, Nd e Eu quando comparadas com as estrelas do disco fino e baixas abundâncias de Ba e Y, comparadas com a média de tais estrelas, à mesma metalicidade. Limitando esta discussão aos elementos Nd e Y, na estrela NGC 4349-127 nenhum deles apresenta valores fora do padrão da abundância solar, de acordo com as tabelas 3.7 e 3.8. Por tal motivo descartaria-se a hipótese desta estrela pertencer à população *h $\alpha$ mr*.

Espécies	$\Delta T_{eff}$ +100 K	$\Delta \log g$ +0.3	$\Delta \xi$ +0.3 km s <sup>-1</sup>	$\Delta [Fe/H]$ 0.09	$\Delta W_\lambda$ +3 mÅ	$(\sum \sigma^2)^{1/2}$	$\sigma_{obs}$
Fe I	+0.11	-0.08	-0.13	+0.02	+0.04	+0.19	+0.12
Fe II	-0.09	+0.14	-0.16	-0.01	+0.04	+0.23	+0.14
Mg I	+0.06	+0.05	-0.06	-0.01	+0.04	+0.11	+0.10
Al I	+0.11	-0.04	-0.05	-0.03	+0.05	+0.14	+0.10
Si I	-0.02	-0.06	-0.07	+0.02	+0.04	+0.11	+0.07
Ca I	+0.14	-0.04	-0.14	-0.04	+0.04	+0.21	+0.07
Ti I	+0.17	-0.02	-0.10	-0.02	+0.05	+0.21	+0.12
Cr I	+0.12	+0.03	-0.05	-0.03	+0.04	+0.15	+0.13
Ni I	+0.06	+0.04	-0.09	+0.03	+0.04	+0.13	+0.12
Y II	+0.04	-0.15	-0.12	+0.02	+0.05	+0.20	+0.05
Zr I	+0.16	-0.04	+0.02	-0.05	+0.04	+0.18	+0.05
La II	+0.03	+0.17	-0.10	-0.04	+0.06	+0.22	+0.09
Ce II	+0.03	-0.05	-0.06	+0.03	+0.04	+0.18	+0.11
Nd II	+0.03	+0.02	-0.05	-0.02	+0.05	+0.22	+0.15

Tabela 3.9: Incertezas nas abundâncias calculadas para a estrela NGC 4349-5. A segunda coluna fornece a variação da abundância causada pela variação na temperatura efetiva  $T_{eff}$ . As outras colunas mostram as variações nas abundâncias causadas pelas modificações em  $\log g$ ,  $\xi$ ,  $[Fe/H]$ , and  $W_\lambda$ . A sétima coluna mostra a incerteza *rms*. A última coluna fornece a dispersão observada entre as abundâncias de cada linha para os elementos com mais de três linhas estudadas.

### 3.6 Incertezas nas abundâncias

Na análise de abundâncias vêm implícitas várias fontes de erro, particularmente associados à determinação dos parâmetros atmosféricos e à medida das larguras equivalentes das linhas espectrais. Os erros das larguras equivalentes dependem da razão sinal-ruído  $S/N$  e da resolução espectral. Nos espectros de alta resolução ( $R=48000$ ) utilizados para uma razão  $S/N=150$  a incerteza esperada nas larguras equivalentes entre 2 e 3 mÅ, de acordo com Cayrel (1988). Determinar a incerteza associada a tais erros é possível testar as alterações nas abundâncias de cada elemento com a alteração de cada um dos parâmetros, em forma individual. A combinação quadrática de tais alterações fornece a incerteza total da abundância. As incertezas totais das abundâncias da estrela NGC 4349-5 são apresentadas na coluna 7 da tabela 3.9 e os valores de desvio padrão observados nas abundâncias são fornecidos na última coluna.

Na coluna 6 da tabela 3.10 são apresentadas as incertezas das abundâncias dos elemen-

Espécies	$\Delta T_{\text{eff}}$ +100 K	$\Delta \log g$ +0.3	$\Delta \xi$ +0.3 km s <sup>-1</sup>	$\Delta \log (\text{C})$ +0.20	$\Delta \log (\text{N})$ +0.20	$\Delta \log (\text{O})$ +0.20	$\sigma_{\text{tot}}$
C	+0.12	+0.08	0.00	—	+0.03	+0.11	+0.18
N	+0.20	+0.10	-0.02	-0.19	—	+0.10	+0.31
O	+0.08	+0.15	0.00	-0.02	+0.01	—	+0.17

Tabela 3.10: Efeito dos erros dos parâmetros atmosféricos nas abundâncias de carbono, nitrogênio e oxigênio para a estrela NGC 4349-5.

tos CNO da estrela NGC 4349-5. A estimativa de abundâncias de carbono e nitrogênio é feita utilizando linhas moleculares de CN, pelo qual a incerteza nas abundâncias de carbono incide na variação das abundâncias de nitrogênio. A análise de incertezas mostra que os elementos neutros são mais sensíveis às variações de temperatura, enquanto que as espécies ionizadas são mais sensíveis às variações da gravidade superficial

Para finalizar, a seguir são apresentadas as tabelas 3.11, 3.12 e 3.13 que sintetizam os resultados obtidos no Capítulo 3.

Est. #	$v \sin i$ (km s <sup>-1</sup> )	$A(\text{Li})$	$[\text{C}/\text{Fe}]$ (dex)	$[\text{N}/\text{Fe}]$ (dex)	$[\text{O}/\text{Fe}]$ (dex)	$[\text{N}/\text{C}]$ (dex)	$^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$	$\text{C}/\text{N}$	$\text{C}/\text{O}$
5	7.30	0.31	-0.29	0.39	-0.23	0.68	20	0.83	0.43
9	9.20	1.31	-0.17	0.50	-0.14	0.67	20	0.85	0.46
53	3.20	0.00	-0.12	0.47	-0.03	0.59	24	1.02	0.40
79	4.80	0.86	-0.35	0.49	-0.29	0.84	18	0.58	0.43
127	5.80	1.06	-0.43	0.28	-0.46	0.71	18	0.78	0.52
168	6.00	0.95	-0.21	0.39	-0.16	0.60	18	1.00	0.44
174	4.40	0.65	-0.32	0.30	-0.43	0.62	18	0.95	0.63
203	6.20	—	—	—	—	—	—	—	—
Media	5.86±1.84	0.74±0.44	-0.27±0.11	0.42±0.08	-0.25±0.16	0.67±0.09	19±2	0.86±0.15	0.47±0.08

Tabela 3.11: Principais resultados derivados no Capítulo 3 para as gigantes vermelhas de NGC 4349

Est. #	$[\text{Na}/\text{Fe}]_{\text{NETL}}$ (dex)	$[\text{Mg}/\text{Fe}]$ (dex)	$[\text{Al}/\text{Fe}]$ (dex)	$[\text{Si}/\text{Fe}]$ (dex)	$[\text{Ca}/\text{Fe}]$ (dex)	$[\text{Ti}/\text{Fe}]$ (dex)	$[\text{Cr}/\text{Fe}]$ (dex)	$[\text{Ni}/\text{Fe}]$ (dex)	$[\text{Mg}/\text{Si}]$ (dex)
5	0.15	0.04	0.05	0.11	0.12	-0.08	-0.07	0.02	0.07
9	0.09	0.11	-0.05	0.08	0.09	0.03	0.03	-0.02	-0.03
53	0.10	0.18	0.12	0.24	0.08	0.03	-0.04	0.14	0.06
79	0.13	0.05	0.04	0.18	0.06	-0.09	-0.03	-0.01	0.13
127	0.27	0.29	0.03	0.28	0.06	0.00	-0.11	0.01	-0.01
168	0.16	0.03	0.06	0.13	0.05	-0.12	-0.02	-0.02	0.10
174	0.17	0.15	0.13	0.25	0.04	0.00	0.00	0.12	0.10
203	0.16	0.16	0.02	0.10	0.07	-0.14	0.02000	0.01	-0.06
Media	0.15±0.06	0.13±0.08	0.05±0.07	0.17±0.08	0.07±0.02	-0.03±0.07	-0.02±0.05	0.04±0.07	0.05

Tabela 3.12: Principais resultados derivados no Capítulo 3 para as gigantes vermelhas de NGC 4349

Est.	[Y/Fe] (dex)	[Zr/Fe] (dex)	[La/Fe] (dex)	[Ce/Fe] (dex)	[Nd/Fe] (dex)	[s/Fe] (dex)	[Y/Mg] (dex)
5	0.07	0.13	0.18	0.24	0.23	0.17	0.03
9	0.18	0.12	0.16	0.18	0.20	0.17	0.07
53	0.18	0.02	0.30	0.16	0.33	0.20	0.00
79	0.12	-0.01	0.10	0.26	0.10	0.11	0.07
127	0.08	-0.02	0.31	0.14	0.09	0.12	-0.21
168	0.07	0.09	0.12	0.11	0.09	0.10	0.04
174	0.03	0.13	0.25	0.06	0.07	0.09	-0.12
203	0.05	0.25	0.10	0.11	0.11	0.12	-0.11
Media	0.10±0.06	0.09±0.09	0.18±0.08	0.16±0.07	0.15±0.09	0.14±0.04	-0.03±0.10

Tabela 3.13: Principais resultados derivados no Capítulo 3 para as gigantes vermelhas de NGC 4349

---

## Capítulo 4

# CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS

O estudo das abundâncias químicas no aglomerado aberto NGC 4349 foi desenvolvido tomando como ponto de partida a relevância destas análises na construção de modelos mais realistas e aproximados do gradiente radial da composição química da Via Láctea. Outra das motivações foi discutir em particular o estágio evolutivo das estrelas analisadas, considerando efeitos como a rotação ou a influência da acreção de corpos orbitantes ou estrelas companheiras, no caso dos sistemas binários presentes entre as gigantes vermelhas de NGC 4349. Por fim, outra razão manifestada para encorajar este estudo foi a análise da relação entre a presença de um objeto subestelar orbitante ao redor da estrela NGC 4349-127 e o padrão das abundâncias desta, ainda mais considerando que a literatura sobre estudo de abundâncias em estrelas gigantes hospedeiras de planetas é muito escassa. Assim, atentando esses grandes tópicos, as conclusões deste estudo poderiam ser sintetizadas como segue.

### 4.1 Conclusões

1. Os parâmetros atmosféricos temperatura efetiva, gravidade superficial, velocidade de microturbulência e metalicidade derivados da análise do equilíbrio de

excitação e ionização do ferro se encontram em bom acordo com os reportados na literatura. A metalicidade média  $\langle [Fe/H] \rangle$  determinada do aglomerado concorda com os valores da literatura, sendo este um aglomerado com metalicidade inferior à solar. Nesta tese foram determinados pela primeira vez os parâmetros atmosféricos da estrela NGC 4349-79. Quando determinada a gravidade superficial evolutiva, obtiveram-se valores em acordo com os que foram derivados da análise espectroscópica e com os valores fornecidos pela isocrona do aglomerado, adotada de Marigo et al. (2017), considerando a metalicidade obtida da análise espectroscópica e as correções fotométricas de Majaess et al. (2012). Da análise evolutiva pode se inferir que na estrela NGC 4349-9 ainda não finalizou a primeira dragagem, enquanto que as estrelas NGC 4349-5, 53, 79, 168 e 203 se encontram no clump das gigantes do aglomerado. As estrelas NGC 4349-127 e 174 se encontram no final do clump das gigantes, sendo as estrelas mais frias e com a menor gravidade superficial de NGC 4349.

2. No que diz respeito às velocidades rotacionais destas estrelas, encontra-se um alto grau de espalhamento, com valores entre  $3.20 \text{ km s}^{-1}$ , para a estrela NGC 4349-53, até  $9.20$  para a estrela NGC 4349-9. No caso desta última, a alta rotação pode ser explicada considerando que tal estrela é a menos evoluida da amostra. A dispersão observada das velocidades rotacionais é condizente com a distribuição de velocidades rotacionais observada em gigantes de massa intermediária de outros aglomerados abertos jovens. A velocidade rotacional da estrela hospedeira NGC 4349-127 ( $v \sin i = 5.8 \text{ km s}^{-1}$ ) não se afasta da tendência das velocidades rotacionais das estrelas gigantes. Assim, o efeito da presença do companheiro subestelar desta estrela não se manifestou com o aumento do momento angular desta. Considerando as binárias da amostra, NGC 4349-79, 168 e 203, encontra-se que a condição de binaridade não implicou no aumento da rotação destas estrelas respeito às outras gigantes do aglomerado.

3. As abundâncias de lítio das gigantes vermelhas de NGC 4349 obtidas neste estudo concordam com os valores disponíveis na literatura, sendo este o elemento mais estudado nestas estrelas até agora. A abundância relativamente alta deste elemento na estrela NGC 4349-9 ( $Ab(Li) = 1.31$ ) condiz com o estágio evolutivo já determinado. A abundância de lítio na estrela binária NGC 4349-79, determinada pela primeira vez, é consistente com as abundâncias das outras gigantes da amostra. As abundâncias deste elemento apresentam valores coerentes com os estágios evolutivos das estrelas.

As abundâncias de lítio e as razões isotópicas de carbono das estrelas de NGC 4349 não se mostram correlacionadas. Particularmente, no caso da estrela NGC 4349-127 se conclui que na sua história evolutiva não houve um evento significativo o suficiente para estimular o aumento da produção de lítio ou a variação da razão isotópica de carbono associada a processos não convectivos de mistura. Assim, podemos afirmar que qualquer episódio de acreção, como o *engulfment* de um planeta no passado desta estrela não teria alterado sua composição química nem sua dinâmica.

4. As abundâncias de carbono, nitrogênio e oxigênio obtidas pela primeira vez nas gigantes vermelhas de NGC 4349 se ajustam às tendências de tais abundâncias, encontradas nas gigantes vermelhas do campo e em aglomerados abertos com características evolutivas semelhantes a NGC 4349. A média das abundâncias de C, N e O é consistente com o esperado para estrelas de massa intermediária nos estágios evolutivos previamente determinados. Os valores da razão isotópica de carbono derivados para as estrelas analisadas são semelhantes aos reportados na literatura, e consistentes com seus estágios evolutivos.

Os valores derivados da razão  $^{12}C/^{13}C$  pela primeira vez para as estrelas NGC 4349-53, 79 e 168 também mostram que não há evidências significativas de processos alternativos de mistura nestas estrelas. As médias das razões  $C/N$  e  $^{12}C/^{13}C$



do aglomerado NGC 4349 são consistentes com a tendência esperada em aglomerados de massa superior a  $3M_{\odot}$ . A evolução das abundâncias químicas dos elementos C e N nas gigantes deste aglomerado depende fundamentalmente da mistura convectiva padrão, de acordo com os modelos teóricos de Charbonnel & Lagarde (2010) e Lagarde et al. (2012). A relação entre os valores das razões isotópica  $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$  e  $[N/C]$  mostra uma tendência coerente com os estágios evolutivos das gigantes de NGC 4349, de acordo com tais modelos.

5. As gigantes vermelhas de NGC 4349 apresentam abundâncias dos elementos refratários ajustadas às tendências encontradas para estas espécies químicas em gigantes do campo e em gigantes de aglomerados abertos com idade semelhante. As abundâncias de elementos do grupo do ferro calculadas na estrela NGC 4349-127 não mostram diferenças significativas com os resultados encontrados nas estrelas não hospedeiras do aglomerado, em concordância com a literatura. A abundância de sódio das estrelas estudadas é suficientemente explicada através dos mecanismos de mistura convectiva padrão e coerente com os valores encontrados em outros aglomerados semelhantes da literatura.

As abundâncias médias de sódio e oxigênio do aglomerado se encontram inseridas em forma coerente dentro das tendências destas abundâncias com a metalicidade, encontradas em aglomerados com diferentes idades e nas estrelas de campo. Observa-se uma leve sobreabundância de elementos- $\alpha$  (Mg, Si e Ca) na estrela NGC 4349-127, que ocasiona um desvio na tendência das abundâncias dos elementos refratários com a temperatura de condensação dos elementos para esta estrela, quando comparada com as outras estrelas do aglomerado, que de acordo com a literatura poderia ser explicada pelo fato de tal estrela ter um objeto subestelar orbitando.

6. As abundâncias dos elementos de processo-s calculadas pela primeira vez nas gigantes de NGC 4349 são consistentes com as encontradas nas gigantes de campo

e em outros aglomerados abertos de idade semelhante. Em nenhuma das estrelas estudadas verificou-se uma abundância elevada destes elementos, o que permite afirmar que tais estrelas ainda não avançaram sobre o ramo gigante assintótico. Por outro lado, o aglomerado NGC 4349 se ajusta bem à correlação entre a razão média de abundância dos elementos de processo-s  $[s/Fe]$  e a idade, observada tanto em estrelas de campo como em outros aglomerados abertos. Considerando as gigantes binárias NGC 4349-79, 168 e 203, pode se afirmar que não apresentam nenhuma evidência de processos de interação gravitacional que pudesse indicar a presença de estrelas de bário ou anãs brancas no aglomerado NGC 4349.

7. Na discussão sobre os efeitos da presença do objeto subestelar sobre as abundâncias químicas da sua estrela hospedeiras NGC 4349-127 foram estudados vários indicadores. A análise da metalicidade das gigantes do aglomerado estudado mostra que não houve episódios particulares de alteração desta em nenhuma das estrelas, incluindo a hospedeira NGC 4349-127. A metalicidade desta pareceria ser consequência exclusiva da evolução do disco protoplanetário, cuja massa original parece ter sido suficiente para permitir a existência do objeto subestelar que a orbita, a pesar da metalicidade subsolar do aglomerado. A falta de literatura sobre a razão  $C/O$  em gigantes hospedeiras limita a análise do resultado obtido pra estrela NGC 4349-127, quando comparada com as outras gigantes do aglomerado. O valor obtido,  $C/O_{NGC4349-127} = 0.53$  é consistente com os resultados da literatura sobre estrelas anãs hospedeiras, especificamente aquelas cujos objetos substelares teriam silício na forma de moléculas de  $SiO_2$ .

O cálculo da razão  $[Mg/Si]$  da estrela hospedeira fornece um valor coerente com a tendência desta razão com a metalicidade em estrelas anãs hospedeiras de campo, não tendo literatura para interpretar esta razão em gigantes hospedeiras. Por fim, considerando a análise da razão  $[Y/Mg]$  das gigantes de NGC 4349, observa-se que estas têm a tendência padrão encontrada em estrelas evoluidas do disco

fino da galáxia. Na estrela NGC 4349-127, seu valor da razão  $[Y/Mg] = -0.21$  inicialmente sugeria que a estrela pertencia à população  $h\alpha mr$ , mas a conferência das suas abundâncias de neodímio e ítrio permitiu descartar tal hipótese. Assim, se conclui que o valor obtido desta razão na estrela NGC 4349-127 poderia ser consequência da presença do objeto subestelar.

## 4.2 Perspectivas

Um objetivo muito interessante de pesquisa é a possibilidade de trabalhar com aglomerados abertos de metalicidade menor que -0.2 e mais velhos do que 2 Ganos para continuar estudando as tendências das abundâncias químicas que já foram o objeto de estudo ao longo do Doutorado, em aglomerados jovens (NGC 4349) e de idade intermediária (NGC 2360, NGC 3680 e NGC 5822), ganhando assim um olhar integrador, tanto dos resultados de tais estudos para objetos em diferentes faixas etárias, quanto da experiência abrangente de estudar espectros de estrelas de baixa metalicidade, sejam de aglomerados do disco fino ou do disco espesso.

Outro dos objetivos posteriores, quase uma ambição pessoal, é apreender sobre as técnicas de simulação numérica relacionadas com estudo de abundâncias químicas da Galáxia, tentando entender os modelos que fornecem o enriquecimento associado à produção dos elementos leves, dos elementos- $\alpha$  e dos elementos de processo-s estudados, para gerar análises comparativas de observações e simulações ajustadas a parâmetros observacionais próprios. Foi afirmado que era um “assunto pessoal” considerando que boa parte da análise e discussão dessa tese foi referida a modelos teóricos da evolução estelar e da composição química da Galáxia, e resultava interessante tentar entender a estrutura por trás de tais construções teóricas/computacionais.

Sendo que há modelos usados pelos pesquisadores sobre itens diversos dentro dos estu-

dos evolutivos de estrelas e aglomerados, como os de Charbonnel & Lagarde (2010) e Lagarde et al. (2012) para dar conta dos mecanismos de mistura interna das estrelas gigantes, valeria a pena criar modelos para estudar hipóteses como a adotada por Maiorca et al. (2011) para explicar a tendência da razão de abundância  $[s/Fe]$  dos elementos de processo-s com a idade dos aglomerados, entre outros indicadores evolutivos. Uma das questões abertas nos estudos sobre a evolução galáctica é o modelamento dos yields, considerando tanto o volume de material misturado quanto a eficiência da mistura das espécies químicas (Matteucci, 2012), como foi comentado na Introdução. Acrescentar enfoques e análises alternativas para contribuir no estudo de tais itens é uma motivação muito atraente no futuro profissional, ainda mais tendo a possibilidade de testar tais desenvolvimentos com resultados observacionais próprios.

Com certeza, uma perspectiva interessante que favoreceria as ideias mencionadas é poder continuar usufruindo das vantagens oferecidas por acordos interinstitucionais, como o vigente entre ESO e o Observatório Nacional, na condição de posdoutorando, participando de missões observacionais, procurando gigantes de aglomerados abertos velhos de baixa metalicidade. Outro campo de pesquisa de interesse pessoal que se veria beneficiado com as facilidades de acordos como o aludido é o levantamento de novos espectros de estrelas gigantes com planetas em aglomerados abertos e sua posterior análise de abundâncias, tema pouco estudado na literatura como foi mostrado ao longo desta tese.

A conclusão do curso de Doutorado em Astronomia parece realmente o começo de muitas possibilidades de aprendizado no exercício profissional, mais do que o encerramento de um processo formativo.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Adibekyan, V. Z.; Benamati, L.; Santos, N. C., et al. 2015, MNRAS, 450, 1900

Adibekyan, V. Z.; Sousa, S. G.; Santos, N. C., et al. 2012, A&A, 545, A32

Alexander, J. B. 1967, The Observatory, 87, 238

Andrievsky, S.M., Bersier D., Kovtyukh V.V., et al. 2002a, A&A, 384, 140

Andrievsky, S.M., Kovtyukh V.V., Luck R.E., et al. 2002b, A&A, 381, 32

Andrievsky, S.M., Kovtyukh V.V., Luck R.E., et al. 2002c, A&A, 392, 491

Andrievsky, S.M., Luck R.E., Martin P., et al. 2004, A&A, 413, 159

Anthony-Twarog, B. J., Deliyannis, C. P., Twarog, B. A., Croxall, K. V., Cummings, J. D. 2009, AJ, 138, 1171

Antipova L. I., Boyarchuk, A. A., Pakhomov, Yu. V. & Yushkin, M. V. 2005, ARep, 49, 535

Antipova, L. I., Boyarchuk, A. A., Pakhomov, Yu. V., Yushkin, M. V. 2005, ARep,

49, 535

Asplund, M., Grevesse, N., Sauval, A.J. & Scott, P. 2005, ASP (Astronomical Society of the Pacific) Conf. Series, 47, Issue 1, 481

Asplund, M., Grevesse, N., Sauval, A.J. 2005, ASP (Astronomical Society of the Pacific) Conf. Series, 336, 55

Balachandran, S. 1995, ApJ, 446, 203

Bensby, T.; Feltzing, S.; Oey, M. S. 2014, A&A, 562, A71, 28.

Bocek Topcu, B.; Afşar, M.; Schaeuble, M.; Sneden, C. 2015, MNRAS, 446, 3562

Bocek Topcu, B.; Afşar, M.; Sneden, C. 2016, MNRAS, 463, 580

Boesgaard, A. M., Tripicco, M. 1986, ApJ, 302, L49

Bohm-Vitense, E. 1989, Vol. 2: Stellar Atmospheres. Cambridge University Press

Bonatto, C., Bica, E., Girardi, L. 2004, A&A, 415, 571

Bond, J. C.; O'Brien, D.; Lairetta, D. 2010, ApJ, 715, Issue 2, 1050

Bovy, J., Rix, H.-W., Hogg, D. W. 2012, ApJ, 751, 131

Bowler, B. P., Johnson, J. A., Marcy, G. W., et al. 2010, ApJ, 709, 396

Bressan, A., Marigo, P., Girardi, L., et al. 2012, MNRAS, 427, 127

- Brown, J. A.; Wallerstein, G.; Geisler, D. & Oke, J. B. 1996, AJ, 112, 1551
- Busso, M.; Gallino, R. & Wasserburg, G. 1999, Annual Review of Astronomy and Astrophysics, 37, 239
- Canterna, R., 1976, AJ, 81, 228
- Carlberg, J. K., Majewski, S. R., Patterson, R. J., et al. 2011, ApJ, 732, 39
- Carlberg, J. K.; Cunha, K.; Smith, V. V. & Majewski, S. R. 2012, ApJ, 757, 109
- Carlberg, J. K.; Smith, V. V.; Cunha, K.; Carpenter, K. G. 2016, 818, 1, 25
- Carney B.W., Yong D., Teixeira de Almeida M.L., Seitzer P. 2005, AJ, 130, 1111
- Carraro G., Bresolin F., Villanova S., et al. 2004, AJ, 128, 1676
- Carrera, R. & Pancino, E. 2011, A&A, 535, 30
- Carretta, E., Bragaglia, A. & Gratton, R. G. 2007, A&A, 473, 129.
- Carretta, E.; Bragaglia, A. & Gratton, R. G. 2007, A&A, 473, 129.
- Carretta, E.; Gratton, R. G.; Lucatello, S.; Bragaglia, A. & Bonifacio, P. 2005, A&A, 433, 2, 597
- Carroll, B. W., & Ostlie, D. A. 2007, An introduction to modern astrophysics. Pearson Education, Inc.
- Castro, S., Rich, R. M., Grenon, M., Barbuy, B., McCarthy, J. K. 1997, AJ, 114, 376

- Cayrel, R. (1988). "Data Analysis". Em Cayrel de Strobel, G. Spite, M., eds., *The Impact of Very High S/N Spectroscopy on Stellar Physics*, vol. 132 de IAU Symposium, p. 345.
- Cescutti, G., François, P., Matteucci, F., Cayrel, R., Spite, M. 2006, *A&A*, 448, 557
- Cescutti, G., Matteucci, F., François, P., Chiappini, C. 2007, *A&A*, 462, 943
- Chanamé, J.; Pinsonneault, M. & Terndrup, D. M. 2005, *ApJ*, 631, 540
- Charbonnel, C. & Balachandran, S. C. 2000, *A&A*, 359, 563
- Charbonnel, C. 1995, *ApJ*, 453, L41
- Charbonnel, C., Zahn, J.-P. 2007, *AA*, 467, L15
- Charbonnel, C., Lagarde, N. 2010, *A&A*, 522A, 10
- Chauvin, G., Lagrange, A. -M., Dumas, C., Zuckerman, B., Mouillet, D., Song, I., Beuzit, J. -L. & Lowrance, P. 2005, *A&A*, 438, Issue 2, L25
- Clariá, J. J., Lapasset, E. 1989, *MNRAS*, 241, 301
- D'Orazi, V., Magrini, L., Randich, S., Galli, D., Busso, M., Sestito, P. 2009, *ApJ*, 693, L31
- Daflon, S., Cunha K. 2004, *ApJ*, 617, 1115
- Dawson, D. W. 1978, *AJ*, 83, 1424



- De Silva, G. M.; Gibson, B. K.; Lattanzio, J. & Asplund, M. 2009, *A&A*, 500, L25
- Delgado Mena, E.; Bertr ´an de Lis, S.; Adibekyan, V. Z. et al. 2015, *A&A*, 576, A69
- Delgado Mena, E.; Israelian, G.; González Hernández, J. I. et al. 2010, *ApJ*, 725, 2349
- Delgado Mena, E.; Tsantaki, M.; Adibekyan, V. Zh.; Sousa, S. G.; Santos, N. C.; González Hernández, J. I. & Israelian, G. 2017, arXiv:1705.04349 [astro-ph.SR]
- Delgado Mena, E.; Tsantaki, M.; Sousa, S. G. et al. 2016, *AA*, 587A, 66
- Den Hartog, E. A., Lawler, J. E., Sneden, C. & Cowan, J. J. 2003, *ApJs*, 148, 2, 543
- Denisenkov, P. A. & Denisenkova, S. N. 1990, *Soviet Astronomy Letters* 16, 275
- Denisenkov, P.A. & Ivanov, V.V., 1987, *Soviet Astronomy Letters*, 13, 214.
- Drake, N. A., de La Reza, R., da Silva, L., & Lambert, D. L. 2002, *AJ*, 123, 2703
- Drazdauskas, A.; Tautvaišiene, G.; Smiljanic, R.; Bagdonas, V.; Chorniy, Y. 2016, *MNRAS*, 462, 794
- Edvardsson, B., Andersen, J., Gustafsson, B., et al. 1993, *A&A*, 275, 101
- Edvardsson, B., Andersen, J., Gustafsson, B., Lambert, D. L., Nissen, P. E. et al. 1993, *A&A*, 275, 101
- Eggleton, P. P., Dearborn, D. S. P., Lattanzio, J. C. 2006, *Science*, 314, 1580
- Feltzing, S.; Howes, L.; McMillan, P. & Stonkutė, E. 2017, *MNRAS*, 465, Issue 1, L109

Fernie, J. D. 1963, *The Observatory*, 83, 33

Fischer, D. A., & Valenti, J. 2005, *ApJ*, 622, 1102

François, P., Depagne, E., Hill, V., Spite, M., Spite, F., Plez, B., Beers, T.C., et al. 2007, *A&A*, 476, 935

Friel, E. D., Jacobson, H. R. & Pilachowski, C. A. 2010, *AJ*, 139, 5, 1942

Friel, E. D.; Jacobson, H. R. & Pilachowski, C. A. 2005, *AJ*, 129, 6, 2725

Gallino, R.; Arlandini, C.; Busso, M.; Lugaro, M.; Travaglio, C. et al. 1998, *ApJ*, 497, Issue 1, 388-

Ghezzi, L., Cunha, K., Smith, V. V., de La Reza, R. 2010, *ApJ*, 724, 154

Gonzalez, G., Laws, C., Tyagi, S., & Reddy, B. E. 2001, *AJ*, 121, 432

Gratton, R. G. & Contarini, G. 1994, *A&A*, 283, no. 3, 911

Gratton, R. G. & Sneden, C. 1988, *A&A*, 204, no. 1-2, 193

Gratton, R. G.; Carretta, E.; Eriksson, K. & Gustafsson, B. 1999, *A&A*, 350, 955

Gray, D. F. 1981. *ApJ*, Part 1, 251, 155

Gray, D. F. 1982. *ApJ*, Part 1, 262, 682

Gustafsson, B.; Edvarsson, K.; Jorgensen, U. C.; Nordlund, A.; Plez, B. 2008, *A&A*, 486, Issue 3, 951

Haffner, H., Nowak, Th., 1969. Atlas of southern Milky Way, Hamburg-Bergedorf, European Southern Observatory

Hekker, S., Meléndez, J. 2007, *A&A*, 475, 1003

Hill, V. & Pasquini, L. 1999, *A&A*, 348, L21

Hobbs, L. M.; Thorburn, J. A. & Rebull, L. M. 1999, *ApJ*, 523, 797

Ida, S., & Lin, D. N. C. 2004, *ApJ*, 616, 567

Israelian, G.; Delgado Mena, E. & Adibekyan, V. 2013, Chavez, M.; Bertone, E.; Vega, O. & De la Luz, V. (eds). *Astronomical Society of the Pacific*, 79

Jacobson, H. R.; Friel, E. D. & Pilachowski, C. A. 2007, *AJ*, 134, Issue 3, 1216

Jacobson, H. R.; Pilachowski, C. A. & Friel, E. D. 2011, *AJ*, 142, 59

Jones, M. I.; Jenkins, J. S.; Bluhm, P.; Rojo, P.; & Melo, C. H. F. 2014, *A&A*, 566, A113

Kaufer, A.; Stahl, O.; Tubbesing, S.; Nørregaard, P.; et al. 1999, *The Messenger*, 95, 8

Kholopov, P. N. 1956, *Peremennye Zvezdy*, 11, 325

Kraft, R. P. 1957, *ApJ*, 126, 225

Kumar, Y. B.; Reddy, B. E.; & Lambert, D. L. 2011, *ApJ*, 730, L12

Kurucz, R. L. 1993, CD-ROM 13, Atlas9 Stellar Atmosphere Programs and 2 km/s Grid (Cambridge, MA: Smithsonian Astrophys. Obs)

Lagarde, N., Decressin, T., Charbonnel, C., et al. 2012, *A&A*, 543, A108

Lambert, D. L. 1981. Iben & Renzini (eds) in *Physical Process in Red Giants*. Dordrecht, D. Reidel Publ. Co. p.115

Lambert, D. L., Heath, J. E., Lemke, M., Drake, J. 1996, *ApJs*, 103, 183

Lee, Y. S., Beers, T. C., An, D., Ivezić, Z., Johnson, J. A., Schönrich, R., Bird, J., Yanny, B., Harding, P., Rocha-Pinto, H. J. 2011, *ApJ*, 738, 187

Lind, K.; Asplund, M.; Barklem, P. S. Belyaev, A. K. 2011, *A&A*, 528, A103

Liu, C. & van de Ven, G. 2012, *MNRAS*, 425, 2144

Lodders, K. 2003, *ApJ*, 591, Issue 2, 1220

Lohmann, W. 1961, *AN*, 286, 105

Loktin, A. V., Matkin, N. V. 1994, *AAT*, 4, 153

Louis, C.; Mayor, M. 2007, *A&A*, 472, 2, 657

Luck, R. E. & Heiter, U. 2007, *AJ*, 133, 2464

Luck, R. E. 1994, *ApJs*, 91, 1, 309

Luck, R.E., Gieren W.P., Andrievsky, S.M., et al. 2003, *A&A*, 401, 939

- Maiorca, E., Randich, S., Busso, M., Magrini, L., Palmerini, S. 2011. *ApJ*, 736, 120
- Majaess, D.; Turner, D.; Moni Bidin, C. et al. 2012, *A&A*, 537L, 4
- Maldonado, J.; Villaver, E. & Eiroa, C. 2013, *A&A*, 554, A84
- Maldonado, J.; Villaver, E. 2016, *A&A*, 588, A98, 11
- Marigo, P., Girardi, L., Bressan, A., Rosenfield, P., Aringer, B., Chen, Y., Dussin, M., Nanni, A., et al. 2017, *ApJ*, 835, Issue 1, 77, 19
- Marsakov, V. A., Gozha, M. L., Koval, V. V. & Shpigel, L. V. 2016, *Astronomy Reports*, 60, 1, 61
- Martin, W. C., Fuhr, J. R., Kelleher, D. E., et al. 2002, NIST Atomic Spectra Database (Version 2.0, Gaithersburg, MD: NIST)
- Martin, W. C., Fuhr, J. R., Kelleher, D. E., et al. 2002, NIST Atomic Spectra Database (Version 2.0; Gaithersburg, MD: NIST)
- Massarotti, A., Latham, D. W., Stefanik, R. P., & Fogel, J. 2008, *AJ*, 135, 209
- Matteucci, F. *Chemical evolution of galaxies*. 2012, Springer-Verlag. Berlin Heidelberg
- Mayor, M. & Queloz, D. 1995. *Nature*, 378, Issue 6555, 355
- McClure, R. D.; van der Bergh, S. 1968, *AJ*, 73, 313
- McWilliam, A. & Rich, M. R. 1994, *ApJs*, 91, 749

- Meléndez, J.; Asplund, M.; Gustafsson, B. & Yong, D. 2009, *ApJ*, 704, Issue 1, L66
- Melo, C. H. F.; Pasquini, L.; De Medeiros, J. R. 2001, *A&A*, 375, 851
- Mermilliod, J. -C. 1981, *A&A*, 97, 2, 235
- Mikolaitis, Š., Tautvaišiene, G., Gratton, R., Bragaglia, A. & Carretta, E. 2011a, *MNRAS*, 413, 3, 2199
- Mikolaitis, Š., Tautvaišiene, G., Gratton, R., Bragaglia, A. & Carretta, E. 2011b, *MNRAS*, 416, 2, 1092
- Mikolaitis, Š., Tautvaišiene, G., Gratton, R., Bragaglia, A., Carretta, E. 2010, *MNRAS*, 407, 1866
- Mishenina, T.; Kovtyukh, V.; Soubiran, C. & Adibekyan, V. 2016, *MNRAS*, 462, Issue 2, 1563
- Mishenina, T. V.; Bienaymé, O.; Gorbaneva, T. I.; Charbonnel, C.; Soubiran, C.; Korotin, S. A. & Kovtyukh, V. V. 2006, *A&A*, 456, 1109
- Mishenina, T., Korotin, S., Carraro, G., Kovtyukh, V. V., Yegorova, I. A. 2013, *MNRAS*, 433, 1436
- Mishenina, T., Pignatari, M., Carraro, G., Kovtyukh, V., Monaco, L., Korotin, S., Shereta, E., Yegorova, I., Herwig, F. 2015, *MNRAS*, 446, Issue 4, 3651
- Mortier, A., Santos, N. C., Sousa, S. G., et al. 2013, *A&A*, 557, A70

Navarro, J. F., Abadi, M. G., Venn, K. A., Freeman, K. C., Anguiano, B. 2011, MNRAS, 412, 1203.

Niedzielski, A., Nowak, G., Adamów, M., & Wolszczan, A. 2009, ApJ, 707, 768

Niedzielski, A.; Wolszczan, A.; Nowak, G.; Adamów, M.; Kowalik, K.; Maciejewski, G.; Deka-Szymankiewicz, B. & Adamczyk, M. 2015, ApJ, 803, 1

Nissen, P. E. 2013, A&A, 552, A73

Pancino, E.; Carrera, R.; Rossetti, E. & Gallart, C. 2010, A&A, 511, 56

Pasquini, L., Döllinger, M. P., Weiss, A., et al. 2007, A&A, 473, 979

Pasquini, L., Randich, S., Pallavicini, R. 2001, A&A, 374, 1017

Pasquini, L., Randich, S., Zoccali, M., Hill, V., Charbonnel, C., Nordstroem, B. 2004, A&A, 424, 951

Peña Suárez, V. J.; Sales Silva, J. V.; Katime Santrich, O. J.; Drake, N. A. & Pereira, C. B. 2017, AJ, artigo submetido.

Piatti, A. E., Claria, J. J., Abadi, M. G. 1995, AJ, 110, 2813

Piersanti, L.; Cristallo, S.; Straniero, O. 2013. ApJ, 774, Issue 2, 98, 11

Pinsonneault, M. H. 1997, ARAA, 35, 557

Plez, B. 2008, PhST, 133, 014003

- Preston, G. W. & Sneden, C. 2001, *AJ*, 122, 3, 1545
- Randich, S., Gratton, R., Pallavicini, R., Pasquini, L., Carretta, E. 1999, , 348, 487
- Reddy, A. B. S., Giridhar, S. & Lambert, D. L. 2012, *MNRAS*, 419, 2, 1350
- Reddy, A. B. S.; Giridar, S. & Lambert, D. L. 2015, *MNRAS*, 450, 4301
- Reddy, A. B. S.; Giridhar, S.; & Lambert, D. L. 2013, *MNRAS*, 431, 4, 3338
- Reddy, B. E., Bakker, E. J. & Hrivnak, B.J. 1999, *ApJ*, 524, 831
- Reddy, B. E., Tomkin, J., Lambert, D. L. & Allende Prieto, C. 2003, *MNRAS*, 340, 304
- Reddy, B. E., Tomkin, J., Lambert, D. L., & Allende Prieto, C. 2003, *MNRAS*, 340, 304
- Reyniers, M., Van Winckel, H., Gallino, R. & Straniero, O. 2004, *A&A*, 417, 269
- Salaris, M. & Cassisi, S. 2005, *Evolution of stars and stellar populations*. John Wiley & Sons, Ltd.
- Salaris, M. arXiv:1409.2270 [astro-ph.SR]
- Sales Silva, J. V., Peña Suárez, V. J., Katime Santrich, O. J., Pereira, C. B. et al. 2014, *AJ*, 148, 83
- Santos, N. C., Israelian, G., & Mayor, M. 2001, *A&A*, 373, 1019
- Santos, N. C.; Lovis, C.; Pace, G.; Melendez, J.; Naef, D. 2009, *A&A*, 493, 1, 309



- Santrich, O. J. K.; Pereira, C. B.; & Drake, N. A. 2013, *A&A*, 554, A2
- Sato, B.; Izumiura, H.; Toyota, E. et al. 2007, *ApJ*, 661, 527
- Schonrich, R. Binney, J. 2009, *MNRAS*, 399, 1145.
- Siess, L. & Livio, M. 1999, *MNRAS*, 308, 1133
- Smiljanic, R., Gauderon, R., North, P., Barbuy, B., Charbonnel, C., Mowlavi, N. 2009, *A&A*, 502, 267
- Smiljanic, R.; Romano, D.; Bragaglia, A.; Donati, P.; Magrini, L. Friel, E. et al. 2016, *A&A*, 589, A115
- Smith, V. V., Cunha, K., Jorissen, A. & Boffin, H. M. J. 1996, *A&A*, 315, 179
- Smith, V. V., Cunha, K., Jorissen, A., Boffin, H. M. J. 1996, *A&A*, 315, 179
- Smith, V. V.; Lambert, D. L. & Nissen, P. E. 1998, *ApJ*, 506, 405.
- Snedden, C. 1973, PhD thesis, Univ. Texas
- Snedden, C., McWilliam, A., Prestn, G. W., Cowan, J.J., Burris, D. L. & Armosky, B. J. 1996, *ApJ*, 467, 819
- Sousa, S. G., Santos, N. C., Israelian, G., Mayor, M., Monteiro, M. J. P. F. G. 2007, *A&A*, 469, 783
- Sousa, S. G., Santos, N. C., Mayor, M., et al. 2008, *AA*, 487, 373

Sousa, S. G.; Santos, N. C.; Adibekyan, V.; Delgado-Mena, E.; Israelian, G. Delgado-Mena, E. Israelian, G. 2015, *A&A*, 577, A67, 4

Straizys, V., Laugalys, V. 2008, *Baltic Astron.*, 17, 253

Tautvaišiene, G., Edvardsson, B., Puzeras, E. & Ilyin, I. 2005, *A&A*, 431, 3, 933

Teske, J.; Cunha, K.; Smith, V. V.; Schuler, S. & Griffith, C. 2014, *ApJ*, 788, Issue 1, 39

Tsantaki, M., Sousa, S. G., Adibekyan, V. Z., et al. 2013, *AA*, 555, A150

Van Winckel, H. & Reyniers, M. 2000, *A&A*, 345, 135

Villanova, S.; Carraro, G. & Saviane, I. 2009, *A&A*, 504, 3, 845.

Wiese, W. L., Smith, M. W. & Miles, B. M. 1969, *NBS Ref. Data. Ser.*

Woolley, S. E.; & Weaver, T. A. 1995, *ApJ*, 101, 181

Yong, D., Carney, B.W., Teixeira de Almeida, M.L. 2005, *AJ*, 130, 597

Yong, D., Carney, B.W., Teixeira de Almeida, M.L., Pohl, B.L. 2006, *AJ*, 131, 2256

Začs, L., Alksnis, O., Barzdis, A., Laure, A., Musaev, F.A., et al. 2011, *MNRAS*, 417, 649

Začs, L.; Alksnis, O.; Barzdis, A.; Laure, A.; Musaev, F.A., et al. 2011, *MNRAS*, 417, 649

Zahn, J.-P., Bouchet, L. 1989, A&A, 223, 112

Zamanov, R. K.; Bode, M. F.; Melo, C. H. F.; Porter, J.; Gomboc, A.; Konstantinova-Antova, R. 2006, MNRAS, 365, Issue 4, 1215

## APÊNDICE

### 4.3 Parâmetros atômicos das linhas estudadas

Tabela 4.1: Larguras equivalentes das linhas espectrais de Fe I e Fe II medidas nas estrelas do aglomerado NGC 4349 da amostra.

Elemento	$\lambda$ (Å)	$\chi$ (eV)	$\log gf$	Larguras equivalentes (mÅ)							
				NGC 4349-#							
				5	9	53	79	127	168	174	203
Fe I	5151.91	1.01	-3.320	—	—	156	—	—	147	—	—
	5159.06	4.28	-0.650	—	94	95	105	95	88	—	—
	5198.71	2.22	-2.140	—	141	141	—	139	134	—	—
	5242.49	3.63	-0.970	131	111	116	123	112	108	—	125
	5250.21	0.12	-4.920	—	135	130	—	130	120	—	—
	5253.03	2.28	-3.790	—	55	54	70	55	46	—	—
	5288.52	3.69	-1.510	107	94	90	105	91	91	114	95
	5302.31	3.28	-0.740	—	—	—	—	—	153	—	—
	5307.36	1.61	-2.970	—	138	136	—	140	132	—	—
	5315.05	4.37	-1.400	—	62	59	75	62	57	—	66
	5321.11	4.43	-1.190	69	64	61	72	64	54	77	66
	5322.04	2.28	-2.840	110	101	101	119	103	91	—	108
	5364.87	4.45	0.230	—	137	139	—	139	137	—	—
	5367.47	4.42	0.439	—	138	139	—	140	139	—	—
	5369.96	4.37	0.540	—	—	153	—	152	154	—	—
	5373.71	4.47	-0.710	92	82	80	88	80	78	96	87
	5389.48	4.42	-0.250	107	103	—	110	102	98	119	—
	5410.91	4.47	0.400	—	135	133	—	133	133	—	—
	5417.03	4.42	-1.530	56	55	57	64	55	49	71	60
	5441.34	4.31	-1.580	61	55	54	65	54	49	69	54
	5445.04	4.39	0.040	—	127	130	140	128	129	—	—
	5522.45	4.21	-1.400	76	69	68	74	67	60	79	70
	5531.98	4.91	-1.460	—	39	35	40	33	28	—	—
	5560.21	4.43	-1.040	72	68	70	77	72	—	83	—
	5567.39	2.61	-2.560	127	—	—	—	112	—	—	—
	5576.09	3.43	-0.850	—	134	134	—	138	134	—	—
	5584.77	3.57	-2.170	71	68	68	—	65	61	81	67
	5624.02	4.39	-1.330	—	74	73	82	70	—	83	—
	5633.95	4.99	-0.120	92	82	—	92	86	83	94	88
	5635.82	4.26	-1.740	—	56	56	66	55	54	71	—
	5638.26	4.22	-0.720	108	101	97	108	99	94	120	103
	5686.53	4.55	-0.450	—	102	96	108	98	97	—	—
	5691.50	4.30	-1.370	80	70	69	79	67	65	—	—
	5705.47	4.30	-1.360	64	63	59	71	64	60	70	62
	5717.83	4.28	-0.979	—	88	94	101	92	82	—	—
	5731.76	4.26	-1.150	—	83	84	94	84	76	—	84
	5806.73	4.61	-0.900	77	76	76	84	76	75	—	76
	5814.81	4.28	-1.820	41	43	43	51	41	40	55	46
	5852.22	4.55	-1.180	74	64	62	78	63	61	—	69
	5883.82	3.96	-1.210	98	92	93	99	91	85	96	103

Tabela 4.1, continuação

Elemento	$\lambda$ (Å)	$\chi$ (eV)	$\log gf$	Larguras equivalentes (mÅ)							
				NGC 4349-#							
				5	9	53	79	127	168	174	203
	5916.25	2.45	-2.990	—	99	99	118	98	89	—	—
	5934.65	3.93	-1.020	109	104	102	118	108	96	124	108
	6024.06	4.55	-0.060	—	121	124	136	124	118	—	—
	6027.05	4.08	-1.090	104	91	—	102	—	87	105	95
	6056.01	4.73	-0.400	—	85	89	98	93	85	99	90
	6079.01	4.65	-0.970	76	63	64	74	68	60	81	—
	6082.71	2.22	-3.580	—	83	78	98	78	72	—	—
	6093.64	4.61	-1.350	—	53	50	61	50	44	60	53
	6096.66	3.98	-1.780	—	64	63	74	66	61	74	60
	6120.25	0.91	-5.950	—	34	28	56	30	—	68	31
	6151.62	2.18	-3.290	97	94	88	111	89	82	124	95
	6157.73	4.08	-1.110	104	98	96	—	96	90	—	102
	6165.36	4.14	-1.470	83	70	70	80	69	65	85	—
	6173.34	2.22	-2.880	126	112	110	131	111	101	—	124
	6187.99	3.94	-1.570	—	77	75	88	73	70	95	81
	6200.31	2.60	-2.440	—	113	112	129	115	104	—	122
	6213.43	2.22	-2.480	—	126	123	—	127	119	—	—
	6265.13	2.18	-2.550	—	139	134	—	135	128	—	—
	6311.50	2.83	-3.230	—	69	61	81	63	59	—	—
	6322.69	2.59	-2.430	126	120	116	138	116	110	—	—
	6380.74	4.19	-1.320	76	86	80	96	80	76	—	92
	6392.54	2.28	-4.030	—	49	45	70	48	48	—	—
	6411.65	3.65	-0.660	—	—	150	—	147	145	—	—
	6419.95	4.73	-0.090	—	108	106	117	106	98	—	—
	6436.41	4.19	-2.460	28	31	27	37	25	22	—	30
	6469.19	4.83	-0.620	91	—	—	—	—	—	—	87
	6518.37	2.83	-2.300	—	—	—	—	100	—	—	—
	6551.68	0.99	-5.790	—	50	43	70	43	43	—	41
	6574.23	0.99	-5.020	88	84	80	113	82	71	128	89
	6591.31	4.59	-2.070	29	26	21	33	21	18	—	—
	6592.91	2.72	-1.470	—	—	153	—	—	147	—	—
	6593.87	2.44	-2.420	—	131	129	—	131	123	—	—
	6597.56	4.79	-0.920	70	65	61	69	63	56	78	67
	6608.03	2.28	-4.030	58	55	57	70	63	45	87	53
	6609.11	2.56	-2.690	120	115	114	135	115	100	—	120
	6646.93	2.61	-3.990	50	48	40	63	42	38	78	37

Tabela 4.1, continuação

Elemento	$\lambda$ (Å)	$\chi$ (eV)	$\log gf$	Larguras equivalentes (mÅ)							
				NGC 4349-#							
				5	9	53	79	127	168	174	203
	6653.85	4.14	-2.520	27	26	26	30	22	22	—	—
	6699.14	4.59	-2.190	—	22	20	27	22	17	27	19
	6703.57	2.76	-3.160	84	78	75	93	76	67	106	77
	6704.48	4.22	-2.660	—	17	15	—	16	13	24	11
	6713.74	4.79	-1.600	—	42	40	48	41	—	45	37
	6739.52	1.56	-4.950	—	50	46	65	46	39	79	44
	6745.96	4.07	-2.770	—	25	16	22	19	15	22	—
	6750.15	2.42	-2.620	129	119	118	137	115	106	38	—
	6752.71	4.64	-1.200	72	65	60	79	62	58	—	—
	6783.70	2.59	-3.980	—	53	47	—	46	42	—	—
	6793.26	4.07	-2.470	—	32	30	39	29	23	38	—
	6806.85	2.73	-3.210	81	74	72	91	74	68	107	76
	6810.26	4.61	-0.990	81	71	70	85	72	—	88	71
	6820.37	4.64	-1.170	64	64	65	75	65	61	84	64
	6841.34	4.61	-0.600	—	97	95	107	97	94	—	—
	6851.64	1.61	-5.320	38	31	28	49	29	22	—	31
	6858.15	4.61	-0.930	83	73	73	81	74	69	82	81
	7130.92	4.22	-0.700	—	—	—	—	126	116	—	—
	7132.99	4.08	-1.610	—	67	—	73	65	63	—	—
Fe II	4993.35	2.81	-3.670	—	58	58	59	65	57	66	74
	5132.66	2.81	-4.000	65	43	45	46	47	45	—	—
	5197.56	3.23	-2.250	—	107	109	104	111	—	—	—
	5234.62	3.22	-2.240	126	104	108	101	113	107	106	120
	5284.10	2.89	-3.010	—	87	86	91	85	84	—	—
	5325.56	3.22	-3.170	78	60	65	64	66	55	—	—
	5414.05	3.22	-3.620	55	43	44	45	45	42	52	57
	5425.25	3.20	-3.210	77	58	65	61	62	58	64	74
	5534.83	3.25	-2.770	—	82	88	—	88	83	—	—
	5991.37	3.15	-3.560	68	56	58	56	58	53	59	73
	6084.10	3.20	-3.800	62	40	42	42	42	33	49	57
	6149.25	3.89	-2.720	57	50	54	45	53	—	53	74
	6247.55	3.89	-2.340	88	65	72	65	74	69	74	90
	6416.92	3.89	-2.680	62	57	58	57	56	53	61	65
	6432.68	2.89	-3.580	71	60	63	62	63	44	68	78

Tabela 4.2: Larguras equivalentes das linhas espectrais dos elementos Na → Nd medidas nas estrelas do aglomerado NGC 4349 da amostra.

Elemento	$\lambda$	$\chi$ (eV)	$\log gf$	Ref	Larguras equivalentes (mÅ)							
					NGC 4349-#							
					5	9	53	79	127	168	174	203
Na I	6154.22	2.10	-1.51	PS	81	76	77	75	118	79	99	74
Na I	6160.75	2.10	-1.21	R03	102	91	97	87	132	98	110	96
Mg I	4730.04	4.34	-2.39	R03	90	—	96	83	114	85	95	92
Mg I	5711.10	4.34	-1.75	R99	133	131	137	116	—	130	148	131
Mg I	6318.71	5.11	-1.94	Ca07	67	73	65	56	90	58	80	68
Mg I	6765.45	5.75	-1.94	MR94	23	—	28	28	—	—	26	20
Mg I	6965.41	5.75	-1.72	MR94	42	41	42	41	64	40	60	42
Mg I	7387.70	5.75	-0.87	MR94	88	100	94	83	110	78	87	90
Mg I	8712.69	5.93	-1.26	WSM	—	64	70	59	—	65	58	62
Mg I	8717.83	5.91	-0.97	WSM	—	—	—	—	97	—	—	—
Al I	6696.03	3.14	-1.48	MR94	73	54	76	68	85	74	88	66
Al I	6698.67	3.14	-1.63	R03	50	49	61	46	70	45	61	48
Al I	7835.32	4.04	-0.58	R03	72	60	63	63	80	69	79	59
Al I	7836.13	4.02	-0.40	R03	79	72	75	75	94	71	81	66
Al I	8772.88	4.02	-0.25	R03	—	—	103	103	—	94	106	89
Al I	8773.91	4.02	-0.07	R03	—	102	—	—	—	102	—	—
Si I	5793.08	4.93	-2.06	R03	70	64	67	62	78	66	75	65
Si I	6125.03	5.61	-1.54	E93	50	48	48	45	63	50	54	45
Si I	6131.58	5.62	-1.68	E93	—	—	37	46	52	—	45	39
Si I	6145.02	5.61	-1.43	E93	54	59	51	50	58	54	58	50
Si I	6155.14	5.62	-0.77	E93	100	93	90	85	96	89	99	87
Si I	7760.64	6.20	-1.28	E93	—	—	33	36	37	—	—	32
Si I	7800.00	6.18	-0.72	E93	72	68	70	69	66	70	65	68
Si I	8728.01	6.18	-0.36	E93	90	84	95	90	—	94	92	92
Si I	8742.45	5.87	-0.51	E93	105	110	100	100	—	103	90	105
Ca I	6161.30	2.52	-1.27	E93	99	100	92	84	120	98	110	98
Ca I	6166.44	2.52	-1.14	R03	112	107	101	92	137	103	120	105
Ca I	6169.04	2.52	-0.80	R03	129	134	116	108	—	119	136	110
Ca I	6455.60	2.51	-1.29	R03	98	89	93	90	129	95	118	91
Ti I	4758.12	2.25	0.420	MFK	85	85	85	—	112	86	98	68
Ti I	4759.28	2.25	0.514	MFK	—	—	90	—	—	80	105	71
Ti I	4997.10	0.00	-2.118	MFK	82	94	108	77	—	88	134	82
Ti I	5009.66	0.02	-2.259	MFK	95	85	100	80	—	83	—	78
Ti I	5016.17	0.85	-0.574	MFK	114	—	120	99	—	110	147	98
Ti I	5022.87	0.83	-0.434	MFK	124	—	135	108	—	—	—	110
Ti I	5039.96	0.02	-1.130	MFK	139	140	143	122	—	136	—	120
Ti I	5043.59	0.84	-1.733	MFK	68	—	77	57	117	58	103	64



Tabela 4.2, continuação

Elemento	$\lambda$	$\chi$ (eV)	$\log gf$	Ref	Larguras equivalentes (mÅ)							
					NGC 4349-#							
					5	9	53	79	127	168	174	203
Ti I	5062.10	2.16	-0.464	MFK	39	36	51	43	90	35	68	39
Ti I	5087.06	1.43	-0.840	E93	—	—	109	—	—	—	—	—
Ti I	5113.45	1.44	-0.880	E93	70	93	83	68	112	66	101	69
Ti I	5145.47	1.46	-0.574	MFK	76	83	89	72	122	75	118	75
Ti I	5147.48	0.00	-2.012	MFK	103	92	118	90	—	100	—	83
Ti I	5152.19	0.02	-2.024	MFK	104	—	115	97	—	—	—	—
Ti I	5219.71	0.02	-2.292	MFK	83	—	102	80	—	—	—	—
Ti I	5223.63	2.09	-0.559	MFK	44	63	57	48	95	40	76	48
Ti I	5295.78	1.05	-1.633	MFK	50	58	62	40	95	51	84	42
Ti I	5490.16	1.46	-0.937	MFK	61	63	78	60	117	66	109	66
Ti I	5662.16	2.32	-0.109	MFK	59	74	65	60	100	51	90	57
Ti I	5689.48	2.30	-0.469	MFK	36	40	56	32	81	38	69	41
Ti I	5866.46	1.07	-0.871	E93	113	—	118	—	—	—	—	—
Ti I	5922.12	1.05	-1.465	MFK	79	68	86	65	130	60	115	65
Ti I	5978.55	1.87	-0.496	MFK	70	64	75	62	113	59	101	66
Ti I	6091.18	2.27	-0.370	R03	43	42	58	40	91	40	73	40
Ti I	6126.22	1.07	-1.370	R03	73	62	89	66	131	69	112	65
Ti I	6258.11	1.44	-0.355	MFK	101	98	113	92	—	107	147	92
Ti I	6554.24	1.44	-1.219	MFK	61	70	78	64	121	56	110	51
Cr I	4801.03	3.12	-0.130	MFK	—	—	83	—	—	85	95	73
Cr I	4836.85	3.10	-1.137	MFK	—	—	—	—	52	—	—	—
Cr I	4964.93	0.94	-2.526	MFK	94	—	90	87	—	91	115	80
Cr I	5193.50	3.42	-0.720	MFK	29	32	42	36	—	26	54	34
Cr I	5200.18	3.38	-0.650	MFK	60	57	56	—	72	50	63	50
Cr I	5214.13	3.37	-0.740	MFK	31	40	37	31	55	37	49	42
Cr I	5238.96	2.71	-1.305	MFK	41	47	45	35	62	43	58	37
Cr I	5243.36	3.39	-0.567	MFK	46	48	50	—	—	50	83	52
Cr I	5247.57	0.96	-1.630	MFK	—	—	142	122	—	—	—	—
Cr I	5272.00	3.45	-0.421	MFK	61	—	47	40	67	53	73	48
Cr I	5300.75	0.98	-2.130	GS	113	128	117	101	—	112	143	113
Cr I	5304.18	3.46	-0.692	MFK	27	30	37	28	64	32	52	37
Cr I	5312.86	3.45	-0.562	MFK	47	40	41	38	70	43	58	43
Cr I	5318.77	3.44	-0.688	MFK	27	35	28	36	64	27	39	32
Cr I	5340.45	3.44	-0.730	MFK	38	33	—	40	55	36	67	28
Cr I	5628.65	3.42	-0.772	MFK	26	28	36	30	37	36	50	34
Cr I	5783.07	3.32	-0.500	MFK	59	60	59	48	83	57	75	45
Cr I	5783.87	3.32	-0.290	GS	—	—	—	—	—	—	90	—
Cr I	5784.97	3.32	-0.380	MFK	54	63	64	59	75	55	71	62
Cr I	5787.92	3.32	-0.080	GS	81	74	73	65	98	75	96	69
Cr I	6330.09	0.94	-2.920	R03	78	81	87	74	129	79	116	79
Ni I	4904.42	3.54	-0.170	MFK	—	125	—	—	—	112	—	—
Ni I	4913.98	3.74	-0.620	MFK	89	87	77	77	94	85	94	—
Ni I	4935.83	3.94	-0.360	MFK	—	87	—	—	—	90	88	—

Tabela 4.2, continuação

Elemento	$\lambda$	$\chi$ (eV)	$\log gf$	Ref	Larguras equivalentes (mÅ)							
					NGC 4349-#							
					5	9	53	79	127	168	174	203
Ni I	4953.21	3.74	-0.660	MFK	84	84	—	—	—	80	85	—
Ni I	4967.52	3.80	-1.570	MFK	—	—	33	30	—	—	—	—
Ni I	4995.66	3.63	-1.580	MFK	—	—	42	30	61	45	62	41
Ni I	5010.94	3.63	-0.870	MFK	83	72	74	67	87	73	85	79
Ni I	5157.98	3.61	-1.590	MFK	48	40	42	36	46	44	56	44
Ni I	5197.17	3.90	-1.190	MFK	57	51	60	42	81	53	56	53
Ni I	5578.73	1.68	-2.640	MFK	111	102	111	95	—	105	136	100
Ni I	5589.37	3.90	-1.140	MFK	53	40	46	40	53	43	57	46
Ni I	5593.75	3.90	-0.840	MFK	66	65	66	61	78	62	79	63
Ni I	5643.09	4.17	-1.250	MFK	28	31	35	22	40	34	40	34
Ni I	5748.36	1.68	-3.260	MFK	80	67	87	68	101	73	110	80
Ni I	5760.84	4.11	-0.800	MFK	73	69	69	58	66	63	68	66
Ni I	5805.23	4.17	-0.640	MFK	62	60	62	57	75	61	73	59
Ni I	5996.74	4.24	-1.060	MFK	38	38	41	41	55	35	49	36
Ni I	6053.69	4.24	-1.070	MFK	55	—	39	46	47	40	51	34
Ni I	6086.29	4.27	-0.510	MFK	67	61	66	62	81	63	82	62
Ni I	6108.12	1.68	-2.440	MFK	124	113	122	106	—	115	—	96
Ni I	6111.08	4.09	-0.870	MFK	57	53	60	51	70	59	65	52
Ni I	6128.98	1.68	-3.320	MFK	76	71	81	70	104	72	115	101
Ni I	6130.14	4.27	-0.960	MFK	41	42	41	31	50	37	50	—
Ni I	6176.82	4.09	-0.264	R03	100	91	93	80	99	90	93	90
Ni I	6177.25	1.83	-3.510	MFK	56	48	62	43	82	49	84	51
Ni I	6186.72	4.11	-0.960	MFK	—	47	53	52	65	50	68	53
Ni I	6223.99	4.11	-0.980	MFK	53	52	55	46	65	60	69	60
Ni I	6230.10	4.11	-1.260	MFK	—	46	50	—	—	40	—	—
Ni I	6322.17	4.15	-1.170	MFK	37	26	31	41	51	30	50	38
Ni I	6327.60	1.68	-3.150	MFK	100	—	100	80	120	97	115	91
Ni I	6378.26	4.15	-0.900	MFK	57	—	58	54	62	60	67	65
Ni I	6384.67	4.15	-1.130	MFK	56	57	57	49	67	54	62	49
Ni I	6482.81	1.94	-2.630	MFK	93	89	96	86	—	95	120	82
Ni I	6532.88	1.94	-3.390	MFK	—	—	65	—	—	61	92	63
Ni I	6586.32	1.95	-2.810	MFK	83	80	99	87	130	83	118	83
Ni I	6598.61	4.24	-0.980	MFK	50	49	59	45	58	54	55	47
Ni I	6635.14	4.42	-0.830	MFK	40	48	44	42	53	39	63	49
Ni I	6767.78	1.83	-2.170	MFK	142	—	137	130	—	—	—	—
Ni I	6772.32	3.66	-0.970	R03	77	—	86	—	—	—	—	—
Ni I	6842.04	3.66	-1.477	E93	50	53	55	58	70	56	75	58
Y II	4883.68	1.08	0.070	SN96	110	—	100	—	—	110	115	112
Y II	5087.43	1.08	-0.170	SN96	100	109	90	91	115	110	103	104
Y II	5200.41	0.99	-0.570	SN96	92	93	85	80	105	94	92	101
Y II	5205.72	1.03	-0.340	SN96	—	—	—	85	—	—	—	—
Y II	5289.81	1.03	-1.850	VWR	28	25	25	30	42	28	39	32
Y II	5402.78	1.84	-0.440	R03	50	52	43	50	56	51	57	52

Tabela 4.2, continuação

Elemento	$\lambda$	$\chi$ (eV)	$\log gf$	Ref	Larguras equivalentes (mÅ)							
					NGC 4349-#							
					5	9	53	79	127	168	174	203
Zr I	4772.30	0.62	-0.060	A05	31	13	38	28	78	22	58	32
Zr I	4815.63	0.60	-0.270	A05	—	21	23	18	65	20	50	26
Zr I	5385.13	0.52	-0.640	A05	15	17	20	11	52	13	51	16
Zr I	6127.46	0.15	-1.060	S96	20	16	22	15	71	17	69	19
Zr I	6134.57	0.00	-1.280	S96	—	—	19	—	—	—	—	—
Zr I	6143.18	0.07	-1.100	S96	21	18	23	18	74	17	72	24
La II	4086.71	0.00	-0.160	SN96	88	82	—	—	—	83	90	83
La II	5122.99	0.32	-0.930	SN96	55	52	45	—	78	53	—	—
La II	5303.53	0.32	-1.350	VWR	32	23	—	—	—	22	48	—
La II	5880.63	0.24	-1.830	R04	24	16	20	18	46	20	30	25
La II	6320.43	0.17	-1.520	S96	32	30	37	33	72	27	61	32
La II	6390.48	0.32	-1.410	VWR	26	25	34	35	60	26	52	35
La II	6774.33	0.12	-1.709	VWR	36	24	28	25	62	28	60	29
Ce II	4073.47	0.48	0.320	S96	79	70	61	66	88	—	—	—
Ce II	4083.23	0.70	0.240	S96	—	50	—	—	—	57	—	—
Ce II	4120.84	0.32	-0.240	S96	63	59	54	54	—	61	93	62
Ce II	4127.38	0.68	0.240	S96	—	60	52	62	—	59	—	—
Ce II	4418.79	0.86	+0.310	S96	—	58	50	—	—	60	—	—
Ce II	4562.37	0.48	+0.330	S96	86	80	74	75	95	80	85	81
Ce II	4628.16	0.52	+0.260	S96	79	81	66	70	89	77	78	74
Ce II	5117.17	1.40	+0.010	VWR	23	22	19	23	32	21	30	24
Ce II	5187.46	1.21	+0.300	VWR	42	37	32	41	54	34	49	39
Ce II	5274.24	1.28	+0.389	VWR	45	43	36	46	47	40	51	42
Ce II	5472.30	1.25	-0.190	R04	—	—	13	21	29	—	32	30
Nd II	4706.54	0.00	-0.071	DH	—	—	62	59	80	66	67	53
Nd II	4797.15	0.56	-0.069	DH	35	—	32	29	52	31	53	40
Nd II	4914.38	0.38	-0.070	DH	53	37	51	48	63	42	52	47
Nd II	5063.72	0.98	-0.620	DH	18	17	24	20	40	20	29	24
Nd II	5092.80	0.38	-0.610	DH	51	47	51	45	78	50	65	45
Nd II	5130.59	1.30	+0.450	DH	—	—	55	49	—	—	—	—
Nd II	5234.19	0.55	-0.510	DH	60	32	54	42	—	40	—	49
Nd II	5306.46	0.86	-0.970	DH	—	—	12	—	26	—	—	—
Nd II	5311.46	0.98	-0.420	DH	39	28	28	10	40	30	41	30
Nd II	5319.81	0.55	-0.140	DH	—	—	79	31	—	—	—	—
Nd II	5485.70	1.26	-0.120	DH	21	26	25	30	42	23	30	27
Nd II	5740.88	1.16	-0.530	DH	22	18	22	—	—	15	—	18
Nd II	5811.57	0.86	-0.860	DH	16	23	20	21	37	16	32	18

---

**4.4 Artigo aceito: “High resolution spectroscopic observations of single red giants in three open clusters : NGC 2360, NGC 3680 and NGC 5822”**

HIGH RESOLUTION SPECTROSCOPIC OBSERVATIONS OF SINGLE RED GIANTS IN THREE OPEN  
CLUSTERS : NGC 2360, NGC 3680 AND NGC 5822\*

V.J. PEÑA SUÁREZ<sup>1</sup>, J.V. SALES SILVA<sup>1</sup>, O.J. KATIME SANTRICH<sup>1,2</sup>, N.A. DRAKE<sup>1,3</sup> & C.B. PEREIRA<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Observatório Nacional/MCTIC, Rua Gen. José Cristino, 77, 20921-400, Rio de Janeiro, Brazil*  
*e-mail: jearim@on.br, joaovictor@on.br, drake@on.br, claudio@on.br*

<sup>2</sup> *Present address : Universidade de São Paulo/Instituto Astronômico e Geofísico*  
*Rua do Matão 1226, Cidade Universitária, 05508-900, São Paulo, Brazil*  
*e-mail: ojsantrich@usp.br*

<sup>3</sup> *Laboratory of Observational Astrophysics, St. Petersburg State University, Universitetsky pr. 28, Petrodvoretz, 198504 St. Petersburg, Russia*

(Received; Revised; Accepted; Published)

Submitted to ApJ

ABSTRACT

Single stars in open clusters with known distances are important targets in constraining the nucleosynthesis process, since their ages and luminosities are also known. Therefore, chemical peculiarities can be linked directly to the evolutionary status of a star.

In this work we analyze a sample of 29 single red giants of the open clusters NGC 2360, NGC 3680, and NGC 5822 using high-resolution spectroscopy. We obtained atmospheric parameters, abundances of the elements C, N, O, Na, Mg, Al, Ca, Si, Ti, Ni, Cr, Y, Zr, La, Ce, and Nd, as well as radial and rotational velocities. We employed the local thermodynamic equilibrium atmospheric models of Kurucz and the spectral analysis code MOOG. **Rotational velocities and light-element abundances were derived using spectral synthesis.**

We also derived the carbon isotopic ratio for these stars and we suggest that the thermohaline mixing is the main process to explain the relatively low <sup>12</sup>C/<sup>13</sup>C values in some of them.

Based on our analysis of the single red giants in these three open clusters we could compare, for the first time, their abundance pattern with that of the binary stars of the same clusters previously studied. Our results show that the abundances of both single and binary stars of the open clusters NGC 2360, NGC 3680, and NGC 5822 do not have significant differences.

**For the elements created by the s-process, we observed that the open clusters NGC 2360, NGC 3680 and NGC 5822 also follow the trend already raised in the literature that young clusters have higher s-process element abundances than older clusters. Finally we observed that the three clusters of our sample exhibit a trend in the [Y/Mg]-age relation, which may indicate the ability of [Y/Mg] ratio to be used as a clock for the giants.**

*Keywords:* Galaxy: open clusters and associations: individual : NGC 2360, NGC 3680, NGC 5822 —  
stars : abundances — stars : fundamental parameters — stars: evolution —

\* Based on the observations made with the 2.2m telescope at the European Southern Observatory (La Silla, Chile) under the agreement with Observatório Nacional and under agreement between Observatório Nacional and Max-Planck Institute für Astronomie.

## 1. INTRODUCTION

The study of red giants in open clusters (OCs) provides a good approach to understanding the chemical and the dynamical evolution of the Galaxy. In recent years the gradient and age-abundance relations studies using open clusters has provoked interesting discoveries such as tendencies between abundance and age for some s-process elements (e.g. Maiorca et al. 2011; Mishenina et al. 2015), and has also greatly improved our knowledge of galactic disc properties through large surveys such as Gaia-ESO, OCCASUS and APOGEE (e.g., Magrini et al. 2017, Casamiquela et al. 2017, Cunha et al. 2016).

The advantage of open clusters is that they have a wide range of ages and distances and also have been formed at several epochs and at different Galactocentric distances. The study the red giants of the open clusters through high-resolution stellar spectroscopy offers great possibilities to analyze possible trends and/or correlations between the fundamental parameters of stars such as age and metallicity and the abundance ratios  $[X/Fe]$  of various chemical species such as light elements (CNO),  $\alpha$ -elements, and s-process elements.

In this work we continue our study of chemical abundances of the red giants of the open clusters NGC 2360, NGC 3680 and NGC 5822. Our study that began with the analysis of the binary stars in these OCs by Sales Silva et al. (2014), hereafter SS2014, now focuses on the single stars of the same OCs. Our work benefited from an extensive study conducted by Mermilliod et al. (2008) and Frinchaboy & Majewski (2008) where the authors published the results of their long-term surveys to obtain radial velocities of red giants in several open clusters. Based on these studies, several stars of these three clusters were recognized as the cluster members and we decided to observe all red giant stars that are members of these clusters including binary and single stars. The advantage of observing several stars recognized as members of a cluster is that the chances of encountering chemically peculiar objects increase significantly as it was the case of the barium stars of the open cluster NGC 5822 (Katime Santrich et al. 2013).

Some giant stars of our sample have already been spectroscopically studied with high-resolution by several authors, however, they mainly determined atmospheric parameters and/or obtained the abundance of a specific element (lithium) (Pasquini et al. 2001; Anthony-Twarog et al. 2009 for the open cluster NGC 3680 and Delgado Mena et al. 2016). Few studies obtained abundances for another elements for these clusters, specially for the elements of the s-process. Smiljanic et al. (2009) deter-

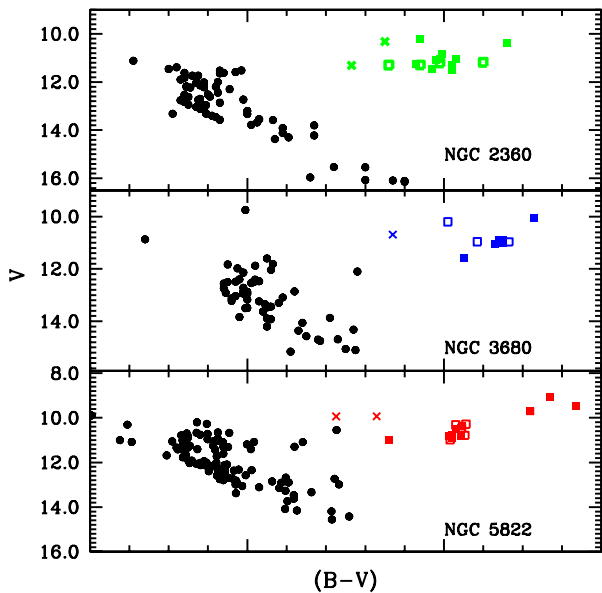
mined abundances for a few stars of each cluster and in order to study CNO elements, mainly. More recently, for NGC 3680, Mitschang et al. (2012) obtained abundances for several elements, Na, Al,  $\alpha$ -elements and elements of the s-process but not the light elements carbon, nitrogen and oxygen.

We obtained the atmospheric parameters and abundances of the light elements (CNO) and the  $^{12}C/^{13}C$  ratio using spectral synthesis techniques and equivalent width measurements to determine the abundances of Na, Mg, Al, Ca, Si, Ti, Ni, Cr, Y, Zr, La, Ce and Nd for the 29 single red giants of the mentioned open clusters. The total number of the Fe I and Fe II absorption lines used was about 3500. To determine the abundances of the other elements, the number of absorption lines used was about 8400. The radial velocities and the  $v \sin i$  values were also obtained. The results of the abundances determinations are discussed in comparison with previous analysis for field single giants and also in comparison with other cluster giants. In our study we could compare, for the first time, the abundances of single and binary stars in the same cluster in order to investigate eventual possible chemical peculiarities caused by the binary nature. **It is worth mention that in the last years the  $[Y/Mg]$  ratio has been proposed as a clock for the field solar twins (e.g. da Silva et al. 2012). In this paper we will also discuss and test the age-  $[Y/Mg]$  relation for the clusters of our sample.**

## 2. OBSERVATIONS

The high-resolution spectra of the single red giants of the open clusters NGC 2360, NGC 3680, and NGC 5822 were obtained with the FEROS (Fiberfed Extended Range Optical Spectrograph) (Kaufer et al. 1999) attached at the 2.2m ESO telescope of La Silla (Chile). Twenty seven of these spectra were observed in 2008 and 2009, whereas the stars TYC 7751-608-1 (NGC 3680) and TYC 8681-389-1 (NGC 5822) were observed in 2016, as it is showed in Table 1<sup>1</sup>. The wavelength range obtained with FEROS covers the spectral region between 3800 Å and 9200 Å with a resolving power of  $R = 48\,000$ . The detector was a  $2k \times 4k$  CCD with  $15\mu m$  pixels. The data reduction was done with the FEROS Data Reduction Software which consists of the CCD bias correction, flat-fielding, spectrum extraction, wavelength calibration and correction of barycentric velocity. The nominal S/N ratio was evaluated by measuring the rms flux fluctuation in selected continuum

<sup>1</sup> Tables 2, 3, 4, 5, 6, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 17, 18, 19, 20, 21 and 22 are available only in electronic form.



**Figure 1.** Color-magnitude diagrams of the open clusters NGC 2360 (green), NGC 3680 (blue) and NGC 5822 (red). Open squares represent the binary stars, and the crosses represent the yellow stragglers studied in Sales Silva et al. (2014). Single giants analyzed in this work are represented by filled squares and black circles represent the main-sequence and/or possible blue straggler stars in these clusters. For NGC 2360, the  $UBV$  photometry was taken from Eggen (1968), for NGC 3680, the  $UBV$  photometry was taken from Eggen (1969) and for NGC 5822  $UBV$  photometry was taken from Twarog et al. (1993).

windows, and the typical values are between 100 and 150.

Table 1 gives the information of the observed stars. The stars were selected from the radial velocity surveys of Mermilliod et al. (2008) and Frinchaboy & Majewski (2008). Figure 1 shows the colour-magnitude diagrams (CMDs) of the open clusters NGC 2360, NGC 3680, and NGC 5822 based on the  $UBV$  photometry of Eggen (1968) for NGC 2360, Eggen (1969) for NGC 3680, and Twarog et al. (1993) for NGC 5822. The photometry for the stars TYC 7751-608-1 and TYC 8681-389-1 was obtained by *Tycho-2*, as is mentioned by Frinchaboy & Majewski (2008).

### 3. ANALYSIS AND RESULTS

#### 3.1. Line Selection, Equivalent Width Measurements and Oscillator Strengths

Tables 2 to 6 show the lower excitation potentials  $\chi$  (eV) of the transitions, the  $\log gf$  values and the mea-

sured equivalent widths of the Fe I and Fe II absorption lines used to obtain the atmospheric parameters. The line list is the same that was used in SS2014. The  $\log gf$  values for the Fe I and Fe II lines were taken from Lambert et al. (1996) and Castro et al. (1997).

#### 3.2. Atmospheric Parameters

The effective temperature ( $T_{\text{eff}}$ ), surface gravity ( $\log g$ ), microturbulence ( $\xi$ ), and metallicity ( $[\text{Fe}/\text{H}]$ ) (we use the notation  $[\text{X}/\text{H}] = \log(N_{\text{X}}/N_{\text{H}})_{\star} - \log(N_{\text{X}}/N_{\text{H}})_{\odot}$ ), were determined using the local thermodynamic equilibrium (LTE) model atmospheres of Kurucz (1993) and the spectral analysis code MOOG (Sneden 1973).

The procedure to derive the effective temperature ( $T_{\text{eff}}$ ) is the analysis of the excitation equilibrium, indicated by an absence of the trend of the iron abundances derived from individual Fe I lines with different the excitation potentials. The microturbulent velocity  $\xi$  ( $\text{km s}^{-1}$ ) was found constraining the Fe I abundance to show no dependence on the reduced equivalent width ( $W_{\lambda}/\lambda$ ). The adopted atmospheric parameters are given in Table 7. The value of  $\log g$  was obtained based on ionization balance of neutral and ionized iron lines using the assumption of LTE. We found typical uncertainties of the temperature, gravity, and microturbulent velocity of  $\sigma(T_{\text{eff}}) = \pm(100 - 120)$  K,  $\sigma(\log g) = \pm 0.2$ , and  $\sigma(\xi) = \pm 0.3$   $\text{km s}^{-1}$ .

To check the  $\log g$  derived from spectroscopic analysis of the studied stars, we can calculate the evolutionary gravities following the relation

$$\log g_{\star} = \log(M_{\text{TO}}/M_{\odot}) + 0.4(V - A_V + BC) + 4 \log T_{\text{eff}} - 2 \log r(\text{kpc}) - 16.5. \quad (1)$$

In the equation (??), the turn-off mass  $M_{\text{TO}}$ , the interstellar absorption, and the distances for NGC 2360, NGC 3680, and NGC 5822 are the same as used by Smiljanic et al. (2009) and the bolometric corrections were taken from Alonso et al. (1999). There is a mean difference between the spectroscopic and evolutionary gravities of approximately  $0.20 \pm 0.10$  dex for the open cluster NGC 2360 and  $0.30 \pm 0.20$  dex for the open clusters NGC 3680 and NGC 5822.

It is well known that there is a disagreement between the gravities based on the ionization equilibrium (spectroscopic gravity) and on parallaxes. NLTE effects is probably the main source (Smiljanic et al. 2009). It is also known that the stars with larger surface gravities have lower microturbulent velocities than stars with lower gravities. This is seen in Figure 6 of Mishenina & Kovtyukh (2001), therefore we should expect that an error in the microturbulent velocity should influence the

**Table 1.** Relevant information for the target stars of the open clusters NGC 2360, NGC 3680, and NGC 5822. Star cluster number, BD, CD, CPD, and HD numbers (when available),  $V$ ,  $B - V$ , and radial velocities taken from Mermilliod et al. (2008)<sup>a</sup> and Frinchaboy & Majeswki (2008)<sup>b</sup> are given in columns 1 to 5. Our values of the radial velocities are given in Col. 6. The last two columns provide the observation dates and the exposure times. Spectra obtained from ESO Archive are labelled as <sup>c</sup>

ID	BD/CD/CPD/HD	$V$	$B - V$	RV km s <sup>-1</sup>	RV km s <sup>-1</sup>	Obs. Date	Exp sec
NGC 2360 - 7 <sup>a</sup>	—	11.08	1.00	+27.47±0.48	+27.47±0.40	2008 Dec 24	1 800
NGC 2360 - 37 <sup>a</sup>	—	11.33	1.02	+28.69±0.36	+29.07±0.45	2008 Dec 24	1 800
NGC 2360 - 50 <sup>a</sup>	—	11.08	1.02	+27.56±0.52	+27.30±0.30	2008 Dec 25	1 800
NGC 2360 - 66 <sup>a</sup>	—	11.22	0.95	+27.86±0.21	+28.29±0.40	2008 Dec 26	1 800
NGC 2360 - 68 <sup>a</sup>	BD-15°1740	10.20	0.94	+27.64±0.46	+28.22±0.45	2008 Oct 21	1 200
NGC 2360 - 79 <sup>a</sup>	—	11.29	1.02	+27.52±0.63	+28.38±0.40	2007 Apr 07	1 320
NGC 2360 - 85 <sup>a</sup>	—	11.46	0.99	+27.48±0.65	+27.36±0.45	2008 Dec 26	1 800
NGC 2360 - 86 <sup>a</sup>	—	10.80	1.02	+27.69±0.50	+27.61±0.45	2009 Mar 07	1 800
NGC 2360 - 89 <sup>a</sup>	—	11.07	0.99	+27.03±0.40	+27.13±0.45	2009 Mar 07	1 800
NGC 2360 - 93 <sup>a</sup>	—	10.35	1.16	+27.69±0.39	+28.52±0.45	2009 Mar 07	1 800
NGC 2360 - 119 <sup>a</sup>	—	11.04	1.04	+27.68±0.34	+27.74±0.45	2009 Mar 07	1 800
NGC 2360 - 134 <sup>a</sup>	—	11.52	1.02	+27.60±0.30	+27.92±0.40	2009 Mar 08	3 000
NGC 3680 - 13 <sup>a</sup>	CD-42°6963	10.83	1.15	+1.40±0.50	+1.48±0.40	2009 Mar 07	1 800
NGC 3680 - 26 <sup>a</sup>	CD-42°6977	10.96	1.13	+0.70±0.50	+0.80±0.70	2009 Mar 07	1 800
NGC 3680 - 41 <sup>a</sup>	CD-42°6981	11.01	1.15	+1.00±0.50	+1.30±0.43	2009 Mar 09	1 800
NGC 3680 - 44 <sup>a</sup>	CD-42°6983	10.06	1.23	+1.20±0.60	+1.50±0.50	2009 Mar 09	1 200
NGC 3680 - 53 <sup>a</sup>	—	10.86	1.13	+2.00±0.70	+1.20±0.45	2009 Mar 09	1 800
TYC 7751 - 608 - 1 <sup>b</sup>	—	11.48	0.92	+3.00±1.00	+3.24±0.45	2016 May 15	3 000
NGC 5822 - 1 <sup>a,c</sup>	HD 132944	9.06	1.28	-31.03±0.20	-28.89±0.40	2009 Mar 07	420
	—					2010 Jun 25	300
NGC 5822 - 6 <sup>a,c</sup>	—	10.78	1.02	-29.60±0.20	-28.56±0.30	2009 Mar 06	1 800
	—					2010 Jun 25	1 800
NGC 5822 - 8 <sup>a,c</sup>	CPD-53°6243	10.39	1.05	-30.40±0.20	-27.58±0.36	2009 Mar 07	1 200
	—					2010 Jun 25	1 800
NGC 5822 - 102 <sup>a,c</sup>	—	10.85	1.03	-29.80±0.25	-29.11±0.48	2009 Mar 10	1 800
	—					2010 Jun 26	1 800
NGC 5822 - 224 <sup>a</sup>	—	10.82	1.04	-29.45±0.15	-30.05±0.44	2009 Mar 10	1 800
NGC 5822 - 240 <sup>a</sup>	CD-54°6003	9.50	1.34	-29.50±0.15	-28.06±0.70	2009 Mar 10	900
NGC 5822 - 316 <sup>a,c</sup>	CD-54°6002	10.52	1.03	-28.33±0.07	-27.63±0.34	2010 Jun 28	1 200
NGC 5822 - 348 <sup>a,c</sup>	—	10.91	1.02	-29.06±0.07	-28.15±0.21	2010 Jun 28	1 200
NGC 5822 - 375 <sup>a,c</sup>	CD-53°5820	9.71	1.22	-29.47±0.08	-28.59±0.12	2010 Jun 28	1 200
NGC 5822 - 443 <sup>a,c</sup>	CD-53°5815	9.72	1.22	-29.24±0.10	-28.31±0.04	2010 Jun 28	1 200
TYC 8681 - 389 - 1 <sup>b</sup>	—	11.01	0.86	-30.81±0.77	-29.62±1.00	2016 Mar 19	2 400



**Table 7.** Derived atmospheric parameters, metallicities and rotational velocities for stars of the open clusters NGC 2360, NGC 3680, and NGC 5822. For  $[\text{Fe I}/\text{H}]$  and  $[\text{Fe II}/\text{H}]$  we also show the standard deviation and the number of lines employed.

Star	$T_{\text{eff}}$ K	$\log g$	$\xi$ $\text{km s}^{-1}$	$[\text{Fe I}/\text{H}] \pm \sigma$ (#)	$[\text{Fe II}/\text{H}] \pm \sigma$ (#)	$v \sin i$ $\text{km s}^{-1}$
NGC 2360 - 7	5 100	2.7	1.3	0.01±0.09 (80)	-0.02±0.12 (11)	2.4
NGC 2360 - 37	5 000	2.6	1.4	-0.16±0.15 (102)	-0.17±0.08 (12)	3.4
NGC 2360 - 50	5 100	2.9	1.3	0.04±0.09 (77)	0.04±0.09 (12)	3.5
NGC 2360 - 66	5 100	2.8	1.3	-0.11±0.12 (94)	-0.12±0.12 (13)	4.3
NGC 2360 - 68	5 100	2.8	1.3	-0.12±0.10 (92)	-0.11±0.10 (13)	3.4
NGC 2360 - 79	5 100	2.9	1.3	0.02±0.14 (84)	0.01±0.06 (13)	2.4
NGC 2360 - 85	5 000	2.6	1.3	-0.02±0.13 (81)	-0.04±0.08 (12)	3.4
NGC 2360 - 86	4 900	2.4	1.2	-0.07±0.10 (86)	-0.07±0.11 (14)	3.4
NGC 2360 - 89	5 000	2.6	1.3	-0.07±0.10 (86)	-0.04±0.09 (15)	3.4
NGC 2360 - 93	4 700	2.2	1.4	-0.07±0.11 (72)	-0.08±0.09 (13)	3.4
NGC 2360 - 119	5 000	2.5	1.3	-0.06±0.10 (90)	-0.08±0.10 (14)	3.4
NGC 2360 - 134	5 000	2.6	1.3	-0.19±0.09 (87)	-0.20±0.10 (12)	4.3
NGC 3680 - 13	4 600	2.3	1.2	-0.06±0.10 (54)	-0.04±0.10 (9)	3.0
NGC 3680 - 26	4 700	2.6	1.2	0.00±0.13 (63)	-0.03±0.10 (11)	2.8
NGC 3680 - 41	4 700	2.4	1.2	-0.05±0.11 (42)	-0.10±0.10 (9)	4.5
NGC 3680 - 44	4 500	1.7	1.5	-0.15±0.08 (53)	-0.13±0.10 (14)	4.5
NGC 3680 - 53	4 600	2.2	1.3	-0.11±0.10 (39)	-0.09±0.11 (9)	4.0
TYC 7751-608-1	6 500	4.5	1.5	0.04±0.14 (51)	0.00±0.09 (10)	4.2
NGC 5822 - 1	4 400	1.9	1.4	-0.11±0.09 (54)	-0.11±0.09 (10)	4.7
NGC 5822 - 6	5 100	2.9	1.2	-0.06±0.13 (76)	-0.06±0.12 (11)	5.0
NGC 5822 - 8	5 000	2.7	1.4	-0.10±0.10 (75)	-0.09±0.07 (12)	4.5
NGC 5822 - 102	5 000	2.6	1.2	-0.15±0.11 (65)	-0.15±0.07 (10)	5.7
NGC 5822 - 224	5 100	2.8	1.2	-0.01±0.08 (59)	-0.02±0.07 (11)	4.5
NGC 5822 - 240	4 500	1.8	1.5	-0.16±0.10 (57)	-0.17±0.06 (10)	3.5
NGC 5822 - 316	5 100	2.8	1.5	-0.07±0.09 (78)	-0.08±0.06 (11)	3.5
NGC 5822 - 348	5 000	2.6	1.3	-0.15±0.09 (82)	-0.16±0.07 (12)	3.5
NGC 5822 - 375	4 700	2.1	1.5	-0.11±0.10 (68)	-0.12±0.10 (13)	3.0
NGC 5822 - 443	4 800	2.5	1.6	-0.05±0.11 (71)	-0.06±0.07 (11)	3.5
TYC 8681 - 389 - 1	5 200	2.7	1.4	0.00±0.13 (59)	0.00±0.07 (11)	4.5

uncertainty in the surface gravity. In fact using the sample of giant stars of Luck & Heiter (2007) and Takeda et al. (2008) we find that a typical error of 0.2-0.3 in the microturbulent velocity would be sufficient to cause an error of about 0.3-0.4 in the surface gravity.

### 3.3. Comparison of our derived atmospheric parameters with previous results

Table 8 shows the comparison between the values of the atmospheric parameters for the stars analyzed in this work in common with other studies for the three OCs.

#### 3.3.1. NGC 2360

Some stars of this open cluster have already been spectroscopically investigated by Hamdani et al. (2000), Smiljanic et al. (2009), Santos et al. (2009), and recently by Delgado Mena et al. (2016).

Hamdani et al. (2000), hereafter (H2000), using the spectra of a lower spectral resolution than ours ( $R=28\,000$ ), analyzed the stars NGC 2360-7, 50, 62, and 86. In that study the authors determined the  $T_{\text{eff}}$  and microturbulent velocity through an iterative method minimizing the dispersion of the abundances of iron peak elements and the slope of the Fe I abundance versus equivalent width, while  $\log g$  was obtained through the relation between the temperature, distance and turn-off mass of the cluster.

Our values for effective temperatures and surface gravities for the stars NGC 2360-7 and 50 are very similar to the reported by H2000. The differences between our derived  $\log g$  and  $T_{\text{eff}}$  values and their values are 130 K and 0.19 dex for NGC 2360-7 and 70 K and 0.04 dex for NGC 2360-50. The microturbulent velocity for NGC 2360-7, 50, 86, the effective temperature and surface gravity for NGC 2360-86 obtained by us show lower values than that of H2000, with differences greater than their respective uncertainties. The reason for these differences in microturbulent velocity, effective temperature and surface gravity is probably due to different methods and line lists of iron lines used in the determination of the atmospheric parameters. Another factor that probably also contributes to such differences is the use by H2000 of lines with equivalent widths greater than  $160\text{ m}\text{\AA}$ , which were not used by us.

On the other hand, Smiljanic et al. (2009) (hereafter S2009) used the same methodology as used in our analysis to obtain the atmospheric parameters, however with a different list of the iron lines. The atmospheric parameters obtained by us for the stars NGC 2360-7, 50, and 86 are in good agreement with the values reported by them, with the only exception in the  $\log g$  of NGC

2360-7 and 86 that show a difference of 0.30 dex and 0.25 dex, respectively.

Santos et al. (2009), hereafter SS2009, used the line lists of Hekker & Melendez (2007) and Sousa et al. (2008) separately, in order to obtain the atmospheric parameters for the three stars NGC 2360-7, 79 and 85. With the exception of the surface gravities, the atmospheric parameters obtained here show similar values (within the uncertainties associated with each parameter) to the values derived by SS2009 for both line lists. In the case of  $\log g$ , their values are greater than ours with a larger difference for NGC 2360-85 (0.61 dex) with the list of Sousa et al. (2008) and 0.57 dex with the list of Hekker & Melendez (2007). Hekker & Melendez (2007) analyzed 380 F and G giant stars and they found that their  $\log g$  can be overestimated in giant stars with  $T_{\text{eff}}$  around 5000 K (called “hot” giant stars). This could explain the overestimation of surface gravities obtained by SS2009, considering that the giants NGC 2360-7, 79, and 85 are “hot” giant stars with effective temperatures of 5100 K, 5100 K and 5000 K, respectively.

Finally, Delgado Mena et al. (2016), hereafter (D2016), studied a sample of 67 red giants in 12 OCs. Their atmospheric parameters were obtained with a resolution similar to our ( $R > 50\,000$ ), using the line list of Tsantaki et al. (2013), and the grid of stellar atmospheres of Kurucz (1993). These authors used the PARSEC v1.3 isochrones (Bressan et al. 2012) in order to derive masses, radii, and ages for the stars, and based on that, they obtained the  $\log g$  values corresponding to these isochrones for each star. Regarding the differences between their results and ours for the stars NGC 2360-7, 50, 66, 79, 85, 86, 89, and 119, we can see that there is a good agreement among the results.

#### 3.3.2. NGC 3680

The atmospheric parameters for the single giant stars of NGC 3680 were obtained by Pasquini et al. (2001), Anthony-Twarog et al. (2009), S2009, SS2009, Mitschang et al. (2012), and D2016. Pasquini et al. (2001), hereafter (P2001), analyzed five single red giants of NGC 3680, and their  $T_{\text{eff}}$  were obtained applying the effective temperature scale of Alonso et al. (1999) and a reddening  $E(B - V) = 0.05$  from Nordstroem et al. (1996). The surface gravities determined by P2001 were obtained using the equation (??) considering a turn-off mass of  $1.8 M_{\odot}$  and the values of  $V$  magnitude and bolometric correction of Johnson (1966). Microturbulent velocity was calculated assuming an initial velocity of  $2.0\text{ km s}^{-1}$  and testing several possible values, keeping the zero slope of the iron abundance versus equivalent width relation. Our values for  $T_{\text{eff}}$  for the sin-

gle stars are similar to the results of P2001, the greatest difference is 61 K for the star NGC 3680-53. Comparing our surface gravities with their values, there is also a good agreement, with the greatest difference of 0.3 dex for the  $\log g$  for the star NGC 3680-44. For the star NGC 3680-13 we found similar values of the atmospheric parameters with S2009 only with a difference of 0.3 dex in  $\log g$ , which is the mean difference between our spectroscopic and evolutionary gravity found by the equation (??).

Anthony-Twarog et al. (2009), hereafter AT2009, reported results for the five stars in common with us. They obtained  $T_{\text{eff}}$  using the relations of Ramírez & Meléndez (2005) and the calibrations of Alonso et al. (1999). These authors used the isochrones of Padova group to determine the  $\log g$  values, similar to those obtained by P2001. The microturbulent velocities in AT2009 were calculated using the relation adopted by Carretta et al. (2007), giving lower values than in P2001. Comparing our results with AT2009 (only for  $T_{\text{eff}}$  and  $[\text{Fe}/\text{H}]$ ), it can be seen that the effective temperatures are in good agreement.

Comparing our results with those of Santos et al. (2009) for the three stars in common, NGC 3680-13, 26, and 41, we see that our values are consistent with the obtained by them, having a greater difference in  $T_{\text{eff}}$  of 180 K (referred to the line list of Hekker & Meléndez (2007), and with the average of the differences in  $\log g$  of 0.38 dex and in microturbulent velocity, around 0.28  $\text{km s}^{-1}$  (when the line list of Sousa et al. 2008 was used).

We have four stars in common with the study of Mitschang et al. (2012), hereafter (M2012), and in Table 8 are shown the differences in effective temperature, surface gravity, and microturbulent velocity. As was explained in our previous paper (SS2014), the main reason of this discrepancy is the different atomic data for the Fe I and Fe II lines used in both studies. Finally, the comparison between our values for the atmospheric parameters for the red giants NGC 3680-13, 26, and 41 with the ones published by D2016 shows that the results are in good agreement, with a greater difference of 80 K in  $T_{\text{eff}}$ , less than 0.3 dex in the  $\log g$  and less than 0.2  $\text{km s}^{-1}$  in microturbulent velocity.

For the star TYC 7751-608-1 there is no previous spectroscopic temperature and gravity determinations. The recent **distance estimation based on parallax** provided by *Gaia* (Prusti et al. 2016), gives a distance of  $375 \pm 38$  pc, much smaller than the distance considered for NGC 3680, 935 pc. In fact, using our temperature and gravity determination and assuming  $1.0 M_{\odot}$  for TYC 7751-608-1 and  $V = 11.48$  we obtain a distance which is in a good agreement with the value

given by *Gaia*. In addition, if we consider the values of  $B = 12.45$  and  $V = 11.94$  given in Henden (2016) and  $(B - V)_0 = 0.44$ , which corresponds to an effective temperature around 6300 K (Alonso et al. 1999), this is in good agreement with our obtained value for the effective temperature of this star.

### 3.3.3. NGC 5822

For the single red giants of the open cluster NGC 5822 there are some previous results for the atmospheric parameters for the stars NGC 5822-1, 102, 224, 240, and 443 obtained by Luck (1994), the stars NGC 5822-1, 240, 316, and 443 by S2009, the stars NGC 5822-102, 224, 438 by SS2009 and Pace et al. (2010). Using intermediate resolution spectra,  $R = 18\,000$ , Luck (1994) obtained atmospheric parameters for the star NGC 5822-1, the only star in common with us, which has a difference of 700 K in  $T_{\text{eff}}$  and 0.8  $\text{km s}^{-1}$  in microturbulent velocity.

In Table 8 we can see that the greatest difference is for the temperature of the star NGC 5822-443 (210 K) while for the other stars analyzed here and in S2009 the differences in the temperature are smaller. The results adopted by us for the temperature of the stars NGC 5822-102 and 224 are consistent with those derived by SS2009, and having differences around 0.3 dex in  $\log g$  based on their line list, as for the stars analyzed in NGC 2360. As far as the atmospheric parameters obtained by D2016 are concerned, we found that the differences are lower than 250 K in effective temperature, 0.4 dex in  $\log g$  and 0.2  $\text{km s}^{-1}$  for  $\xi$ .

We finish this Section where we comment on the recent study done by Heiter et al. (2014) on the metallicities of open clusters. In that study, the authors compiled the metallicities obtained via high-resolution spectroscopy of all open clusters in the literature with the aim of making the comparison between the works performed by different authors more homogeneous. To achieve this goal, Heiter et al. (2014) recalculated the metallicities of the clusters adopting that the stars used in the metallicity determination have the effective temperatures in the range 4400-6500 K with  $\log g \geq 2.0$  to eliminate any rapidly rotating hot dwarfs or stars with chemical peculiarities, as well as bright giants possibly affected by non-LTE effects. After selecting stars with these criteria, Heiter et al. (2014) determined the average metallicity for each cluster, weighted by the inverse square of the individual errors quoted by the authors. For NGC 2360, NGC 3680 and NGC 5822, Heiter et al. (2014) obtained metallicities of  $-0.03 \pm 0.06$ ,  $-0.01 \pm 0.06$  and  $+0.08 \pm 0.08$ , respectively, which are in good agreement with our derived metallicities (Section 4.2.1).

### 3.4. Abundance Analysis

The chemical abundances of the elements sodium to nickel and the elements of the s-process were determined in the same way as in SS2014, applying the line-synthesis code MOOG (Snedden 1973). Abundances were normalized to solar using the spectrum of Ganymede. Details of the procedure are given in Santrich et al. (2013). Tables 9-13 provide the equivalent widths of atomic lines used to obtain the abundances. For the star TYC 7751-608-1 we did not determine the aluminum abundance due to the weakness of the lines.

In order to derive abundances of carbon and nitrogen we used the spectral region of the  $C_2$  molecule ( $C_2(0,1)$  band head of the Swan system  $A^3\Pi_g - X^3\Pi_u$  at 5635 Å and CN lines in the region around 8000 Å to determine the nitrogen abundances. The oxygen abundances were obtained through the synthesis of the oxygen forbidden line [O I] at 8446 Å. For derivation of the  $^{12}C/^{13}C$  ratio, we used the spectral synthesis of the  $^{13}CN$  at the spectral region around 8004 Å containing the  $^{13}CN$  lines. Due to the presence of strong contamination by the  $O_2$  telluric line it was not possible to obtain the oxygen abundance for the stars NGC 2360-79, 85, TYC 7751-608-1, and TYC 8681-389-1.

The departures from the LTE increase with increasing luminosity (or for stars with low gravity) and with decreasing of metallicity. Therefore NLTE corrections for the elements analyzed in this work should be minimal if any. In fact, the corrections given in Mashonkina et al. (2016) for iron, calcium and titanium for stars with near solar metallicity as seen in Table 7 are less than 0.05 dex.

The derived mean abundances of all elements, including the mean abundances of the s-process elements and the comparison of our derived chemical abundance with other few similar studies are given in Tables ??, ??, and ??.

### 3.5. Abundance Uncertainties

We estimated the sensitivity of the derived chemical abundances to the uncertainties of the atmospheric parameters  $T_{\text{eff}}$ ,  $\log g$ , and  $\xi$  in the same way as in SS2014. We changed each atmospheric parameter consistently with the standard error, and also changed the equivalent width of the lines of each element. Finally, we derived a new abundance in each case and compared it with the obtained for those elements with more than three available lines.

The estimated uncertainties for the stars NGC 2360-7, NGC 3680-13, and NGC 5822-1 are shown in Tables 17, 18 and 19. The total uncertainty (seventh column of these tables) of the abundance is calculated composing quadratically the uncertainties due to atmospheric

parameters and the equivalent widths. The last column of the Tables 17, 18 and 19 includes the observed abundance dispersion between the lines for each element with more than three available lines. Changes in abundance of carbon, nitrogen and oxygen, related to variations in  $T_{\text{eff}}$ ,  $\log g$ , and  $\xi$  are listed in Tables 20, 21 and 22.

## 4. DISCUSSION

### 4.1. Rotational Velocities

The determination of rotational velocities,  $v \sin i$ , was made by spectral synthesis technique as described in SS2014. To calculate the synthetic spectra we used a macroturbulent velocity of  $3 \text{ km s}^{-1}$  and instrumental broadening corresponding to FEROS spectral resolution. Our results are shown in Table 7. The stars of the OCs studied here have rotational velocities  $2.0 \leq v \sin i \leq 6.0 \text{ km s}^{-1}$ , which is also consistent with the values found for other evolved red giant stars, as determined by Carlberg et al. (2011). These authors analyzed the relation between the rotational velocity values of almost 1300 K giant stars and their effective temperatures. As can be seen in Figure 2 the  $v \sin i - T_{\text{eff}}$  values of the single stars of the OCs NGC 2360, NGC 3680, and NGC 5822 follow the trend seen by Carlberg et al. (2011); approximately 30% of the stars of their study have  $T_{\text{eff}}$  lower than 5500 K.

Relative to previous works, AT2009 also derived rotational velocities for five stars in NGC 3680, and obtained high  $v \sin i$  values between 16.8 and 18.0  $\text{km s}^{-1}$ . A possible reason for this difference is the fact that these authors used Fourier cross-correlation method to obtain  $v \sin i$  which accuracy is reduced in the analysis of evolved stars such as K giants, while the spectral synthesis gives better precision, without limitations related to the blending of spectral lines (Gray 2013).

Based on our results, we obtained a mean value of  $3.5 \pm 0.7 \text{ km s}^{-1}$  for the projected rotational velocities of 28 giants. Based on our results taken in SS2014, we obtained a mean value of  $4.3 \pm 1.0 \text{ km s}^{-1}$  for the projected rotational velocities of the 16 binaries of the same clusters. Excluding the star NGC 5822-80 which has the highest rotational velocity among the binary stars, we obtained a mean value of  $4.1 \pm 0.7 \text{ km s}^{-1}$ . Carlberg et al. (2011) obtained rotational velocities only for single field giant stars. Excluding those stars that differ more than  $1\sigma$  of their standard error, that is, those stars with rotational velocities higher than  $9.0 \text{ km s}^{-1}$  and which represents only 3% of their sample, the mean rotational velocity is  $4.5 \pm 1.2 \text{ km s}^{-1}$ . Therefore, we did not find significant differences neither between the two samples, the binary and the single stars of the same three clus-

**Table 14.** Abundance ratios ( $[X/Fe]$ ) for the stars of NGC 2360.

$[X/Fe]$	NGC 2360 - #												$\langle [X/Y] \rangle$
	7	37	50	66	68	79	85	86	89	93	119	134	
$[C/Fe]$	-0.36	-0.27	-0.29	-0.21	-0.38	—	—	-0.38	-0.35	-0.38	-0.34	-0.35	$-0.33 \pm 0.06$
$[N/Fe]$	0.37	0.41	0.40	0.47	0.48	—	—	0.41	0.41	0.42	0.48	0.41	$0.43 \pm 0.04$
$[O/Fe]$	-0.09	-0.08	-0.05	-0.08	-0.14	—	—	-0.17	-0.09	-0.12	-0.13	-0.13	$-0.11 \pm 0.04$
$[N/C]$	0.73	0.68	0.69	0.66	0.86	—	—	0.79	0.76	0.80	0.82	0.76	$0.76 \pm 0.07$
$^{12}C/^{13}C$	16	16	10	20	12	—	—	20	16	20	24	20	$17 \pm 4$
$[Na/Fe]$	0.12	0.17	0.05	0.25	0.13	0.01	0.03	0.18	0.17	0.26	0.22	0.22	$0.15 \pm 0.08$
$[Mg/Fe]$	0.11	0.19	0.10	0.02	0.17	-0.05	0.02	0.12	0.02	0.11	0.23	0.27	$0.11 \pm 0.10$
$[Al/Fe]$	0.14	0.19	0.18	0.15	0.18	0.12	0.12	0.19	0.19	0.22	0.20	0.23	$0.18 \pm 0.04$
$[Si/Fe]$	0.10	0.16	0.05	0.05	0.14	0.06	0.05	0.13	0.16	0.16	0.09	0.20	$0.11 \pm 0.05$
$[Ca/Fe]$	0.09	0.08	0.07	0.08	0.09	0.07	0.08	0.08	0.05	0.07	0.08	0.10	$0.08 \pm 0.01$
$[Ti/Fe]$	0.02	-0.04	0.00	-0.04	0.00	-0.02	-0.11	-0.07	-0.06	-0.05	-0.05	-0.05	$-0.04 \pm 0.04$
$[Cr/Fe]$	0.04	0.01	0.00	0.04	0.05	0.03	0.11	-0.06	-0.01	-0.02	0.01	0.02	$0.02 \pm 0.04$
$[Ni/Fe]$	-0.04	-0.04	-0.02	-0.07	-0.06	-0.07	-0.05	-0.04	-0.04	-0.03	-0.03	-0.04	$-0.04 \pm 0.02$
$[Y/Fe]$	0.06	0.08	0.09	-0.01	0.13	0.11	0.08	0.16	0.04	0.11	-0.04	0.08	$0.07 \pm 0.06$
$[Zr/Fe]$	0.08	0.09	0.12	0.11	0.21	0.10	-0.03	-0.11	-0.05	-0.08	-0.01	0.04	$0.04 \pm 0.10$
$[La/Fe]$	-0.06	0.27	0.25	0.09	0.22	0.26	0.30	0.29	0.19	0.28	0.19	0.21	$0.21 \pm 0.10$
$[Ce/Fe]$	0.28	0.21	0.28	0.21	0.29	0.18	0.17	0.25	0.26	0.24	0.29	0.18	$0.24 \pm 0.05$
$[Nd/Fe]$	0.09	0.19	0.23	0.16	0.16	0.11	-0.02	0.07	0.13	0.08	0.08	0.12	$0.12 \pm 0.06$
$[s/Fe]$	0.09	0.17	0.19	0.11	0.20	0.15	0.10	0.13	0.11	0.13	0.10	0.13	$0.13 \pm 0.04$

ters nor between the binary and single stars of the same three clusters and the single field giants.

#### 4.2. The abundance pattern

In the following Sections we discuss the abundance pattern of the single red giant studied in the OCs NGC 2360, NGC 3680, and NGC 5822.

##### 4.2.1. Metallicity

Considering the results for the metallicity given in Table 7, we concluded that the OCs NGC 2360, NGC 3680, and NGC 5822 have solar metallicity, with mean values of  $-0.07 \pm 0.07$ ,  $-0.06 \pm 0.07$ , and  $-0.09 \pm 0.06$ , respectively. These values **are consistent with** those obtained in SS2014 from the study of the binary stars in these clusters,  $-0.02 \pm 0.03$ ,  $-0.08 \pm 0.06$ , and  $-0.09 \pm 0.08$ , respectively.

Other studies for the open cluster NGC 2360 using high resolution spectroscopy, such as Friel & Janes (1993), H2000, S2009, SS2009, Reddy et al. (2012), and D2016 obtained metallicities  $-0.28 \pm 0.05$ ,  $0.08 \pm 0.06$ ,  $0.04 \pm 0.09$ ,  $-0.01 \pm 0.01$ ,  $-0.08 \pm 0.03$ , and  $0.02 \pm 0.02$ , respectively.

For NGC3680, P2001 derived a mean metallicity of  $-0.30 \pm 0.31$  using a smaller number of Fe I lines than employed by us, seven Fe I lines around the Li I 6707.7 Å doublet. Considering the results of AT2009, the authors obtained a different result from us,  $-0.17 \pm 0.08$ , based on analysis of the giant stars, and a mean metallicity of  $-0.04 \pm 0.11$  based on the results of dwarf stars. The comparison of metallicities is given in Table 8. M2012, like AT2009, also analyzed a sample of dwarfs and giants of the open cluster NGC 3680. They obtained a mean metallicity of  $-0.04 \pm 0.16$  based on the dwarf stars and  $0.00 \pm 0.08$  based on the giant stars. As far as the metallicity obtained by D2016 is concerned, the authors obtained a mean metallicity of  $-0.08 \pm 0.04$  after analyzing the stars NGC 3680-13, 26, and 41.

For the single red giants in NGC 5822, previous high-resolution spectroscopic analyses were done by S2009, SS2009, and D2016, which obtained a mean metallicity of  $0.04 \pm 0.11$ ,  $0.08 \pm 0.08$ , and  $0.04 \pm 0.03$ , respectively. The comparison between the  $[Fe/H]$  values for the stars in common with us is shown in Table 8.

##### 4.2.2. Carbon, nitrogen, and oxygen

**Table 15.** Abundance ratios ( $[X/Fe]$ ) for the stars of NGC 3680.

$[X/Fe]$	TYC 7751 - 608 - 1	NGC 3680 - #					$\langle [X/Y] \rangle$
		13	26	41	44	53	
$[C/Fe]$	—	-0.37	-0.35	-0.42	-0.28	-0.34	$-0.35 \pm 0.05$
$[N/Fe]$	—	0.30	0.39	0.25	0.10	0.18	$0.24 \pm 0.11$
$[O/Fe]$	—	-0.18	-0.14	-0.26	-0.14	-0.18	$-0.18 \pm 0.05$
$[N/C]$	—	0.67	0.74	0.67	0.38	0.52	$0.60 \pm 0.15$
$^{12}C/^{13}C$	—	16	20	12	8	10	$13 \pm 5$
$[Na/Fe]$	0.01	0.03	0.08	0.05	0.22	0.06	$0.09 \pm 0.08$
$[Mg/Fe]$	-0.04	0.03	0.17	0.13	0.11	0.16	$0.12 \pm 0.08$
$[Al/Fe]$	—	0.24	0.26	0.21	0.32	0.16	$0.24 \pm 0.06$
$[Si/Fe]$	-0.02	0.13	0.15	0.10	0.24	0.21	$0.17 \pm 0.09$
$[Ca/Fe]$	0.00	-0.02	0.08	0.06	0.12	-0.15	$0.02 \pm 0.10$
$[Ti/Fe]$	0.07	-0.06	0.01	0.07	0.00	-0.06	$-0.01 \pm 0.06$
$[Cr/Fe]$	0.03	-0.07	-0.07	0.03	0.04	-0.01	$-0.02 \pm 0.05$
$[Ni/Fe]$	-0.10	-0.01	0.00	0.08	-0.05	-0.08	$-0.01 \pm 0.07$
$[Y/Fe]$	—	0.07	0.24	0.00	-0.13	0.06	$0.05 \pm 0.13$
$[Zr/Fe]$	—	-0.14	-0.01	0.03	0.01	-0.04	$-0.03 \pm 0.07$
$[La/Fe]$	—	0.01	0.18	0.11	0.01	0.10	$0.08 \pm 0.07$
$[Ce/Fe]$	—	0.31	0.20	0.18	0.20	0.12	$0.20 \pm 0.07$
$[Nd/Fe]$	—	0.22	0.27	0.21	0.13	0.31	$0.23 \pm 0.07$
$[s/Fe]$	—	0.09	0.18	0.11	0.04	0.11	$0.11 \pm 0.05$

The  $[X/Fe]$  ratios for the CNO abundances for all the single red giants of the three OCs analyzed in this work are shown in Figure 3, where we compared our values of  $[C/Fe]$ ,  $[N/Fe]$ , and  $[O/Fe]$  ratios and the field giants studied by Mishenina et al. (2006) (hereafter M2006) and Luck & Heiter (2007) (hereafter LH2007). In addition, we also show these ratios for other open clusters previously analyzed where we separated them according to their age, young for those with ages less than 1.0 Gyr and old for those with ages older than 1.0 Gyr, using the same references as in SS2014 including the recent analysis done by Bocek Topcu et al. (2015, 2016) and Drazdauskas et al. (2016a, 2016b).

Previous determination of CNO abundances of the giant stars of the open cluster NGC 2360 was done by S2009 of which we have three stars in common: NGC 2360-7, 50, 86, although the CNO abundances were obtained only for NGC 2360-50 and 86. Our  $[N/Fe]$  ratios are in agreement with those obtained by S2009, 0.40 and 0.41, respectively. Relative to  $[C/Fe]$  ratios, S2009 obtained  $-0.18$  for both stars while our values are  $-0.29$  and  $-0.38$ , respectively. For the star NGC 2360-86, the  $[O/Fe]$  ratio obtained by them is 0.15 higher than ours. There are no previous determinations of the CNO abun-

dances for the single red giants of NGC 3680. For NGC 5822, S2009 obtained carbon and nitrogen abundances for four stars in common with our study, NGC 5822-1, 240, 316 and 443. Based on these stars they obtained a mean  $[C/Fe]$  and  $[N/Fe]$  ratios of  $-0.15 \pm 0.05$  and  $0.41 \pm 0.07$ , respectively, while we have for the same stars  $-0.20 \pm 0.09$  and  $0.30 \pm 0.12$ .

As shown in Figure 3, our  $[C/Fe]$  and  $[N/Fe]$  ratios for the cluster giants analyzed in this work have similar values as the giants of the other open clusters and also similar to the ones reported by M2006 and LH2007 for field giants. The low  $[C/Fe]$  and high  $[N/Fe]$  ratios for the giants analyzed in this work show the effects of the first dredge-up: carbon is underabundant (all giants have  $[C/Fe] < 0.00$ ) while nitrogen is overabundant (Lambert 1981). The oxygen abundances of our cluster giants all show low  $[O/Fe]$  ratios. A similar behavior for the giants of other OCs have already been reported by Bocek Topcu et al. (2015, 2016).

Compared the mean CNO abundances of the single giants for each cluster with those derived in our analysis of the binary stars given in SS2014, we did not find significant differences. We calculated the difference in the mean abundances, taking into account, only when

**Table 16.** Abundance ratios ( $[X/Fe]$ ) for the stars of NGC 5822.

$[X/Fe]$	NGC 5822 - #										$\langle [X/Y] \rangle$	
	1	6	8	102	224	240	316	348	375	443		TYC 8681 - 389 - 1
[C/Fe]	-0.34	-0.34	-0.28	-0.35	-0.21	-0.26	-0.20	-0.36	-0.34	-0.25	—	$-0.29 \pm 0.06$
[N/Fe]	0.37	0.48	0.40	0.44	0.18	0.12	0.36	0.41	0.36	0.35	—	$0.35 \pm 0.11$
[O/Fe]	-0.13	-0.08	-0.09	-0.29	-0.10	-0.10	-0.02	-0.19	-0.13	-0.02	—	$-0.12 \pm 0.08$
[N/C]	0.71	0.82	0.68	0.79	0.39	0.38	0.56	0.77	0.70	0.60	—	$0.64 \pm 0.16$
$^{12}C/^{13}C$	16	12	8	—	16	24	12	24	16	20	—	$16 \pm 5$
[Na/Fe]	0.14	0.13	0.17	0.20	0.15	0.33	0.22	0.23	0.15	0.20	0.16	$0.19 \pm 0.06$
[Mg/Fe]	0.04	0.03	-0.01	0.03	0.06	0.10	0.21	0.13	0.21	0.06	0.10	$0.09 \pm 0.07$
[Al/Fe]	0.21	0.22	0.24	0.13	0.31	0.27	0.18	0.20	0.13	0.10	0.15	$0.19 \pm 0.06$
[Si/Fe]	0.27	0.10	0.14	0.04	0.02	0.16	0.11	0.12	0.09	0.07	0.04	$0.11 \pm 0.07$
[Ca/Fe]	-0.03	-0.03	-0.04	-0.02	0.00	0.09	-0.03	0.10	0.11	0.06	0.12	$0.03 \pm 0.07$
[Ti/Fe]	-0.15	0.00	-0.08	-0.07	-0.01	0.08	0.02	-0.02	0.06	0.08	0.04	$0.00 \pm 0.07$
[Cr/Fe]	-0.04	-0.01	-0.01	-0.02	0.02	0.06	0.03	0.06	0.05	-0.01	0.00	$0.01 \pm 0.03$
[Ni/Fe]	0.03	-0.07	-0.04	-0.11	-0.06	-0.02	-0.03	-0.03	0.01	-0.02	-0.10	$-0.04 \pm 0.04$
[Y/Fe]	0.18	0.01	0.09	0.11	0.17	0.07	-0.03	-0.02	0.08	0.09	-0.03	$0.07 \pm 0.07$
[Zr/Fe]	-0.10	0.16	0.00	0.12	0.17	0.06	0.14	0.01	0.05	0.17	0.14	$0.08 \pm 0.09$
[La/Fe]	0.29	0.18	0.23	0.15	0.26	0.31	0.31	0.11	0.29	0.36	0.05	$0.23 \pm 0.10$
[Ce/Fe]	0.23	0.25	0.30	0.20	0.43	0.18	0.33	0.21	0.23	0.29	0.19	$0.26 \pm 0.07$
[Nd/Fe]	-0.02	0.15	0.08	0.14	0.17	0.06	0.13	0.19	0.18	0.10	0.18	$0.12 \pm 0.06$
[s/Fe]	0.12	0.15	0.14	0.14	0.24	0.14	0.18	0.10	0.17	0.20	0.11	$0.15 \pm 0.04$

we have available results for the elements which abundances were determined in two or more stars in each cluster. Due this fact, we could not compare the carbon and oxygen abundance in NGC 2360 between the single giants and binaries because we obtained the carbon and oxygen abundance only in two binary stars of NGC 2360. For the open cluster NGC 5822, the oxygen abundance was not measured in the binary stars of this cluster (SS2014).

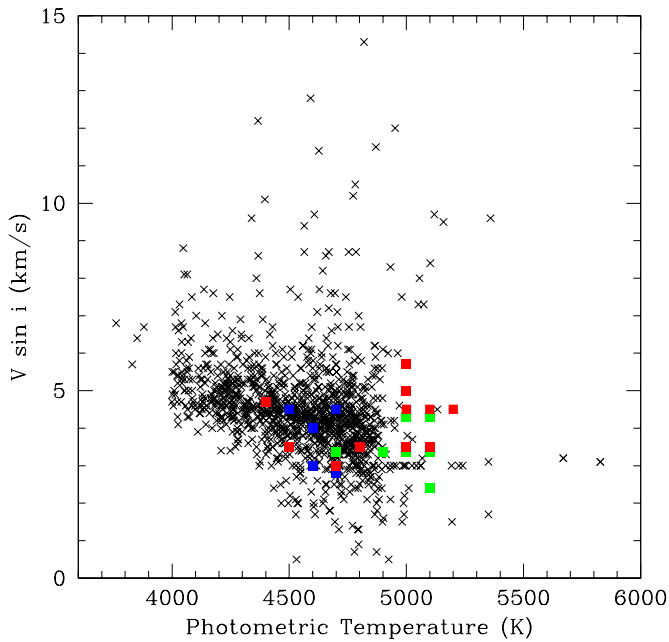
For carbon, the differences in abundance ratios  $[C/Fe]$  between the single giants and the binaries for the open clusters NGC 3680 and NGC 5822 are respectively  $-0.04 \pm 0.05$  and  $-0.03 \pm 0.12$ . For nitrogen, for the open clusters NGC 2360, NGC 3680, and NGC 5822, the difference in the abundance ratios  $[N/Fe]$  between the single giants and binaries are, respectively,  $0.14 \pm 0.18$ ,  $-0.21 \pm 0.20$  and  $-0.10 \pm 0.20$ . For oxygen, only for the NGC 3680 we could make a comparison and the difference is only  $0.03 \pm 0.06$ .

#### 4.2.3. $[N/C]$ and $^{12}C/^{13}C$

The  $[N/C]$  and the  $^{12}C/^{13}C$  ratios are evolutionary indicators of the cluster red giants, as given by the models of Schaller et al. (1992) and Charbonnel & Lagarde

(2010) (hereafter CL2010), among others. Particularly, the mixing models of CL2010 show correlations between the  $[N/C]$  and  $^{12}C/^{13}C$  ratios and turn-off masses  $M_{TO}$  of the cluster. For the stars analyzed in NGC 2360 ( $M_{TO} = 1.78-1.98M_{\odot}$ ), NGC 3680 ( $M_{TO} = 1.46-1.70M_{\odot}$ ), and NGC 5822 ( $M_{TO} = 1.89-2.14M_{\odot}$ ) the mean values derived for  $[N/C]$  are  $0.76 \pm 0.07$ ,  $0.60 \pm 0.15$ , and  $0.64 \pm 0.16$ , respectively (Tables 14, 15 and 16). Regarding the values of  $[N/C]$  of S2009 for the stars in common (NGC 2360-50, 86; NGC 5822-1, 240, 316, and 443) we see good agreement with their results.

Gilroy (1989) showed that the carbon isotopic ratio changes for clusters with  $M_{TO} < 2.2M_{\odot}$ , however S2009 showed that some cluster giant stars with  $M_{TO} > 2.0M_{\odot}$  could also have low carbon isotopic ratios as the low-mass stars. These low  $^{12}C/^{13}C$  ratios seen in more massive stars are currently attributed to non-canonical mixing or thermohaline convection (Stancliffe et al. 2007). We also obtained  $^{12}C/^{13}C$  ratios using spectral synthesis technique around the region  $\lambda 8004 \text{ \AA}$  for these stars of the program clusters. Figure 4 shows three examples of our  $^{12}C/^{13}C$  ratio determination for the stars NGC 2360-37 ( $^{12}C/^{13}C = 16$ ), NGC 3680-44 ( $^{12}C/^{13}C = 8$ ), and NGC 5822-375 ( $^{12}C/^{13}C = 24$ ). The mean values for the

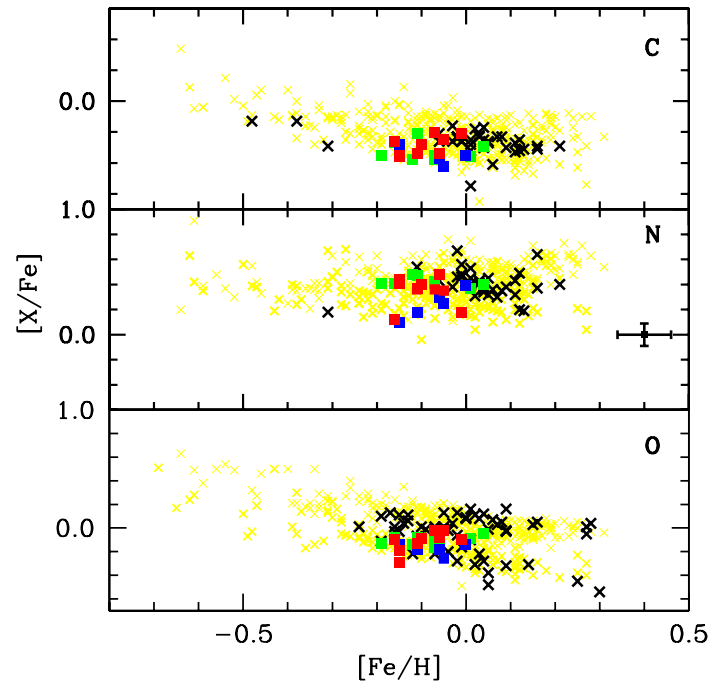


**Figure 2.** Projected rotational velocities of the single giant stars of the open clusters NGC 2360, NGC 3680 and NGC 5822 analyzed in this work, plotted as a function of photometric temperature. Black crosses represent the stars of the sample studied by Carlberg et al. (2011). Other symbols have the same meaning as in Figure 1.

carbon isotopic ratio for NGC 2360, NGC 3680, and NGC 5822 are  $17 \pm 4$ ,  $13 \pm 5$ , and  $16 \pm 5$  (Tables 14, 15 and 16). Our values of this ratio are slightly different from the results for the stars in common with S2009 (NGC 5822-1, 240, and 443), but the uncertainties in the derivation of this ratio are significant.

Figure 5 show  $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$  as a function of  $[\text{N}/\text{C}]$  regarding the mixing models of CL2010, including the values of these ratios for the stars analyzed by us and by S2009, Mikolaitis et al. (2010, 2011a, 2011b) and Böcek Topcu et al. (2016). This authors analyzed OCs with turn-off masses and ages similar to the program clusters, and their results were separated regarding the stellar evolutionary stage: clump stars, RGB stars, and RGB tip/early-AGB. Comparing the points for the stars studied here with the quoted works, we see that the most part of these stars already passed the first dredge-up predicted by the CL2010 models, and are placed between the RGB clump and the RGB tip/early-AGB stage, regarding the distribution of the points obtained by the mentioned references.

The results obtained here for this ratios show that the thermohaline mixing is the main transport process in these stars. Considering the lowest values of  $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$

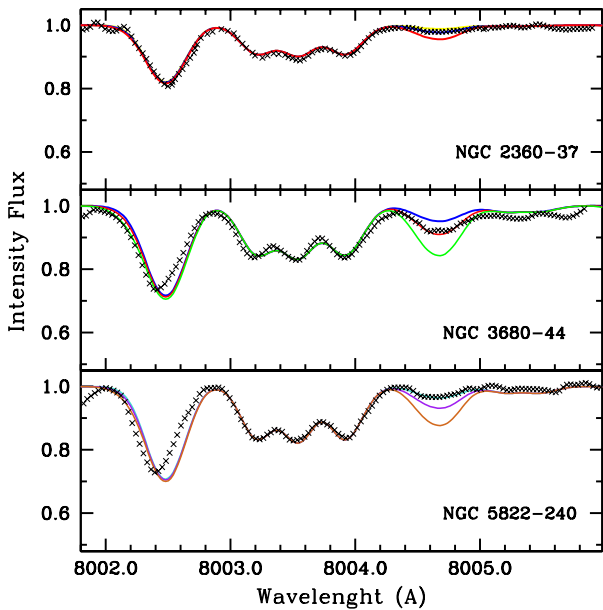


**Figure 3.** Abundance ratios  $[\text{X}/\text{Fe}]$  versus  $[\text{Fe}/\text{H}]$  for CNO elements. Symbols for the open clusters analyzed in this work are the same as in Figure 1. Yellow crosses represent field giants of Luck & Heiter (2007) and clump giants of Mishenina et al. (2006) and black crosses represent the mean abundances of other open clusters. Data for open clusters were taken from Gratton & Contarini (1994), Carretta et al. (2005), Friel et al. (2005), Yong et al. (2005), Smiljanic et al. (2009), Friel et al. (2010), Pancino et al. (2010), Jacobson et al. (2011), Carrera & Pancino (2011), Začs et al. (2011), Santrich et al. (2013), Böcek Topcu et al. (2015, 2016) and Drazdauskas et al. (2016a, 2016b).

ratio, we highlight the interesting cases of NGC 3680-44 and 53, the most evolved stars of their host cluster regarding their low  $\log g$  values. Another low carbon isotopic ratio values (8-12) were found for stars less evolved. Two stars have relatively high  $^{12}\text{C}/^{13}\text{C} > 20$ , with low  $\log g$  values, as the cases of NGC 2360-93 and NGC 5822-240. This apparent contradiction is common in these studies, regarding the great uncertainties suggested by CL2010 for their models.

We could only establish a comparison of the  $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$  ratio between the binary and the single giants for the open cluster NGC 3680. For NGC 5822, the spectra of the binary stars around  $\lambda 8004.7\text{\AA}$ , a spectral region used to obtain the  $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$  ratio, are contaminated by  $\text{H}_2\text{O}$  telluric line. For the binary stars of NGC 2360, the same region is either contaminated by telluric line or





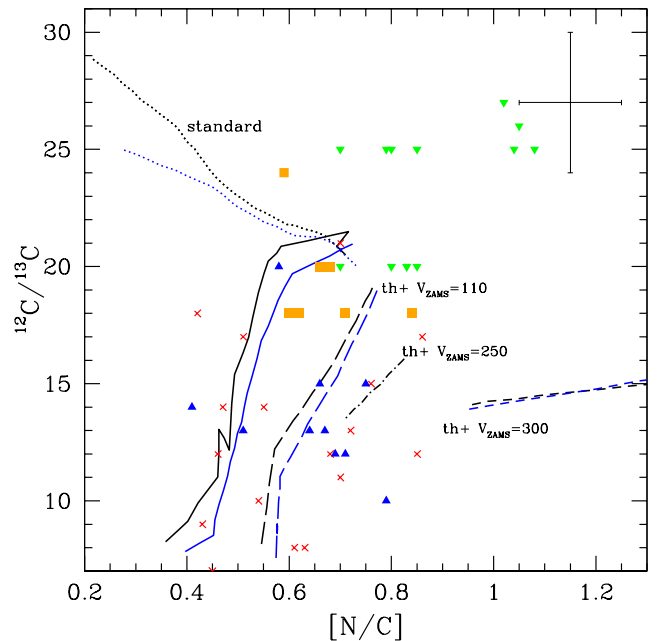
**Figure 4.** Observed (black squares) and synthetic (solid lines) spectra of NGC 2360-37, NGC 3680-44, and NGC 5822-240 in the region around the  $^{13}\text{CN}$  molecular line at  $\lambda$  8004Å. The synthetic spectra were calculated with the carbon isotopic ratios  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}=32$  (yellow line), 24 (turquoise), 16 (blue), 12 (purple), 8 (red), 6 (chocolate) and 4 (green).

severely impacted by cosmic rays. For the binary stars of NGC 3680 (stars #11, #20 and #27) we obtained a mean value of 20 for  $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$  ratio which means that no significant mixing has happened, or binarity did not impact the  $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$  ratio.

#### 4.2.4. Other elements: Na to Ni

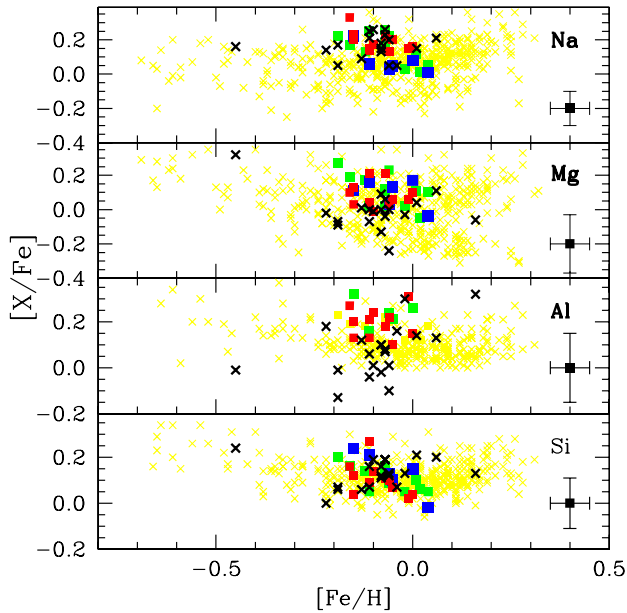
Figures 6 and 7 show the abundance ratios of the elements Na, Al, Mg, Si, Ca, Ti, Cr, and Ni for the single giants studied in this work. These ratios were also obtained by M2006 and LH2007 for samples of field red giant stars in a wide range of metallicity. Additionally, we included the  $[\text{X}/\text{Fe}]$  mean ratios obtained in five older clusters and 13 young OCs as was mentioned in Section 4.2.2. Our abundance ratios for these elements are consistent with the trends found in field giant stars and the other open clusters included as reference.

Detailed  $[\text{X}/\text{Fe}]$  ratios for NGC 2360 are included in Tables 15 and 16 as well as the results obtained by H2000. Comparing their mean values with ours, we see that the higher differences in abundance ratios are for the Ti and Cr,  $-0.23\pm 0.10$  and  $-0.15\pm 0.09$ , respectively. The differences between the mean values for other elements are similar or lower than the mean uncertainty

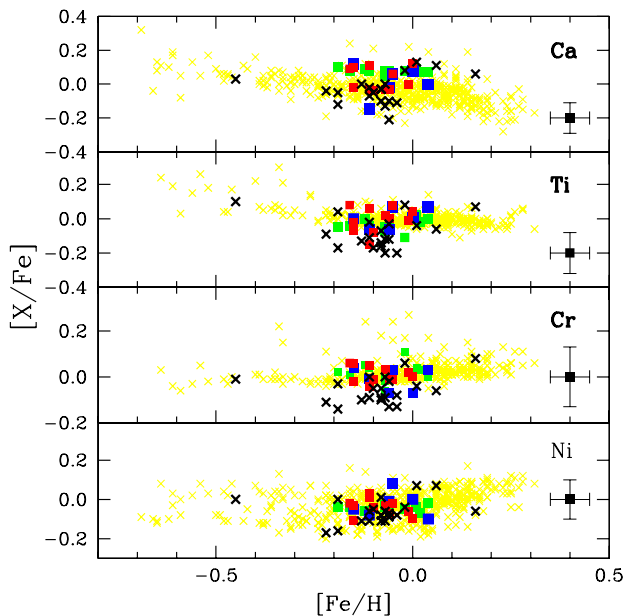


**Figure 5.**  $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$  as a function of the  $[\text{N}/\text{C}]$  ratio. Symbols for the open clusters analyzed in this work are the same as in Figure 1. Clump stars, RGB stars and RGB tip/early AGB stars studied by Smiljanic et al. (2009), Mikolaitis et al. (2010, 2011a, 2011b), and Bocek Topcu et al. (2016) are represented by brown, violet, and turquoise crosses. Theoretical predictions from Charbonnel & Lagarde (2010) are shown at the tip of the RGB and after completion of the second dredge-up (black and blue lines respectively). Standard models (neither thermohaline, nor rotation-induced mixing) are shown as dotted lines, models with thermohaline mixing only ( $V_{\text{ZAMS}}=0$ ) as solid lines, and models with thermohaline and rotation induced mixing for different initial rotation velocities as long-dashed, dot-dashed, and dashed lines.

of the derived abundances. For the open cluster NGC 3680, in Tables 17 and 18 we show our  $[\text{X}/\text{Fe}]$  ratios and the values found by M2012, AT2009, and S2009 (only for the star NGC 3680-13). The comparison between the M2012 mean values and ours show differences between  $\pm 0.10$  and  $\pm 0.27$  for the abundance ratios, except for Na and Ni. The differences among the values obtained for  $[\text{Si}/\text{Fe}]$  and  $[\text{Ni}/\text{Fe}]$  ratios by AT2009 and us are  $0.21\pm 0.11$  and  $0.16\pm 0.08$  respectively. Finally, when compared our mean values of abundance ratios for the stars in NGC 5822 with that of Pace et al. (2010) and S2009 (Tables 19 and 20), the greater differences are  $-0.23\pm 0.11$  and  $-0.19\pm 0.07$  for Ti and Cr, and  $0.22\pm 0.05$  for Na. The differences in abundance ratios are a consequence of the different line lists adopted and also of different atmospheric parameters found by these authors.



**Figure 6.** Abundance ratios  $[X/Fe]$  versus  $[Fe/H]$  for the elements Na to Si. Symbols have the same meaning as in Figure 3.



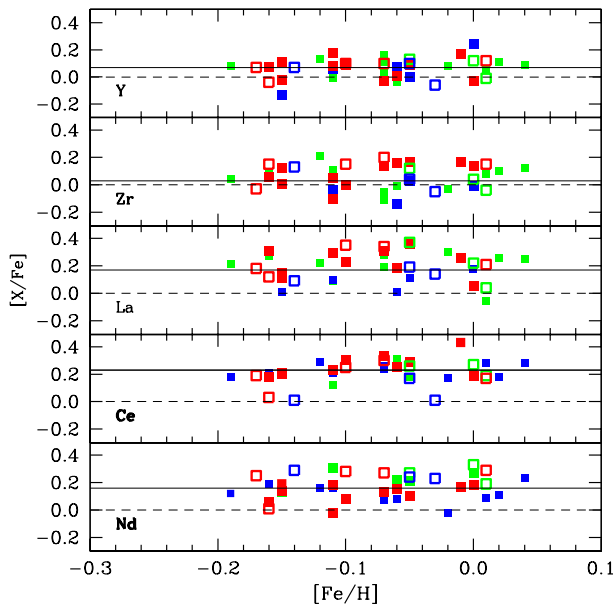
**Figure 7.** Abundance ratios  $[X/Fe]$  versus  $[Fe/H]$  for the elements Ca to Ni. Symbols have the same meaning as in Figure 3.

The comparison between the abundances obtained for the single and binaries red giants analyzed in our previous paper offers a coherent view of the chemical composition (Na to Ni) of the OCs analyzed. For the elements discussed in this Section, the mean differences of the  $[X/Fe]$  ratios between the single and binary stars for NGC 2360, NGC 3680 and NGC 5822 are, respectively,  $0.05 \pm 0.06$ ,  $0.03 \pm 0.08$  and  $0.00 \pm 0.06$ .

#### 4.2.5. Heavy elements : neutron-capture elements

In Figure 8 we show the abundance ratios  $[X/Fe]$  versus metallicity for the heavy elements Y, Zr, La, Ce, and Nd for the giant stars of the open clusters analyzed in this work. We zoomed the metallicity into a smaller range than we did for the other elements because we want to investigate whether there is any difference between the abundance of the s-process elements in single and binary stars of the same open clusters. Figure 8 also shows solid lines which represent the mean abundances of these elements for the three clusters given by the single giants. The dashed lines represent the ratio  $[X/Fe] = 0.0$ . Open squares represent the binary stars from SS2014. For Y, Zr, La, Ce, and Nd, the results for mean  $[X/Fe]$  ratios are, respectively,  $0.06 \pm 0.01$ ,  $0.03 \pm 0.06$ ,  $0.17 \pm 0.08$ ,  $0.23 \pm 0.03$  and  $0.16 \pm 0.06$  for the single giants, while for the binary stars the results are  $0.06 \pm 0.02$ ,  $0.07 \pm 0.05$ ,  $0.20 \pm 0.05$ ,  $0.16 \pm 0.14$  and  $0.25 \pm 0.02$ , respectively. Given that, no significant difference for the mean abundances for the single and binary giants can be seen.

In Figure 9 we compare the mean values of the abundance ratios for the elements of the s-process,  $[s/Fe]$ , for the three open clusters studied here with other open clusters from the literature analyzed with high-resolution spectroscopy. Thanks to the recent analysis done for several open clusters after Maiorca et al. (2011), we see that the trend between the  $[s/Fe]$  ratio and the age of the clusters is better set. The open clusters analyzed in this work, NGC 2360 (1.10 Gyr, green square), NGC 3680 (1.80 Gyr, yellow square) and NGC 5822 (0.89 Gyr, red square) give further support to the trend raised by Maiorca et al. (2011). Figure 9 also shows the  $[s/Fe]$  ratio for field giants analyzed by Luck & Heiter (2007) where the ages were obtained following Takeda et al. (2008). Field giants display a similar trend as the cluster giants, as seen based on the linear fit, however young giants

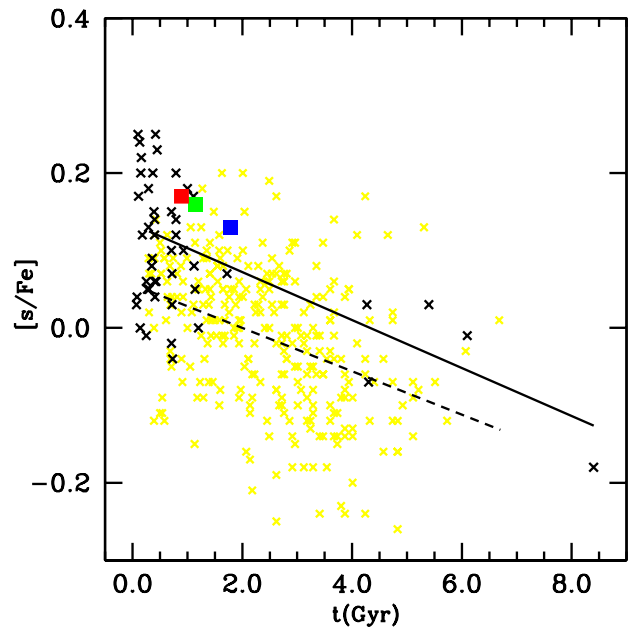


**Figure 8.** Abundance ratios  $[X/Fe]$  versus  $[Fe/H]$  for the s-process elements. Symbols have the same meaning as in Figure 1. Solid lines represents the mean abundance ratio for each element for the single giants for the open clusters analyzed in this work and dashed lines represent the ratio  $[X/Fe] = 0.0$ . Open squares represent the mean abundance ratio for each binary star for the same open clusters analyzed by SS2014.

(those with ages less than 1.0 Gyr) all have  $[s/Fe]$  values less than +0.2, contrary to the young open clusters. The two linear fits for open clusters and for the field giants illustrate this difference.

In order to explain why young open clusters present an overabundance of s-process elements compared to older ones, Maiorca et al. (2011) considered that AGB stars with masses less than  $1.5 M_{\odot}$  would present extra-mixing phenomena following by a very efficient production of neutrons via  $^{13}C$ . However, not all young clusters present a  $[s/Fe]$  ratio higher than +0.2. This means that mixing and production of the s-process elements, as raised by Reddy et al. (2015), were incomplete at the places where some open clusters were formed.

Finally, we comment that previous heavy-element abundance determination has already been reported only for the OCs NGC 2360 and NGC 3680. H2000 obtained abundances only for yttrium and cerium and only for three stars of the OC NGC 2360, so we can not make a detailed comparison. M2012 obtained systematically higher mean  $[X/Fe]$  ratios of the s-process



**Figure 9.** Mean s-process abundance ( $[s/Fe]$ ) versus age for the open clusters analyzed in this work in comparison with other open clusters. Symbols have the same meaning as in Figure 3. The solid line represents the linear fit for the data of the open clusters and the dashed line represents the linear fit to data for field giants analyzed by Luck & Heiter (2007). For the open clusters the linear least-squares fit for  $[s/Fe]$  versus age is  $[s/Fe] = (0.144 \pm 0.019) - (0.033 \pm 0.006) \times (\text{age})$  while for the field giants the relation between  $[s/Fe]$  and age is  $[s/Fe] = (0.056 \pm 0.011) - (0.028 \pm 0.004) \times (\text{age})$ .

elements in stars of NGC 3680 compared with us. For yttrium, lanthanum and neodymium the differences are, respectively, +0.13, +0.22, and +0.37, as seen in Table 18. This is due to the different effective temperatures and spectroscopic gravities derived (mainly, since these abundances are based on the lines of single ionized elements and the different adopted line lists to determine the atmospheric parameters of the stars, as we have already mentioned in Section 3.3. For the open clusters NGC 2360 and NGC 5822 we obtained for the first time the abundances of the s-process elements for a “large” sample of giants, 12 stars in NGC 2360 (Table 14) and 11 stars in NGC 5822 (Table 16).

#### 4.3. $[Y/Mg]$ ratio as an age indicator

One of the greatest challenges of modern astronomy is the reliable age determination of the objects. This difficulty becomes more evident when we talk about estimates of the ages of field stars, which are usually linked to great uncertainties. Recently, some studies have attempted to overcome these difficulties by relating the

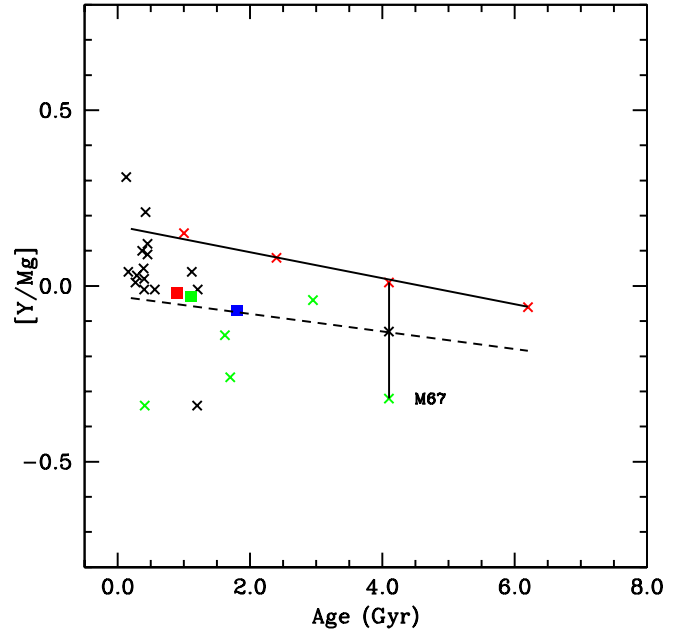
age of stars to abundance ratios, exploring the mass indicators of these ratios. The  $[Y/Mg]$  ratio is one of the most promising ratios for age estimating. Da Silva et al. (2012), Nissen (2015) and Feltzing et al. (2017) found for the solar-type stars a well-defined relation of age with the abundance ratio  $[Y/Mg]$ . However, little is known how universal such a relation is, or its dependence on  $[Fe/H]$  for low metallicity stars (Feltzing et al. 2017).

Open and globular clusters may play an important role in the verification of such relation, since clusters have well-defined ages. Thus we calculated the mean values of the  $[Y/Mg]$  ratios for the clusters NGC 2360, NGC 3680 and NGC 5822 and inserted them in the context of age- $[Y/Mg]$  relation. The clusters NGC 2360, NGC 3680 and NGC 5822 have an ages of 1.10 Gyr, 1.80 Gyr and 0.89 Gyr respectively (Netopil et al., 2016), while their  $[Y/Mg]$  ratios are  $-0.03 \pm 0.11$ ,  $-0.07 \pm 0.13$  and  $-0.02 \pm 0.13$ . We observed that despite the small difference in the values of the  $[Y/Mg]$  ratios and the ages, the oldest cluster of our sample, NGC 3680, also presents the lowest value for the  $[Y/Mg]$  ratio, while the youngest cluster, NGC 5822, have the highest  $[Y/Mg]$  ratio.

Recently Slumstrup et al. (2017) also tested the ratio  $[Y/Mg]$  as an indicator of stellar age using giant stars, comparing its results for four open clusters with the obtained by Nissen (2015) for twin solar field stars. In figure 10 the results of the ratio  $[Y/Mg]$  vs. Age (Gyr) calculated for NGC 2360, NGC 3680 and NGC 5822 are compared with the reported by Slumstrup et al. (2017), Nissen (2015), Feltzing et al. (2017) for solar twins and the values that can be calculated from the ratios  $[Y/Fe]$  and  $[Mg/Fe]$  obtained by Pancino et al. (2005) and Reddy et al. (2012, 2013, 2015 and 2016) for several open clusters.

The results of the ratio  $[Y/Mg]$  obtained for the open clusters of our sample are in good agreement with the inferred trend of Feltzing et al. (2017) and are also consistent with the values of this ratio determined from the clusters analyzed by Pancino et al. and Reddy et al. These studies include the open cluster M67, also studied by Slumstrup et al. (2017), and the comparison of the  $[Y/Mg]$  obtained in these papers for M67 shows three different values determined for the same object. The discrepancies observed in figure 10 could be explained considering the different dispersions of the ratio  $[s/Fe]$  obtained in the quoted papers, and by the difference in solar abundance values of reference of Y and Mg adopted in each of these studies.

The linear fits in figure 10, corresponding to the observations of Nissen (2015) and Feltzing et al. (2017), allow us to state that the values of the ratio  $[Y/Mg]$  of



**Figure 10.**  $[Y/Mg]$  ratio as a function of the stellar age (Gyr) for the three open clusters analyzed in this work (NGC 2360, NGC 3680 and NGC 5822; green, blue and red squares), compared with the trends of Nissen (2015) and Feltzing et al. (2017) for solar twin stars (solid and dashed lines), the values obtained by Slumstrup et al. (2015) (red crosses) for four open clusters, and the values derived of this ratios for the open clusters studied by Pancino et al. (2005) and Reddy et al. (2012, 2013, 2015, 2016). For the solar twin stars the linear least-squares fit for  $[Y/Mg]$  versus age are  $[Y/Mg] = (-0.17 \pm 0.009) - (0.037 \pm 0.0013) \times (\text{age})$  (Nissen, 2015), and  $[Y/Mg] = (-0.029 \pm 0.014) - (0.025 \pm 0.002) \times (\text{age})$  (Feltzing et al. (2017).

the open clusters studied in this paper are in good agreement with the trends found by these authors. The discrepancies relatives to the values found by Slumstrup et al. for the open clusters of its sample are consistent with the dispersion values found in the literature. Thus, the values of  $[Y/Mg]$  calculated for the open clusters NGC 2360, NGC 3680 and NGC 5822 provide a new evidence of the validity of the  $[Y/Mg]$  ratio as a stellar clock.

However, the age- $[Y/Mg]$  relation has to be considered with caution due to the interdependence of this relation with metallicity and also with the atmospheric parameters of stars (Feltzing et al. 2017). A chemical study using large homogeneous samples analyzed with high-resolution spectroscopy, such as Gaia-ESO and APOGEE surveys, will be fundamental for the  $[Y/Mg]$  ratio to serve as a sensitive indicator of age.

## 5. CONCLUSIONS

The study of the chemical abundances of the 29 red giants in the open clusters NGC 2360, NGC 3680 and NGC 5822 using high-resolution optical spectra can be summarized as follows:

1. As far as the abundance ratio  $[X/Fe]$  for the elements created by the s-process is concerned, the open clusters NGC 2360, NGC 3680 and NGC 5822 also follow the trend with age, that is younger clusters are more s-process enriched than older clusters. In addition, for many giant stars of the open clusters NGC 2360 and NGC 5822 we determined the abundance of the s-process elements for the first time.
2. **We also searched for possible trend with the age using the  $[Y/Mg]$  ratio. Our results indicate that the use of this ratio seems to be promising. However this ratio for open clusters needs to be analyzed under the same methodology for a larger sample of clusters covering wide range in ages.**
3. Our study made it possible, for the first time, to compare the abundances of the single and binary stars of the same open clusters. Our conclusion showed that there is no significant differences in the abundances between the single and binary giants of these three open clusters. We did not find any enrichment of the elements of the s-process.
4. The projected rotational velocities  $v \sin i$  for the single red giants of these three open clusters are similar to those derived for binary stars of the same clusters previously analyzed by SS2014.

5. The CNO abundances derived for the giants NGC 2360-50, 86, NGC 5822-6, 8, 102, 224, 348 and 375 are in agreement with the literature. We have calculated for the first time the CNO abundances for the other cluster giants, specially for those of the NGC 3680. The  $[N/C]$  and  $^{12}C/^{13}C$  ratios for the stars studied in NGC 2360 show that these stars have passed by the first dredge-up and some of them in NGC 5822 are probably at the early AGB phase. We hinted that the single red giants of these OCs may be suffering the effects of the thermohaline mixing without rotation, but the evidence is not conclusive.

6. We have shown that the abundance ratios  $[X/Fe]$  of the elements Na to Ni of the stars analyzed in this work follow the abundance pattern of disk giant stars with similar metallicity. In addition, the abundance pattern of the giants of the open clusters NGC 2360, NGC 3680, and NGC 5822 are also similar to the abundance pattern of red giants of other open clusters.

This research used the SIMBAD database, operated at CDS, Strasbourg, France. NAD acknowledges FAPERJ, Rio de Janeiro, Brazil, for Visiting Researcher grant E-26/200.128/2015 and the St. Petersburg State University for research grant 6.38.335.2015. J.V. Sales Silva also thanks FAPERJ, Rio de Janeiro, Brazil, grant E-05/225.131/2016. We also thank the anonymous referee for the suggestions that helped to improve the paper.

## REFERENCES

- Alonso, A., Arribas, S. & Martínez-Roger, C. 1999, *A&AS*, 140, 261
- Anthony-Twarog, B.J., Deliyannis, C.P., Twarog, B.A., Croxall, K.V., Cummings, J.D. 2009, *AJ*, 138, 1171 (AT2009)
- Antipova L. I., Boyarchuk, A.A., Pakhomov, Yu. V. & Yushkin, M. V. 2005, *ARep*, 49, 535
- Bensby, T., Feltzing, S., Lundström, I. 2003, *A&A*, 410, 527
- Blackwell, D.E., Booth, A.J., Menon, S.L.R. & Petford, A.D. 1986, *MNRAS*, 220, 289
- Bocek Topcu, B., Afşar, M., Schaeuble, M. & Sneden, C. 2015, *MNRAS*, 446, 3562
- Bocek Topcu, B., Afşar, M. & Sneden, C. 2016, *MNRAS*, 463, 580
- Brown, J.A., Wallerstein, G., Geisler, D. & Oke, J.B. 1996, *AJ*, 112, 1551
- Bressan, A., Marigo, P., Girardi, L., Salasnich, B. et al. 2012, *MNRAS*, 427, 127
- Carlberg, J.K., Majewski, S.R., Patterson, R.J., Bizyaev, D., Smith, Verne, V. & Cunha, K. 2011, *ApJ*, 732, 39
- Carrera, R. & Pancino, E. 2011, *A&A*, 535, 30
- Carretta, E., Gratton, R.G., Lucatello, S., Bragaglia, A. & Bonifacio, P. 2005, *A&A*, 433, 2, 597
- Carretta, E., Bragaglia, A. & Gratton, R.G. 2007, *A&A*, 473, 129.
- Casamiquela, L., Carrera, R., Blanco-Cuaresma, S., Jordi, C. & Balaguer-Núñez, L. et al. 2017, *MNRAS*, 470, 4364
- Castro, S., Rich, R.M., Grenon, M., Barbuy, B. & McCarthy, J.K. 1997, *AJ*, 114, 376.
- Charbonnel, C., Lagarde, N. 2010, *A&A*, 522A, 10
- Cunha, K., Frinchaboy, P. M., Souto, D., Thompson, B. & Zasowski, G. et al. 2016, *AN*, 337, 922.
- da Silva, R., Porto de Mello, G. F., Milone, A.C., da Silva, L. et al. 2012, *A&A*, 542, 84
- Delgado Mena, E., Tsantaki, M., Sousa, S.G., Kunitomo, M. et al. 2016, *A&A*, 587A, 66 (D2016)
- Den Hartog, E.A., Lawler, J.E., Sneden, C. & Cowan, J.J. 2003, *ApJS*, 148, 2, 543
- Depagne, E., Hill, V., Spite, M., Spite, F., Plez, B., et al. 2002, *A&A*, 390, 187
- Drake, J.J. & Smith, G. 1991, *MNRAS*, 250, 89
- Drazdauskas, A., Tautvaišienė, G., Randich, S., Bragaglia, A., Mikolaitis, S., Janulius, R. 2016, *A&A*, 589, 50
- Drazdauskas, A., Tautvaišienė, G., Smiljanic, R., Bagdonas, V., Chorniy, Y. 2016, *MNRAS*, 462, 794
- Edvardsson, B., Andersen, J., Gustafsson, B., Lambert, D. L., Nissen, P. E. et al. 1993, *A&A*, 275, 101
- Eggen, O. J. 1968, *ApJ*, 152, 83
- Eggen, O. J. 1969, *ApJ*, 155, 439
- Feltzing, S., Howes, L.M., McMillan, P.J. & Stokutė, E., 2017, *MNRAS*, 465, L109

- Friel, E. D. & Janes, K. A. 1993, *A&A*, 267, 75
- Friel, E.D., Jacobson, H.R. & Pilachowski, C.A. 2005, *AJ*, 129, 6, 2725
- Friel, E.D., Jacobson, H.R. & Pilachowski, C.A. 2010, *AJ*, 139, 5, 1942
- Frinchaboy, P.M., Majewski, S.R. 2008, *AJ*, 136, 118
- Gilroy, K.K. 1989, *ApJ*, 347, 835
- Gratton, R.G. & Sneden, C. 1988, *A&A*, 204, no. 1-2, 193
- Gratton, R.G. & Contarini, G. 1994, *A&A*, 283, no. 3, 911.
- Gray, D.F., 2013, *AJ*, 146, 29.
- Grevesse, N. & Sauval, A. J. 1998, *Space Science Review*, 85, 161.
- Hamdani, S., North, P., Mowlavi, N., Raboud, D. & Mermilliod, J.-C. 2000, *A&A*, 360, 509 (H2000)
- Heiter, U., Soubiran, C., Netopil, M. & Paunzen, E., 2014, *A&A*, 561, 93
- Hekker, S., Meléndez, J. 2007, *A&A*, 475, 1003
- Henden, A. 2016, *The Journal of the American Association of Variable Star Observers*, vol. 44, no. 1, p. 84
- Jacobson, H.R., Friel, E.D. & Pilachowski, C.A. 2008, *AJ*, 135, 6, 2341
- Jacobson, H.R., Pilachowski, C.A. & Friel, E.D. 2011, *AJ*, 142, 59
- Johnson, H.L. 1966, *ARA&A*, 4, 193
- Kaluzny, J. 2003, *Acta Astronomica*, 53, 51
- Katime Santrich, O. J., Pereira, C. B. & de Castro, D.B., 2013, *AJ*, 146, 39
- Kaufer, A., Stahl, O., Tubbesing, S., Norregaard, P., Avila, G. et al. 1999, *The Messenger*, 95, 8
- Kurucz, R.L. 1993, CD-ROM 13, Atlas9 Stellar Atmosphere Programs and 2 km/s Grid (Cambridge: Smithsonian Astrophys. Obs)
- Lambert, D. L. 1981, *Physical processes in red giants. Proceedings of the Second Workshop, Erice, Italy, September 3-13, 1980.* (Dordrecht, D. Reidel Publishing Co.), p. 115-134
- Lambert, D.L., Heath, J.E., Lemke, M. & Drake, J. 1996, *ApJS*, 103, 183
- Luck, R.E., 1994, *ApJS*, 91, 1, 309
- Luck, R.E. & Heiter, U. 2007, *AJ*, 133, 6, 2464 (LH2007)
- Magrini, L., Sestito, P., Randich, S., Galli, D. 2009, *A&A*, 494, 95
- Maiorca, E., Randich, S., Busso, M., Magrini, L., Palmerini, S. 2011, *ApJ*, 736, 120
- Magrini, L., Randich, S., Kordopatis, G., Prantzos, N. & Romano, D., 2017, *A&A*, 603, 2.
- Martin, G.A., Fuhr, J.R. & Wiese, W.L. 1988. *Atomic transition probabilities. Scandium through Manganese.* New York: American Institute of Physics (AIP) and American Chemical Society
- Martin, W.C., Fuhr, J.R., Kelleher, D.E., et al. 2002, *NIST Atomic Spectra Database (Version 2.0, Gaithersburg, MD: NIST)*
- Mashonkina, L.L., Sitnova, T.N. & Pakhomov, Yu.V., 2016, *Ast. L.*, 42, 606
- McWilliam, A. & Rich, M. R. 1994, *ApJS*, 91, 749
- Mermilliod, J.C., Mayor, M. & Udry, S. 2008, *A&A*, 485, 303
- Mikolaitis, Š., Tautvaišienė, G., Gratton, R., Bragaglia, A., Carretta, E. 2010, *MNRAS*, 407, 1866
- Mikolaitis, Š., Tautvaišienė, G., Gratton, R., Bragaglia, A. & Carretta, E. 2011a, *MNRAS*, 413, 3, 2199
- Mikolaitis, Š., Tautvaišienė, G., Gratton, R., Bragaglia, A. & Carretta, E. 2011b, *MNRAS*, 416, 2, 1092
- Mishenina, T.V. & Kovtyukh, V.V., 2001, *A&A*, 370, 951
- Mishenina, T.V., Bienaymé, O., Gorbaneva, T.I., Charbonnel, C., Soubiran, C. et al. 2006, *A&A*, 456, 1109 (M2006)
- Netopil, M., Paunzen, E., Heiter, U. & Soubiran, C., 2016, *A&A*, 585, 150
- Nissen, P.E., 2015, *A&A*, 579, 52
- Mitschang, A.W., De Silva, G.M. & Zucker, D.B. 2012, *MNRAS*, 422, 4, 3527 (M2012)
- Nordstroem, B., Andersen, J. & Andersen, M. I. 1996, *A&A*, 118, 407
- Pace, G., Danziger, J., Carraro, G., Melendez, J., François, P. et al. 2010, *A&A*, 515, 28
- Pancino, E., Carrera, R., Rossetti, E. & Gallart, C. 2010, *A&A*, 511, 56
- Pasquini, L., Randich, S. & Pallavicini, R. 2001, *A&A*, 374, 1017 (P2001)
- Preston, G.W. & Sneden, C. 2001, *AJ*, 122, 3, 1545
- Prusti, T. et al., 2016, *A&A*, 595, 1.
- Ramírez, I., Meléndez, J. 2005, *ApJ*, 626, 465
- Reddy, B.E., Bakker, E.J. & Hrivnak, B.J. 1999, *ApJ*, 524, 831
- Reddy, B.E., Tomkin, J., Lambert, D.L. & Allende Prieto, C. 2003, *MNRAS*, 340, 304
- Reddy, A.B.S., Giridhar, S. & Lambert, D.L. 2012, *MNRAS*, 419, 2, 1350
- Reddy, A.B.S., Giridhar, S. & Lambert, D.L. 2013, *MNRAS*, 431, 4, 3338
- Reddy, A.B.S., Giridar, S. & Lambert, D.L. 2015, *MNRAS*, 450, 4301
- Reyniers, M., Van Winckel, H., Gallino, R. & Straniero, O. 2004, *A&A*, 417, 269
- Sales Silva, J.V., Peña Suárez, V. J., Katime Santrich, O.J., Pereira, C.B. et al. 2014, *AJ*, 148, 83
- Santos, N.C., Lovis, C., Pace, G., Meléndez, J. & Naef, D., 2009, *A&A*, 493, 309 (SS2009)
- Santrich, O.J.K., Pereira, C. B. & Drake, N. A. 2013, *A&A*, 554A, 2
- Schaller, G., Schaerer, D., Meynet, G., Maeder, A. 1992, *A&AS*, 96, 269
- Slumstrup, D., Grundahl, F., Brogaard, K., Thygesen, A.O., Nissen, P.E. et al. 2017, arXiv170708585S
- Smiljanic, R., Gauderon, R., North, P., Barbuy, B., Charbonnel, C. & Mowlavi, N. 2009, *A&A*, 502, 267 (S2009)
- Smith, G. Edvardsson, B. & Frisk, U. 1986, *A&A*, 165, 126
- Smith, V.V., Cunha, K., Jorissen, A. & Boffin, H.M.J. 1996, *A&A*, 315, 179
- Sneden, C. 1973, Ph.D. Thesis, Univ. of Texas.
- Sneden, C., McWilliam, A., Prestn, G.W., Cowan, J.J., Burris, D.L. & Armosky, B.J. 1996, *ApJ*, 467, 819
- Sousa, S.G., Santos, N.C., Mayor, M., Udry, S. 2008, *A&A*, 487, 373
- Stancliffe, R.J., Glebbeek, E., Izzard, R.G., Pols, O.R. 2007, *A&A*, 464L, 57
- Takeda, Y., Sato, B. & Murata, D., 2008, *PASJ*, 60, 781.
- Tsantaki, M., Sousa, S. G., Adibekyan, V. Zh., Santos, N. C and 2 more. 2013, *A&A*, 555A, 150
- Twarog, B.A., Anthony-Twarog, B.J. & McClure, R.D., 1993, *PASP*, 105, 78
- Van Winckel, H. & Reyniers, M. 2000, *A&A*, 345, 135
- Villanova, S., Carraro, G. & Saviane, I. 2009, *A&A*, 504, 3, 845.
- Wiese, W.L., Smith, M. W. & Miles, B. M. 1969, *NBS Ref. Data. Ser.*
- Yong, D., Carney, B. W. & Teixeira de Almeida, M. L. 2005, *AJ*, 130, 2, 597
- Začs, L., Alksnis, O., Barzdis, A., Laure, A., Musaev, F.A., et al. 2011, *MNRAS*, 417, 649