

**ANÁLISE ESPECTROSCÓPICA EM ALTA RESOLUÇÃO
DE GIGANTES VERMELHAS NOS AGLOMERADOS
ABERTOS NGC 3114 E NGC 5822**

Orlando José Katime Santrich



Rio de janeiro, Junho 2013

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ASTRONOMIA



**Observatório
Nacional**

**ANÁLISE ESPECTROSCÓPICA EM ALTA RESOLUÇÃO
DE GIGANTES VERMELHAS NOS AGLOMERADOS
ABERTOS NGC 3114 E NGC 5822**

Orlando José Katime Santrich

Tese de doutorado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Astronomia como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Título de Doutor em Ciências: Astronomia. Área de concentração em Astrofísica Estelar.

Orientador: Claudio Bastos Pereira

Junho de 2013
Rio de Janeiro - RJ

*“O único lugar onde o sucesso vem
antes do trabalho é no dicionário..”
Albert Einstein.*

Para Tomy, Abigail, Estela, Miriam e, Nancy

Agradecimentos

Tenho um especial agradecimento para minha mãe (Tomy), vovó (Abigail) e minhas tias (Estela e Miriam) bem como para minha namorada Nancy pela torcida e palavras de apoio na distância. Elas ocupam um lugar destacado no meu coração e sem dúvida o impulso dado foi fundamental para terminar todo este processo.

Quero agradecer ao Observatório Nacional pela chance que teve de usufruir suas instalações e infraestrutura, um agradecimento para Claudio pela orientação recebida ao longo destes quatro anos. Também estou especialmente agradecido com os professores: Vladimir Ortega, Ramiro de la Reza, Kátia Cunha, Simone Daflon, Marcelo Borges e, Natália Drake.

Finalmente, estou agradecido pela amizade dos meus colegas de pós-graduação no Observatório Nacional, principalmente: os Gugas (Pinheiro e Rossi), João Vitor, Vladimir, Diego, Didier, Denise, Daniel, Vinicius, Marlon, Luiz Paulo, Flora, Flavia, os Rodrigues (Bouffleur, de Souza e, Bijani), Sergio, Marção, Julio (Campagnolo) e, Mario. Bem como aos meus colegas, amigos e companheiros de moradia: Javier Ernesto e Cesar.

Resumo

Os aglomerados abertos são importantes para o estudo da Via Láctea, bem como para a Astrofísica estelar. A importância astrofísica desse tipo de aglomerados pode ser resumida em: estudo da estrutura da Via Láctea, comportamento dinâmico dos diferentes componentes da nossa Galáxia, para a formação estelar e para o estudo da evolução das estrelas.

Nessa tese analisamos 26 estrelas gigantes vermelhas dos aglomerados NGC 3114 e NGC 5822 com espectroscopia em alta resolução, utilizando o espectrografo FEROS. Os parâmetros atmosféricos e abundâncias foram determinados sob a condição de equilíbrio termodinâmico local utilizando os modelos atmosféricos de Kurucz. Os elementos leves foram obtidos através da técnica de síntese espectral. Toda a análise de abundância foi feita utilizando o código de análise espectral **moog**. As abundâncias químicas determinadas foram: Lítio, Carbono, Nitrogênio, Oxigênio, Sódio, Cálcio, Magnésio, Silício, Alumínio, Cromo, Titânio, Níquel, Ítrio, Zircônio, Lantânio, Cério e Neodímio, e também a razão isotópica $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$.

Encontramos metalicidades de $[\text{Fe}/\text{H}] = -0.01 \pm 0.03$ e -0.10 ± 0.05 para NGC 3114 e NGC 5822, respectivamente. Para NGC 3114, o ajuste da isocrona forneceu um valor de massa do “turn-off” de $4.2 M_{\odot}$ e uma idade de 0.16 Gyr. Para NGC 5822, a massa do “turn-off” foi tomada da literatura.

No aglomerado aberto NGC 3114 foram encontradas duas estrelas de alta rotação, HD 87479 e HD 304864, com 15.0 km s^{-1} e 11.0 km s^{-1} respectivamente. A estrela HD 87526 com uma metalicidade de $[\text{Fe}/\text{H}] = -0.73 \pm 0.10$ não pertence ao aglomerado NGC 3114 e portanto deve ser uma estrela do disco espesso/halo.

As abundâncias de Carbono e Nitrogênio concordam com as tendências observadas em gigantes de campo e em gigantes de aglomerados abertos. Em ambos os aglomerados a razão $[\text{N}/\text{C}]$ concorda com os valores previstos para a primeira dragagem.

As abundâncias de Oxigênio são relativamente menores que as gigantes de campo mas similares às gigantes dos outros aglomerados. Nas estrelas gigantes do aglome-

rado NGC 3114 foi detectado enriquecimento de Sódio. Os dois aglomerados mostram evidência de uma provável anticorrelação Oxigênio-Sódio. Para os elementos do Magnésio até o Níquel, as razões de abundâncias $[X/Fe]$ mostram as mesmas tendências das gigantes de campo e de aglomerados abertos.

No aglomerado NGC 5822 foram encontradas duas estrelas candidatas a “Red Stragglers”, NGC 5822-4 e NGC 5822-312, com velocidades de microturbulência de $\xi=0.00 \text{ km s}^{-1}$ e 0.70 km s^{-1} , respectivamente. Esses valores são muito baixos para estrelas consideradas gigantes. Além disto, essas estrelas apresentam velamento nos seus espectros, fato que fica especialmente refletido nas baixas metalicidades e abundâncias de Titânio.

Ainda no aglomerado NGC 5822 foram descobertas duas estrelas de Bário, NGC 5822-2 e NGC 5822-201, com abundâncias médias dos elementos do processo de $[s/Fe]= 0.77\pm0.12$ e 0.83 ± 0.05 e, luminosidades de $140 L_{\odot}$ e $76 L_{\odot}$. As abundâncias dos elementos pesados em ambos os aglomerados NGC 3114 e NGC 5822 mostram a mesma tendência observada em outros aglomerados abertos.

Palavras-Chave: Galáxia: aglomerados abertos e associações estelares: individual: NGC 3114 e NGC 5822 — estrelas: abundâncias — estrelas: estrelas de Bário — estrelas: parâmetros fundamentais.

Abstract

The open clusters are important for the study of the Milky Way, as well as for stellar astrophysics. The astrophysical importance of these clusters could be summed up in: the study of the structure of the Milky Way, dynamic behavior of the different components of our Galaxy, for stellar formation and to study the evolution of stars.

We carried out a detailed spectroscopic analysis to derive the chemical composition of twenty-six red giants in the young open clusters NGC 3114 and NGC 5822. Abundances of Lithium, Carbon, Nitrogen, Oxygen, Sodium, Calcium, Magnesium, Silicon, Aluminum, Chrome, Titanium, Nickel, Yttrium, Zirconium, Lanthanum, Cerium and Neodymium were obtained, as well as the carbon isotopic ratio $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$. The atmospheric parameters of the studied stars and their chemical abundances were determined using FEROS spectrograph. We employed the local-thermodynamic-equilibrium model atmospheres of Kurucz and the spectral analysis code **moog**. The abundances of the light elements were derived using the spectral synthesis technique.

We found that NGC 3114 and NGC 5822 have a mean metallicity of $[\text{Fe}/\text{H}] = -0.01 \pm 0.03$ and -0.10 ± 0.05 . For NGC 3114, the isochrone fit yielded at turn-off mass of $4.2 M_{\odot}$ and an age of 0.16 Gyr. For NGC 5822, the turn-off mass was taken from literature.

We found that two stars in NGC 3114, HD 87479 and HD 304864, have high rotational velocities of 15.0 km s^{-1} and 11.0 km s^{-1} . The star HD 87526 with metallicity $[\text{Fe}/\text{H}] = -0.73 \pm 0.10$ is in the galactic halo/thick disk and therefore does not belonging to the cluster.

The oxygen abundances in NGC 3114 and NGC 5822 are lower compared to the field giants but similar to the giants in young clusters. In the open cluster NGC 3114 we detected sodium enrichment in the analyzed cluster giants. The two open clusters NGC 3114 and NGC 5822 show signs of a probable anticorrelation between Oxygen and Sodium. As far as the other elements are concerned, their $[\text{X}/\text{Fe}]$ ratios follow the same trend seen in giants with the same metallicity.

The carbon and nitrogen abundances in both clusters agree with the field and cluster giants. In both clusters, the [N/C] ratio is in good agreement with the models predicted by first dredge-up.

In the open cluster NGC 5822 there are two candidates for Red Stragglers, NGC 5822-4 and NGC 5822-312 with low-microturbulence velocity $\xi=0.00 \text{ km s}^{-1}$ and 0.70 km s^{-1} which are very low values to be considered giant stars. In addition they also have lower metallicities and Titanium abundances compared with other stars in the cluster. The most likely explanation for these lower metallicities and abundances is the occurrence of veiling in the spectra of these stars.

Also in NGC 5822, we reported the discovery of two barium stars, NGC 5822-2 and NGC 5822-201. We found that these stars have mean s-process abundances of $[\text{s/Fe}] = 0.77 \pm 0.12$ and 0.83 ± 0.05 and luminosities of $140 L_{\odot}$ and $76 L_{\odot}$, respectively. For the other stars in the open clusters studied in this thesis, they follow the trend of heavy-element abundance seen in other open clusters.

Key words: galaxy: open clusters and associations: individual: NGC 3114 & NGC 5822 — stars: abundances — stars: barium stars — stars: fundamental parameters.

Conteúdo

Resumo	IV
Abstract	VI
1 Introdução	1
1.1 Importância astrofísica dos aglomerados abertos	1
1.2 Resultados relevantes utilizando espectroscopia de alta resolução	3
1.2.1 Gradiente de abundâncias no disco	4
1.2.2 Correlação idade-metalicidade no disco	6
1.2.3 Anti-correlação [O/Fe]-[Na/Fe]	9
1.2.4 Abundâncias dos elementos do processo-s	11
1.3 Motivação desta tese	13
2 Observações	15
2.1 Espectros de alta resolução	15
2.2 Lista de linhas	20
3 Metodologia e Resultados	25
3.1 Abundâncias solares	25
3.2 Parâmetros estelares	26
3.2.1 Erros nos parâmetros estelares	28
3.2.2 Gravidades evolutivas	30
3.3 Determinação das abundâncias	30
3.4 Incertezas nas abundâncias	37
3.5 Comparações com a literatura	41

4	Análise e discussão	44
4.1	Alta rotação em NGC 3114	44
4.2	Metalicidades	46
4.3	Carbono, nitrogênio e oxigênio	47
4.3.1	Razão isotópica $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$	51
4.4	Abundâncias de Lítio	52
4.5	Outros elementos: Sódio até o Níquel	52
4.5.1	Duas gigantes com baixas metalicidades e velocidades de mi- croturbulência no aglomerado NGC 5822	56
4.6	Elementos pesados	64
4.7	Provável tendência das abundâncias com a idade	67
4.8	Binárias no aglomerado NGC 5822	76
5	Duas estrelas de Bário em NGC 5822	80
5.1	Conceito de estrela de Bário	80
5.2	NGC 5822-2 e -201	81
6	Conclusões e perspectivas	90
6.1	Conclusões	90
6.2	Perspectivas	93

Bibliografia

Anexos: Listas de linhas e artigos

Lista de Figuras

1.1	Gradiente radial de metalicidade no disco a partir de aglomerados abertos jovens	4
1.2	Gradiente radial de Carbono, Oxigênio, Sódio e Magnésio no disco a partir de aglomerados abertos	5
1.3	Gradiente radial de abundâncias de Alumínio, Silício, Cálcio e Titânio no disco a partir de aglomerados abertos	5
1.4	Gradiente radial de abundâncias dos elementos Cromio, Níquel, Ítrio e Zircônio no disco a partir de aglomerados abertos	6
1.5	Gradiente radial de abundâncias dos elementos Lantânio, Cério e Neodímio no disco a partir de aglomerados abertos	7
1.6	Relação idade-metalicidade para diferentes aglomerados da literatura	8
1.7	Abundâncias de Carbono, Magnésio, Alumínio e Silício versus Idade no disco	8
1.8	Abundâncias de Cálcio, Titânio, Cromio e Níquel versus Idade no disco	9
1.9	Anti-correlação Oxigênio-Sódio nas estrelas do aglomerado globular NGC 2808	10
1.10	Abundâncias dos elementos do processo-s em aglomerados abertos (Maiorca et al. 2011)	12
2.1	Espectros normalizados na região (6 155-6 175) Å para as estrelas 3, 8, 11 e 240 do aglomerado NGC 5822	16
2.2	Espectros normalizados na região (5 195-5 210) Å para as estrelas estrelas 181, 238 e 262 do aglomerado NGC 3114 e NGC 5822-6	17
2.3	Diagrama Cor Magnitude corrigido do avermelhamento para o aglomerado NGC 3114	20
2.4	Diagrama Cor Magnitude corrigido do avermelhamento para o aglomerado NGC 5822	21
2.5	Espectro normalizado na região em torno da linha proibida de Oxigênio neutro em λ 6 300 Å para a estrela NGC 3114-238	22

2.6	Região espectral normalizada da estrela NGC 5822-11 em torno da linha proibida de Oxigênio neutro 6 363 Å para a estrela NGC 5822	23
2.7	Região espectral com linhas moleculares de C ₂ na estrela NGC 5822-2	23
2.8	Região espectral com linhas moleculares de C ₂ na estrela NGC 5822-201	24
2.9	Região espectral com linhas moleculares de ¹² CN na estrela NGC 5822-224	24
3.1	Metodologia utilizada para calcular os parâmetros estelares e as abundâncias químicas	27
3.2	Linha proibida de Oxigênio neutro em 6 300 Å na estrela NGC 5822-11 contaminada pelas linhas telúricas	32
3.3	Síntese espectral da linha proibida de Oxigênio neutro em 6 363 Å na estrela NGC 5822-11	33
3.4	Síntese espectral da linha molecular C ₂ em torno da região λ 5 086 Å na estrela NGC 5822-11	37
3.5	Síntese espectral da linha molecular ¹² CN λ 8 008 Å na estrela NGC 5822-11	38
4.1	Espectros normalizados de HD 87566, HD 87833, HD 304864 e, HD 87479 com algumas linhas de absorção identificadas	45
4.2	Diagrama Vsin i <i>versus</i> Temperaturas fotométricas	46
4.3	Abundâncias dos elementos do ciclo CNO em função da metalicidade relativas às gigantes de campo	49
4.4	Abundâncias dos elementos do ciclo CNO em função da metalicidade relativas às gigantes de aglomerados	50
4.5	Razão isotópica ¹² C/ ¹³ C de gigantes em aglomerados abertos em função da massa do “turn-off”	53
4.6	Abundâncias dos elementos de Sódio até Silício em função das metalicidades relativas às gigantes de campo	54
4.7	Abundâncias dos elementos de Cálcio até Níquel em função das metalicidades relativas às gigantes de campo	55
4.8	Médias das abundâncias dos elementos de Sódio até Silício em função das metalicidades relativas às gigantes de aglomerados	57
4.9	Abundâncias dos elementos desde o Cálcio até o Níquel em função das metalicidades relativas às gigantes de aglomerados	58
4.10	Velamento na região espectral λ 4958–4964Å das estrelas com baixas microturbulências	60

4.11	Velamento na região espectral λ 5185–5190Å das estrelas com baixas microturbulências	63
4.12	Abundâncias dos elementos do processo-s em função das metalicidades relativas às gigantes de campo	65
4.13	Abundâncias médias dos elementos do processo-s em função das metalicidades relativas às gigantes dos outros aglomerados	66
4.14	Abundâncias médias de Oxigênio <i>versus</i> idade para diferentes aglomerados abertos	68
4.15	Abundâncias de Sódio <i>versus</i> idade para diferentes aglomerados abertos	69
4.16	Abundância de Oxigênio <i>versus</i> Sódio para aglomerados abertos com a normalização de Grevesse & Sauval (1998)	71
4.17	Abundância de Oxigênio <i>versus</i> Sódio para aglomerados abertos com a normalização de Asplund et al. (2009)	72
4.18	Massa do “Turn-off” em função da idade para aglomerados abertos .	74
4.19	Abundâncias do processo-s em função da idade relativas aos outros aglomerados abertos	75
4.20	Histograma das velocidades radiais no aglomerado NGC 5822	77
5.1	Região espectral normalizada da linha de absorção do Zr I 6127 Å nas estrelas de Bário NGC 5822-2, NGC 5822-201, HD 65314 e na gigante HD 2114	82
5.2	Região espectral normalizada da linha de absorção La II 6390 Å nas estrelas de Bário NGC 5822-2, NGC 5822-201, HD 65314 e na gigante HD 2114	82
5.3	Região espectral normalizada da linha de absorção La II 6774 Å nas estrelas de Bário NGC 5822-2, NGC 5822-201, HD 65314 e na gigante HD 2114	84
5.4	Síntese espectral do Carbono na região em torno de Fe I 5634 Å . . .	85
5.5	Abundâncias dos elementos do ciclo CNO nas estrelas de bário NGC 5822-2 e -201 comparadas com as estrelas de Bário no campo	86
5.6	Abundâncias dos elementos do processo-s nas estrelas de bário NGC 5822-2 e -201 relativas às estrelas de Bário no campo	87

Lista de Tabelas

2.1	Parâmetros observacionais dos aglomerados estudados	18
2.2	Características observacionais das estrelas no aglomerado NGC 3114 .	18
2.3	Características observacionais das estrelas no aglomerado NGC 5822 .	19
3.1	Abundâncias solares obtidas nesta tese	26
3.2	Parâmetros estelares e abundâncias de FeI e FeII no aglomerado NGC 3114	28
3.3	Parâmetros estelares e abundâncias de FeI e FeII no aglomerado NGC 5822	29
3.4	Ordem das incertezas nos parâmetros estelares para cada aglomerado	29
3.5	Gravidades espectroscópicas ($\log g_{esp}$) e evolutivas ($\log g_{evo}$) das es- trelas estudadas	31
3.6	Abundâncias dos elementos leves em NGC 3114 calculados via síntese espectral	34
3.7	Abundâncias dos elementos do ciclo CNO calculados via síntese es- pectral no aglomerado NGC 5822	34
3.8	Razões de abundâncias médias para os elementos químicos do Sódio até o Níquel das estrelas nos aglomerados NGC 3114 e NGC 5822 . .	35
3.9	Razões de abundâncias dos elementos do processo-s para os aglome- rados NGC 3114 e NGC 5822	36
3.10	Incerteza nas abundâncias dos elementos químicos para a estrela HD 87109 do aglomerado NGC 3114	39
3.11	Incerteza nas abundâncias dos elementos do ciclo CNO para a estrela HD 87109 do aglomerado NGC 3114	39
3.12	Incerteza nas abundâncias químicas para a estrela NGC 5822-2	40
3.13	Incerteza nas abundâncias químicas para a estrela NGC 5822-201 . .	40
3.14	Parâmetros atmosféricos de algumas estrelas da amostra encontradas na literatura.	42

3.15	Diferenças entre os parâmetros de algumas estrelas da amostra e a literatura	43
4.1	Velocidades de Rotação no aglomerado NGC 3114	44
4.2	Parâmetros estelares e razões de abundâncias dos elementos α e do pico do ferro em função do Hidrogênio.	61
4.3	Parâmetros e razões de abundâncias dos elementos do processo-s em função do Hidrogênio no aglomerado NGC 5822.	62
4.4	Comparação entre abundâncias médias das binárias e não-binárias em NGC 5822 dos elementos Carbono até o Níquel.	78
4.5	Comparação entre as abundâncias médias das binárias e não-binárias em NGC 5822 para os elementos do processo-s.	78
5.1	Magnitudes bolométricas e luminosidades das estrelas da amostra. . .	83
5.2	Eficiência do processo-s nas estrelas da amostra.	88
6.1	Linhas de Ferro I e II observadas no aglomerado NGC 5822.	
6.2	Linhas dos elementos desde o Sódio até o Níquel na mesma ordem de número atômico para as estrelas no aglomerado NGC 5822.	
6.3	Linhas dos elementos do processo-s desde o Ítrio até o Neodímio na mesma ordem de número atômico para as estrelas no aglomerado NGC 5822.	

Capítulo 1

Introdução

1.1 Importância astrofísica dos aglomerados abertos

Os aglomerados abertos são importantes para o estudo da Via Láctea, bem como para a Astrofísica estelar. De fato a importância astrofísica desse tipo de aglomerados pode ser resumida em quatro pontos específicos: estudo da estrutura da Via Láctea, comportamento dinâmico dos diferentes componentes da nossa Galáxia, para a formação estelar e para o estudo da evolução das estrelas.

Atualmente existe um debate sobre a estrutura da nossa Galáxia proveniente da existência de dois discos, um interno e outro externo (Beers & Carollo 2009). Sob esta idéia, os constituintes da Galáxia seriam um halo que provavelmente esteja também dividido em halo interno e externo, os discos interno e externo e a barra/bojo. A hipótese dos dois discos e da estrutura Galáctica está baseada pelo comportamento dinâmico e pela evolução química da Via Láctea. Neste sentido, as abundâncias dos elementos químicos através da sua distribuição radial corroboram a existência do disco. Uma propriedade importante na astrofísica galáctica é o gradiente radial de metalicidade, dado pelo caráter das observações em alta resolução feitas nos últimos anos. O gradiente radial de metalicidade define a existência e delimita o disco interno e externo, pois a correlação é inversa, ou seja na medida que a distância Galactocêntrica de um objeto aumenta sua metalicidade diminui. Não obstante, os trabalhos de Carraro et al. (2004); Yong et al. (2005); Villanova et al.

(2005) e Frinchaboy et al. (2007) mostraram que para distâncias Galactocêntricas (R_{gc}) entre 10 e 12 kpc o gradiente de metalicidade ao invés de mostrar um acentuado declínio como na vizinhança solar, torna-se menos acentuado permanecendo quase plano em direção ao anti-centro Galáctico. Portanto, o comportamento do gradiente de metalicidade não parece ser similar nos discos interno e externo. Esse resultado será mostrado na seção 1.2. Uma forma de analisar a diferença do gradiente nos dois discos é através do estudo de aglomerados abertos velhos, pois eles podem oferecer uma visão do que pode estar acontecendo no disco Galáctico externo. A diferença de idade entre os aglomerados abertos jovens e os velhos pode ser também importante para averiguar diferenças nas abundâncias, pois, se houver, poderiam ser devidas a processos nucleares em estrelas de massa intermediária, tal como acontece nos aglomerados globulares (Friel et al. 2010). Nesta tese é usada a definição de Friel (1995), sendo os aglomerados abertos jovens aqueles com idade inferior a 1 Gano e os mais velhos aqueles com idade superior a 1 Gano.

Os aglomerados abertos são também objetos fundamentais para estudar a dinâmica da nossa Galáxia pois ajudam a entender o movimento dos braços espirais e, em geral de grupos de estrelas em movimento. Através deles é obtida a curva de rotação Galáctica, e com dados precisos de velocidades radiais, distâncias e idades ajudam a determinar as órbitas estelares. A dinâmica, além da análise química pode ser utilizada para verificar se uma estrela pertence ao aglomerado ou associação estelar, e isso pode ser feito por meio da comparação entre os movimentos próprios e abundâncias químicas.

No caso da formação estelar, aglomerados abertos também são importantes, pois permitem verificar uma hipótese fundamental: a formação das estrelas a partir da mesma nuvem molecular no mesmo tempo. O cálculo das abundâncias químicas é um instrumento importante para conferir esta hipótese, pois as estrelas dentro de uma mesma nuvem molecular devem ter evoluído de forma similar e portanto apresentar parâmetros estelares e abundâncias químicas similares. A análise das abundâncias químicas de aglomerados abertos é fundamental para desvendar outra propriedade importante em astrofísica: a provável correlação idade-metalicidade. A existência do gradiente radial de metalicidade implica que as estrelas mais jovens devem ser mais abundantes em Ferro e estarem no disco interno enquanto que as mais pobres devem estar no disco externo e no halo Galáctico. No entanto, a espectroscopia de alta resolução está mostrando que isso não é inteiramente verdade (figuras 1.1 e 1.6). A hipótese da evolução simultânea, contudo, deve considerar situações adicionais, como o enriquecimento por efeito da transferência de massa em sistemas binários,

pois é possível encontrar estrelas com abundâncias muito diferentes da média do aglomerado. Esta situação ocorreu no aglomerado NGC 5822 estudado nesta tese, onde foram descobertas duas “Red Stragglers” e duas estrelas de Bário, das quais detalharemos nos capítulos 4 e 5.

Finalmente, os aglomerados abertos são laboratórios onde a física dos interiores estelares é investigada, porque permite estudar por exemplo fenômenos de mistura que acontecem nas estrelas gigantes. Na fase de RGB (“Red Giant Branch”) acontece a primeira dragagem quando o envoltório convectivo se aprofunda e leva material da queima do Hidrogênio para a superfície. Enquanto na fase AGB (“Asymptotic Giant Branch”), o envoltório convectivo leva à superfície elementos da queima do Hélio e do processo-s. Por isso, o cálculo das abundâncias fotosféricas nas gigantes de aglomerados é uma ferramenta importante que permite corroborar as hipóteses sobre os processos de mistura nessa fase da evolução estelar. Além disto, a análise de abundâncias químicas ajuda a compreender também todas as etapas da evolução, pois cada elemento químico é consequência de algum tipo de reação nuclear que, por sua vez, depende do estágio evolutivo da estrela. Como a estrutura estelar é diferente em cada fase da evolução, a análise das abundâncias de aglomerados abertos é, então, uma ferramenta para discernir a estrutura estelar.

1.2 Resultados relevantes utilizando espectroscopia de alta resolução

Esta seção aborda dois resultados importantes para o estudo de aglomerados abertos através da espectroscopia de estrelas gigantes e anãs: o gradiente de metalicidade e a correlação idade-metalicidade no disco galáctico. As figuras 1.1 até 1.8 foram construídas com base na compilação de Magrini, et al. (2009) e nos posteriores trabalhos de Pakhomov et al. (2009); Smiljanic et al. (2009); Villanova et al. (2009); Friel, et al. (2010); Pancino et al. (2010); Carrera & Pancino (2011); Jacobson et al. (2011); Mikolaitis et al. (2010, 2011a, 2011b); Zacs et al. (2011); Maiorca et al. (2011) e, Reddy et al. (2012). Estes artigos foram também utilizados para comparar com os resultados obtidos nesta tese no capítulo 4.

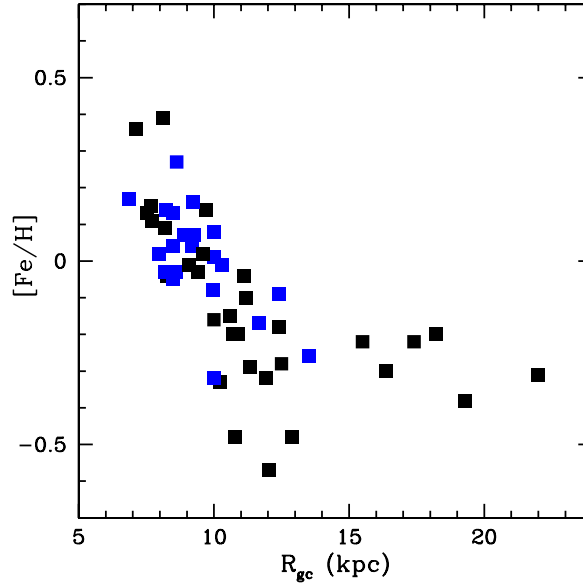


Figura 1.1: Gradiente radial de metalicidade no disco a partir de aglomerados abertos jovens (quadrados azuis) e velhos (quadrados negros). Os aglomerados abertos foram obtidos dos artigos citados na seção 1.2.

1.2.1 Gradiente de abundâncias no disco

A existência do gradiente de metalicidade na nossa galáxia é um resultado amplamente difundido na literatura. A evidência é também sustentada pelos aglomerados abertos observados em diferentes distâncias Galactocêntricas utilizando espectrógrafos de média e alta resolução.

Apesar da dispersão presente na figura 1.1, pode-se observar que a existência do gradiente no disco Galáctico é clara. Este gradiente foi encontrado também por Pedicelli et al. (2009) através da análise de variáveis Cefeidas. Intuitivamente, o gradiente radial dos outros elementos químicos também deveria existir. Resultados similares em média resolução são obtidos por Friel et al. (2010) e Carraro et al. (2007) e em alta resolução por Magrini et al. (2009) corroboram a existência do gradiente radial dos outros elementos químicos.

Como já foi mencionado na seção anterior, a existência do gradiente de metalicidade é evidência da estrutura Galáctica. De fato, a figura 1.1 mostra que a transição do disco interno ao externo pode estar na região $R_{gc}=[11-13]$ kpc, um pouco diferente do que se pensava inicialmente, entre $R_{gc}=[9-10]$ kpc. Além disto, o gradiente tem uma inclinação negativa no disco interno enquanto que no disco externo é praticamente plano.

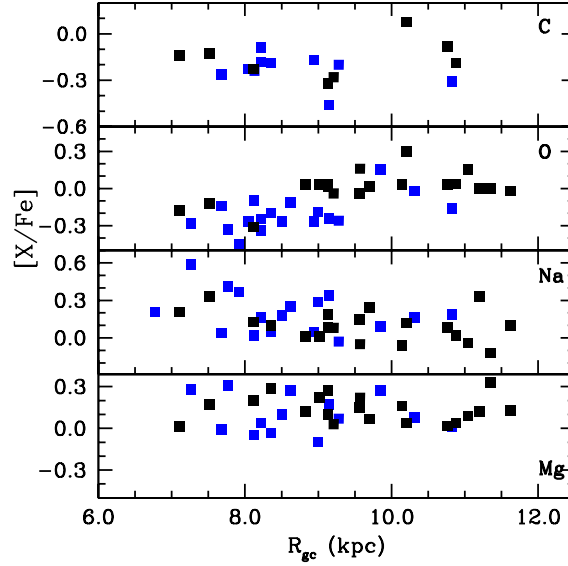


Figura 1.2: Gradiente radial de abundâncias no disco a partir de aglomerados abertos jovens e velhos. Resultados são mostrados para os elementos Carbono, Oxigênio, Sódio e Magnésio. Símbolos têm o mesmo significado como na figura 1.1.

As figuras 1.2 até 1.5 mostram as razões de abundâncias médias $[X/Fe]$ dos aglomerados abertos versus distância Galactocêntrica (R_{gc}) para varios aglomerados abertos tomados da literatura. As referências não são uniformes pois para cada

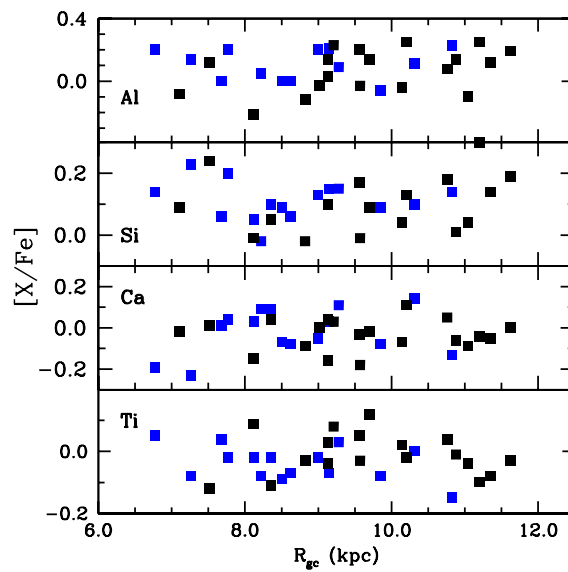


Figura 1.3: Gradiente radial de abundâncias dos elementos Alumínio, Silício, Cálcio e Titânio. Símbolos têm o mesmo significado como na figura 1.1.

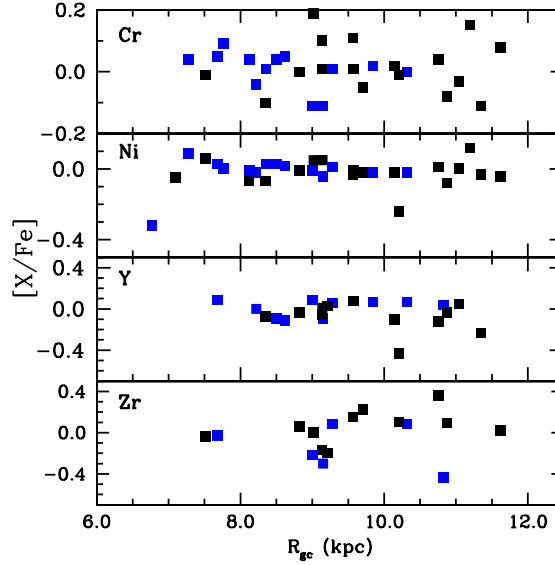


Figura 1.4: Gradiente radial de abundâncias dos elementos Cromio, Níquel, Ítrio e Zircônio. Símbolos têm o mesmo significado como na figura 1.1.

grupo de elementos (elementos do ciclo CNO, Sódio e Alumínio, elementos do grupo do Ferro, elementos alfa e, elementos do processo-s) os artigos são diferentes.

Para o cálculo da R_{gc} foram tomados de WEBDA¹: a distância Galactocêntrica do Sol 8.5 kpc, a distância heliocêntrica, e as coordenadas Galácticas de cada aglomerado aberto. Como mostram os resultados das figuras 1.2 até 1.5, no intervalo de $R_{gc}=[6, 11]$ kpc não existe nenhuma tendência das abundâncias com a distância Galactocêntrica.

Não obstante, existem dois elementos que parecem apresentar tendência com R_{gc} , o Oxigênio e o Sódio. Como pode ser observado no segundo painel da figura 1.2, a razão do Oxigênio $[O/Fe]$ apresenta uma correlação com a distância galactocêntrica. Enquanto a razão do Sódio $[Na/Fe]$, apesar de apresentar mais dispersão que no caso do Oxigênio, pode-se observar que existe uma anti-correlação entre a abundância do Sódio e a distância galactocêntrica.

1.2.2 Correlação idade-metalicidade no disco

Se existe uma anti-correlação metalicidade-distância Galactocêntrica, então poderia haver uma relação semelhante idade-metalicidade? No disco da nossa Galáxia

¹[HTTP://WWW.UNIVIE.AC.AT/WEBDA/](http://WWW.UNIVIE.AC.AT/WEBDA/)

os objetos mais antigos são os mais distantes. No entanto, até agora as observações não mostram uma evidência clara ou conclusiva para a correlação idade-metalicidade.

A figura 1.6 mostra precisamente que, através de aglomerados abertos não é possível concluir que há uma correlação idade-metalicidade, pois existem aglomerados abertos velhos com metalicidades altas e aglomerados abertos jovens com metalicidade muito baixas. Os resultados obtidos a partir de aglomerados abertos e até mesmo Cefeidas mostram que o declive do gradiente de metalicidade é quase zero nos últimos 10 Ganos (Magrini, et al. 2009).

O estudo do comportamento temporal do gradiente de metalicidade é essencial para os modelos de evolução química da Via Láctea. Os modelos desenvolvidos por Tosi, et al. (1998) e Chiappini, et al. (1997, 2001) mostram um comportamento do gradiente de metalicidade com maior inclinação (“steepening”) enquanto os modelos de Allen et al. (1998), Mollá, et al. (1997), Hou, et al. (2000) e Magrini, et al. (2007, 2009) sugerem um comportamento com maior achatamento (“flattening”). A diferença entre os dois comportamentos pode estar relacionada a diferentes taxas de formação estelar e ao fluxo de material do halo para o disco considerados em cada modelo.

Além dos aglomerados abertos, a evolução química da Via Láctea também pode ser estudada através de regiões HII, estrelas OB e variáveis Cefeidas. Em modelos de evolução química, estrelas gigantes de campo e aglomerados abertos velhos

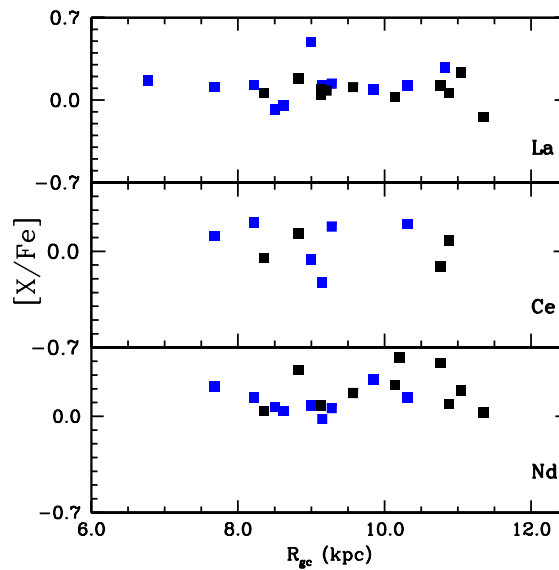


Figura 1.5: Gradiente radial de abundâncias dos elementos Lantânio, Cério e Neodímio. Símbolos têm o mesmo significado como na figura 1.1.

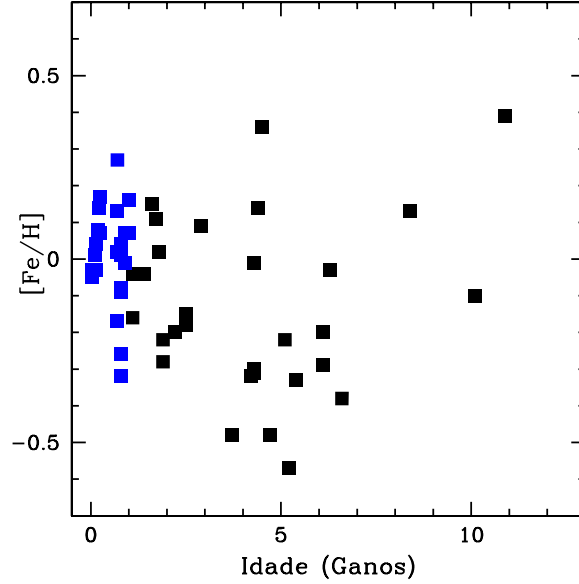


Figura 1.6: Relação idade-metallicidade para diferentes aglomerados estudados na literatura. Os símbolos têm a mesma representação que na figura 1.1

constituem a população que determina o tempo passado do gradiente de metalicidade enquanto que as estrelas jovens (incluindo Cefeidas e gigantes), regiões HII e aglomerados jovens determinam o gradiente atual.

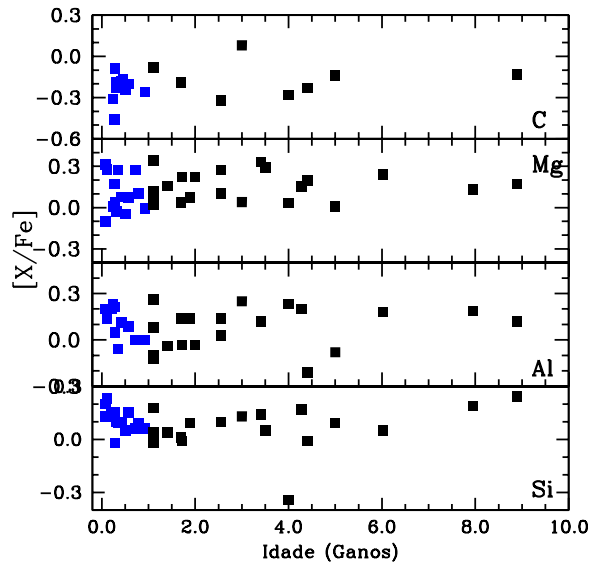


Figura 1.7: Abundâncias $[X/Fe]$ versus Idade no disco a partir de aglomerados abertos jovens e velhos. Resultados são mostrados para os elementos Carbono, Magnésio, Alumínio e Silício. Os símbolos têm a mesma representação que na figura 1.1

As figuras 1.7 e 1.8 mostram que também não existe nenhuma tendência das razões de abundâncias com a idade, tanto para os aglomerados jovens e os mais velhos. Não obstante, como será mencionado na seção 1.2.3 e discutido nos resultados desta tese, as abundâncias de Sódio e Oxigênio parecem apresentar tendência com a idade.

1.2.3 Anti-correlação $[O/Fe]$ - $[Na/Fe]$

Talvez seja possível que a anti-correlação Sódio-oxigênio observada em aglomerados globulares possa ser uma característica também observada nos aglomerados abertos (Gratton et al. 2004). A evidência desta anticorrelação nesse tipo de aglomerado é obtida a partir de observações realizadas em alta resolução. Na figura 1.9 mostra-se o exemplo para o aglomerado globular NGC 2808 (Carretta et al. 2006).

A explicação para esta anticorrelação é a poluição primordial, mas a fonte dessa poluição ainda é motivo de debate. Para explicar este fato observacional existem hipóteses como a ejeção de material a partir de estrelas massivas e o “Hot Bottom Burning” através de estrelas em fase de AGB. Lattanzio et al. (2006) mostraram que o “Hot Bottom Burning” eleva a temperatura ($T > 10^9$ K) na base do envelope convectivo de forma tal que ativa os ciclos CNO e Neônio-Sódio. Assim o Neônio

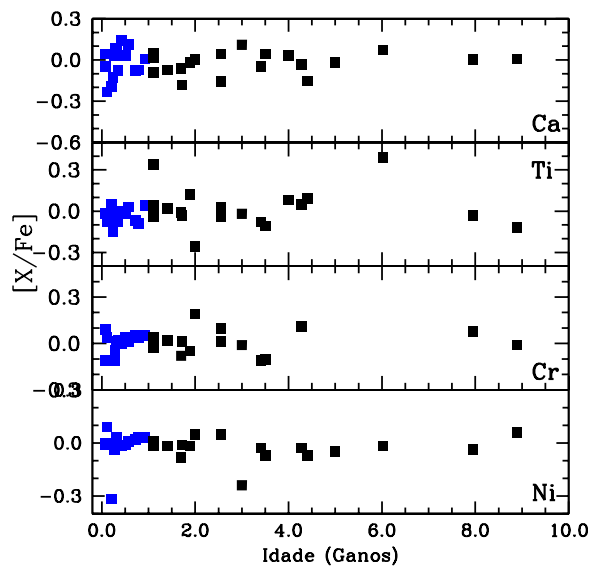


Figura 1.8: Abundâncias $[X/Fe]$ versus Idade para os elementos Cálcio, Titânio, Cromio e Níquel. Os símbolos têm a mesma representação que na figura 1.1

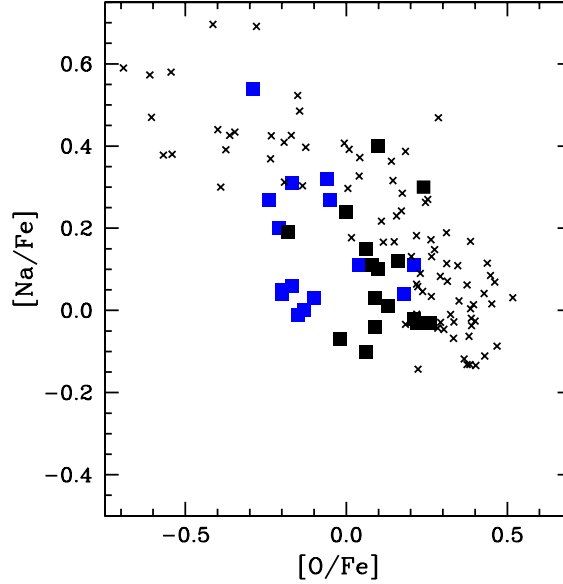


Figura 1.9: Anti-correlação $[O/Fe]$ vs $[Na/Fe]$ observada nas estrelas do aglomerado globular NGC 2808 (cruzes pretas) obtida por Carretta et al. (2006). Quadradinhos azuis e pretos como nas figuras anteriores. As razões de abundâncias para os aglomerados abertos foram tomadas dos artigos citados na seção 1.2.

é usado para produzir Sódio através da captura protônica enquanto o Oxigênio é consumido pelo ciclo Oxigênio-Nitrogênio. Dessa forma as estrelas AGB, poluem o entorno da formação do aglomerado globular através de ventos de baixa velocidade, os quais são retidos dentro do aglomerado para formar novas estrelas pobres em Oxigênio e ricas em Sódio.

de Silva et al. (2009) fizeram uma compilação de abundâncias para 18 aglomerados abertos (16 com idades superiores a 1.0 Ganos e 2 com idades inferiores a 1.0 Ganos) cujas razões de abundâncias de $[O/Fe]$ e $[Na/Fe]$ ficam dentro do intervalo da anti-correlação observada nos aglomerados globulares (fig.1 desse artigo). Como se observa na figura 1.9, a existência da anti-correlação $[O/Fe]$ – $[Na/Fe]$ não é tão clara como a observada nos aglomerados globulares. Portanto, a análise em alta resolução de mais aglomerados abertos é fundamental para verificar a existência dessa anti-correlação.

Nesta tese foram calculadas as abundâncias de $[O/Fe]$ e $[Na/Fe]$ para 25 estrelas gigantes nos aglomerados NGC 3114 e NGC 5822 e, os resultados mostram que as abundâncias médias de $[O/Fe]$ e $[Na/Fe]$ para cada estrela nos dois aglomerados concordam com o comportamento proposto por de Silva et al. (2009). As prováveis tendências das razões $[O/Fe]$ e $[Na/Fe]$ com a distância R_{gc} , mostrada na figura 1.2,

podem ser reflexo de uma anti-correlação entre estes dois elementos.

1.2.4 Abundâncias dos elementos do processo-s

Na fase tardia da AGB, duas fontes alternadas de energia são ativadas, a zona de queima do Hidrogênio (H-BS por suas siglas em inglês) e a zona de queima do Hélio (He-BS). Estas duas fontes estão separadas por uma zona fina em equilíbrio radioativo, a chamada “He-intershell”. Esta zona é progressivamente corroída pela H-BS nas suas camadas inferiores. Isso ocasiona a produção de Hélio e o aumento da massa que por sua vez ocasionara um aumento progressivo da temperatura e da densidade até alcançar valores suficientes para gerar o pulso térmico.

Essa liberação súbita de energia gera instabilidades convectivas nas camadas superiores e ocasiona uma mistura de material em toda a zona “Helium-intershell” (Schwarzschild & Harm 1965, 1967). Como consequência há uma expansão que temporariamente extingue a H-BS. Nestas condições, o envelope convectivo penetra na H-BS levando para a superfície o material sintetizado. Este episódio na evolução estelar é conhecido como a terceira dragagem TDU (“Third Dredge Up”).

De acordo com Iben & Renzini (1983), durante a TDU, uma descontinuidade química é estabelecida na interface entre o envelope rico em Hidrogênio e a “Helium-intershell”, com uma súbita mudança de opacidade, e por tanto, do gradiente de temperatura. Assim, na fronteira radiativa, a velocidade convectiva cai abruptamente a zero, enquanto deve existir uma região de transição em que a velocidade de convecção diminui suavemente a zero. Portanto, uma mistura parcial pode ocorrer. Então, nesta hipótese, o envelope rico em Hidrogênio penetra nas camadas superiores da “He-intershell”.

Essa penetração ocasiona re-ignição do Hidrogênio na H-BS e a formação de um reservatório de ^{13}C , chamada de ^{13}C -“pocket” nas camadas superiores da “He-intershell”. Este ^{13}C -“pocket” se forma pela captura protônica do ^{12}C através da reação $^{12}\text{C}(\text{p},\gamma)^{13}\text{N}(\beta^+)^{13}\text{C}$ quando a He-BS penetra na H-BS. O ^{12}C foi previamente produzido na queima do Hélio.

De acordo com Straniero et al. (1995) e Gallino et al. (1998), durante o período inter pulso a temperatura pode alcançar os 1×10^8 K dentro do ^{13}C -“pocket”, nessas condições, neutrôns são emitidos através da reação $^{13}\text{C}(\alpha,\text{n})^{16}\text{O}$. Esta reação é a maior fonte de neutrôns para estrelas em fase de AGB com massa no intervalo de $1.2 \leq M_*/M_\odot \leq 3.0$. Com esses altos valores de temperatura e densidade neutrônica tem início a captura lenta (“slow”) de neutrôns que vai gerar os elementos pesados.

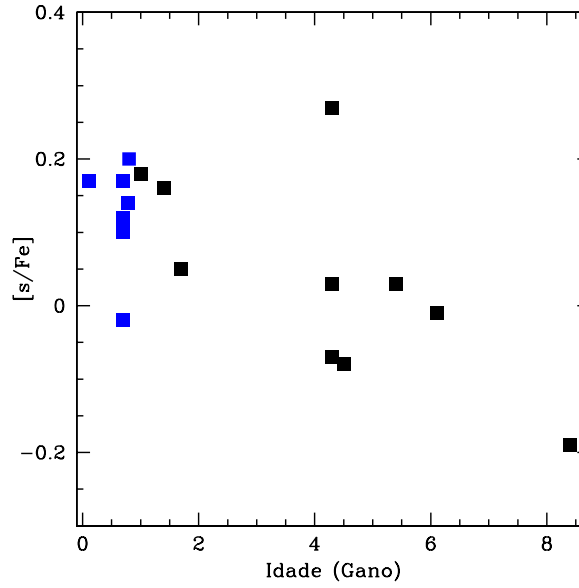


Figura 1.10: Abundâncias dos elementos do processo-s em aglomerados abertos calculadas por Maiorca et al. (2011).

De fato, quando o neutron livre é capturado por um núcleo, produz um núcleo mais pesado e estável e há um decaimento β^- . Disse-se lento pois o índice de captura neutrônica é maior que a desintegração β^- .

O processo-s é muito importante para a formação dos elementos pesados porque estes não podem ser explicados por fusão pois os elementos com $A < 64$ não conseguem vencer a repulsão coulombiana. A repulsão coulombiana aumenta com o aumento do número atômico Z .

As abundâncias dos elementos do processo-s em gigantes de aglomerados abertos estão sendo estudadas apenas recentemente. Um trabalho destacado neste sentido é o artigo de Maiorca et al. (2011) que calcularam abundâncias dos elementos do processo-s em aglomerados abertos de diferentes idades observados em alta resolução. Esses resultados mostram sobre-abundâncias da média do processo-s nos aglomerados abertos jovens relativos aos aglomerados abertos velhos, (ver figura 1.10).

Como vai ser mostrado nos seguintes capítulos desta tese, nossos resultados para as abundâncias dos elementos do processo-s nos aglomerados NGC 3114 e NGC 5822 concordam com os obtidos por Maiorca et al. (2011). Além disto, foram descobertas duas estrelas de bário no aglomerado NGC 5822. Fato destacado pois desde o artigo de McClure et al. (1980) e a posterior confirmação utilizando espectroscopia de média resolução (Smith & Sunzef 1987), não se tinha notícia sobre a presença deste tipo de objetos em um aglomerado aberto.

1.3 Motivação desta tese

Há muitos anos atrás, antes de se desenvolver a espectroscopia da forma como a conhecemos atualmente, a fotometria era a única maneira de analisar as estrelas dentro de um aglomerado. A partir da fotometria é possível, por exemplo, calcular importantes variáveis como a idade, distância e avermelhamento, inclusive os parâmetros estelares e boas aproximações para o valor da metalicidade. Apesar que a fotometria abriu o caminho para análises mais detalhadas, apresentava limitações para examinar as abundâncias químicas dos objetos astronômicos. Graças ao grande desenvolvimento da instrumentação astronômica, principalmente telescópios e espectrógrafos de alta resolução, foi possível obter os primeiros resultados de abundâncias químicas em estrelas de aglomerados e de campo.

Apesar do aumento relativamente constante de artigos sobre as abundâncias químicas de aglomerados abertos, as referências encontradas na literatura mostram, até agora, que esse número é ainda insuficiente em comparação com os aglomerados observados (cerca de 8.9% dos aglomerados abertos têm estudos de abundâncias químicas, Dias et al. 2003). Sendo que uma grande parte desses resultados estão focalizados na metalicidade e nas abundâncias de Lítio. As abundâncias dos elementos do ciclo CNO têm sido pouco estudadas bem como as abundâncias geradas pelo processo-s. Além de poucos aglomerados com análise química, existe o problema do pequeno número de estrelas observadas e, aqueles com maior número de estrelas apresentam observações que não foram feitas em alta resolução. Estudar estrelas em aglomerados é mais vantajoso do que as estrelas no campo, pois, como foi mencionado na seção 1.1, em um aglomerado as estrelas têm aproximadamente a mesma idade e distância, facilitando o cálculo das luminosidades, enquanto as estrelas no campo têm mais incertezas associadas ao cálculo das distâncias e portanto das luminosidades. Neste sentido, o estudo através de gigantes vermelhas é a melhor maneira de discernir a evolução estelar, pois as estrelas RGB e AGB são muito brilhantes.

O objetivo desta tese é determinar, através das linhas espectrais de absorção, os parâmetros estelares e as abundâncias químicas nas gigantes vermelhas dos aglomerados abertos NGC 3114 e NGC 5822. As abundâncias químicas a serem determinadas são: Lítio, Carbono, Nitrogênio, Oxigênio, Sódio, Cálcio, Magnésio, Silício, Alumínio, Cromo, Titânio, Níquel, Ítrio, Zircônio, Lantânio, Cério e Neodímio, e também a razão isotópica $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$.

Esta tese encontra-se dividida da seguinte forma: no capítulo 2 descrevemos as observações; no capítulo 3 a metodologia utilizada e os resultados obtidos para as estrelas nos dois aglomerados. A seguir discutimos os resultados obtidos no capítulo 4 e, no capítulo 5 descrevemos a descoberta das duas estrelas de Bário em NGC 5822. Finalmente no capítulo 6, apresentamos as conclusões e as perspectivas. Como material anexo desta tese são mostradas as listas de linhas medidas em cada estrela da amostra e os dois artigos submetidos.

Capítulo 2

Observações

2.1 Espectros de alta resolução

Os dados espectroscópicos das estrelas usadas nesta tese foram obtidos com o espectrógrafo echelle FEROS (Fiberfed Extended Range Optical Spectrograph) instalado no telescópio de 2.2 m do ESO em La silla/Chile. A resolução do FEROS é de 48 000, o que corresponde a 2.2 pixels de $15\mu\text{m}$ com um comprimento de onda no intervalo de 3 800 Å a 9 200 Å (Kaufer et al. 1999). As estrelas analisadas foram selecionadas do catálogo de Mermilliod et al. (2008). Os espectros foram reduzidos utilizando o “pipeline” do MIDAS¹, o qual consiste das seguintes etapas: correção de bias, flat-fielding, extração do espectro, calibração de comprimento de onda e correção baricêntrica. Nas figuras 2.1 e 2.2 mostram-se alguns dos espectros normalizados da amostra.

O aglomerado NGC 3114 está classificado na literatura como um aglomerado aberto jovem enquanto NGC 5822 é considerado de idade intermediária. Os dois aglomerados pertencem ao disco galáctico e apresentam estudos prévios de cinemática e fotometria. Estas características, encontram-se resumidas na tabela 2.1.

¹“Munich Image Data Analysis System” é um software distribuído por ESO

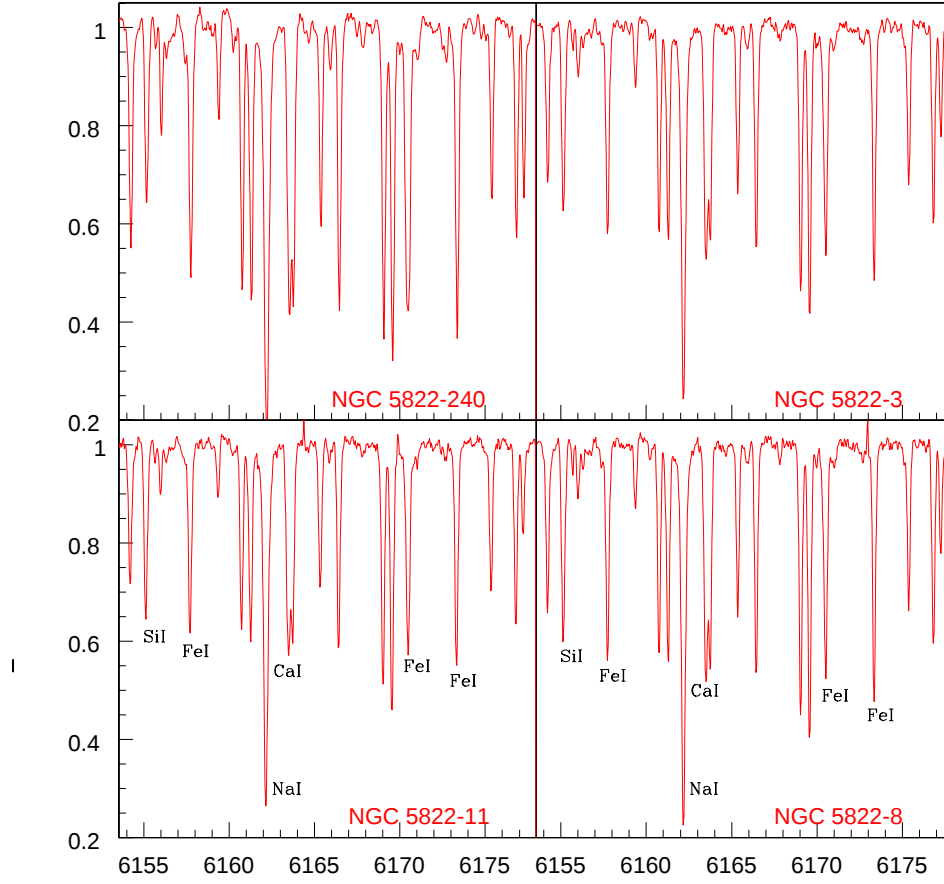


Figura 2.1: Espectros em alta resolução normalizados na região (6 155-6 175) Å para as estrelas 3, 8, 11 e 240 do aglomerado NGC 5822. Algumas linhas atômicas de absorção são identificadas.

Nas tabelas 2.2 e 2.3 mostram-se os dados observacionais para cada aglomerado e informações adicionais para cada estrela. A razão sinal ruído S/N foi calculada através da variação do fluxo rms em diferentes faixas espectrais e os valores típicos para todas as estrelas estão no intervalo de $S/N = 100 - 150$.

No aglomerado NGC 5822 foram adicionadas à análise mais 4 estrelas obtidas a partir do banco de dados do ESO². Essas estrelas são as quatro últimas na tabela 2.3. Alguns espectros estelares deste aglomerado encontram-se disponibilizadas para uso público nesse portal.

²Número de projeto: 085.D-0093(A). No site http://archive.eso.org/eso/eso_archive_main.html

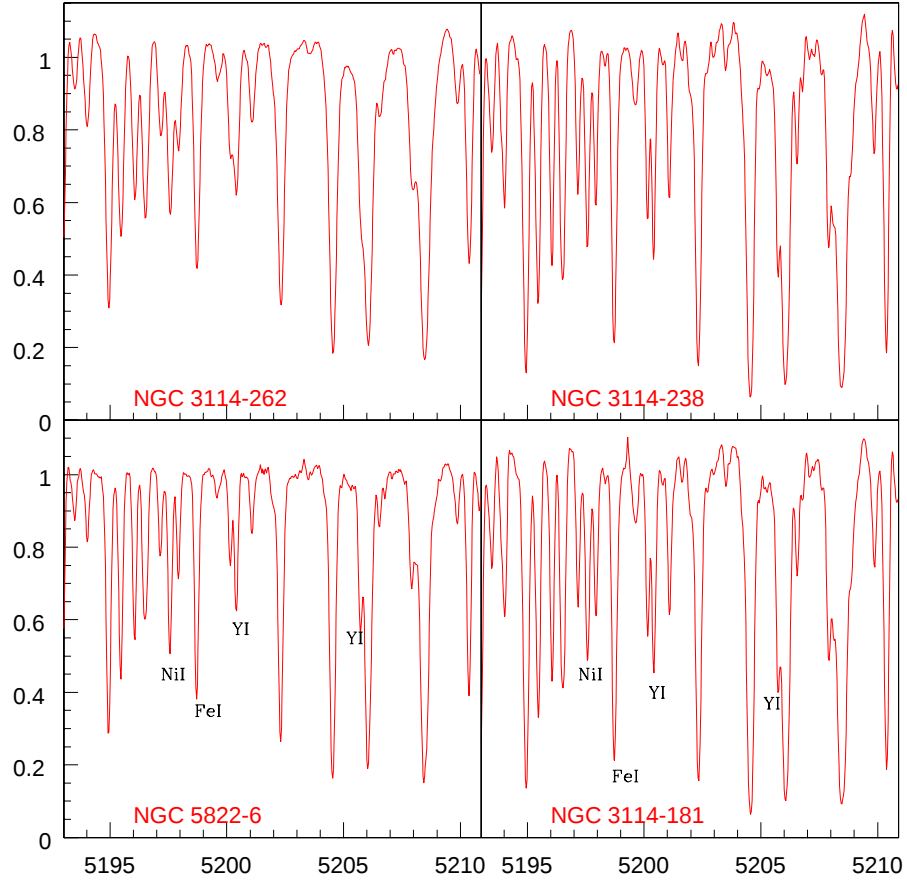


Figura 2.2: Como na figura 2.1 porém na região (5 195-5 210) Å para as estrelas 181, 238 e 262 do aglomerado NGC 3114 e para a estrela NGC 5822-6.

As figuras 2.3 e 2.4 mostram os diagramas cor magnitude de NGC 3114 e NGC 5822. Para os dois aglomerados, os diagramas foram construídos com os dados fotométricos disponíveis em Mermilliod et al. (2008), corrigidos dos respectivos avermelhamentos e com isócronas calculadas a partir dos modelos de Bertelli et al. (1994).

A velocidade radial foi medida a partir do deslocamento de várias linhas de absorção no espectro observado com respeito à posição das respectivas linhas em repouso.

Tabela 2.1: Parâmetros observacionais dos aglomerados obtidos a partir das referências no site WEBDA.

Parâmetro	NGC 3114	NGC 5822
α, δ (2000)	10 02 00, -60 06 00	15 04 21, -54 23 48
l, b	283.33, -03.84	321.57, 03.59
log idade	8.09	8.82
R_{gc} (kpc)	9.09	8.89
V_r (km s ⁻¹)	-1.72	-29.31
E(B-V)	0.07	0.15
[Fe/H]	0.02	-0.02

Tabela 2.2: Características observacionais das estrelas no aglomerado NGC 3114. A primeira coluna mostra o número da estrela no aglomerado, a segunda coluna mostra a magnitude fotométrica V, na terceira coluna o índice de cor B-V, a quarta e quinta colunas mostram as velocidades radiais de Mermilliod et al. (2008) e a calculada nesta tese (V_r^a), sexta coluna mostra a data de observação e a última coluna o tempo de exposição (t_{exp}).

Estrela	NGC 3114-#	V	B - V	V_r km s ⁻¹	V_r^a km s ⁻¹	Data obs.	t_{exp} (segundos)
HD 87109	6	7.6	1.29	-1.43±0.23	-1.31±0.49 ^b	9 Abril 2008	600
HD 87479	150	7.9	1.17	-2.19±0.51	-1.71±0.61	9 Abril 2008	420
HD 87526	170	7.3	0.89	-1.95±0.40	-2.38±0.17	9 Abril 2008	600
HD 87566	181	8.3	1.28	-2.18±0.10	-2.27±0.23	10 Abril 2008	420
HD 87833	238	8.5	1.27	-1.72±0.18	-1.40±0.34	22 Dezembro 2008	600
HD 304859	262	8.6	1.16	-1.20±0.23	-1.22±0.17	10 Abril 2008	600
HD 304864	283	7.7	1.25	-1.73±0.31	-1.41±0.36	22 Dezembro 2008	600

b: -1.33 km s⁻¹ (de Medeiros et al. 2002)

Tabela 2.3: Características observacionais das estrelas no aglomerado NGC 5822. Colunas têm o mesmo significado da tabela 2.2.

NGC 5822-#	V	B-V	V_r	V_r^a	Data obs.	t_{exp}
			km s ⁻¹	km s ⁻¹		(segundos)
1	9.06	1.28	-31.03±0.20	-28.89±0.40	8 Março 2009	420
2	9.50	1.05	-29.10±0.10	-25.07±0.27	8 Março 2009	900
3	10.30	1.06	-30.15±0.35	-26.74±0.23	8 Março 2009	900
4	9.94	0.73	-30.05±0.25	-30.07±0.41	8 Março 2009	900
6	10.78	1.02	-29.60±0.20	-28.56±0.30	6 Agosto 2009	1800
8	10.39	1.05	-30.40±0.20	-27.58±0.36	8 Março 2009	1200
11	11.01	1.00	-29.00±0.10	-34.01±0.15	9 Março 2009	1800
51	10.46	1.03	-29.65±0.19	-27.61±0.22	9 Março 2009	1200
80	10.33	1.00	-28.10±0.10	-10.03±0.64	9 Março 2009	1200
102	10.85	1.03	-29.80±0.25	-29.11±0.48	6 Agosto 2009	1800
151	10.80	1.05	-29.70±0.06	-31.50±0.26	6 Agosto 2009	1800
201	10.24	1.06	-28.10±0.30	-27.80±0.15	9 Março 2009	1200
224	10.82	1.04	-29.45±0.15	-30.05±0.44	7 Agosto 2009	1800
240	9.50	1.34	-29.50±0.15	-28.06±0.70	7 Agosto 2009	900
312	9.90	0.85	-31.02±0.90	-23.32±0.25	7 Agosto 2009	1200
316 ^b	10.52	1.03	-28.33±0.07	-27.63±0.34	26 Junho 2010	1800
348 ^b	10.91	1.02	-29.06±0.07	-28.15±0.21	26 Junho 2010	1800
375 ^b	9.71	1.22	-29.47±0.08	-28.59±0.12	26 Junho 2010	1200
443 ^b	9.72	1.22	-29.24±0.10	-28.31±0.04	26 Junho 2010	1200

b: Arquivos obtidos apartir do ESO “archive” observados com o mesmo telescópio e espectrógrafo.

As figuras 2.5 e 2.6 mostram as linhas proibidas de oxigênio λ 6300 Å e λ 6363 Å utilizadas na síntese espectral para calcular as abundâncias de Oxigênio. Como será mostrado no próximo capítulo, a linha de λ 6300 Å, que é a regularmente utilizada nesse processo, foi utilizada nas estrelas do aglomerado NGC 3114 e para a estrela NGC 5822-80, enquanto que a linha λ 6363 Å foi utilizada no resto das estrelas do aglomerado NGC 5822.

As figuras 2.7 e 2.8 mostram linhas moleculares de C₂ utilizadas para calcular, através da síntese espectral, as abundâncias de Carbono nas duas estrelas de Bário NGC 5822-2 e -201. Como será mostrará no capítulo 5, estas linhas de Carbono no entorno da linha de Fe I λ 5634 Å são visíveis em estrelas cujas abundâncias de Carbono são altas, como por exemplo nas estrelas de Bário. Nesse mesmo capítulo se mostraram as sínteses espectrais nessa região para as duas estrelas.

A figura 2.9 mostra as regiões com algumas linhas moleculares de ¹²CN utilizadas para calcular as abundâncias de Nitrogênio. As linhas de ¹²CN, tal qual a linha de Oxigênio λ 6300 Å são suscetíveis à contaminação por linhas telúricas.

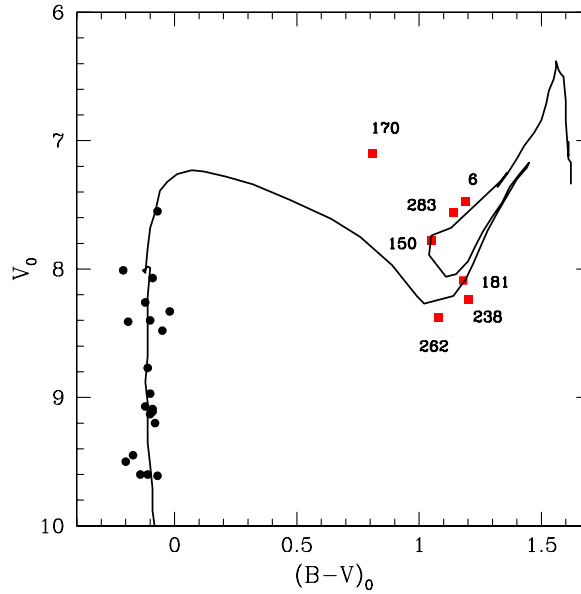


Figura 2.3: Diagrama Cor Magnitude corrigido do avermelhamento para o aglomerado NGC 3114. Quadrados vermelhos representam as gigantes analisadas nesta tese. A isocrona corresponde ao modelo de Bertelli et al. (1994) com os seguintes parâmetros: $\log t = 8.20$, $Z = 0.020$ e, $Y = 0.28$.

2.2 Lista de linhas

Nos espectros das estrelas observadas (tabelas 2.2 e 2.3) existe um grande número de linhas absorção do Fe I e Fe II e também outras transições atômicas correspondentes aos elementos: Na, Mg, Al, Si, Ca, Ti, Cr, Ni, Y, Zr, La, Ce e Nd. As larguras equivalentes destes elementos foram medidas utilizando o ajuste gaussiano através da tarefa SPLIT do software IRAF³.

Três listas de linhas foram utilizadas nesta tese: a primeira lista para as linhas de absorção do Ferro I e II; a segunda para as transições dos elementos do grupo do Ferro, elementos α e elementos do processo-s; e a terceira lista os elementos leves: Lítio, Carbono, Nitrogênio e, Oxigênio e razão isotópica $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$. A primeira lista foi construída tomando valores de Lambert et al. (1996) e Castro et al. (1997) enquanto que para os outros elementos foram utilizados valores tomados de várias referências.

³“Image Reduction and Analysis Facility” é um software distribuído por NOAO (“National Optical Astronomical Observatory”)

Ver as tabelas dos artigos Katime Santrich et al. (2013a) e Katime Santrich et al. (2013b) e as tabelas 1 até 3 no Anexo onde se mostram os valores de potencial de excitação χ (eV), $\log gf^4$ e as larguras equivalentes medidas dos diferentes elementos para todas as estrelas da amostra. A lista de linhas para os elementos leves foi construída por Drake & Pereira (2008, 2011) e Pereira & Drake (2009).

⁴Sendo g o peso estatístico da transição e f a força do oscilador

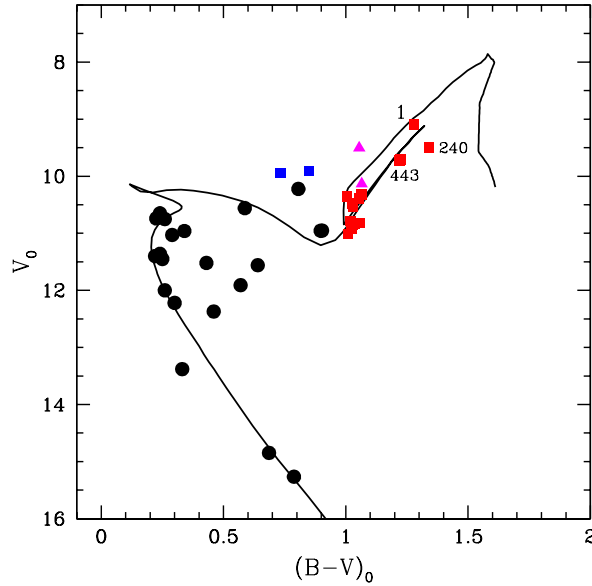


Figura 2.4: Diagrama Cor Magnitude corrigido do avermelhamento para o aglomerado NGC 5822. Quadrados vermelhos representam as gigantes analisadas nesta tese, os dois quadrados azuis representam as estrelas NGC 5822-4 e -312 enquanto os triângulos em magenta às estrelas NGC 5822-2 e -201. As estrelas que não estão identificadas neste diagrama estão divididas em dois grupos: as que parecem estar no começo do primeiro ascenso 6, 11, 102, 224, 348, e 375 e as que parecem estar no “clump” 3, 8, 51, 80, 151 e, 316. Na seção 4.3.1 será discutido o estado evolutivo. A isocrona corresponde ao modelo de Bertelli et al. (1994) com os parâmetros: $\log t=8.95$, $Z= 0.017$ e, $Y=0.30$.

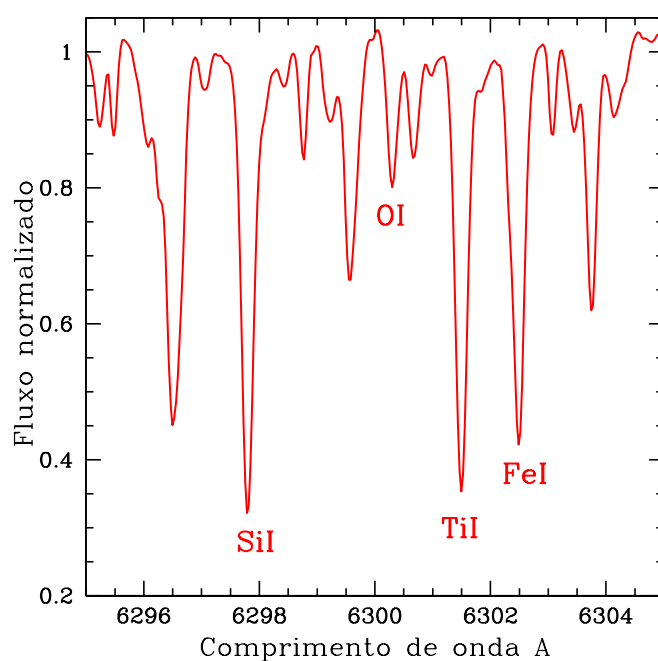


Figura 2.5: Espectro normalizado na região em torno da linha proibida [O I] λ 6300 Å. O espectro corresponde a estrela NGC 3114-238. Esta linha está livre de efeitos telúricos em todas as estrelas deste aglomerado. Além da linha do Oxigênio são identificadas algumas linhas.

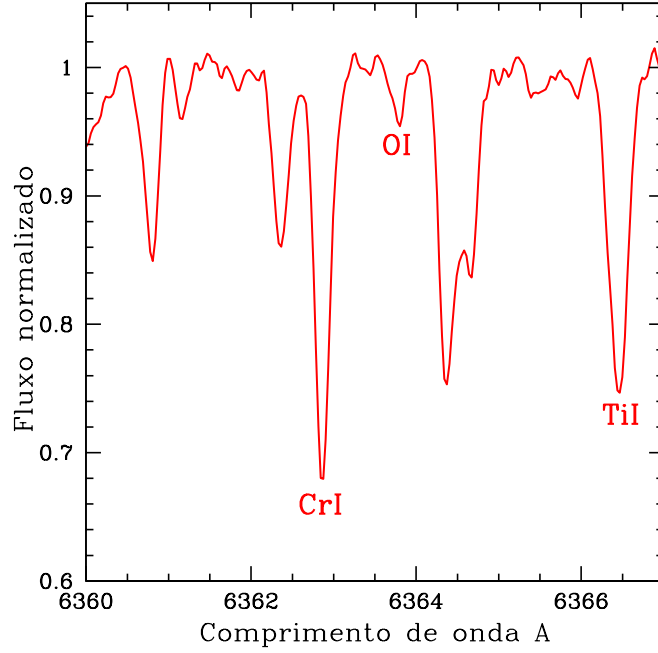


Figura 2.6: Região espectral normalizada da estrela NGC 5822-11 em torno da linha proibida [O I] λ 6 363 Å. Nas estrelas do aglomerado NGC 5822 foi utilizada esta linha para calcular as abundâncias de Oxigênio.

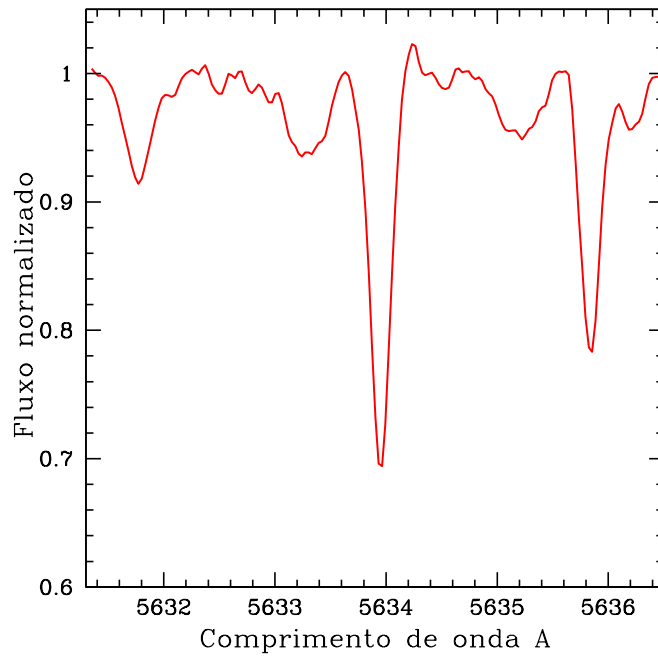


Figura 2.7: Região espectral com linhas moleculares de C_2 utilizadas para calcular as abundâncias de Carbono. O espectro normalizado corresponde à estrela NGC 5822-2.

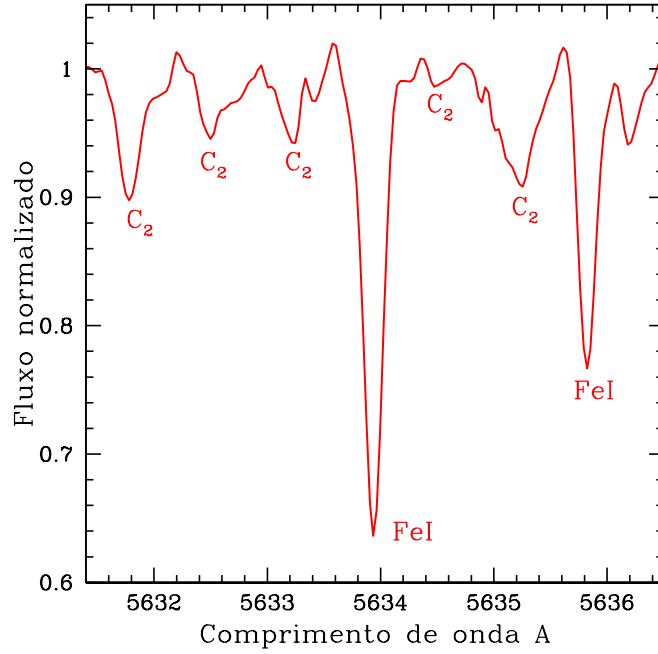


Figura 2.8: Linhas moleculares de C_2 na mesma região espectral da figura anterior para a estrela NGC 5822-201. As linhas de C_2 são identificadas.

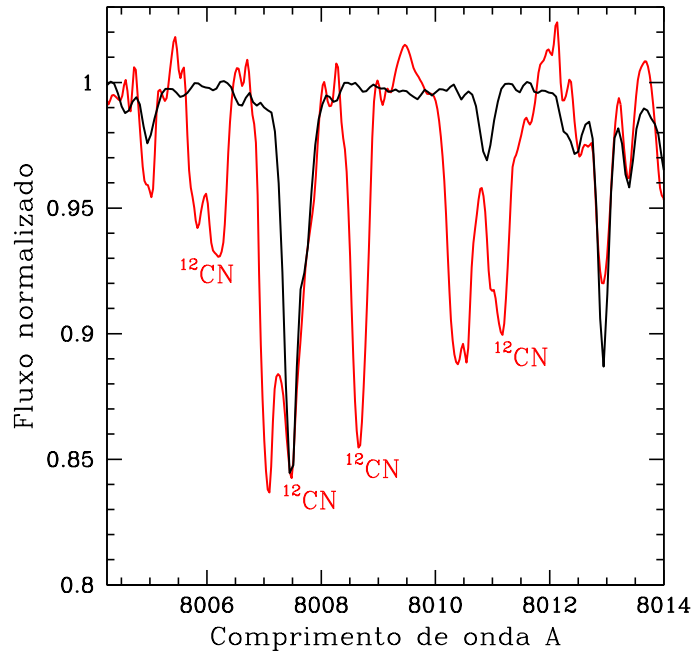


Figura 2.9: Região espectral com algumas linhas moleculares de ^{12}CN utilizadas para calcular a abundância de Nitrogênio. O espectro normalizado em vermelho com a correção baricêntrica corresponde à estrela NGC 5822-224 e o espectro em negro às linhas telúricas.

Capítulo 3

Metodologia e Resultados

3.1 Abundâncias solares

Para evitar erros sistemáticos na análise das abundâncias, foram determinadas as abundâncias solares utilizando a mesma metodologia e lista de linhas. Para isso utilizou-se o espectro de Ganimede tomado com o espectrógrafo HARPS do ESO. Foi utilizado o seguinte modelo de Kurucz (1993) para o Sol $T_{\text{eff}} = 5777$, $\log g = 4.44$ e $\xi = 0.75 \text{ km s}^{-1}$ (Pavlenko et al. 2012). O resultado dessa análise é mostrado na tabela 3.1. Como pode ser observado, existe concordância com as abundâncias solares de Grevesse & Sauval (1998). Não obstante, as abundâncias de Alumínio são 0.15 dex menores que Grevesse & Sauval (1998), uma situação similar encontrou Reddy et al. (2012) nas suas abundâncias solares. De acordo com Pancino et al. (2010), a razão pode ser pelo fato que as linhas de Alumínio $\lambda 6696 \text{ \AA}$ e $\lambda 6698 \text{ \AA}$ parecem sempre apresentar abundâncias menores que as outras linhas.

As abundâncias solares dos elementos do ciclo CNO foram calculadas com a técnica de síntese espectral tal como se mostra na seção 3.3. As abundâncias solares de Carbono obtidas nesta tese são 0.10 dex maiores que as obtidas por Grevesse & Sauval (1998). As razões de abundâncias $[X/H]$ e $[X/Fe]$ derivadas nesta tese foram calculadas utilizando as abundâncias solares da tabela 3.1.

Tabela 3.1: Abundâncias solares obtidas nesta tese comparadas com as abundâncias fotosféricas de Grevesse & Sauval (1998). O número de linhas utilizadas está em parenteses. Para os elementos do ciclo CNO foi utilizada a síntese espectral, o número em parenteses indica o número de regiões espectrais utilizadas na síntese.

Especies	$\log \varepsilon_{\odot}$	$\log \varepsilon_{\odot}$
	Esta tese	Grevesse & Sauval (1998)
C	$8.62 \pm 0.05(2)$	8.52 ± 0.06
N	$7.96 \pm 0.05(1)$	7.92 ± 0.06
O	$8.77 \pm 0.08(1)$	8.83 ± 0.06
Na	$6.34 \pm 0.05(3)$	6.33 ± 0.03
Mg	$7.60 \pm 0.08(2)$	7.58 ± 0.05
Al	$6.32 \pm 0.14(2)$	6.47 ± 0.07
Si	$7.57 \pm 0.01(3)$	7.55 ± 0.05
Ca	$6.39 \pm 0.09(13)$	6.36 ± 0.02
Ti	$4.99 \pm 0.06(44)$	5.02 ± 0.06
Cr	$5.67 \pm 0.09(29)$	5.67 ± 0.03
Fe I	$7.54 \pm 0.08(74)$	7.50 ± 0.05
Fe II	$7.54 \pm 0.03(11)$	—
Ni	$6.31 \pm 0.05(47)$	6.25 ± 0.04
Y	$2.26 \pm 0.05(3)$	2.24 ± 0.03
Zr	$2.64 \pm 0.06(3)$	2.60 ± 0.02
La	$1.22 \pm 0.09(2)$	1.17 ± 0.07
Ce	$1.58 \pm 0.02(4)$	1.58 ± 0.09
Nd	$1.60 \pm 0.05(3)$	1.50 ± 0.06

3.2 Parâmetros estelares

A determinação dos parâmetros estelares atmosféricos: temperatura efetiva (T_{eff}), gravidade superficial ($\log g$), velocidade microturbulenta (ξ), e a metalicidade $[\text{Fe}/\text{H}]$; são pré-requisitos para o cálculo das abundâncias fotosféricas. Os parâmetros estelares foram determinados utilizando os modelos atmosféricos de Kurucz (1993) sob a condição de equilíbrio termodinâmico local LTE (por suas siglas em inglês “Local Thermodynamical Equilibrium”) utilizando o código de análise espectral *MOOG* (Snedden 1973).

A temperatura efetiva (T_{eff}) foi calculada a partir do equilíbrio de excitação definido através da independência entre as abundâncias de Fe I e o respectivo potencial de excitação de cada linha. O potencial de excitação está correlacionado com a temperatura de excitação que sob a aproximação LTE corresponde à temperatura efetiva.

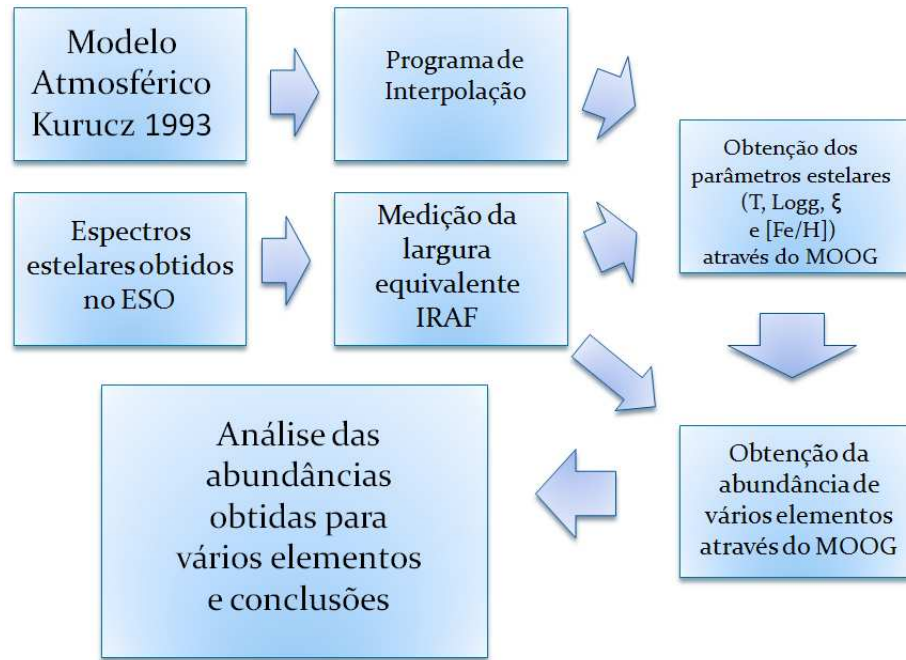


Figura 3.1: Ilustração da metodologia utilizada nesta tese para calcular os parâmetros estelares e as abundâncias químicas. A figura foi tomada de Sales Silva (2011).

A velocidade de microturbulência (ξ) foi encontrada a partir da independência das abundâncias de Fe I com as larguras equivalentes reduzidas (W_λ/λ). A explicação física desta condição é que a velocidade de microturbulência influencia o alargamento Doppler da linha.

A gravidade superficial ($\log g$) foi determinada através do equilíbrio de ionização entre as abundâncias médias de Fe I e Fe II. O equilíbrio de ionização está ligado diretamente com a pressão eletrônica, que por sua vez está relacionada com a gravidade a partir do equilíbrio hidrostático.

A metalicidade $[\text{Fe}/\text{H}]$ é estabelecida a partir do valor final fixado pelo equilíbrio de ionização a partir do modelo de atmosfera em LTE utilizado. Nesta tese a metalicidade tem a notação $[\text{Fe}/\text{H}] = \log(N_{\text{Fe}}/N_{\text{H}})_\star - \log(N_{\text{Fe}}/N_{\text{H}})_\odot$. Onde N_{Fe} e N_{H} são os números de partículas de Ferro e Hidrogênio respectivamente, por unidade de volume. As abundâncias solares foram tomadas de Grevesse & Sauval (1998).

O conjunto de valores encontrado sob as condições descritas acima é uma solução única que determina os parâmetros estelares e a metalicidade para cada estrela. Uma ilustração da metodologia descrita é mostrada na figura 3.1.

Os resultados para as gigantes do aglomerado NGC 3114 são mostrados na tabela 3.2, enquanto que a tabela 3.3 mostra os parâmetros estelares e metalicidades

Tabela 3.2: Parâmetros estelares e abundâncias de Fe I e Fe II das estrelas no aglomerado NGC 3114. Para cada estrela são mostrados o desvio padrão da abundância de Ferro e o número de linhas usadas no cálculo.

Estrela	T_{eff} (K)	$\log g$ (dex)	ξ km s^{-1}	[Fe I/H] $\pm \sigma$ (#)	[Fe II/H] $\pm \sigma$ (#)
HD 87109	4 700	1.2	2.0	-0.03 $\pm$ 0.13 (51)	-0.04 $\pm$ 0.14 (9)
HD 87479	4 900	1.8	2.4	-0.01 $\pm$ 0.16 (32)	0.00 $\pm$ 0.24 (4)
HD 87526	5 300	1.5	2.9	-0.73 $\pm$ 0.10 (71)	-0.74 $\pm$ 0.09 (13)
HD 87566	4 500	1.6	1.6	+0.02 $\pm$ 0.18 (56)	+0.01 $\pm$ 0.11 (11)
HD 87833	4 900	2.2	1.9	-0.03 $\pm$ 0.15 (42)	-0.02 $\pm$ 0.12 (9)
HD 304859	4 500	1.6	1.6	+0.07 $\pm$ 0.18 (51)	+0.07 $\pm$ 0.09 (10)
HD 304864	4 700	1.2	2.2	+0.03 $\pm$ 0.15 (30)	+0.05 $\pm$ 0.22 (3)

para as gigantes do aglomerado NGC 5822.

Os resultados da tabela 3.2 mostram que a estrela HD 87526 não pertence ao aglomerado NGC 3114 pois sua metalicidade é muito diferente das outras estrelas do aglomerado.

Os resultados na tabela 3.3 mostram duas estrelas com velocidade microturbulenta baixa: NGC 5822-4 e -312. Provavelmente isto deve ser produzido por um velamento nos espectros das duas estrelas. Este fenômeno ocasiona uma diminuição na largura equivalente das linhas e, como pode ser observado estas duas estrelas são as que apresentam as menores metalicidades dentro do aglomerado. As estrelas NGC 5822-4 e -312 serão discutidas na seção 4.5.1.

3.2.1 Erros nos parâmetros estelares

Os erros internos nas temperaturas efetivas (T_{eff}) foram determinados a partir das incertezas na inclinação entre as abundâncias de Fe I e o potencial de excitação. Enquanto que para as velocidades de microturbulência (ξ) os erros foram obtidos a partir das incertezas na inclinação entre Fe I e largura equivalente reduzida (W_{λ}/λ).

A incerteza para $\log g$ foi determinada mudando esse parâmetro ao redor da solução encontrada até que a diferença entre as abundâncias médias de Fe I e Fe II fosse exatamente um sigma do respectivo desvio padrão. As incertezas médias dos parâmetros atmosféricos para cada aglomerado são mostradas na tabela 3.4.

Tabela 3.3: Parâmetros estelares e abundâncias de Fe I e Fe II das estrelas no aglomerado NGC 5822.

Estrela	T_{eff} (K)	$\log g$ (dex)	ξ km s^{-1}	[Fe I/H] $\pm \sigma$ (#)	[Fe II/H] $\pm \sigma$ (#)
NGC 5822-1	4400	1.90	1.40	-0.09 $\pm$ 0.09 (54)	-0.09 $\pm$ 0.09 (10)
NGC 5822-2	5100	2.40	1.60	-0.15 $\pm$ 0.09 (57)	-0.15 $\pm$ 0.06 (13)
NGC 5822-3	5000	2.70	1.40	-0.10 $\pm$ 0.08 (79)	-0.10 $\pm$ 0.07 (13)
NGC 5822-4	4900	2.40	0.00	-0.27 $\pm$ 0.11 (75)	-0.27 $\pm$ 0.08 (10)
NGC 5822-6	5100	2.90	1.20	-0.04 $\pm$ 0.13 (76)	-0.04 $\pm$ 0.12 (11)
NGC 5822-8	5000	2.70	1.40	-0.08 $\pm$ 0.10 (75)	-0.07 $\pm$ 0.07 (12)
NGC 5822-11	5000	2.60	1.30	-0.16 $\pm$ 0.10 (70)	-0.17 $\pm$ 0.07 (10)
NGC 5822-51	5100	2.80	1.20	0.01 $\pm$ 0.12 (75)	0.02 $\pm$ 0.10 (13)
NGC 5822-80	5100	3.00	1.10	-0.02 $\pm$ 0.09 (71)	-0.02 $\pm$ 0.08 (12)
NGC 5822-102	5000	2.60	1.20	-0.13 $\pm$ 0.11 (65)	-0.13 $\pm$ 0.07 (10)
NGC 5822-151	4900	2.50	1.20	-0.17 $\pm$ 0.11 (67)	-0.19 $\pm$ 0.09 (13)
NGC 5822-201	5200	2.70	1.50	-0.11 $\pm$ 0.10 (66)	-0.11 $\pm$ 0.09 (11)
NGC 5822-224	5100	2.80	1.20	0.01 $\pm$ 0.08 (59)	0.00 $\pm$ 0.07 (11)
NGC 5822-240	4500	1.80	1.50	-0.14 $\pm$ 0.10 (57)	-0.15 $\pm$ 0.06 (10)
NGC 5822-312	4900	2.20	0.70	-0.32 $\pm$ 0.12 (73)	-0.32 $\pm$ 0.10 (9)
NGC 5822-316	5100	2.80	1.50	-0.05 $\pm$ 0.09 (78)	-0.06 $\pm$ 0.06 (11)
NGC 5822-348	5000	2.60	1.30	-0.13 $\pm$ 0.09 (82)	-0.14 $\pm$ 0.07 (12)
NGC 5822-375	4700	2.10	1.50	-0.09 $\pm$ 0.10 (68)	-0.10 $\pm$ 0.10 (13)
NGC 5822-443	4800	2.50	1.60	-0.03 $\pm$ 0.11 (71)	-0.04 $\pm$ 0.07 (11)

Tabela 3.4: Ordem das incertezas nos parâmetros estelares para cada aglomerado.

NGC #	T_{eff}	$\log g$	ξ
3114	± 140 K	± 0.20 dex	± 0.3 km s^{-1}
5822	± 120 K	± 0.20 dex	± 0.2 km s^{-1}

3.2.2 Gravidades evolutivas

Nesta tese foram comparadas as gravidades espectroscópicas com as gravidades evolutivas. Para calcular as gravidades evolutivas foi utilizada a equação:

$$\begin{aligned} \log g_{\star} = & \log \frac{M_{\star}}{M_{\odot}} + 0.4 (V - A_V + BC) \\ & + 4 \log T_{\text{eff}} - 2 \log r \text{ (kpc)} - 16.5. \end{aligned} \quad (3.1)$$

Para tal cálculo foram tomados os valores de massa do “turn-off”, distância e excesso de cor de cada aglomerado (Katime Santrich et al. 2013 para o aglomerado NGC 3114 e Smiljanic et al. 2009 para o aglomerado NGC 5822). As correções bolométricas foram calculadas através das equações de Alonso et al. (1999). As gravidades evolutivas calculadas para todas as estrelas analisadas nesta tese são mostradas na tabela 3.5. As diferenças médias entre as duas gravidades por aglomerado são 0.27 ± 0.19 dex e 0.20 ± 0.14 dex para NGC 3114 e NGC 5822 respectivamente. Estes valores se encaixam no mesmo intervalo das incertezas para cada aglomerado mostradas na tabela 3.4.

3.3 Determinação das abundâncias

Após obtidos os parâmetros estelares e metalicidades, as larguras equivalentes de cada linha correspondente a cada elemento químico são usadas pelo código *MOOG* para calcular as abundâncias. Desta maneira foram obtidas as abundâncias de Sódio e Alumínio, elementos do grupo do Ferro, elementos alfa e os elementos do processo-*s*.

Para determinar as abundâncias dos elementos leves tais como Lítio, Carbono, Nitrogênio e Oxigênio foi usada a técnica de síntese espectral que basicamente consiste na geração de um espectro teórico a partir do modelo de atmosfera previamente encontrado para posteriormente ajustá-lo ao espectro observado. A razão isotópica $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ vinculada aos processos de “extra-mixing” no interior estelar foi também calculada usando esta técnica.

As abundâncias do Lítio foram obtidas usando a linha de dupla ressonância λ 6708 Å. As linhas de CN na vizinhança de Li I foram incluídas na lista de linhas. Os parâmetros eletrônicos para este processo foram obtidos de Smith et al. (1998) e

Tabela 3.5: Gravidades espectroscópicas ($\log g_{esp}$) e evolutivas ($\log g_{evo}$) das estrelas estudadas nos aglomerados NGC 3114 e NGC 5822. As diferenças médias entre as duas gravidades são 0.27 ± 0.19 e 0.20 ± 0.14 respectivamente. A estrela HD 87526 foi retirada por não pertencer ao aglomerado NGC 3114.

ESTRELA	$\log g_{esp}$	$\log g_{evo}$	$\Delta \log g$
HD 87109	1.20	1.67	0.47
HD 87479	1.80	1.89	0.09
HD 87566	1.60	1.83	0.23
HD 87833	2.20	2.13	0.07
HD 304859	1.60	1.95	0.35
HD 304864	1.20	1.71	0.51
NGC 5822-1	1.90	1.89	0.01
NGC 5822-2	2.40	2.48	0.08
NGC 5822-3	2.70	2.76	0.06
NGC 5822-4	2.40	2.55	0.15
NGC 5822-6	2.90	2.98	0.08
NGC 5822-8	2.70	2.78	0.08
NGC 5822-11	2.60	3.03	0.43
NGC 5822-51	2.80	2.85	0.05
NGC 5822-80	3.00	2.80	0.20
NGC 5822-102	2.60	2.96	0.36
NGC 5822-151	2.50	2.90	0.40
NGC 5822-201	2.70	2.81	0.11
NGC 5822-224	2.80	3.01	0.21
NGC 5822-240	1.80	2.15	0.35
NGC 5822-312	2.20	2.55	0.35
NGC 5822-316	2.80	2.88	0.08
NGC 5822-348	2.60	2.99	0.39
NGC 5822-375	2.10	2.35	0.25
NGC 5822-443	2.50	2.42	0.08

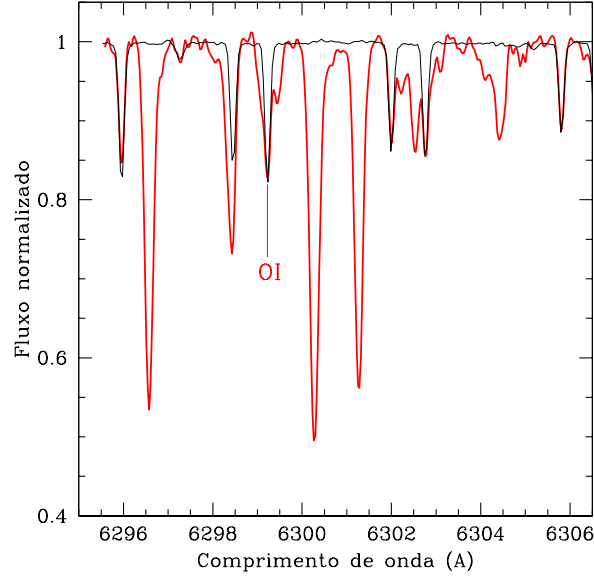


Figura 3.2: Linha proibida [O I] λ 6300 Å na estrela NGC 5822-11 contaminada pelas linhas telúricas. Espectro em vermelho representa o observado e o negro representa o espectro da estrela telúrica.

Hobbs et al. (1999). Uma razão isotópica solar de Lítio ${}^6\text{Li}/{}^7\text{Li} = 0.081$ foi utilizada para gerar o espectro sintético.

Devido ao fato das abundâncias de CNO serem interdependentes pela associação de Carbono e Oxigênio em moléculas de CO nas atmosferas de estrelas frias, as abundâncias de CNO foram calculadas de forma iterativa até que as abundâncias dos três elementos fossem encontradas.

As abundâncias do oxigênio foram obtidas a partir das linhas proibidas de [O I] em λ 6300 Å e λ 6363 Å. É necessário ter cuidado com a contribuição de efeitos telúricos na linha λ 6300 Å pois em quase todas as estrelas do aglomerado NGC 5822 (com exceção da estrela NGC 5822-80) esta linha encontrava-se sobreposta com linhas de H_2O e portanto foi utilizada a linha λ 6363 Å que é pouco mais sensível ao contínuo. Nas estrelas do aglomerado NGC 3114 o problema dos efeitos telúricos não se apresentou de modo que a linha mais forte λ 6300 Å pode ser utilizada nas 7 estrelas. Nas figuras 3.2 e 3.3 mostra-se o exemplo deste procedimento na estrela NGC 5822-11.

Para encontrar as abundâncias de Carbono foi utilizada a linha molecular C_2 em λ 5086 Å e na região ao redor da linha λ 5635 Å. A figura 3.4 mostra o processo de síntese para a estrela NGC 5822-11 utilizando a linha λ 5086 Å.

Após calcular as abundâncias de Oxigênio e Carbono, passamos a calcular a

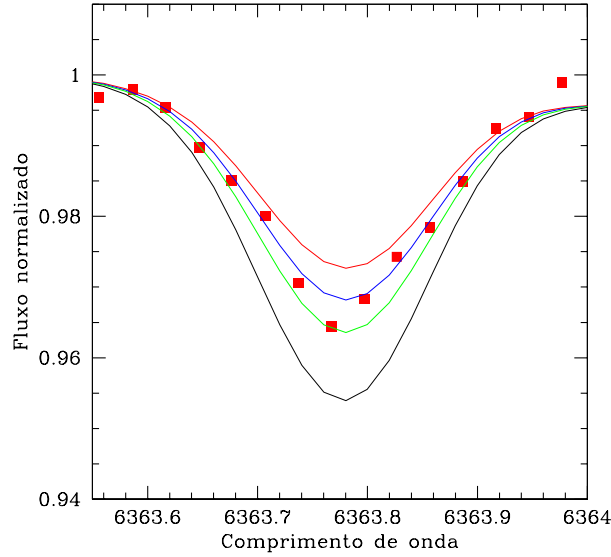


Figura 3.3: Sínteses espectral da linha proibida [O I] λ 6363 Å utilizada para calcular a abundância do Oxigênio na estrela NGC 5822-11. Os pontos em vermelho representam o espectro observado. Os espectros em preto, verde, azul e, vermelho representam as sínteses com valores de abundâncias de 8.64, 8.61, 8.58, e 8.55 respectivamente.

abundância de Nitrogênio. A figura 3.5 mostra um exemplo do procedimento utilizado para a mesma estrela citada anteriormente. As linhas moleculares de ^{12}CN em λ 7995 Å, λ 8002 Å e, λ 8008 Å estão livres de efeitos telúricos e portanto foram utilizadas para calcular as abundâncias.

A razão isotópica $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ foi calculada de forma similar através das abundâncias das linhas moleculares de ^{13}CN nas mesmas regiões espectrais usadas na análise das abundâncias de Nitrogênio e também sob a condição que não estivessem superpostas com as linhas telúricas.

As abundâncias dos elementos leves: Lítio, Carbono, Nitrogênio, Oxigênio e a razão isotópica $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ são mostradas nas tabelas 3.6 e 3.7. A abundância de Lítio tem a notação $\log \varepsilon$. Na tabela 3.6, a estrela HD 87526 foi excluída do cálculo da abundância média.

Em geral, as abundâncias do processo-s calculadas nesta tese foram baseadas em cinco elementos (Ítrio, Zircônio, Lantânio, Cério e Neodímio) com várias linhas de absorção. Este aspecto é de profunda importância, pois a maioria dos artigos publicados não encontram mais de três elementos do processo-s e não mais de duas ou três linhas por elemento.

Tabela 3.6: Abundâncias dos elementos leves em NGC 3114 calculados via síntese espectral. A última coluna fornece as razões isotópicas.

Estrela	$\log \varepsilon(\text{Li})$	[C/Fe]	[N/Fe]	[O/Fe]	$^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$
HD 87109	0.9	-0.20	0.38	-0.27	16
HD 87479	1.3	-0.19	0.56	-0.19	≥ 20
HD 87526	1.1	0.41	1.15	0.30	≥ 24
HD 87566	0.3	-0.15	0.45	-0.15	11
HD 87833	1.3	-0.27	0.42	-0.10	24
HD 304859	0.3	-0.30	0.18	-0.30	16
HD 304864	1.2	-0.37	0.37	-0.40	≥ 16
Média	0.9 ± 0.5	-0.25 ± 0.08	0.39 ± 0.12	-0.24 ± 0.11	≥ 17

Tabela 3.7: Como na tabela 3.6 porém para o a glomerado NGC 5822.

Estrela	[C/Fe]	[N/Fe]	[O/Fe]	$^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$
NGC 5822-1	-0.38	0.64	-0.20	16
NGC 5822-2	0.03	0.50	-0.15	
NGC 5822-3	-0.26	0.40	-0.41	
NGC 5822-4	-0.33	0.44	-0.13	
NGC 5822-6	-0.35	0.59	-0.11	
NGC 5822-8	-0.32	0.58	0.03	
NGC 5822-11	-0.17	0.26	-0.06	15
NGC 5822-51	-0.34	0.39	-0.21	
NGC 5822-80	-0.24	0.42	-0.12	
NGC 5822-102	-0.53	0.61	-0.12	
NGC 5822-151	-0.44	0.64	-0.33	
NGC 5822-201	0.15	0.54	0.10	
NGC 5822-224	-0.27	0.54	-0.11	
NGC 5822-240	-0.32	0.27	-0.28	19
NGC 5822-312	-0.33	0.57	-0.13	
NGC 5822-316	-0.38	0.62	-0.25	15
NGC 5822-348	-0.47	0.80	0.01	
NGC 5822-375	-0.25	0.34	-0.27	16
NGC 5822-443	-0.16	0.53	-0.07	
Média ^a	-0.33 ± 0.10	0.52 ± 0.15	-0.15 ± 0.13	16

a: Cálculo sem incluir as estrelas NGC 5822-2 e -201

Tabela 3.8: Abundâncias médias da forma $[X/Fe]$ para os elementos do Sódio até o Níquel das estrelas nos aglomerados NGC 3114 e NGC 5822. A razão $[Na/Fe]$ para o aglomerado NGC 3114 foi calculada sob efeitos não-LTE da maneira feita por Gratton et al. (1999). As abundâncias da estrela HD 87526 foram excluídas dos cálculos das abundâncias médias de NGC 3114. Os números em parênteses indicam o número de linhas utilizadas.

Estrela	$[Na/Fe](NLTE)^a$	$[Mg/Fe]$	$[Al/Fe]$	$[Si/Fe]$	$[Ca/Fe]$	$[Ti/Fe]$	$[Cr/Fe]$	$[Ni/Fe]$
HD 87109	+0.36(2)	-0.06±0.19(5)	-0.06±0.18(4)	+0.03±0.18(9)	-0.01±0.16(3)	-0.11±0.20(14)	-0.01±0.26(20)	-0.08±0.22(36)
HD 87479	+0.26(1)	—	+0.13±0.21(4)	+0.05(2)	-0.02(2)	0.06±0.19(8)	-0.07±0.21(4)	-0.15±0.21(16)
HD 87526	+0.42(2)	+0.50±0.25(3)	+0.29±0.26	+0.35±0.17(8)	+0.11±0.12(7)	-0.07±0.14(13)	+0.19±0.14(8)	+0.01±0.16(21)
HD 87566	+0.26(2)	+0.05±0.25(8)	-0.16±0.19(5)	-0.01±0.21(9)	-0.02±0.23(3)	-0.12±0.21(16)	-0.05±0.28(17)	+0.01±0.28(33)
HD 87833	+0.36(2)	+0.01±0.22(8)	+0.08±0.25(5)	+0.04±0.18(6)	-0.11±0.21(5)	+0.06±0.21(17)	0.05±0.24(16)	+0.06±0.19(33)
HD 304859	+0.19(2)	+0.12±0.30(7)	-0.11±0.20(6)	+0.13±0.20(8)	+0.01±0.32(3)	-0.14±0.21(16)	-0.05±0.25(18)	+0.02±0.24(36)
HD 304864	+0.19(2)	—	—	+0.18±0.19(6)	-0.13(2)	-0.13±0.23(10)	-0.02±0.21(8)	-0.21±0.22(26)
Média	+0.27±0.08	+0.03±0.08	-0.03±0.10	0.07±0.07	-0.05±0.06	-0.06±0.06	-0.03±0.02	-0.06±0.08
NGC 5822-#								
1	0.13±0.19(2)	0.00±0.14(8)	-0.10±0.11(5)	0.27±0.11(8)	-0.02±0.08(5)	-0.20±0.14(29)	-0.06±0.15(17)	0.07±0.12(37)
2	0.32±0.09(2)	0.23±0.10(7)	-0.03±0.07(4)	0.19±0.09(8)	0.12±0.08(8)	-0.01±0.11(27)	-0.01±0.13(20)	0.04±0.09(38)
3	0.16±0.04(2)	0.14±0.13(9)	-0.05±0.10(5)	0.18±0.09(8)	0.06±0.05(6)	-0.01±0.08(29)	0.03±0.09(23)	0.02±0.07(37)
4	0.05±0.12(2)	-0.08±0.12(7)	-0.03±0.09(5)	0.11±0.06(8)	0.05±0.06(9)	-0.38±0.13(30)	-0.12±0.12(27)	0.00±0.08(37)
6	0.12±0.03(2)	0.03±0.14(8)	-0.13±0.08(5)	0.10±0.10(6)	-0.02±0.08(6)	-0.05±0.11(37)	-0.03±0.11(25)	-0.03±0.07(43)
8	0.16±0.07(2)	-0.01±0.14(8)	-0.04±0.11(5)	0.14±0.11(7)	0.03±0.08(7)	-0.13±0.10(41)	-0.03±0.09(26)	0.00±0.10(45)
11	0.24±0.04(2)	0.05±0.13(9)	-0.04±0.14(5)	0.14±0.09(9)	0.10±0.10(7)	-0.09±0.10(36)	0.02±0.12(24)	-0.04±0.08(45)
51	0.08±0.03(2)	-0.18±0.06(6)	-0.16±0.05(5)	0.07±0.11(9)	0.08±0.05(7)	0.01±0.10(32)	0.05±0.11(20)	0.11±0.08(35)
80	0.07±0.04(2)	0.09±0.20(9)	-0.17±0.17(5)	0.08±0.06(9)	-0.01±0.08(7)	-0.03±0.09(24)	0.08±0.15(22)	0.00±0.08(36)
102	0.19±0.07(2)	0.03±0.12(7)	-0.08±0.10(5)	0.04±0.09(8)	-0.01±0.07(6)	-0.12±0.11(38)	-0.04±0.11(23)	-0.07±0.10(41)
151	0.23±0.06(2)	0.19±0.13(8)	0.13±0.13(4)	0.24±0.10(8)	0.07±0.10(7)	-0.07±0.11(36)	0.02±0.14(23)	0.02±0.10(45)
201	0.28±0.03(2)	0.14±0.15(8)	0.29±0.03(3)	0.21±0.11(5)	0.09±0.07(5)	-0.03±0.13(32)	0.03±0.11(20)	0.06±0.10(40)
224	0.14±0.07(2)	0.06±0.13(8)	0.01±0.10(5)	0.02±0.09(9)	0.01±0.09(7)	-0.06±0.12(40)	0.00±0.15(21)	-0.02±0.08(44)
240	0.32±0.10(2)	0.10±0.14(8)	0.20±0.15(5)	0.16±0.11(8)	0.10±0.08(4)	0.03±0.12(24)	0.04±0.14(18)	0.02±0.11(34)
312	0.23±0.05(2)	0.07±0.09(7)	0.04±0.17(4)	0.18±0.06(8)	0.19±0.11(8)	-0.29±0.15(22)	-0.09±0.12(20)	0.02±0.13(35)
316	0.21±0.00(2)	0.21±0.10(9)	-0.08±0.09(5)	-0.09±0.09(8)	-0.02±0.09(7)	-0.03±0.10(39)	0.01±0.11(23)	0.01±0.08(44)
348	0.22±0.06(2)	0.13±0.09(9)	-0.08±0.10(5)	0.12±0.07(8)	0.11±0.07(5)	-0.07±0.11(36)	0.04±0.11(26)	0.01±0.07(45)
375	0.14±0.14(2)	0.21±0.11(6)	0.04±0.09(6)	0.09±0.12(8)	0.12±0.09(5)	0.01±0.12(28)	0.03±0.11(18)	0.05±0.10(42)
443	0.19±0.01(2)	0.06±0.10(6)	-0.06±0.07(4)	0.07±0.12(8)	0.07±0.12(5)	0.03±0.12(34)	-0.03±0.10(17)	0.02±0.09(36)
Média	0.18±0.08	0.08±0.01	-0.02±0.12	0.12±0.08	0.06±0.06	-0.08±0.11	0.00±0.05	0.02±0.04

Tabela 3.9: Razões de abundâncias dos elementos do processo-s nos aglomerados NGC 3114 e NGC 5822. A última coluna mostra a média das abundâncias do processo-s. Igual que na tabela anterior, as abundâncias de HD 87526 foram excluídas das médias. As abundâncias das estrelas NGC 5822-2 e -201 foram excluídas do cálculo das médias.

Estrela	[Y/Fe]	[Zr/Fe]	[La/Fe]	[Ce/Fe]	[Nd/Fe]	[s/Fe]
HD 87109	+0.07(2)	-0.02±0.16(7)	+0.23±0.10(4)	+0.09±0.12(5)	+0.16±0.16(7)	+0.11±0.09
HD 87479	-0.01(2)	—	—	—	—	—
HD 87526	-0.07±0.19(5)	—	+0.01±0.19(4)	+0.14±0.14(12)	+0.25±0.15(11)	+0.08±0.11
HD 87566	-0.03±0.15(4)	-0.16±0.07(9)	+0.15(2)	+0.11±0.11(6)	+0.16±0.13(4)	+0.07±0.11
HD 87833	+0.01±0.12(3)	+0.19±0.06(6)	+0.27(2)	+0.06±0.06(4)	+0.30±0.11(10)	+0.17±0.13
HD 304859	+0.05±0.17(4)	-0.11±0.17(11)	+0.19±0.07(4)	+0.07±0.09(6)	+0.11±0.18(6)	+0.06±0.07
HD 304864	-0.01(1)	-0.11±0.11(3)	+0.02(2)	—	+0.15±0.12(6)	+0.01±0.10
Média	0.02±0.04	-0.04±0.11	+0.17±0.09	+0.08±0.02	0.18±0.06	+0.08±0.08
NGC 5822-#						
1	0.24±0.14(4)	-0.12±0.08(11)	0.32±0.11(4)	0.21±0.09(8)	0.32±0.12(9)	0.19±0.17
2	0.93±0.13(4)	0.60±0.08(8)	0.75±0.12(6)	0.75±0.13(10)	0.80±0.16(8)	0.77±0.12
3	0.15±0.08(5)	0.23±0.11(9)	0.34±0.07(5)	0.35±0.07(7)	0.39±0.12(10)	0.29±0.10
4	0.18±0.11(5)	0.04±0.13(7)	0.28±0.06(5)	0.40±0.13(6)	0.96±0.15(3)	0.37±0.35
6	0.01±0.08(5)	0.31±0.14(5)	0.21±0.02(5)	0.23±0.12(9)	0.58±0.12(9)	0.27±0.20
8	0.09±0.10(6)	0.02±0.09(8)	0.26±0.16(5)	0.28±0.11(9)	0.34±0.15(8)	0.20±0.13
11	-0.14±0.13(6)	0.25±0.10(8)	0.24±0.12(5)	0.25±0.12(9)	0.42±0.17(9)	0.20±0.21
51	0.17±0.09(4)	0.09±0.11(7)	0.30±0.05(5)	0.25±0.09(6)	0.30±0.10(9)	0.22±0.08
80	0.18±0.10(6)	0.07±0.05(5)	0.30±0.06(3)	0.41±0.10(5)	0.38±0.10(7)	0.27±0.14
102	0.11±0.16(6)	0.14±0.12(5)	0.18±0.13(5)	0.18±0.11(7)	0.30±0.17(8)	0.18±0.07
151	0.07±0.14(5)	-0.03±0.12(8)	0.18±0.12(5)	0.19±0.07(6)	0.37±0.12(7)	0.16±0.15
201	0.83±0.10(6)	0.75±0.09(11)	0.88±0.06(5)	0.89±0.16(5)	0.81±0.15(10)	0.83±0.05
224	0.17±0.07(5)	0.20±0.10(8)	0.33±0.10(6)	0.41±0.13(6)	0.35±0.08(8)	0.29±0.10
240	0.07±0.00(3)	0.08±0.10(14)	0.34±0.09(6)	0.16±0.11(7)	0.56±0.13(6)	0.24±0.20
312	-0.02±0.10(6)	0.04±0.07(6)	0.40±0.09(5)	0.12±0.05(7)	0.22±0.07(6)	0.15±0.11
316	-0.03±0.09(5)	0.16±0.09(7)	0.34±0.06(6)	0.31±0.12(9)	0.47±0.11(9)	0.25±0.19
348	-0.03±0.09(5)	0.03±0.07(7)	0.14±0.05(5)	0.19±0.16(7)	0.36±0.12(9)	0.14±0.15
375	0.08±0.10(4)	0.07±0.10(12)	0.32±0.03(4)	0.21±0.11(6)	0.37±0.13(10)	0.21±0.12
443	0.21±0.13(5)	0.19±0.11(12)	0.41±0.09(6)	0.27±0.08(8)	0.38±0.10(10)	0.29±0.08
Média	0.09±0.30	0.10±0.23	0.29±0.20	0.26±0.22	0.42±0.21	0.23±0.21

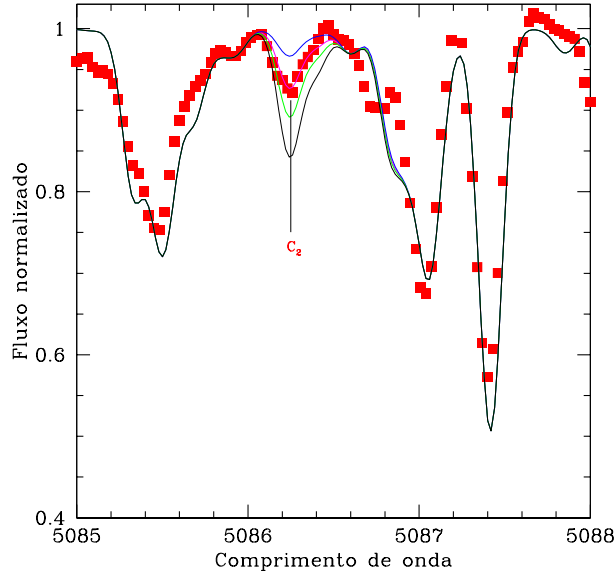


Figura 3.4: Síntese espectral da linha molecular C_2 em torno da região λ 5086 Å utilizada para calcular a abundância do Carbono na estrela NGC 5822-11. Os pontos em vermelho representam o espectro observado. As sínteses para esta linha correspondem às abundâncias de Carbono para 8.22, 8.19, 8.16 e, 8.13.

3.4 Incertezas nas abundâncias

As incertezas nas abundâncias derivadas para as estrelas da amostra são influenciadas por três fatores: os parâmetros estelares, as larguras equivalentes e os valores de gf . Os erros nos valores de gf foram discutidos em Smith, Cunha & Lambert (1995) e portanto, referenciamos esse artigo para uma discussão detalhada.

As incertezas nas abundâncias devidas aos erros nos parâmetros estelares T_{eff} , $\log g$ e ξ foram encontradas substituindo esses parâmetros por seus desvios padrão e posteriormente calculando as mudanças sofridas nas abundâncias dos elementos. Esta técnica foi aplicada às abundâncias calculadas através das larguras equivalentes, bem como aquelas abundâncias determinadas através da síntese espectral.

As incertezas nas abundâncias devido aos erros nas larguras equivalentes foram calculadas a partir da expressão fornecida por Cayrel (1988). Os erros das larguras equivalentes são devidos essencialmente à razão S/N e a resolução espectral. Nesta análise tem-se uma resolução de 48 000 com espectros que apresentam S/N da ordem de 150, portanto as incertezas esperadas nas larguras equivalentes são de aproximadamente 2–3 mÅ. Para todas as larguras equivalentes medidas, estas incertezas levam a erros nas abundâncias menores que aqueles devido às incertezas

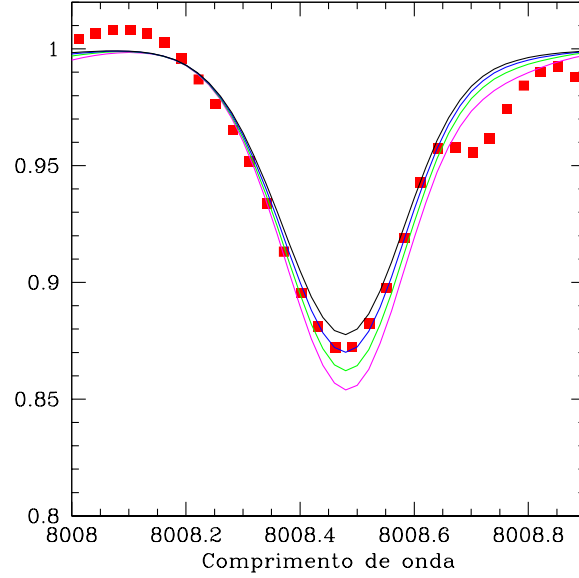


Figura 3.5: Síntese espectral da linha molecular $^{12}\text{CN } \lambda 8008 \text{ \AA}$ utilizada para calcular a abundância do Nitrogênio na estrela NGC 5822-11. As sínteses correspondem às abundâncias de Nitrogênio para 8.08, 8.05, 8.02 e, 7.99.

nos parâmetros estelares.

Sob a hipótese de que os erros são independentes, eles podem ser combinados de forma quadrática, de modo que a incerteza total é: $[\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^N \sigma_i^2}]$. Estas incertezas finais são apresentadas na coluna 7 das tabelas 3.10, 3.12 e 3.13. Nessas tabelas, a segunda coluna mostra a variação na T_{eff} e as seguintes colunas mostram as variações ocasionadas nas abundâncias por $\log g$, ξ , $[\text{Fe}/\text{H}]$ e W_λ , respectivamente. A última coluna mostra a incerteza observada nas abundâncias a partir das linhas de absorção, sendo que o cálculo foi feito para elementos com mais de três linhas observadas. Para o caso da tabela 3.11, as colunas 1-4 mostram as mesmas variações que as tabelas 3.10, 3.12 e 3.13 enquanto as colunas 5-7 mostram variações iterativas nas abundâncias dos elementos do ciclo CNO.

Tabela 3.10: Incerteza nas abundâncias dos elementos químicos para a estrela HD 87109 do aglomerado NGC 3114.

Especies	ΔT_{efe} +140 K	$\Delta \log g$ +0.4	$\Delta \xi$ +0.3	[Fe/H] 0.1	ΔW_{λ} +3 mÅ	$(\sum \sigma^2)^{1/2}$	σ_{obs}
Fe I	+0.12	+0.02	-0.14	-0.01	+0.04	0.19	0.13
Fe II	-0.12	+0.18	-0.18	-0.02	+0.04	0.28	0.14
Mg I	+0.07	-0.01	-0.05	-0.01	+0.04	0.10	0.14
Al I	+0.09	-0.01	-0.06	0.00	+0.04	0.12	0.13
Si I	-0.01	+0.07	-0.08	+0.01	+0.04	0.11	0.13
Ca I	+0.17	-0.02	-0.18	-0.02	+0.04	0.25	0.10
Ti I	+0.23	-0.01	-0.13	-0.02	+0.05	0.27	0.15
Cr I	+0.16	-0.01	-0.08	-0.01	+0.05	0.19	0.22
Ni I	+0.10	+0.06	-0.11	+0.02	+0.05	0.17	0.18
Y II	0.00	+0.17	-0.20	+0.04	+0.06	0.27	0.08
Zr I	+0.26	-0.01	-0.02	-0.02	+0.06	0.27	0.16
La II	+0.03	+0.17	-0.09	+0.04	+0.04	0.20	0.10
Ce II	+0.01	+0.17	-0.08	+0.03	+0.05	0.20	0.12
Nd II	+0.03	+0.18	-0.06	+0.05	+0.06	0.21	0.18

Tabela 3.11: Incerteza nas abundâncias dos elementos do ciclo CNO para a estrela HD 87109 do aglomerado NGC 3114.

Especies	ΔT_{eff} +140 K	$\Delta \log g$ +0.4	$\Delta \xi$ +0.3 km s ⁻¹	$\Delta \log (\text{C})$ +0.20	$\Delta \log (\text{N})$ +0.20	$\Delta \log (\text{O})$ +0.20	$(\sum \sigma^2)^{1/2}$
C	+0.08	+0.02	0.00	—	-0.01	+0.05	0.10
N	+0.22	+0.05	-0.01	-0.25	—	+0.10	0.35
O	+0.03	+0.18	0.00	-0.01	-0.01	—	0.18

Tabela 3.12: Incerteza nas abundâncias químicas para a estrela NGC 5822-2.

Especies	ΔT_{eff} +100 K	$\Delta \log g$ +0.2	$\Delta \xi$ +0.2	ΔW_{λ} +3 mÅ	$(\sum \sigma^2)^{1/2}$	σ_{obs}
Fe I	-0.09	+0.00	+0.08	-0.06	0.13	0.09
Fe II	-0.06	-0.07	+0.08	-0.07	0.14	0.06
C I	-0.01	+0.04	-0.04	—	0.06	—
N I	-0.10	+0.06	+0.09	—	0.15	0.08
O I	-0.02	-0.10	-0.01	—	0.10	—
Na I	-0.06	+0.01	+0.04	-0.04	0.08	—
Mg I	-0.04	+0.01	+0.04	-0.04	0.07	0.10
Al I	-0.05	+0.00	+0.02	-0.05	0.07	0.07
Si I	0.00	-0.02	+0.03	-0.05	0.06	0.09
Ca I	-0.10	+0.01	+0.11	-0.05	0.15	0.08
Ti I	-0.13	+0.00	+0.08	-0.06	0.16	0.11
Cr I	-0.09	+0.01	+0.06	-0.06	0.12	0.13
Ni I	-0.07	-0.01	+0.06	-0.06	0.11	0.09
Y II	0.00	-0.06	+0.15	-0.06	0.17	0.13
Zr I	-0.15	+0.00	+0.01	-0.07	0.17	0.08
La II	-0.02	-0.07	+0.07	-0.06	0.12	0.12
Ce II	-0.01	-0.06	+0.14	-0.07	0.17	0.13
Nd II	-0.02	-0.07	+0.09	-0.07	0.14	0.16

Tabela 3.13: Incerteza nas abundâncias químicas para a estrela NGC 5822-201.

Especies	ΔT_{eff} +100 K	$\Delta \log g$ +0.2	$\Delta \xi$ +0.2	ΔW_{λ} +3 mÅ	$(\sum \sigma^2)^{1/2}$	σ_{obs}
Fe I	-0.11	+0.00	+0.08	-0.06	0.15	0.10
Fe II	+0.06	-0.08	+0.08	-0.06	0.14	0.09
C I	-0.06	-0.03	-0.03	—	0.07	—
N I	-0.17	-0.04	-0.04	—	0.18	0.09
O I	-0.03	-0.08	-0.01	—	0.09	—
Na I	-0.08	+0.01	+0.03	-0.04	0.09	—
Mg I	-0.05	+0.01	+0.03	-0.05	0.08	0.15
Al I	-0.06	+0.01	+0.04	-0.05	0.09	0.12
Si I	-0.02	+0.00	+0.04	-0.05	0.07	0.11
Ca I	-0.11	+0.00	+0.12	-0.05	0.17	0.07
Ti I	-0.15	+0.01	+0.07	-0.06	0.18	0.13
Cr I	-0.12	-0.01	+0.07	-0.06	0.15	0.11
Ni I	-0.10	-0.02	+0.05	-0.06	0.13	0.10
Y II	-0.01	-0.04	+0.15	-0.06	0.18	0.10
Zr I	-0.17	-0.01	+0.01	-0.08	0.18	0.09
La II	-0.02	-0.05	+0.07	-0.06	0.11	0.06
Ce II	-0.03	-0.12	+0.16	-0.08	0.22	0.16
Nd II	-0.02	-0.14	+0.06	-0.07	0.17	0.15

3.5 Comparações com a literatura

Como foi mencionado na introdução, existem estudos prévios na literatura dos dois aglomerados abertos estudados nesta tese. Para o caso de NGC 3114, destacam-se principalmente estudos prévios de fotometria, como por exemplo os artigos: Janakowitz & McCosh (1963); Schneider & Weiss (1988); Clariá et al. (1989); Sagar & Sharpless (1991); Carraro & Patat (2001); Paunzen et al. (2003). Utilizando espectroscopia de alta resolução, pode ser citado o trabalho de Santos et al. (2009) e, em baixa resolução, os trabalhos de Saffe, Levato & López-García (2005) e Saffe & Levato (2009). Como pode ser visto na tabela 3.14, a estrela NGC 3114-181 (HD 87566) é a única em comum com a amostra utilizada nesta tese e, a diferença nos resultados pode ser explicada fundamentalmente pelas listas de linhas utilizadas, pois nesse trabalho foram utilizadas duas listas (Sousa et al. 2008) e Hekker & Meléndez 2007) que também apresentam diferenças entre si.

O aglomerado NGC 5822 também apresenta estudos prévios de fotometria, veja Carraro et al. (2011) e as suas referências. A espectroscopia de média resolução foi utilizada por Luck (1994) para calcular parâmetros estelares e abundâncias. Análises em alta resolução deste aglomerado foram efetuadas por Smiljanic et al. (2009) e Santos et al. (2009). Nos artigos acima citados, a análise espectroscópica foi feita a partir da observação das gigantes vermelhas mostradas na tabela 3.14. Além disto, Maiorca et al. (2011), também em alta resolução, estudaram as anãs TATM 1103 e TATM 1014 das quais obtiveram as abundâncias dos elementos do processo-s.

Em comum com a nossa amostra encontram-se as estrelas: NGC 5822-1, NGC 5822-2, NGC 5822-102, NGC 5822-201, NGC 5822-224, NGC 5822-240, NGC 5822-316, e NGC 5822-443. A estrela NGC 5822-1 foi observada por Luck (1994) e por Smiljanic et al. (2009) mas para efeito de comparação foi tomada esta última referência, já que os referidos autores observaram essa estrela utilizando FEROS. Como pode ser observado na tabela 3.14, existe uma diferença de 0.12 dex entre os resultados encontrados nesta tese e os de Smiljanic et al. (2009), que podem ser explicados pelas diferentes listas de linhas. Para a estrela de Bário NGC 5822-2, existe unicamente o resultado prévio de Luck (1994), as diferenças em T_{eff} , ξ e $[Fe/H]$ devem-se à resolução espectral e a lista de linhas utilizada. Mesmo assim, como sera comentado no capítulo 5, essa estrela ainda apresenta sobre abundâncias de Zircônio e Neodímio. Para as estrelas NGC 5822-102 e -224 foi calculada a média dos resultados obtidos por Santos et al. (2009), utilizando as duas listas de linhas Sousa et al. (2008) e Hekker & Meléndez (2007). As diferenças apresentadas devem estar relaci-

Tabela 3.14: Parâmetros de algumas estrelas da amostra encontradas na literatura, as referências Sousa et al. (2008) e Hekker & Meléndez (2007) correspondem às listas de linhas de Fe I e Fe II utilizadas por Santos et al. (2009) para o cálculo dos parâmetros estelares, enquanto que a lista de Hamdani et al. (2000) foi utilizada por Smiljanic et al. (2009).

Artigo e estrela	T_{eff}	$\log g$	ξ	$[Fe\ i/H] \pm \sigma$ (#)
Luck et al. (1994) com lista de varias fontes				
NGC 5822-1	5100	2.25	2.2	0.09
NGC 5822-2	4800	2.50	2.5	0.04
Santos et al. (2009) com lista de Sousa et al. (2008)				
NGC 3114-13	4985	2.77	1.57	0.01 $\pm$ 0.10 (181)
NGC 3114-181	4561	1.92	2.02	-0.11 $\pm$ 0.13 (165)
NGC 3114-273	5305	3.09	1.57	0.07 $\pm$ 0.07 (183)
NGC 5822-102	5253	3.17	1.44	0.00 $\pm$ 0.08 (178)
NGC 5822-224	5214	3.14	1.41	0.06 $\pm$ 0.08 (184)
NGC 5822-438	5208	3.16	1.39	0.06 $\pm$ 0.08 (180)
Santos et al. (2009) com lista de Hekker & Meléndez (2007)				
NGC 3114-13	4871	2.60	1.45	0.01 $\pm$ 0.08 (15)
NGC 3114-181	4384	1.65	2.01	-0.23 $\pm$ 0.17 (16)
NGC 3114-273	5193	3.00	1.50	0.07 $\pm$ 0.10 (15)
NGC 5822-102	5170	3.20	1.18	0.05 $\pm$ 0.06 (13)
NGC 5822-224	5237	3.37	1.15	0.22 $\pm$ 0.08 (14)
NGC 5822-438	5148	3.21	1.13	0.18 $\pm$ 0.08 (16)
Smiljanic et al. (2009) com lista de Hamdani et al. (2000)				
NGC 5822-1	4470	2.00	1.38	+0.03 $\pm$ 0.10 (32)
NGC 5822-201	5035	2.85	1.32	+0.05 $\pm$ 0.10 (44)
NGC 5822-240	4425	1.95	1.34	+0.02 $\pm$ 0.11 (32)
NGC 5822-316	5110	3.05	1.28	+0.16 $\pm$ 0.10 (43)
NGC 5822-443	4610	2.10	1.53	-0.06 $\pm$ 0.11 (38)

Tabela 3.15: Diferenças entre os parâmetros de algumas estrelas da amostra e a literatura.

Estrela	δT_{eff}	$\delta \log g$	$\delta \xi$	$\delta [\text{Fe}/\text{H}]$
NGC 5822-1	70	0.10	0.02	0.12
NGC 5822-2	300	0.10	0.90	0.19
NGC 5822-102	212	0.59	0.11	0.16
NGC 5822-201	165	0.15	0.18	0.16
NGC 5822-224	126	0.46	0.08	0.13
NGC 5822-240	75	0.15	0.16	0.16
NGC 5822-316	10	0.25	0.22	0.21
NGC 5822-443	190	0.40	0.07	0.03
Médias	130	0.25	0.05	0.08

onadas com as listas de linhas, pois a resolução espectral é praticamente a mesma e existem diferenças importantes entre os resultados de ambas listas. A metalicidade da estrela NGC 5822-224 apresenta uma grande diferença, tal como se observa na tabela 3.14. As estrelas NGC 5822-240 e -316 apresentam pequenas diferenças em T_{eff} , $\log g$ e ξ . A diferença nas metalicidades, da ordem de 0.16 dex e 0.21 dex respectivamente, deve ser devida às listas de linhas. Na estrela NGC 5822-443, as diferenças em ξ e $[\text{Fe}/\text{H}]$ são mínimas enquanto que as diferenças em T_{eff} e $\log g$ podem se considerar normais. As diferenças entre os parâmetros obtidos nesta tese e os resultados obtidos por Luck et al. (1994), Santos et al. (2009) e Smiljanic et al. (2009) são mostrados na tabela 3.15. Como se observa, as diferenças médias dos parâmetros para estrelas em comum com a literatura mostram valores consistentes com os desvios padrão.

Capítulo 4

Análise e discussão

Os resultados obtidos nesta tese serão comparados aos resultados obtidos por Mishenina et al. (2006) para “clump giants” e com as gigantes de campo estudadas por Luck & Heiter (2007). As comparações com os outros aglomerados da literatura foram tomadas dos artigos referenciados na seção 1.2. Os resultados de aglomerados observados em alta resolução são tomados como prioridade para efeitos de comparação.

4.1 Alta rotação em NGC 3114

No aglomerado NGC 3114 foram encontradas velocidades rotacionais maiores que os valores típicos para gigantes frias (2 km s^{-1} , Carlberg et al. 2011). Na tabela 4.1 se observa que as 7 estrelas estudadas apresentam $v \sin i > 2 \text{ km s}^{-1}$, inclusive as estrelas HD 87109, HD 87479, HD 87833 e HD 304864 têm velocidades de rotação altas. Carlberg et al. (2011) investigaram aproximadamente 1 300 estrelas, das quais 30% apresentam velocidades de rotação entre 5 e 10 km s^{-1} e apenas 2% da amostra (24 estrelas) possuem velocidades de rotação mais elevadas do que 10 km s^{-1} .

A figura 4.1 mostra o alargamento das linhas de absorção com rotação crescente

Tabela 4.1: Velocidades de Rotação no aglomerado NGC 3114. Existem 4 gigantes com alta rotação HD 87109, HD 87479, HD 87833 e HD 304864.

V. rotação $v \sin i \text{ km s}^{-1}$	HD 87109	HD 87479	HD 87566	HD 87833	HD 304859	HD 304864
	6.5 ± 1.0	15.0 ± 2.0	< 4.5	8.0 ± 1.0	< 4.5	11.0 ± 2.0

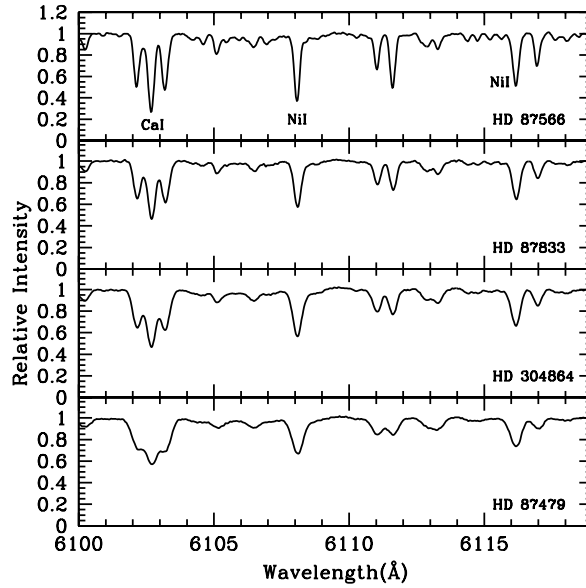


Figura 4.1: Espectros normalizados de HD 87566, HD 87833, HD 304864 e, HD 87479 com algumas linhas de absorção identificadas. Nos espectros de HD 304864 e HD 87479 observa-se o efeito das altas rotações com 11.0 km s^{-1} e 15 km s^{-1} respectivamente.

para as gigantes HD 87566, HD 87833, HD 304864 e, HD 87479. A figura 4.2 mostra as posições dessas estrelas no diagrama velocidades rotacionais projetadas *versus* temperaturas efetivas fotométricas de Carlberg et al. (2011).

A descoberta de HD 87479 como uma das gigantes frias de maior rotação levanta questões interessantes. Uma possibilidade é que HD 87479 poderia ser uma binária e estaria forçada a co-rotacionar com a sua companheira, constituindo-se numa “tidally locked binary”. Neste caso, HD 87479 seria uma binária espectroscópica de linha dupla SB2, no entanto, os nossos dados mostram que a estrela tem um espectro de linha única. Se HD 87479 é realmente uma estrela de linha única, sua rápida rotação poderia ser explicada através de dragagens do momento angular a partir de um núcleo de alta rotação ou devido à acreção de um planeta (Carlberg et al. 2011).

Em aglomerados abertos estrelas gigantes de alta rotação são muito raras. No aglomerado M 67, Melo et al. (2001) mostraram que os objetos de mais alta rotação correspondem às estrelas do “turn-off”, e que a velocidade de rotação diminui ao longo do caminho do ramo subgigante ao gigante. Outros estudos encontraram comportamento semelhante para anãs e gigantes em aglomerados abertos (Pace et al. 2010). No entanto, no aglomerado aberto Berkeley 21, uma estrela gigante (T 406) é,

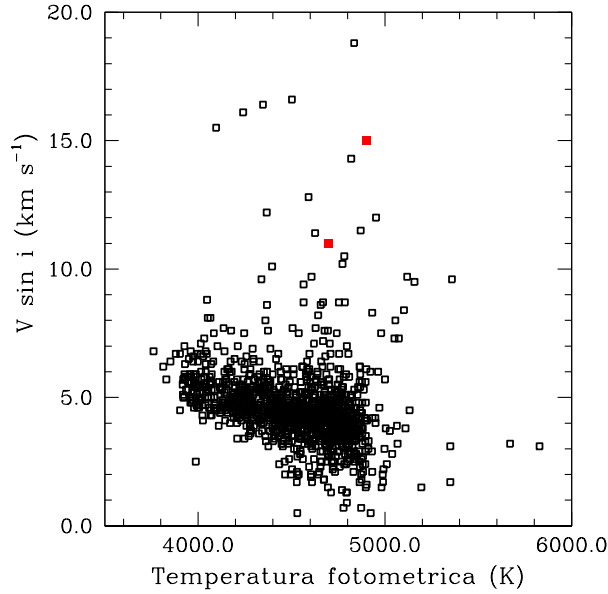


Figura 4.2: Diagrama $V \sin i$ *versus* Temperaturas fotométricas. Os dois quadrados vermelhos representam as gigantes de alta rotação HD 304864 e HD 87479 enquanto os quadrados pretos vazios representam as estrelas da amostra estudada por Carlberg et al. (2011).

além de uma estrela de alta rotação, uma gigante rica em Lítio (Young, et al. 2005). Essa gigante gira a uma velocidade similar à de HD 87479, 16 km s^{-1} . A acreção planetária é a hipótese mais provável para explicar tanto o enriquecimento em Lítio quanto a alta rotação. Outra estrela gigante desse aglomerado, T 33, analisada por Hill & Pasquini (1999), também é uma estrela rica em Lítio, mas não apresenta alta rotação. As estrelas HD 87479 e HD 304864 estabelecem outro paradigma nos possíveis mecanismos internos ou externos a fim de explicar as suas altas velocidades de rotação e o não enriquecimento em Lítio.

O alargamento causado nas linhas espectrais pelo efeito da alta rotação, faz com que as linhas fracas praticamente desapareçam, sendo quase impossível a medição das larguras equivalentes dessas linhas. Isto aconteceu com o Zircônio nas estrelas HD 87479 e HD 304864 como será mostrado na seção 4.6.

4.2 Metalicidades

O aglomerado NGC 3114 apresenta uma metalicidade da ordem solar. Clariá et al. (1989) derivaram uma metalicidade média através da fotometria de $[\text{Fe}/\text{H}] =$

-0.04 enquanto Twarog et al. (1997) derivaram uma metalicidade de $[\text{Fe}/\text{H}] = 0.02$ também utilizando fotometria. Excluindo a estrela HD 87526, o resultado obtido para NGC 3114 é de $[\text{Fe}/\text{H}] = 0.01 \pm 0.03$, valor bem próximo ao encontrado na literatura mais recente.

Como foi mostrado na tabela 3.2, HD 87526 é uma estrela pobre em metais, o que sugere que esta estrela não pertence ao aglomerado. Frye et al. (1970) concluíram, com base em fotometria UBV , que HD 87526 é uma estrela de campo. Os resultados das abundâncias dos elementos α apresentados na tabela 3.8 fornecem evidência adicional de que HD 87526 pode pertencer ao halo galáctico. A média das abundâncias dos elementos α ($[\alpha/\text{Fe}]$), obtida através dos elementos Mg, Si, Ca e, Ti, é igual a 0.21 ± 0.27 e, o seu valor de metalicidade, indicam valores típicos para estrelas do halo (Carretta et al. 2002).

O aglomerado NGC 5822 apresenta uma metalicidade média de $[\text{Fe}/\text{H}] = -0.10 \pm 0.05$, valor diferente do encontrado em trabalhos prévios utilizando espectroscopia: $+0.12$ (Luck 1994); $+0.04$ (Smiljanic, et al. 2009) e $+0.04$ (Santos, et al. 2009). Carraro, et al. (2011) fizeram análise fotométrica $UBVI$ e $uvby\text{CaH}\beta$ de NGC 5822 e, o valor de metalicidade que eles obtiveram foi de -0.02 .

Uma provável explicação para essa diferença pode estar no fato de NGC 5822 apresentar uma alta fração de binárias que não foram previamente estudadas e, pela presença de quatro estrelas particulares, duas de bário NGC 5822-2 e -201 e duas estrelas NGC 5822-4 e -312 com microturbulências e metalicidades baixas, sendo candidatas a “red straggler”. Como se observa na tabela 3.3, estas duas estrelas apresentam as menores metalicidades do aglomerado. Caso não considerássemos essas duas estrelas para o cálculo da metalicidade média, o resultado seria igual a -0.08 ± 0.10 , valor mais próximo do encontrado na literatura.

Os padrões de abundâncias para as estrelas da amostra junto com a discussão acerca das duas estrelas de Bário e as duas estrelas com microturbulência baixa, bem como a alta fração de binárias no aglomerado NGC 5822 serão discutidas nas seções seguintes. Também foi incluída a seção 3.14 para discutir as estrelas da amostra previamente estudadas na literatura.

4.3 Carbono, nitrogênio e oxigênio

Em geral, as abundâncias dos elementos do ciclo CNO obtidas para as estrelas da amostra são semelhantes às gigantes do campo da mesma metalicidade analisadas

por Mishenina et al. (2006) e Luck & Heiter (2007).

Deve-se destacar que existem três particularidades, a primeira delas é a estrela HD 87526 que apresenta um valor de abundância de Carbono correspondente a estrelas da mesma metalicidade no halo da galáxia (figura 4.3). HD 87526 apresenta também uma elevada razão $[N/Fe]=1.15$, similar à estrela HD 167768 analisada por Luck & Heiter (2007) que também apresenta um valor elevado $[N/Fe]=0.91$ a uma metalicidade também similar de -0.61 . As outras duas exceções são as estrelas NGC 5822-2 e -201, que apresentam maiores valores de abundância de $[C/Fe]$. Como será mostrado e discutido na seção 5, este fato, juntamente com as sobre-abundâncias do processo-s, são típicos de estrelas de Bário.

Em estrelas anãs não existe correlação entre a abundância $[N/Fe]$ e a metalicidade no intervalo de $-2.0 < [Fe/H] < +0.3$, o que significa que a abundância de $[N/Fe]$ é de aproximadamente zero (Clegg et al. 1981; Tomkin & Lambert 1984; Charbonel et al. 1987). No entanto, quando a estrela se torna gigante, o envelope convectivo se aprofunda levando o material processado na nucleossíntese para as camadas exteriores da estrela mudando a composição da superfície. Como consequência desta primeira dragagem, a abundância de ^{12}C é reduzida e a abundância de ^{14}N é aumentada (Lambert 1981). Os resultados para as gigantes analisadas nesta tese mostram precisamente esse fato: baixas abundâncias de $[C/Fe]$ e altas abundâncias de $[N/Fe]$.

A razão $[N/C]$ tem sido utilizada como elemento de diagnóstico para eventos da primeira dragagem em aglomerados com gigantes vermelhas (Smiljanic et al. 2009), bem como para a comparação com os modelos de evolução de Schaller et al. (1992). Para o caso dos dois aglomerados NGC 3114 e NGC 5822, os valores médios de $[N/C]$ são 0.64 ± 0.11 e 0.82 ± 0.08 respectivamente, valores próximos dos calculados por Schaller et al. (1992) para as massas do “turn off”, $4 M_{\odot}$ e $2 M_{\odot}$, respectivamente.

A figura 4.4 mostra a comparação das abundâncias do ciclo CNO encontradas nos aglomerados desta tese e os aglomerados desses artigos publicados na literatura. Como pode ser observado, não existem diferenças relevantes entre as abundâncias médias de CNO dos aglomerados da amostra e os estudados na literatura. De fato, NGC 3114 e NGC 5822 parecem concordar muito bem com os aglomerados previamente estudados. As duas estrelas de bário NGC 5822-2 e -201 são mostradas para efeitos de contraste, pois no Carbono, observa-se uma diferença relativa à maioria dos outros aglomerados.

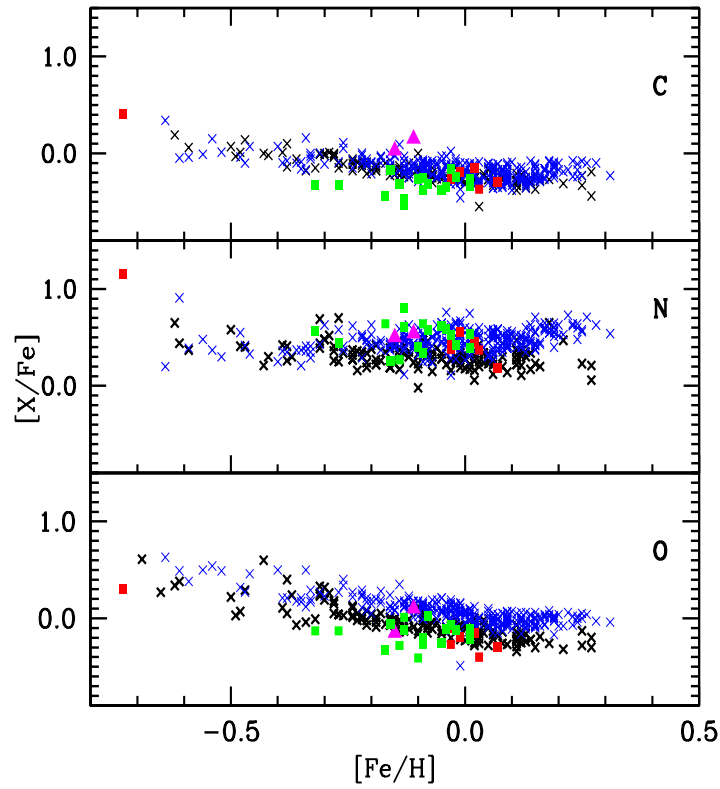


Figura 4.3: Abundâncias dos elementos do ciclo CNO em função da metalicidade. As gigantes de campo de Luck & Heiter (2007) são representadas pelas cruzeiras azuis enquanto as “clump giants” de Mishenina et al. (2006) são as cruzeiras pretas. As gigantes do aglomerado NGC 3114 são representadas pelos quadrados cheios vermelhos, enquanto os verdes representam as gigantes de NGC 5822. Os triângulos magenta representam as duas estrelas de Bário NGC 5822-2 e NGC 5822-201 que serão discutidas na seção 5.

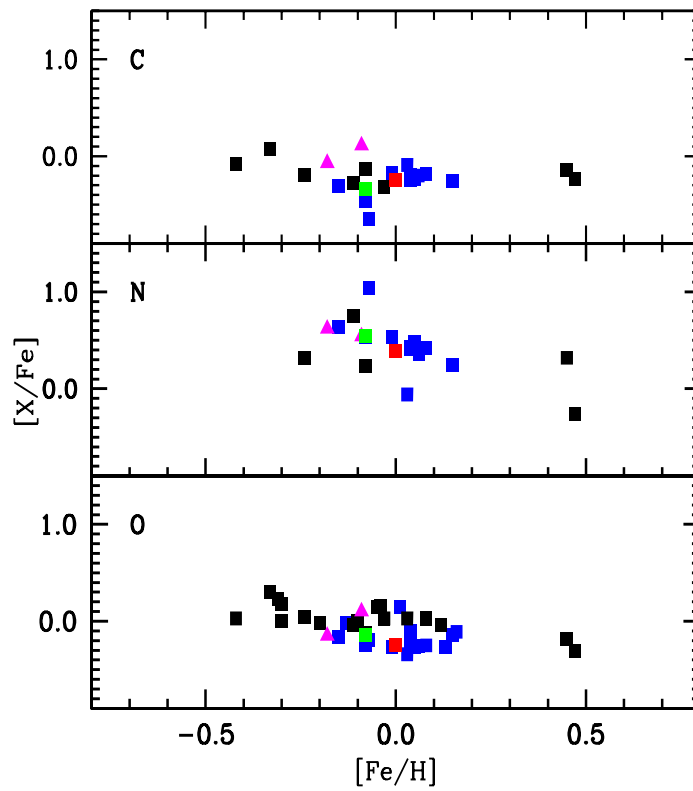


Figura 4.4: Média das abundâncias dos elementos do ciclo CNO em função da metalicidade. Circulos azuis representam os aglomerados abertos com idade inferior a 1 Gano enquanto que os circulos negros representam aos aglomerados com idade superior a 1 Gano. As médias dos aglomerados NGC 3114 e NGC 5822 estão representadas pelos quadrados vermelhos e verdes respectivamente e, as estrelas de Bário correspondem aos triângulos magenta.

4.3.1 Razão isotópica $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$

A razão isotópica do carbono já foi investigada em alguns aglomerados abertos, porém existem poucos artigos dedicados a obter esta razão. Determinações anteriores das razões isotópicas do carbono foram realizadas por Gilroy (1989); Luck (1994); Tautvaisiene et al. (2000); Smiljanic et al. (2009) e Mikolaitis et al. (2010, 2011a, 2011b).

A figura 4.5 mostra as razões isotópicas $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ das estrelas nos aglomerados NGC 3114 e NGC 5822 e em outros aglomerados da literatura em função da massa do “turn-off”. Apresenta-se também a razão isotópica $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ esperada da primeira dragagem a partir dos modelos Schaller et al. (1992) e Charbonnel & Legarde (2010). Gilroy (1989) mostrou que existe uma alteração na razão $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ para aglomerados com massa do “turn-off” inferior a $2.2 M_{\odot}$. No artigo de Smiljanic et al. (2009), os autores foram capazes de mostrar que alguns gigantes de aglomerados com massa do “turn-off” superiores a $2.0 M_{\odot}$ também poderiam ter, como as estrelas de baixa massa, razões $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ baixas. Essas baixas razões isotópicas do carbono estão presentes em estrelas mais massivas e são atribuídas a “non-canonical mixing” ou convecção thermohaline (Stancliffe et al. 2007).

Nesta tese foi investigada se haveria alguma conexão entre a posição de uma gigante no diagrama cor magnitude (figuras 2.3 e 2.4) e a razão isotópica $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ e a razão $[\text{N}/\text{C}]$. No caso do aglomerado NGC 3114, as estrelas 6 (= HD 87109), 150 (= HD 87479) e 283 (= HD 304864) são provavelmente gigantes “post-helium flash” e as estrelas 181 (= HD 87566), 238 (= HD 304859) e 262 (= HD 87833) parecem estar no ramo das gigantes. Não foi detectada nenhuma variação significativa na razão isotópica $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ entre estas classes de gigantes. No que diz respeito à razão $[\text{N}/\text{Fe}]$, somente a estrela 238 (= HD 304859) apresenta um valor relativamente baixo.

No que diz respeito do aglomerado NGC 5822, a estrela NGC 5822-1 por sua posição no diagrama cor magnitude e luminosidade deve estar em fase de “Early-AGB”. As estrelas NGC 5822-3, NGC 5822-8, NGC 5822-11, NGC 5822-51, NGC 5822-80, NGC 5822-151, NGC 5822-201 e, NGC 5822-316 são “clump giants”. As estrelas NGC 5822-240 e -443 são provavelmente “post He-flash”. O resto de estrelas está no ramo das gigantes. As estrelas NGC 5822-6 e NGC 5822-348 apresentam altos valores de $[\text{N}/\text{C}]$, o que provavelmente indica que essas estrelas estão experimentando efeitos da primeira dragagem.

Os dois aglomerados abertos NGC 3114 e NGC 5822 estudados nesta tese apresentam razões isotópicas médias do carbono de $(^{12}\text{C}/^{13}\text{C})_{3114} = 17$ e $(^{12}\text{C}/^{13}\text{C})_{5822} =$

16. Determinações da razão $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ em mais aglomerados abertos com gigantes é necessária para compreender a física dos eventos de dragagem e fenômenos de mistura.

4.4 Abundâncias de Lítio

Na pesquisa de gigantes G e K ricas em Lítio, Brown et al. (1989) mostraram que as gigantes de campo apresentam uma abundância média de Lítio $\log \varepsilon(\text{Li}) \approx 0.1$. Em gigantes de aglomerados abertos, as abundâncias de Lítio foram investigadas por Gilroy (1989), Luck (1994), Pasquini et al. (2001) para NGC 3680, Pasquini et al. (2004) para IC 4651, Gonzalez & Wallerstein (2000) para M 11 e Zacs et al. (2011) para NGC 1545 e Tr 2. O principal resultado dessas investigações mostrou que a abundância de Lítio em gigantes K evoluídas é muito baixa $-1.0 < \log \varepsilon(\text{Li}) < 1.0$, inferior à previsão dos modelos padrão de evolução de Iben (1966, 1967). Mecanismos extra de mistura são a hipótese mais provável para explicar as baixas abundâncias de Lítio observadas nos aglomerados de gigantes (Pasquini et al. 2001; Gilroy 1989).

O valor médio da abundância de Lítio para as gigantes do NGC 3114 é de $\log \varepsilon(\text{Li}) = 0.9 \pm 0.5$, valor maior que para as gigantes de aglomerados com massa de “turn-off” de $4.0 M_{\odot}$ analisadas por Gilroy (1989). Gonzalez & Wallerstein (2000) encontraram abundâncias de Lítio para o aglomerado aberto jovem M 11 que apresenta a mesma massa do “turn-off” que NGC 3114, eles obtiveram uma abundância média de Lítio 1.2 ± 0.3 , valor muito próximo do encontrado em NGC 3114.

4.5 Outros elementos: Sódio até o Níquel

Sobre-abundâncias de Sódio foram observadas nas atmosferas de estrelas supergigantes A e F (Denisenkov & Ivanov 1987), segundo esses autores, o Sódio é sintetizado no núcleo convectivo de estrelas na sequência principal durante o ciclo NeNa. Misturas que ocorrem na primeira dragagem transportam produtos do ciclo CNO para a superfície estelar. Portanto deve-se esperar enriquecimento de Sódio em supergigantes e gigantes relativas às anãs.

A Fig. 2 de Boyarchuk et al. (2001), mostra que $[\text{Na}/\text{Fe}]$ é anti-correlacionada com $\log g$, sabe-se que as linhas de Sódio sofrem de efeitos não-LTE que levam a superestimar as abundâncias. Para ter em conta os efeitos não-LTE utilizou-se o trabalho

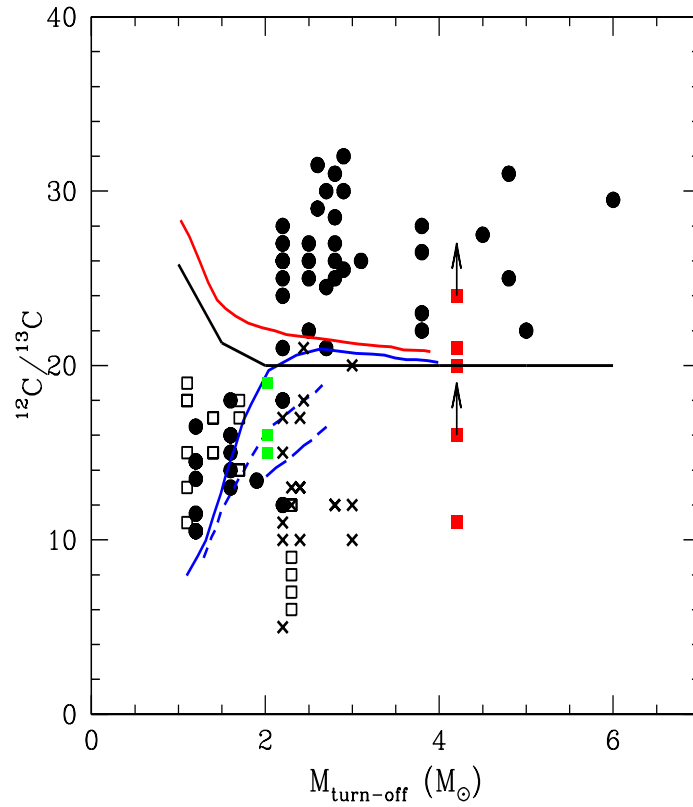


Figura 4.5: Razão isotópica $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ de gigantes em aglomerados abertos em função da massa do “turn-off”. Círculos cheios são os dados de Gilroy (1989); quadradinhos abertos são os dados de Smiljanic et al. (2009) e as cruces são os dados de Mikolaitis et al. (2011a, 2011b). Quadrados vermelhos representam as estrelas no aglomerado aberto NGC 3114 enquanto os quadrados verdes às estrelas no aglomerado NGC 5822. Linha solidada preta representa a $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ esperada de Schaller et al. (1992). As outras linhas representam os modelos de Charbonnel & Legarde (2010): vermelha o modelo “standard”; azul incluindo “thermohaline mixing”; azul tracejada curta “thermohaline mixing” mais rotação de 110 km^{-1} e azul tracejada longa “thermohaline mixing” mais rotação de 250 km^{-1} .

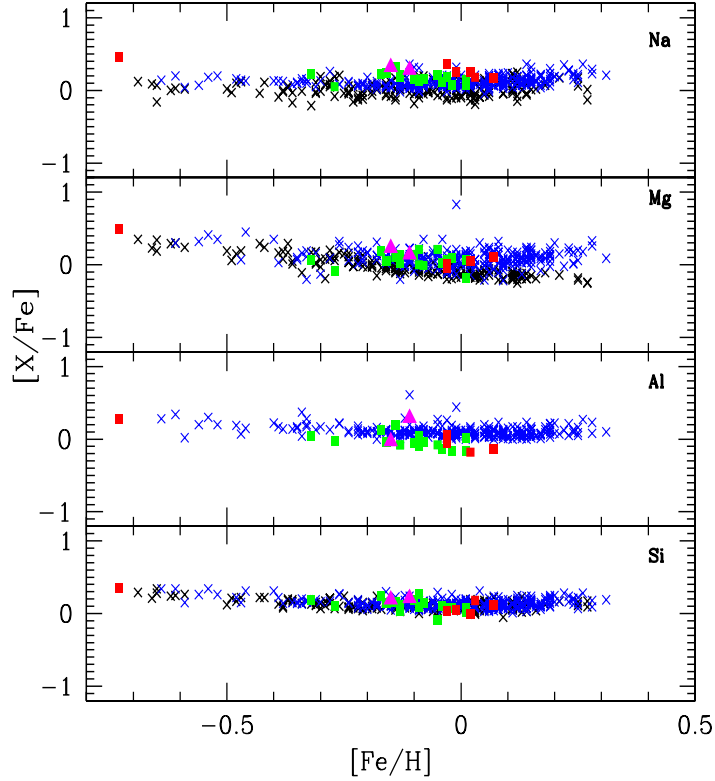


Figura 4.6: Abundâncias dos elementos de Sódio até Silício em função das metalicidades. Os símbolos são iguais à figura 4.3.

teórico de Gratton et al. (1999) que calcularam os valores das correções não-LTE para linhas de Sódio utilizando uma grade de diferentes parâmetros atmosféricos e larguras equivalentes. Para HD 87526, um não-membro do aglomerado, encontramos uma correção de aproximadamente 0.3 dex para as linhas Na λ 6154.22 Å e Na λ 6160.75 Å utilizadas na determinação das abundâncias considerando as respectivas temperatura e gravidade da estrela. O cálculo para HD 87526 dá como resultado $[\text{Na}/\text{Fe}] = 0.36$ (tabela 3.8). Para as gigantes no aglomerado NGC 3114, com larguras equivalentes de aproximadamente 120 mÅ as correções não-LTE são inferiores a 0.2 dex. Para as estrelas do aglomerado NGC 5822 não foram levados em conta efeitos de não-LTE, para o cálculo das abundâncias foram utilizadas as duas linhas λ 6154.22 Å e λ 6160.75 Å por precisamente estarem menos influenciadas pelos desvios do LTE. Os resultados para os dois aglomerados mostram concordância relativos às gigantes de campo (figura 4.6). As abundâncias de Alumínio $[\text{Al}/\text{Fe}]$ observadas nos dois aglomerados NGC 3114 e NGC 5822 apresentam valores levemente inferiores relativos às gigantes de campo da mesma metalicidade.

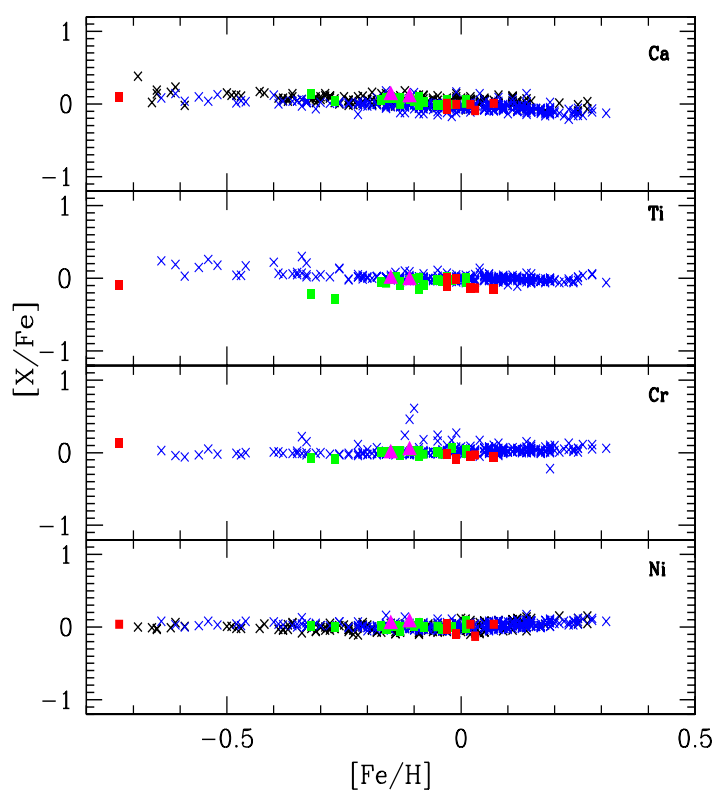


Figura 4.7: Abundâncias dos elementos de Calcio até Níquel em função das metalicidades relativas às gigantes de campo. Os Os símbolos são iguais às figuras 4.3 e 4.6.

As abundâncias de Magnésio, Silício e Cálcio para as estrelas dos dois aglomerados, NGC 3114 e NGC 5822, apresentam também boa concordância com as gigantes de campo da mesma metalicidade. O valor da abundância de Magnésio para a estrela HD 87526 são compatíveis com as estrelas observadas no halo Galáctico. As abundâncias de Titânio apresentam, em termos gerais, concordância com os resultados de Luck & Heiter (2007). Não obstante, existem algumas estrelas com abundâncias levemente inferiores às estrelas de campo. Por exemplo, destacam-se três estrelas da amostra com valores muito menores do que as gigantes de Luck & Heiter (2007). A estrela HD 87526 que pertence ao halo da Vía láctea e as duas estrelas de microturbulência baixa NGC 5822-4 e -312 (ver segundo painel da figura 4.7). Em geral, os elementos α das estrelas da amostra apresentam a mesma tendência observada nas gigantes de campo no disco local estudadas por Luck & Heiter (2007) e Mishenina et al. (2006).

Os elementos de pico de ferro são formados em grandes quantidades em Supernovas do tipo Ia e todos os seus membros devem seguir a mesma tendência com a abundância de ferro. Níquel se mantém constante com $[\text{Ni}/\text{Fe}] = 0.0$ para $-0.8 < [\text{Fe}/\text{H}] < 0.1$ (Luck & Heiter 2007). Para o Cromo, o estudo para as gigantes locais de Luck & Heiter (2007) encontrou uma correlação entre $[\text{Fe}/\text{H}]$ e $[\text{Cr}/\text{Fe}]$ com um coeficiente de 1.06, que corresponde a $[\text{Cr}/\text{Fe}] \simeq 0.0$ para um intervalo de metalicidade de $-0.8 < [\text{Fe}/\text{H}] < 0.2$. As gigantes da amostra estudada nesta tese também seguem a tendência geral observada nas gigantes de campo para as razões $[\text{Ni}/\text{Fe}]$ e $[\text{Cr}/\text{Fe}]$. A estrela HD 87526 apresenta abundâncias de Cromo similares aos valores para estrelas anãs da mesma metalicidade (Edvardsson et al. 1993). As estrelas de bário e as estrelas com microturbulência baixa não apresentam nenhuma particularidade com respeito das abundâncias do grupo do ferro.

As abundâncias médias dos elementos α e do grupo do ferro encontradas nas estrelas gigantes dos aglomerados NGC 3114 e NGC 5822 estudados nesta tese concordam muito bem com as abundâncias médias para os elementos α e do grupo do ferro nos aglomerados abertos publicados na literatura. Estas comparações são feitas nas figuras 4.8 e 4.9.

4.5.1 Duas gigantes com baixas metalicidades e velocidades de microturbulência no aglomerado NGC 5822

Como se mostrou na seção 3.14, não há estudos espectroscópicos prévios sobre as

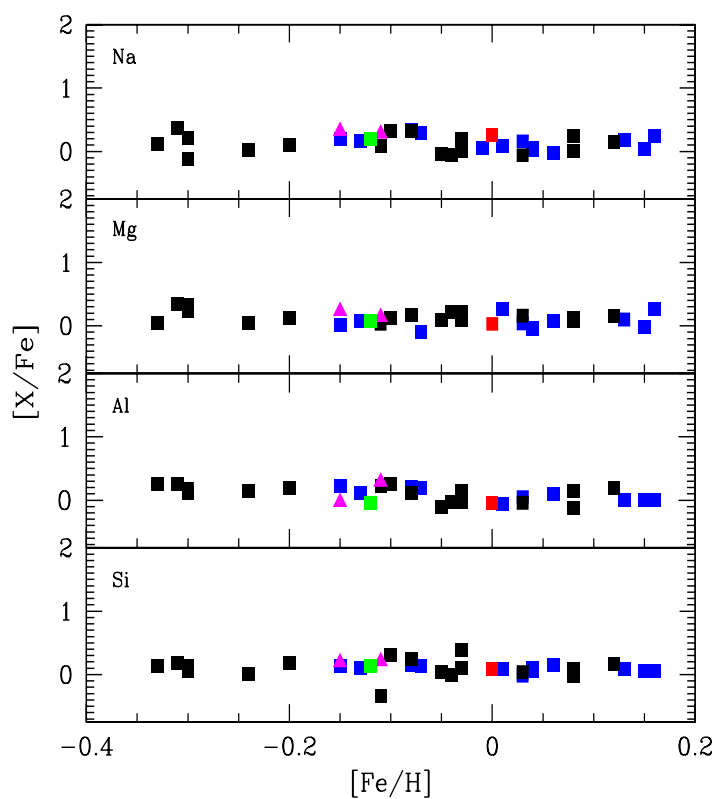


Figura 4.8: Médias das abundâncias dos elementos de Sódio até Silício em função das metalicidades. Quadrados azuis representam os aglomerados abertos jovens enquanto os negros aos aglomerados abertos mais velhos. Os aglomerados tomados da literatura estão referidos na seção 1.2.

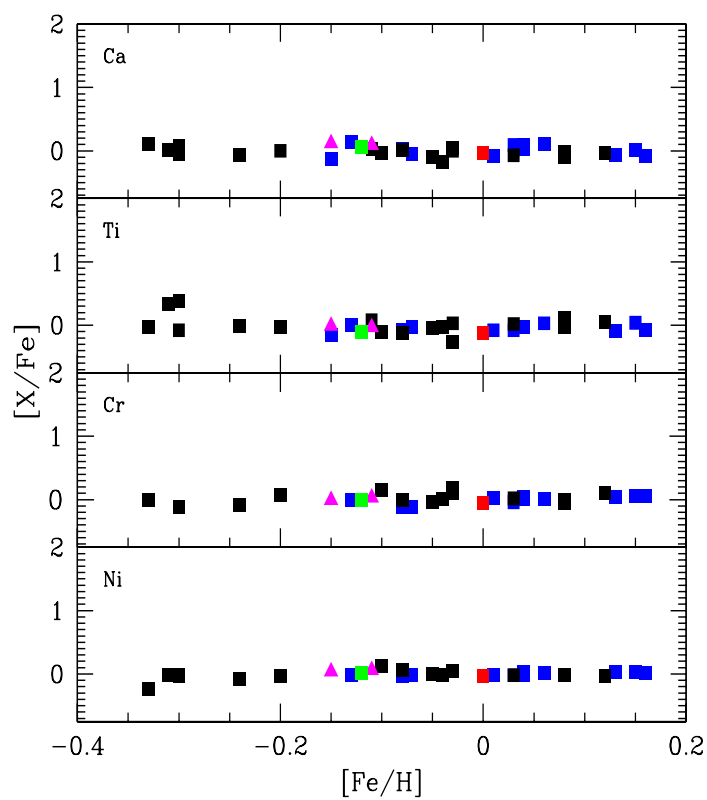


Figura 4.9: Abundâncias dos elementos desde o Cálcio até o Níquel em função das metalicidades. Referências e símbolos como na figura 4.8.

estrelas NGC 5822-4 e -312 analisadas nesta tese, não obstante Peña Suárez (2012) encontrou na amostra do aglomerado aberto NGC 3680 a estrela #34 com uma velocidade microturbulenta similar à de NGC 5822-4 (ver tabela 3.3). A estrela NGC 3680-34 foi estudada fotometricamente por Eggen (1983), Anthony-Twarog et al. (1991) e Nordström et al. (1996). Esses artigos propõem a idéia que talvez a gigante NGC 3680-34 seja uma “Red Straggler”. Esse termo é usado para denotar às estrelas localizadas ao lado vermelho da sequência principal ou no ramo subgigante do diagrama cor magnitude. Eggen (1981 e 1983) propôs que as “Red Stragglers” poderiam ser interpretadas como a contraparte evoluída das “Blue Stragglers”. As estrelas NGC 5822-4 e -312 (ao igual que a estrela NGC 3680-34) estão localizadas na parte superior do ramo subgigante no lado vermelho do diagrama cor magnitude tal como o indicam os quadrados azuis na figura 2.4.

Estrelas “Red Stragglers” analisadas através de fotometria foram também encontradas nos aglomerados abertos M 67 (Mathieu et al. 2003) e NGC 6791 (Kaluzny 2003) bem como no aglomerado globular 47 Tucanae (Albrow et al. 2001). Como não foram feitas análises espectroscópicas dessas estrelas, não é possível dizer se a baixa microturbulência é uma característica das estrelas localizadas na parte vermelha do diagrama cor magnitude.

Na literatura existem trabalhos relatando estrelas gigantes com baixas microturbulências. Por exemplo as estrelas HD 192947 e HD 216763 estudadas por Foy (1978 e 1981) e HD 44007, HD 74462, BD+26°595 e BD+30°2611 estudadas por Proust & Foy (1988) apresentavam baixos valores de velocidades microtubulentas para estrelas consideradas gigantes. Não obstante esses resultados foram rebatidos por McWilliam (1990), Takeda et al. (2008) e, Mashonkina et al. (2012) utilizando espectros observados em alta resolução.

Como se observa na tabela 4.2, as metalicidades, velocidades de microturbulência e, abundâncias (em função do Hidrogênio $[X/H]$) para as estrelas NGC 5822-4 e -312 são menores que para o resto das estrelas do aglomerado, sendo bem menores para os elementos Mg, Ti, Cr e Ni. Se destaca o Titânio com abundâncias de -0.65 dex e -0.61 dex respectivamente, bem menores que o resto do aglomerado e, sendo por sua vez, as menores abundâncias relativas aos outros elementos. Além disso, a estrela NGC 5822-4, assim como para as outras estrelas do aglomerado NGC 5822, apresenta sobre-abundâncias nos elementos pesados do processo-s comparáveis às outras estrelas do mesmo aglomerado (ver a tabela 4.3). O comportamento na estrela NGC 5822-312 é similar referente às abundâncias negativas dos elementos alfa. Não obstante, existe diferença referente às abundâncias do processo-s, pois

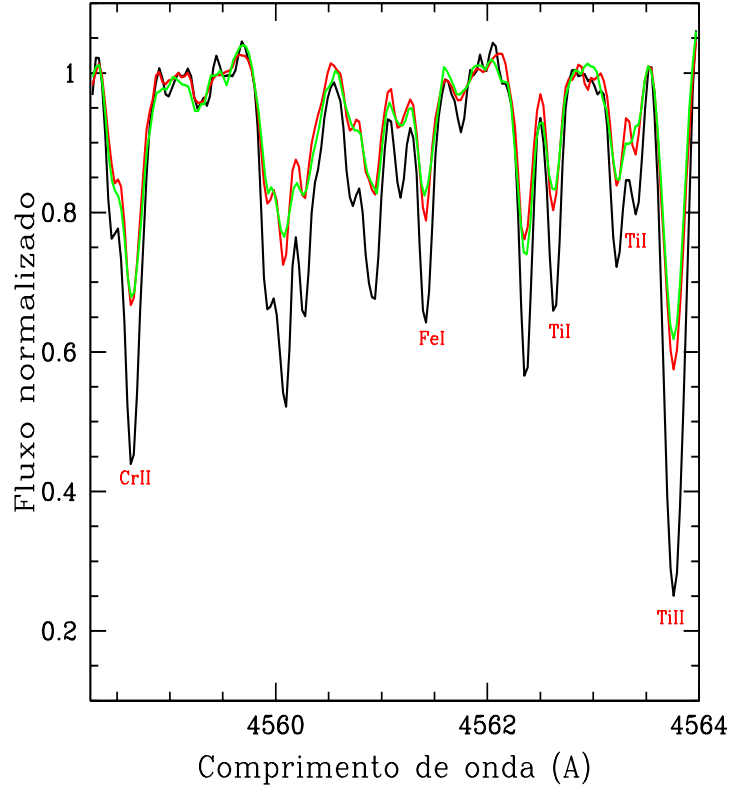


Figura 4.10: Velamento na região espectral λ 4958–4964Å. Espectros normalizados das estrelas com baixas microturbulências NGC 5822-4 (espectro em vermelho) e -312 (espectro em verde) comparados com a gigante NGC 5822-3 (espectro em preto) de microturbulência 1.4 km s^{-1} . Algumas linhas são identificadas.

para os elementos leves do processo-s a tendência também é negativa.

A explicação para as baixas microturbulências e metalicidades e abundâncias negativas, principalmente notável nas metalicidades e nos elementos alfa (vistos na forma $[X/H]$), se deve à existência de um velamento ocasionado por uma companheira binária, de forma tal que o contínuo da companheira ocasiona o velamento nas linhas de absorção das estrelas com baixa microturbulência. Na figura 4.10 mostra-se o efeito sob as linhas de absorção que por sua vez fica refletido nas metalicidades e, abundâncias químicas, tal com se mostrou na tabela 4.2.

O velamento é um fenômeno presente em outras situações astrofísicas, como por exemplo nas estrelas T-Tauri clássicas. Nesse caso o velamento está relacionado com a presença de material circunstelar (Hartigan et al. 1989, 1991).

As figuras 4.10 e 4.11 corroboram o que foi mostrado nas tabelas 4.2 e 4.3. Como pode ser observado, o velamento é maior nas linhas dos elementos do grupo do ferro e nas linhas dos elementos alfa enquanto que diminui nas linhas elementos

Tabela 4.2: Parâmetros estelares e razões de abundâncias dos elementos α e do pico do ferro na forma $[X/H]$.

Estrela	T_{eff}	$\log g$	ξ	Fe	Na	Mg	Al	Si	Ca	Ti	Cr	Ni
NGC 5822-1	4400 K	1.90	1.40	-0.09	0.04	-0.09	-0.19	0.18	-0.11	-0.29	-0.15	-0.02
NGC 5822-2	5100 K	2.40	1.60	-0.15	0.17	0.08	-0.18	0.04	-0.03	-0.16	-0.16	-0.11
NGC 5822-3	5000 K	2.70	1.40	-0.10	0.06	0.04	-0.15	0.08	-0.04	-0.11	-0.07	-0.08
NGC 5822-4	4900 K	2.40	0.00	-0.27	-0.22	-0.35	-0.30	-0.16	-0.22	-0.65	-0.39	-0.27
NGC 5822-6	5100 K	2.90	1.20	-0.04	0.08	-0.01	-0.17	0.06	-0.06	-0.09	-0.07	-0.07
NGC 5822-8	5000 K	2.70	1.40	-0.08	0.08	-0.09	-0.12	0.06	-0.05	-0.21	-0.11	-0.08
NGC 5822-11	5000 K	2.60	1.30	-0.16	0.08	-0.11	-0.20	-0.02	-0.06	-0.25	-0.14	-0.20
NGC 5822-51	5100 K	2.80	1.20	0.01	0.09	-0.17	-0.15	0.08	0.09	0.02	0.06	0.12
NGC 5822-80	5100 K	3.00	1.10	-0.02	0.05	0.07	-0.19	0.06	-0.03	-0.05	0.06	-0.02
NGC 5822-102	5000 K	2.60	1.20	-0.13	0.06	-0.10	-0.21	-0.09	-0.14	-0.25	-0.17	-0.20
NGC 5822-151	4900 K	2.50	1.20	-0.17	0.06	0.02	-0.04	0.07	-0.10	-0.24	-0.15	-0.15
NGC 5822-201	5200 K	2.70	1.50	-0.11	0.17	0.03	0.18	0.10	-0.02	-0.14	-0.08	-0.05
NGC 5822-224	5100 K	2.80	1.20	0.01	0.15	0.07	0.02	0.03	0.02	-0.05	0.01	-0.01
NGC 5822-240	4500 K	1.80	1.50	-0.14	0.18	-0.04	0.06	0.02	-0.04	-0.11	-0.10	-0.12
NGC 5822-312	4900 K	2.20	0.70	-0.32	-0.09	-0.25	-0.28	-0.14	-0.13	-0.61	-0.41	-0.30
NGC 5822-316	5100 K	2.80	1.50	-0.05	0.16	0.16	-0.13	-0.14	-0.07	-0.08	-0.04	-0.04
NGC 5822-348	5000 K	2.60	1.30	-0.13	0.09	0.00	-0.21	-0.01	-0.02	-0.20	-0.09	-0.12
NGC 5822-375	4700 K	2.10	1.50	-0.09	0.05	0.12	-0.05	0.00	0.03	-0.08	-0.06	-0.04
NGC 5822-443	4800 K	2.50	1.60	-0.03	0.16	0.03	-0.09	0.04	0.04	0.00	-0.06	-0.01

Tabela 4.3: Parâmetros e razões de abundâncias dos elementos do processo-s na forma $[X/H]$.

Estrela	Y II	Zr	La II	Ce	Nd	$[s/H]$
NGC 5822-1	0.15	-0.21	0.23	0.12	0.23	0.10
NGC 5822-2	0.78	0.45	0.60	0.60	0.65	0.62
NGC 5822-3	0.05	0.13	0.24	0.25	0.29	0.19
NGC 5822-4	-0.09	-0.23	0.01	0.13	0.69	0.10
NGC 5822-6	-0.03	0.27	0.17	0.19	0.54	0.23
NGC 5822-8	0.01	-0.06	0.18	0.20	0.26	0.12
NGC 5822-11	-0.30	0.09	0.08	0.09	0.26	0.04
NGC 5822-51	0.18	0.10	0.31	0.26	0.31	0.23
NGC 5822-80	0.16	0.05	0.28	0.39	0.36	0.25
NGC 5822-102	-0.02	0.01	0.05	0.05	0.17	0.05
NGC 5822-151	-0.10	-0.20	0.01	0.02	0.20	-0.01
NGC 5822-201	0.72	0.64	0.77	0.78	0.70	0.72
NGC 5822-224	0.18	0.21	0.34	0.42	0.36	0.30
NGC 5822-240	-0.07	-0.06	0.20	0.02	0.42	0.10
NGC 5822-312	-0.34	-0.28	0.08	-0.20	-0.10	-0.17
NGC 5822-316	-0.08	0.11	0.29	0.26	0.42	0.20
NGC 5822-348	-0.16	-0.10	0.01	0.06	0.23	0.01
NGC 5822-375	-0.01	-0.02	0.23	0.12	0.28	0.12
NGC 5822-443	0.18	0.16	0.38	0.24	0.35	0.26

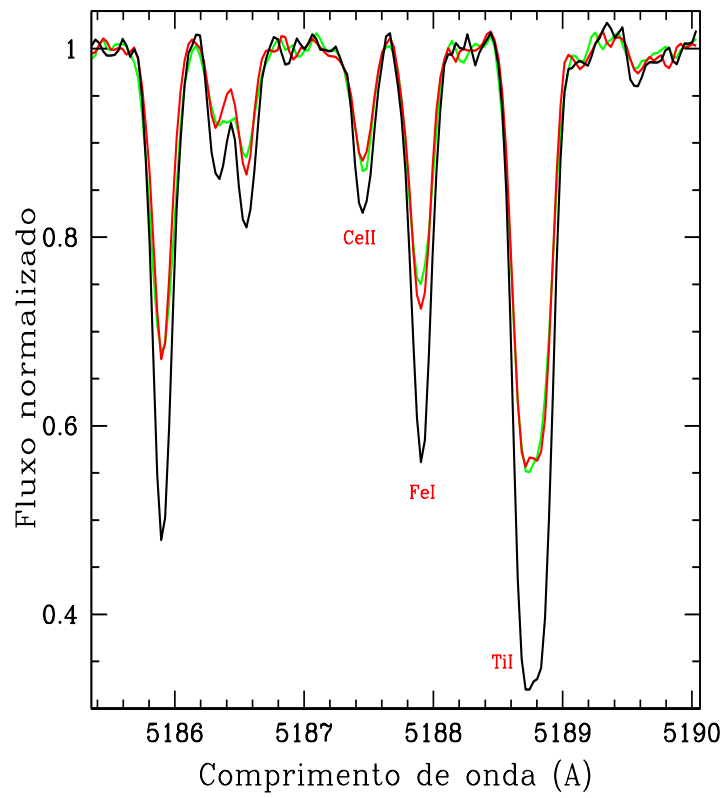


Figura 4.11: Velamento na região espectral λ 5185–5190Å. Cores dos espectros como na figura 4.10. São identificadas a linhas de Ce II, Fe I e, Ti I.

do processo-s. A figura 4.11 mostra que o velamento é menor na linha do Ce II, o Neodímio também apresenta o mesmo comportamento nas duas estrelas sendo mais evidente na estrela NGC 5822-4 tal e como se mostra na tabela 4.3.

4.6 Elementos pesados

A análise espectroscópica das abundâncias dos elementos pesados nas gigantes vermelhas de aglomerados são escassos na literatura e a maioria dos poucos resultados disponíveis estão baseados em um ou dois elementos com apenas algumas linhas analisadas. Não obstante, Mishenina et al. (2006, 2007) e Luck & Heiter (2007) conseguiram, além das abundâncias dos elementos do ciclo CNO, elementos α e elementos do pico do ferro, calcular abundâncias dos elementos do processo-s nas gigantes de campo investigadas por eles. Nessas análises, os autores descobriram que as razões de abundância $[X/Fe]$ para Y, La, Ce e Nd são próximas de zero para metalicidades no intervalo $-0.7 < [Fe/H] < +0.3$.

Na Figura 4.12 mostramos os resultados para estrelas da amostra comparadas com as gigantes de campo. Como pode ser claramente observado, as abundâncias de La, Ce e Nd são superiores nas gigantes dos aglomerados NGC 3114 e NGC 5822 relativas às gigantes de campo. O resultado é principalmente notável nas estrelas do aglomerado NGC 5822. Na realidade, além das duas estrelas de Bário, a estrela de microturbulência zero NGC 5822-4 apresenta alta abundância de Neodímio $[Nd/Fe]$ e a média das abundâncias do processo-s $[s/Fe]$ é a maior após as estrelas de Bário. A outra estrela de baixa microturbulência apresenta abundâncias do processo-s compatíveis com as outras estrelas do aglomerado NGC 5822. A estrela HD 87526 tem abundâncias com a mesma tendência da observada nas gigantes do aglomerado NGC 3114 e levemente superiores às gigantes do campo. Na estrela de alta rotação HD 87479 não foi possível medir linhas de Zircônio enquanto que, na outra estrela HD 304864, somente algumas poucas linhas foram medidas, como se mostrou na tabela 3.9.

Como pode ser observado na figura 4.12, não há abundâncias de Zircônio publicadas na literatura para as gigantes de campo. De fato, obter a abundância deste elemento é mais complicado, pois geralmente as suas linhas estão misturadas e/ou são muito fracas. Por exemplo, nos artigos de Maiorca et al. (2011) e Friel et al. (2010), o zircônio é estudado com base em poucas linhas. As estrelas da amostra apresentaram mais de 3 linhas de zircônio nos espectros, principalmente nas estrelas

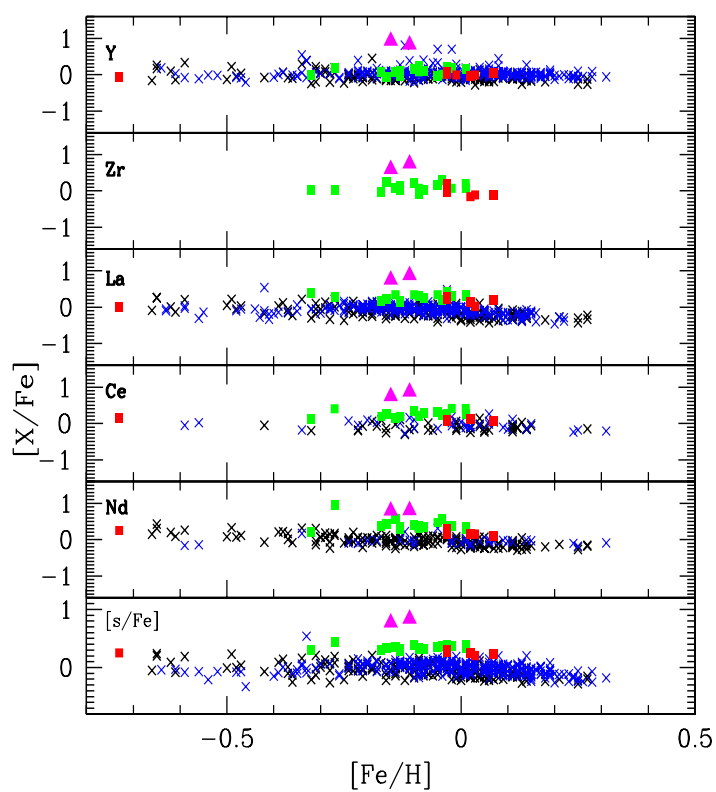


Figura 4.12: Abundâncias dos elementos do processo-s em função das metalicidades relativas às gigantes de campo. Os símbolos são os mesmos que nas figuras 4.3, 4.6 e, 4.7.

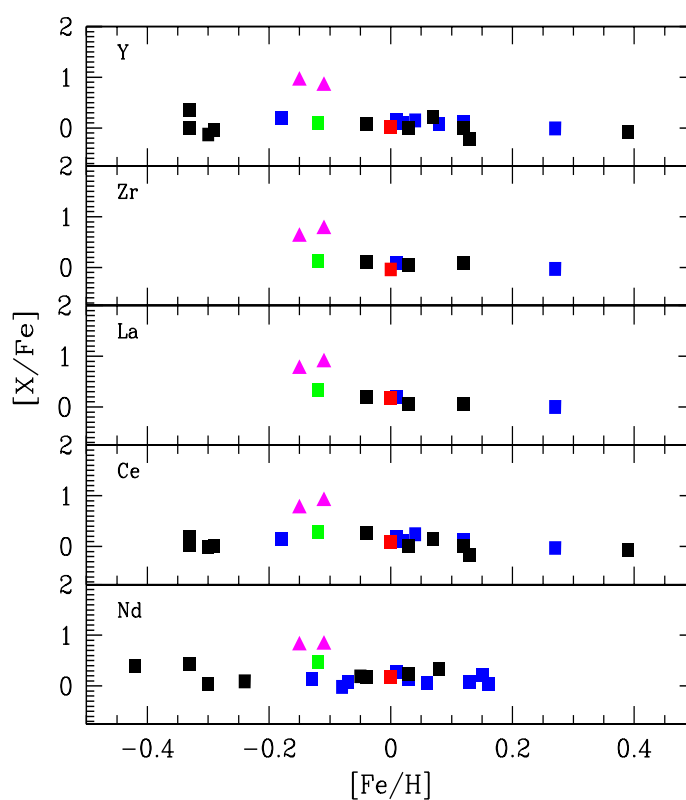


Figura 4.13: Abundâncias médias dos elementos do processo-s em função das metalicidades relativas às gigantes dos outros aglomerados. Os símbolos são os mesmos que nas figuras 4.4, 4.8 e, 4.9.

do aglomerado NGC 5822. As exceções foram a estrela pobre em metais HD 87526 e as já mencionadas estrelas de alta rotação, HD 87479 e HD 304864.

Como é observado na figura 4.13, as abundâncias médias dos elementos do processo-s para as estrelas gigantes dos aglomerados NGC 3114 e NGC 5822 concordam com os resultados publicados na literatura para estrelas gigantes de aglomerados abertos. Relativas às gigantes de campo, as abundâncias dos elementos pesados das estrelas gigantes nos aglomerados estudados nesta tese são maiores.

4.7 Provável tendência das abundâncias com a idade

Na literatura está bem estabelecida a existência de uma anti-correlação entre $[O/Fe]$ e $[Na/Fe]$ nos aglomerados globulares (Carretta et al. 2006). Nesses aglomerados, a provável fonte da anti-correlação O-Na é a contribuição de gerações prévias de gigantes AGB de massa intermediária com interiores suficientemente quentes para que ocorra o “Hot Bottom Burning”. Essas gerações prévias de estrelas AGB de massa intermediária poluíram o meio inter-aglomerado e posteriormente formaram-se estrelas pobres em Oxigênio e ricas em Sódio.

Nesta tese investigou-se o comportamento das razões $[O/Fe]$ e $[Na/Fe]$ nos aglomerados NGC 3114 e NGC 5822. Na literatura existem análises sobre a existência da anti-correlação entre $[O/Fe]$ e $[Na/Fe]$ nos aglomerados abertos. Como exemplo estão os trabalhos de Gratton et al. (2004), de Silva, et al. (2009) e Geisler et al. (2012).

As figuras 4.14 e 4.15 mostram em detalhe o comportamento das abundâncias de Oxigênio e Sódio com a idade. Os artigos utilizados para comparação foram mencionados na seção 1.2 da introdução. A idade dos aglomerados abertos foi tomada da compilação de Chen et al. (2003). Alguns aglomerados na compilação feita nesta tese estão em comum com a compilação feita por de Silva, et al. (2009).

Como é observado nas figuras 4.14 e 4.15, as razões de $[O/Fe]$ e $[Na/Fe]$ normalizadas utilizando as abundâncias solares de Asplund et al. (2009) são em geral maiores que as abundâncias calculadas sob a normalização de Grevesse & Sauval (1998). Nessas duas figuras, no intervalo de 0–2 Ganos, as razões de $[O/Fe]$ apresentam uma tendência geral de aumento seguida de uma suave diminuição enquanto nas razões de $[Na/Fe]$ a tendência geral é de diminuição seguida de um suave aumento. Isto mostra que a abundância de Oxigênio dos aglomerados abertos mais

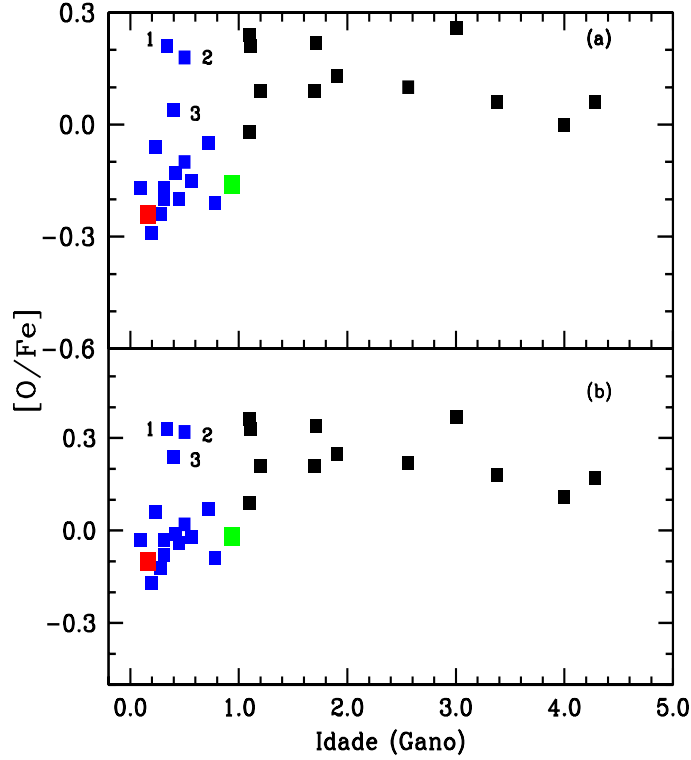


Figura 4.14: Abundâncias médias de $[O/Fe]$ *versus* idade para diferentes aglomerados abertos. Quadrados azuis representam os aglomerados abertos jovens enquanto os negros representam aos aglomerados mais velhos. Os quadrados vermelho e verde representam os aglomerados NGC 3114 e NGC 5822, respectivamente. O panel superior (a) representa as abundâncias de $[O/Fe]$ sob a normalização de Grevesse & Sauval (1998) e o inferior (b) as abundâncias sob a normalização de Asplund et al. (2009).

jovens tendem a ser menores do que nos aglomerados mais velhos e que a abundância de Sódio dos aglomerados abertos mais jovens tendem a ser maiores do que nos mais velhos.

Na figura 4.14 existem aglomerados que escapam da tendência, no caso das abundâncias do Oxigênio existem três quadrados azuis que representam a razão $[O/Fe]$ dos aglomerados jovens: NGC 2099 (rotulados como “1”) com $[O/Fe]_{GS98} = 0.21$ e $[O/Fe]_{Asp09} = 0.33$ (Pancino et al. 2010); NGC 1245 (rotulado como “2”) com $[O/Fe]_{GS98} = 0.19$ e $[O/Fe]_{Asp09} = 0.31$ e NGC 1817 (rotulados como “3”) com $[O/Fe]_{GS98} = 0.08$ e $[O/Fe]_{Asp09} = 0.20$, ambos analisados por Jacobson et al. (2011), onde GS98 e Asp09 representam as normalizações de Grevesse & Sauval (1998) e Asplund et al. (2009) respectivamente. Chen et al. (2003) encontraram idades mais

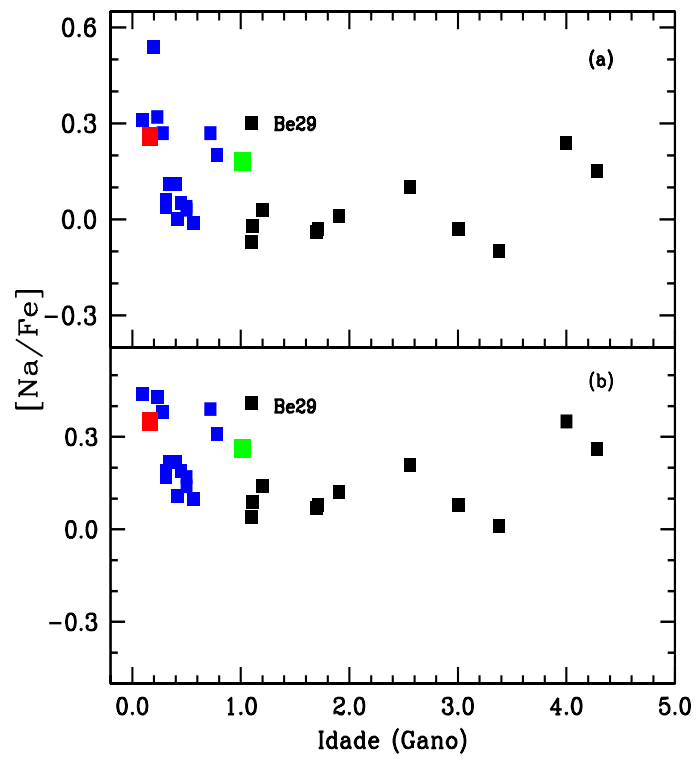


Figura 4.15: Abundâncias de $[Na/Fe]$ *versus* idade para diferentes aglomerados abertos. Símbolos iguais que na figura 4.14.

jovens para NGC 1245 e NGC 1817 (0.5 e 0.4 Ganos, respectivamente), enquanto Jacobson et al. (2011) encontraram idades maiores para ambos os aglomerados (1.1 Ganos). Se realmente NGC 1245 e NGC 1817 têm idades de 1.1 Ganos, estas “altas” abundâncias de $[O/Fe]$ teriam que ser deslocadas para o lado direito nas figuras 4.14 e 4.15 na parte dos aglomerados mais velhos, ficando o aglomerado NGC 2099 como a exceção dos aglomerados jovens por sua alta abundância de $[O/Fe]$.

Na figura 4.15 há um dado que pode escapar dessa tendência. Esse ponto é o aglomerado velho Be 29 com uma idade de 1.1 Ganos e abundância de $[Na/Fe]_{GS98} = +0.3$ ($[Na/Fe]_{Asp09} = +0.4$). No entanto, segundo Chen et al. (2003), Be 29 poderia ser mais velho do que 1.1 Ganos e teria 4.3 Ganos de idade de acordo a Yong et al. (2005). Portanto, sua razão $[Na/Fe]$ seria semelhante aos aglomerados NGC 7142 e NGC 188 com idades de 4.0 Ganos e 4.3 Ganos cujas abundâncias $[Na/Fe]$ foram obtidas por Jacobson et al. (2008) e Friel et al. (2010).

Nas figuras 4.16 e 4.17 mostra-se a anti-correlação entre Oxigênio e Sódio sob as normalizações de GS98 e Asp09, respectivamente. O ponto extremo azul representa a abundância média das gigantes em NGC 6475 (Villanova et al. 2009). Também se mostram os resultados de $[O/Fe]$ e $[Na/Fe]$ sem qualquer normalização para o aglomerado globular NGC 2808 (Carretta et al. 2006). Como se mostra nas duas figuras, é provável que exista nos aglomerados abertos uma anti-correlação O-Na como a observada nos aglomerados globulares.

Uma situação análoga se apresenta quando se observam as tendências das abundâncias com as distâncias Galactocêntricas, tal e como foi mencionado na introdução e como se mostra na figura 1.2. Com base nesta figura pode-se deduzir um comportamento das abundâncias de Oxigênio e Sódio em relação às distâncias galactocêntricas análogo ao comportamento em relação às idades. Infelizmente, o Sódio apresenta uma dispersão maior que nas idades e a tendência de diminuição não é tão clara como a tendência de aumento até os 10 kpc do Oxigênio.

Na figura 4.18 mostra a dependência da massa do “turn-off” com a idade para alguns aglomerados. Infelizmente, não existem muitas determinações das massas do “turn-off” para aglomerados disponíveis na literatura. Os resultados desta tese para NGC 3114 e NGC 5822 refletem os resultados de Gilroy (1989), Smiljanic et al. (2009), Mikolaitis et al. (2011a), Luck (1994) e, Gonzalez & Wallerstein (2000) no sentido que os aglomerados abertos mais jovens apresentam massas maiores que os aglomerados mais velhos pois os mais jovens contém um grande número de estrelas de massa intermediária. Assim a anticorrelação Na-O vista em aglomerados de até

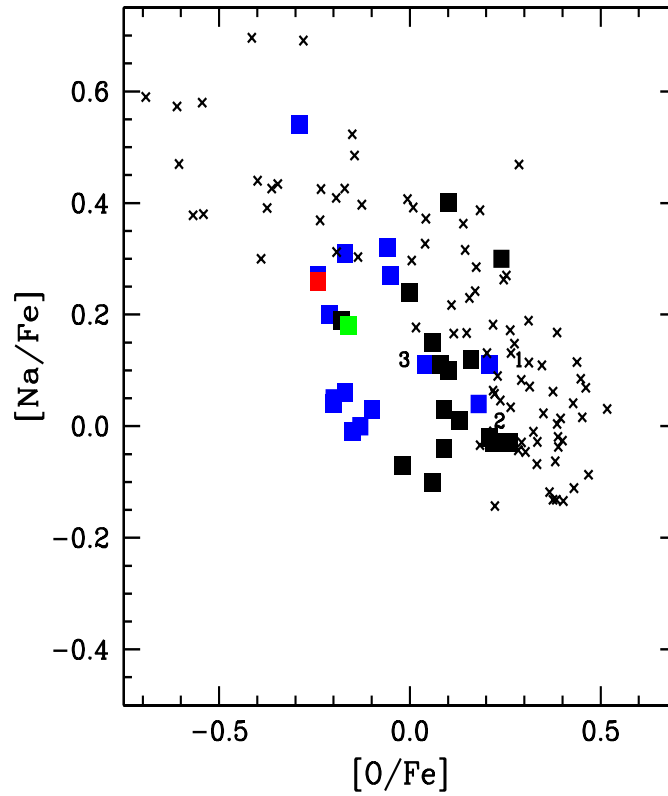


Figura 4.16: Abundância $[O/Fe]$ *versus* $[Na/Fe]$ para aglomerados abertos. Os quadrados azuis representam os aglomerados jovens enquanto os pretos representam os mais velhos. O quadrado vermelho representa ao aglomerado NGC 3114 e o verde ao NGC 5822. As estrelas do aglomerado globular NGC 2808 são representadas pelas cruces. A abundância de NGC 2808 foi tomada de Carretta et al. (2006). As abundâncias estão normalizadas para valores solares de Grevesse & Sauval (1998). Os pontos 1, 2 e 3 representam os aglomerados NGC 2099, NGC 1245 e NGC 1817.

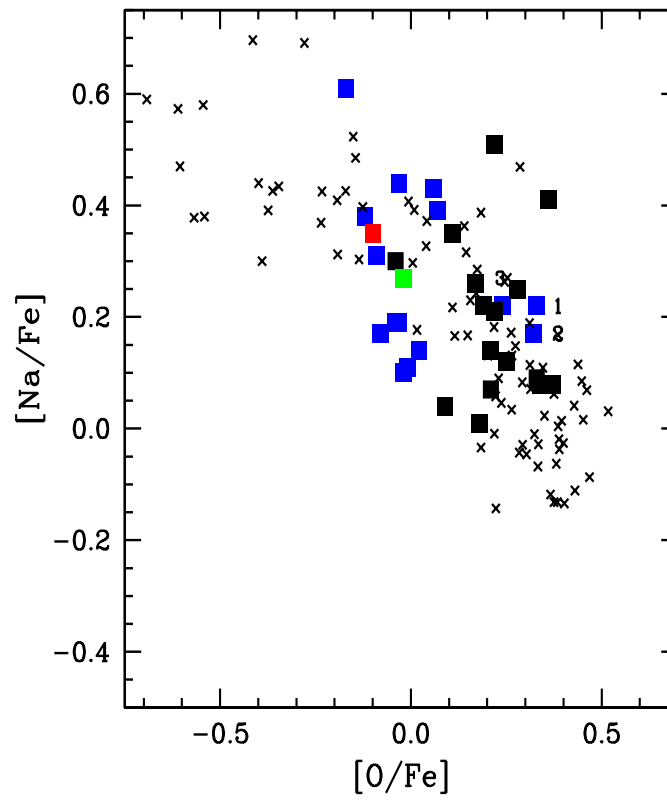


Figura 4.17: Igual que a figura 4.16 porém com a normalização de Asplund et al. (2009).

1.0 Ganos (figuras 4.14 a 4.17) seria uma consequência da nucleossíntese interna ocorrendo nessas estrelas, isto é, a ocorrência dos ciclos Oxigênio-Nitrogênio (ON) e Neônio-Sódio (NeNa). Dessa forma, o Oxigênio deve ser consumido pelo ciclo ON enquanto o Sódio é realçado pelo ciclo NeNa. Em aglomerados globulares, a provável fonte da anticorrelação NaO é a contribuição de gerações previas de gigantes AGB de massa intermédia com interiores o suficientemente quentes para que ocorra o “Hot Bottom Burning”. Essas gerações previas de estrelas AGB de massa intermediária poluíram o meio inter-aglomerado e posteriormente formaram-se estrelas pobres em Oxigênio e ricas em Sódio (de Silva et al. 2009). No que diz respeito às gigantes dos aglomerados mais jovens, provavelmente seus envelopes convectivos puderam ter sido capazes de penetrar a uma profundidade suficiente para que a queima de Hidrogênio possa ocorrer através do ciclo CNO. Outra possibilidade para anti-correlação Na-O observada é que, como nos aglomerados globulares, a primeira geração de estrelas em um aglomerado aberto também tenham poluído as estrelas que observamos hoje. Também poder-se sugerir que o enriquecimento do Sódio visto nos aglomerados mais velhos seja devido à ocorrência do ciclo NeNa. Parece que o ciclo ON não ocorre nos aglomerados mais velhos os quais apresentam em sua maioria estrelas de baixa massa. Isto explicaria porque os aglomerados mais velhos também apresentam baixas razões de $[O/Fe]$ similares às abundâncias observadas nos aglomerados abertos mais jovens.

Finalmente, analisamos o comportamento das abundâncias dos elementos pesados com a idade. Os resultados para as abundâncias do processo-s nos dois aglomerados analisados nesta tese estão em concordância com os resultados de Maiorca et al. (2011). Recentemente, estes autores apresentaram resultados da sua investigação sobre o padrão de abundâncias do processo-s baseados em uma grande amostra de 19 aglomerados abertos. Neste estudo, após a análise da amostra composta por anãs e gigantes vermelhas, eles notaram que os aglomerados abertos mais jovens foram os mais enriquecidos em elementos do processo-s. Na figura 4.19 mostra-se a comparação dos resultados das abundâncias do processo-s em função da idade para as estrelas de NGC 3114 e NGC 5822 relativos aos aglomerados estudados por Maiorca et al. (2011). Como pode ser observado, os resultados desta tese também seguem a tendência observada por Maiorca et al. (2011).

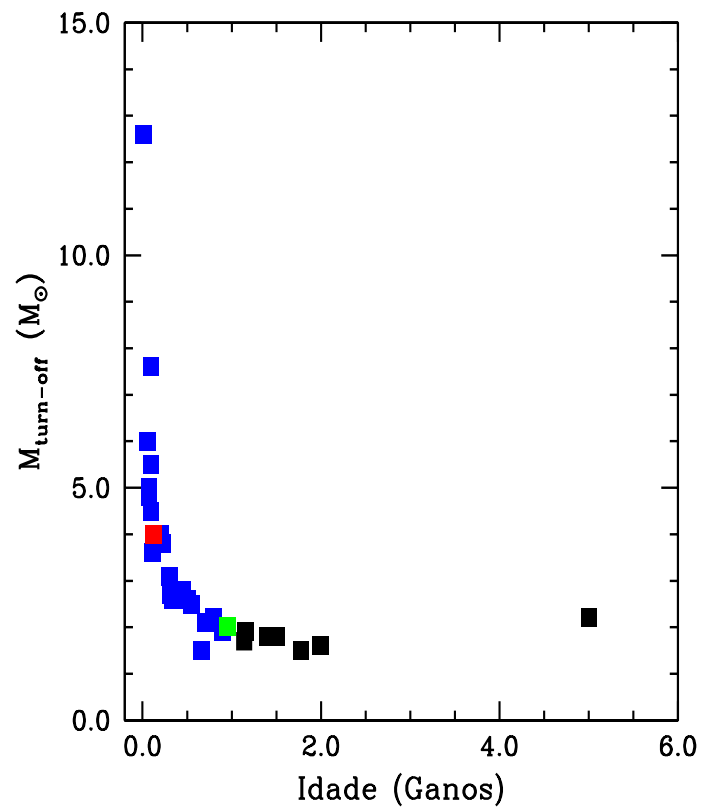


Figura 4.18: Massa do “Turn-off” em função da idade para aglomerados abertos. Símbolos iguais que nas figuras anteriores.

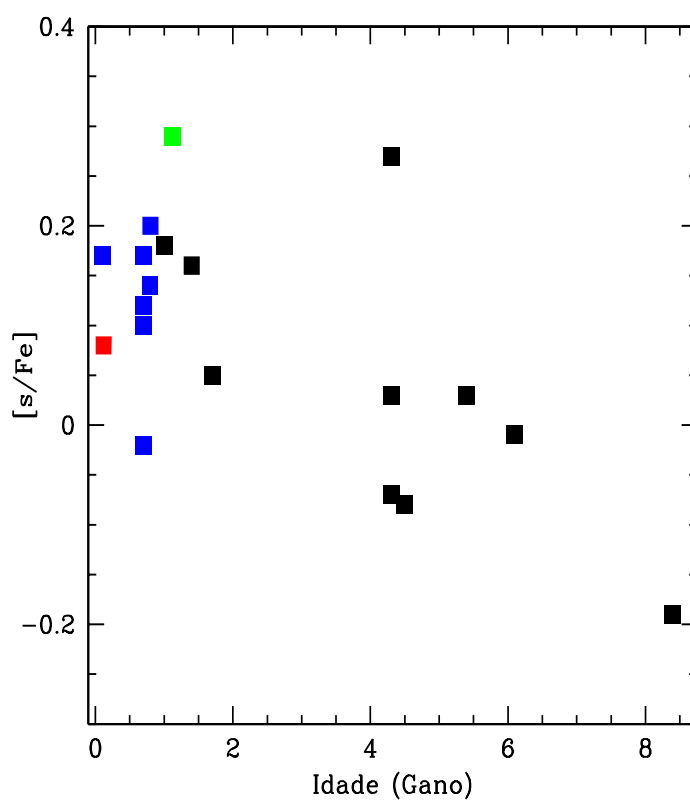


Figura 4.19: Abundâncias do processo-s em função da idade relativas aos outros aglomerados abertos. Quadrados vermelho e verde representam NGC 3114 e NGC 5822 respectivamente.

4.8 Binárias no aglomerado NGC 5822

O aglomerado NGC 5822 apresenta um alto número de binárias relativo aos outros aglomerados abertos (Mermilliod et al. 2007 e 2008). Nesta tese não foi realizada uma análise sobre a binaridade das gigantes no aglomerado NGC 5822. Em outras palavras, não foi feito um estudo dinâmico por estar fora do alcance do inicialmente proposto nesta tese. A informação sobre a natureza binária foi tomada de varias fontes disponíveis na literatura. Estas fontes ficam resumidas aos artigos de Mermilliod (1989, 1990, 2007 e 2008) e as informações disponíveis em WEBDA. As estrelas NGC 5822-2, NGC 5822-3, NGC 5822-4, NGC 5822-11, NGC 5822-51, NGC 5822-80, NGC 5822-151, e NGC 5822-312 estão classificadas como binárias e apresentam elementos orbitais publicados na literatura. Em nenhum dos espectros destas estrelas foram detectadas linhas duplas.

Na figura 4.20 mostra-se a distribuição da variação das velocidades radiais dentro do aglomerado NGC 5822. Como se observa no histograma, em sua maioria as estrelas do aglomerado apresentam pequenos desvios da velocidade radial média do aglomerado, 8 estrelas apresentam desvios $<1 \text{ km s}^{-1}$, outras 8 estrelas apresentam desvios $<4 \text{ km s}^{-1}$, duas estrelas com desvios em torno de 5 km s^{-1} e a estrela NGC 5822-80 com o maior desvio 17.68 km s^{-1} . Essa estrela está classificada como binária, de igual forma que 5 das outras estrelas com desvios no intervalo $2\text{--}4 \text{ km s}^{-1}$, incluída a estrela de Bário NGC 5822-2 e as duas candidatas a “red stragglers”. A estrela de Bário NGC 5822-201 apresenta desvios muito pequenos da velocidade radial apesar do fato de estar classificada como binária em Mermilliod et al. (2007).

Nas tabelas 4.4 e 4.5, os símbolos na primeira coluna representam: a média das binárias BIN, a média das não-binárias NÃO-BIN, a média das binárias sem as duas estrelas de bário BIN-SBA, a média das binárias sem incluir as duas “red stragglers” BIN-SRS e a média das binárias sem incluir as estrelas de bário nem as “red stragglers” BIN-SBA-SRS.

Como pode ser visto na tabela 4.4, as abundâncias de Carbono são afetadas pelo carácter binário das estrelas dentro do aglomerado NGC 5822, pois se são comparadas as abundâncias médias BIN com as NÃO-BIN observa-se uma diferença de 0.13 dex. Como já foi mencionado, nos espectros das estrelas classificadas como binárias estudadas nesta tese não mostram linhas duplas, portanto a explicação para essa diferença está na hipótese da transferência de massa. Este fato fica mais evidente quando são comparadas as abundâncias médias NÃO-BIN com as BIN-SBA e as abundâncias médias BIN-SRS com as BIN pois nos dois casos as diferenças são

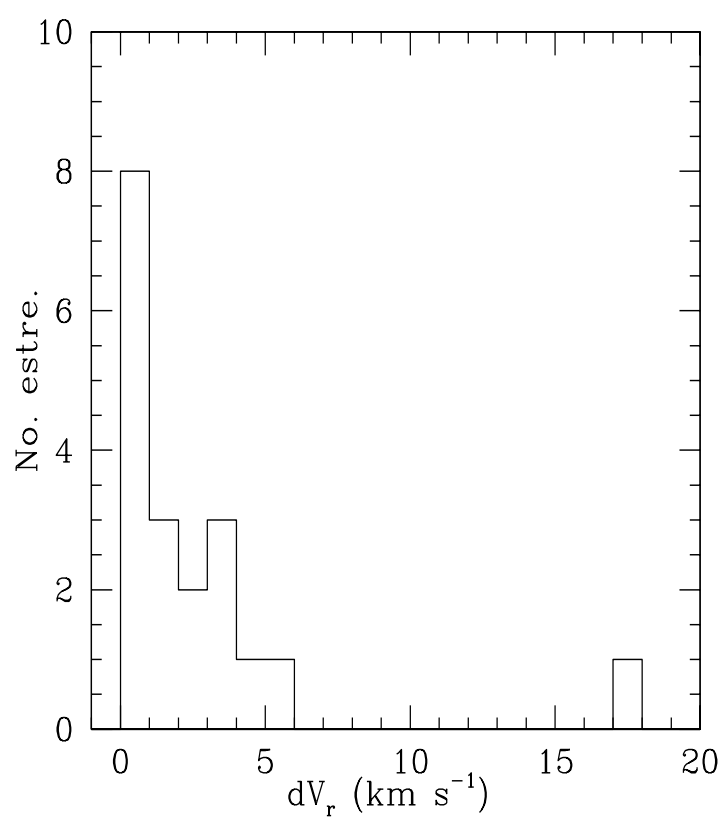


Figura 4.20: Histograma das velocidades radiais no aglomerado NGC 5822. Sendo $\Delta V_r = V_r - V_{mr}$, onde V_{mr} é a velocidade radial média do aglomerado NGC 5822 calculada nesta tese.

Tabela 4.4: Comparação entre abundâncias médias das binárias e não-binárias em NGC 5822 dos elementos Carbono até o Níquel.

Média	C	N	O	Na	Mg	Al	Si	Ca	Ti	Cr	Ni
BIN	-0.21	0.48	-0.16	0.18	0.07	0.00	0.16	0.08	-0.10	0.00	0.03
NÃO-BIN	-0.34	0.55	-0.14	0.18	0.08	-0.03	0.09	0.04	-0.06	-0.01	0.01
BIN-sBa	-0.30	0.45	-0.20	0.15	0.04	-0.04	0.14	0.08	-0.12	0.00	0.02
BIN-sRS	-0.18	0.47	-0.17	0.20	0.09	0.00	0.16	0.07	-0.03	0.03	0.03
BIN-sBa-sRS	-0.29	0.42	-0.23	0.16	0.06	-0.06	0.14	0.06	-0.04	0.04	0.02

Tabela 4.5: Comparação entre as abundâncias médias das binárias e não-binárias em NGC 5822 para os elementos do processo-s.

Média	YII	Zr	La II	Ce	Nd	[hs]	[ls]	[hs/ls]	[s/Fe]
bin	0.26	0.23	0.41	0.40	0.52	0.44	0.24	0.20	0.36
não-bin	0.09	0.11	0.29	0.25	0.40	0.31	0.10	0.21	0.23
bin-sBa	0.08	0.10	0.29	0.28	0.43	0.34	0.09	0.24	0.24
bin-sRS	0.31	0.28	0.43	0.44	0.50	0.45	0.30	0.16	0.39
bin-sBa-sRS	0.09	0.12	0.27	0.29	0.37	0.31	0.10	0.21	0.23

praticamente zero. Tal e como foi mostrado na seção 4.5.1, as “red straggler” não influenciam as abundâncias de Carbono.

Os outros elementos do ciclo CNO, Nitrogênio e Oxigênio, não apresentam diferenças significativas entre as abundâncias médias de binárias e não-binárias. Da mesma forma, a influência da transferência de massa nessas abundâncias também não é significativa.

Como pode ser verificado na tabela 4.4, a influência da transferência de massa nas abundâncias dos elementos do grupo do ferro e elementos α é praticamente zero pois as abundâncias médias BIN e NÃO-BIN são praticamente iguais em todos os elementos desde o Sódio até o Níquel. A influência do velamento também não é significativa pois as diferenças entre as médias NÃO-BIN e BIN-sRS são pequenas. Não obstante, como foi mencionado na seção 4.5.1, as duas “red straggler” influenciam as abundâncias destes dois grupos de elementos apenas quando são analisadas as abundâncias com respeito ao Hidrogênio $[X/H]$.

Os efeitos da transferência de massa são mais evidentes nos elementos do processo-s tal como se observa na tabela 4.5. Este fato fica em evidência quando são observadas as grandes diferenças entre as abundâncias médias BIN e NÃO-BIN e as poucas diferenças entre as abundâncias médias NÃO-BIN e BIN-sBa.

Também pode ser visto que a influência do velamento nas abundâncias do processo-s é nulo, pois caso comparemos as abundâncias médias NÃO-BIN e BIN-SRS observa-se a mesma diferença existente entre NÃO-BIN e BIN-SBA. Observa-se este comportamento na tabela 3.9, onde as duas “red straggler” apresentam praticamente as mesmas abundâncias do processo-s que as outras estrelas dentro do aglomerado.

Capítulo 5

Duas estrelas de Bário em NGC 5822

5.1 Conceito de estrela de Bário

As estrelas de Bário são objetos de massa baixa intermediária com sobre-abundâncias de Carbono e elementos do processo-s. Estes tipos de estrelas não são o suficientemente luminosas para serem consideradas estrelas em fase de TP-AGB e portanto, não podem ser classificadas como objetos intrinsecamente enriquecidos em elementos do processo-s porque ainda não experimentaram episódios da terceira dragagem. As estrelas de Bário fazem parte dos chamados objetos extrinsecamente enriquecidos em elementos do processo-s, pois as suas sobre-abundâncias são explicadas através da transferência de massa a partir de uma estrela companheira. Esta transferência é feita através de um vento estelar ou do fluxo de matéria através do lóbulo de Roche originados numa estrela central que passou pela fase de TP-AGB e atualmente é uma anã branca.

O estudo das estrelas de bário é importante para a interpretação física dos fenômenos de acréscimo em binárias quimicamente peculiares bem como para análise da nucleossíntese do processo-s, pois em estrelas AGB existe uma forte opacidade molecular que dificulta o cálculo das abundâncias químicas. Além disso, pelo fato de serem observadas no halo e no disco, as estrelas de Bário proporcionam uma oportunidade para investigar a nucleossíntese do processo-s em diferentes metalicidades.

Vários trabalhos foram publicados sobre estrelas de Bário e objetos quimicamente

peculiares, especificamente, estrelas de Bário no campo têm sido estudados por Barbuy (1992), Allen & Barbuy (2006), Smiljanic, et al. (2007), Pereira & Drake (2009), Drake & Pereira (2007) e Pereira et al. (2011), enquanto os artigos de Mallia (1976) e D’Orazzi et al. (2010) mostraram a existência deste tipo de estrelas em aglomerados globulares. As primeiras estrelas de Bário descobertas em aglomerados abertos foram relatadas por McClure, et al. (1980) no aglomerado NGC 2420 e posteriormente confirmadas por Smith & Sunzef (1987) utilizando espectroscopia de media resolução. Desde então não houve registro deste tipo de estrelas em um aglomerado aberto.

5.2 NGC 5822-2 e -201

As figuras 5.1, 5.2 e 5.3 mostram as linhas dos elementos do processo-s, Zr I 6127 Å, La II 6390 Å e La II 6774 Å nas estrelas NGC 5822-2 e -201 comparadas com outra estrela de Bário HD 65314 e a gigante HD 2114. Como pode ser observado, as linhas de La II apresentam uma profundidade maior nas três estrelas de Bário relativas à gigante HD 2114 e, a linha de Zr I está bem definida nas estrelas de Bário enquanto é muito fraca na gigante HD 2114.

A tabela 5.1 mostra as magnitudes bolométricas e luminosidades para todas as estrelas da amostra. Tais quantidades foram calculadas com as conhecidas equações $M_{bol} = V + 5(1 - \log r) - A_v + BC$ e $\log(L/L_\odot) = -0.4(M_{bol\star} - M_{bol\odot})$ e tomando de Smiljanic, et al. (2009) os valores das magnitudes aparentes V , a distância r e o avermelhamento A_v . A correção bolométrica BC foi calculada utilizando os polinômios de Alonso et al. (1999) e para a magnitude bolométrica solar $M_{bol\odot}$ foi utilizado o valor de 4.74 (Bessel 1998). Tal como pode ser observado na tabela 5.1, as estrelas NGC 5822-2 e -201 não são suficientemente luminosas como para estarem na fase de AGB. Previsões teóricas de Lattanzio (1986) e Vassiliadis & Wood (1993) mostram que no primeiro “thermal pulse” a luminosidade da estrela deve estar no intervalo de 1 400 a 1 800 $L_\odot$.

A figura 5.4 mostra a síntese espectral das linhas moleculares de C_2 em torno de 5635 Å. A estrela de Bário HD 65314 tinha sido previamente estudada na literatura mas não apresentava resultados para as abundâncias de CNO. Tais abundâncias foram calculadas por Katime Santrich et al. (2013b) e adicionadas nesta tese para efeitos de comparação. As linhas moleculares de C_2 em torno de 5635 Å somente são notáveis em estrelas com enriquecimento de Carbono. Como pode ser observado,

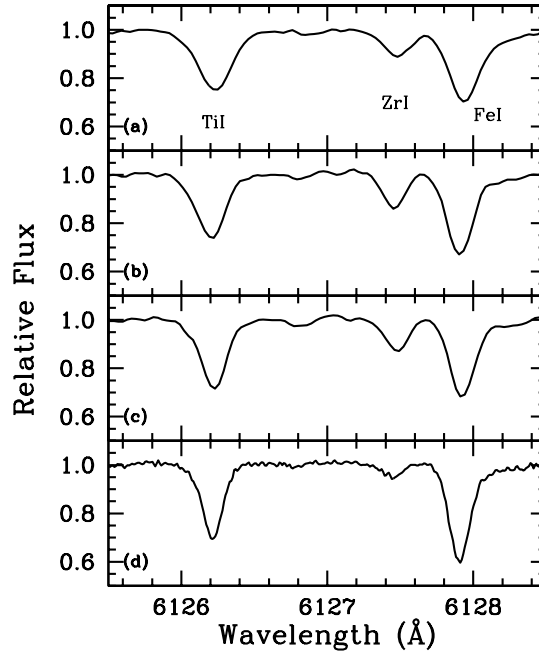


Figura 5.1: Região espectral normalizada da linha de absorção do Zr I 6127 Å nas estrelas de Bário NGC 5822-2 (a), NGC 5822-201 (b), HD 65314 (c) e na gigante HD 2114 (d).

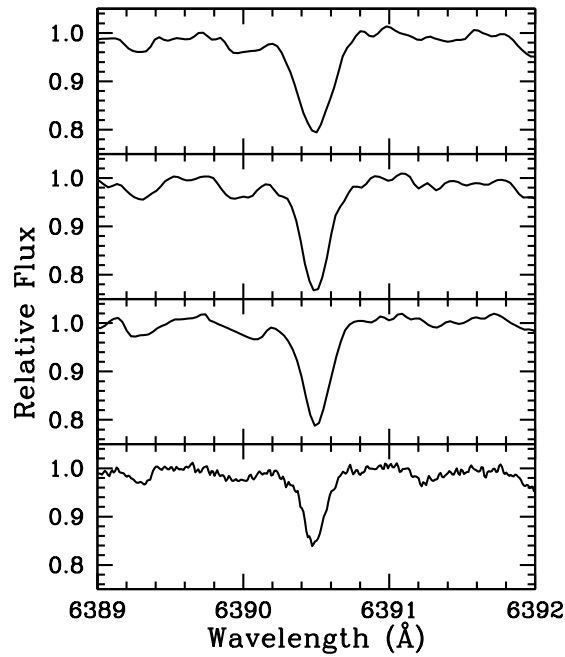


Figura 5.2: Como na figura 5.1 porém para a linha de La II 6390 Å.

Tabela 5.1: Magnitudes bolométricas e luminosidades das estrelas da amostra.

ESTRELA	M_{bol}	$\log(L/L_{\odot})$	$L(L_{\odot})$
HD 87109	-2.78	3.01	1031
HD 87479	-2.38	2.85	711
HD 87526	-2.84	3.04	1086
HD 87566	-2.20	2.78	605
HD 87833	-1.78	2.61	409
HD 304859	-1.90	2.66	459
HD 304864	-2.68	2.97	940
NGC 5822-1	-1.15	2.36	228
NGC 5822-2	-0.31	2.02	105
NGC 5822-3	0.46	1.72	52
NGC 5822-4	0.03	1.89	77
NGC 5822-6	0.96	1.52	33
NGC 5822-8	0.52	1.69	49
NGC 5822-11	1.14	1.44	28
NGC 5822-51	0.64	1.65	44
NGC 5822-80	0.50	1.70	50
NGC 5822-102	0.98	1.51	32
NGC 5822-151	0.88	1.55	35
NGC 5822-201	0.45	1.72	52
NGC 5822-224	1.02	1.49	31
NGC 5822-240	-0.64	2.15	143
NGC 5822-312	0.01	1.90	79
NGC 5822-316	0.70	1.62	42
NGC 5822-348	1.04	1.48	30
NGC 5822-375	-0.31	2.02	105
NGC 5822-443	-0.22	1.99	98

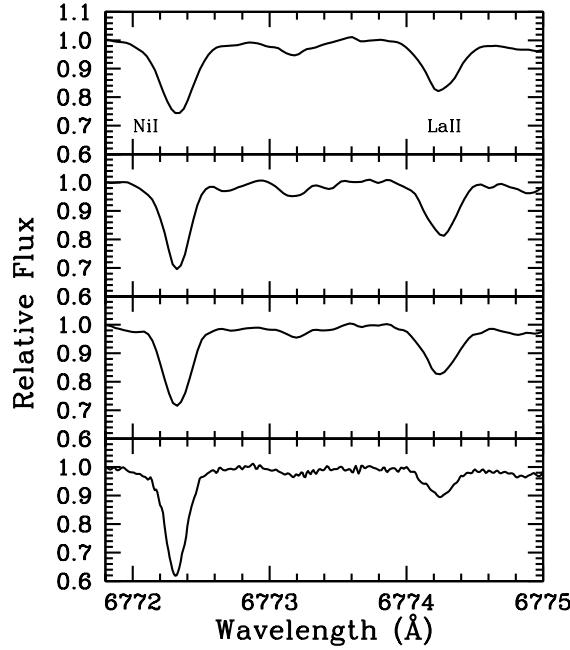


Figura 5.3: Como nas figuras 5.1 e 5.2 porém para a linha de La II 6774 Å.

NGC 5822-2 e -201 apresentam abundâncias de C_2 similares a uma estrela de Bário típica como HD 65314 (ver figura 5.4).

Na figura 4.3 da seção 4.3, as duas estrelas de Bário NGC 5822-2 e -201 são representadas pelos triângulos em magenta. Como se observa nessa figura, as estrelas NGC 5822-2 e -201 apresentam abundâncias de C_2 maiores quando comparadas às gigantes de campo da mesma metalicidade e, essa diferença é maior ainda para o caso da estrela NGC 5822-201. Ocorre uma situação oposta nas abundâncias de Nitrogênio e Oxigênio, pois apresentam as mesmas tendências que nas gigantes de campo. Na figura 4.4 se observa esse mesmo comportamento das abundâncias do ciclo CNO nas estrelas NGC 5822-2 e -201 quando comparadas com as abundâncias de CNO das gigantes nos outros aglomerados abertos encontrados na literatura (4.4).

A figura 5.5 mostra que as estrelas de Bário NGC 5822-2 e -201 apresentam abundâncias dos elementos do ciclo CNO similares às outras gigantes de Bário publicadas na literatura. As duas estrelas de Bário descobertas em NGC 5822, de forma similar que as outras gigantes de Bário da literatura, apresentam enriquecimento de Carbono e Nitrogênio. As sobre-abundâncias de Nitrogênio são produzidas por efeitos da primeira dragagem.

A figura 4.12 mostra claramente que as abundâncias dos elementos do processo-
s, Y II, La II, Ce II and Nd II são muito maiores que para as gigantes de Mishenina

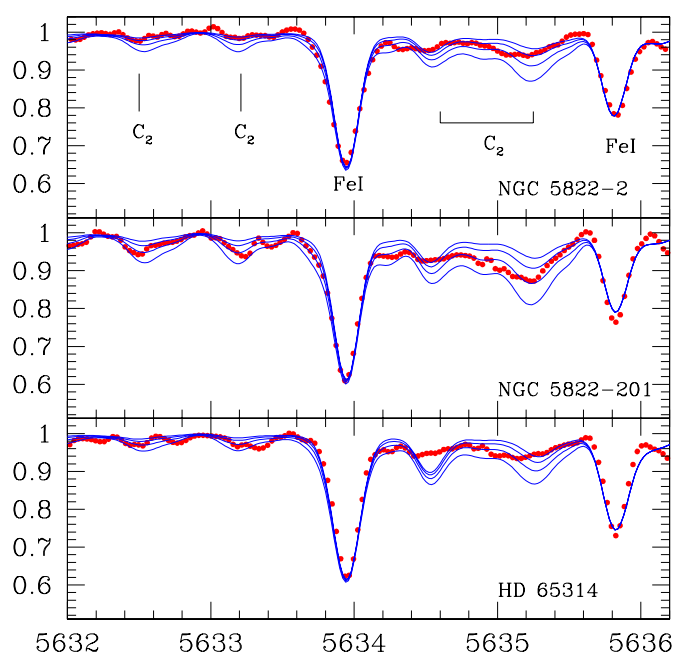


Figura 5.4: Síntese espectral do Carbono na região em torno de Fe I 5634 Å. As linhas pontilhadas vermelhas representam os espectros observados. As linhas solidas azuis representam as diferentes sínteses utilizadas: $\log \varepsilon(\text{C}) = 8.20, 8.30, 8.40$ e 8.52 para NGC 5822-2; $\log \varepsilon(\text{C}) = 8.32, 8.42, 8.52$ e 8.62 para NGC 5822-201 e $\log \varepsilon(\text{C}) = 8.12, 8.22, 8.32$ e 8.42 para HD 65314.

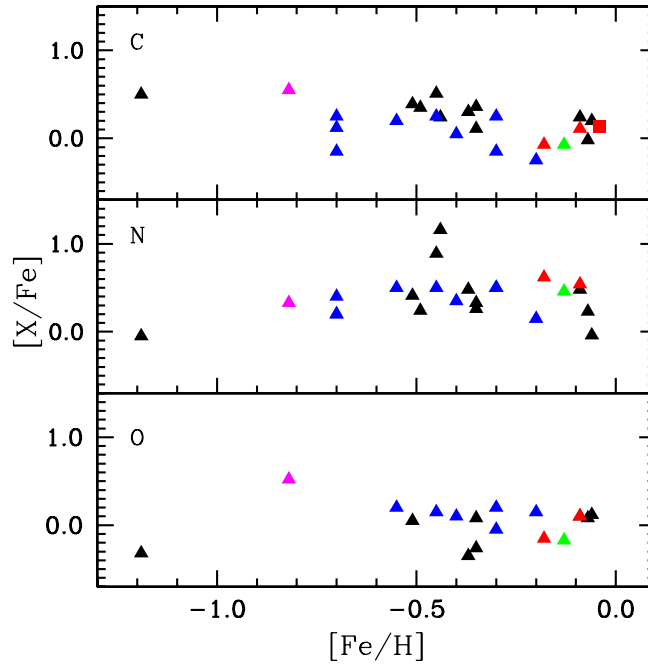


Figura 5.5: Abundâncias dos elementos do ciclo CNO nas estrelas de bário NGC 5822-2 e -201 comparadas com as estrelas de Bário no campo. Triângulos azuis representam os resultados de Barbuy et al. (1992), os triângulos negros são os resultados de Allen & Barbuy (2006), o triângulo magenta representa a estrela de Bário HD 10613 estudada por Pereira & Drake (2009), os triângulos vermelhos representam as duas estrelas de Bário NGC 5822-2 e -201 e o quadrado vermelho representa a estrela NGC 2420-X estudada por Smith & Suntzeff (1987).

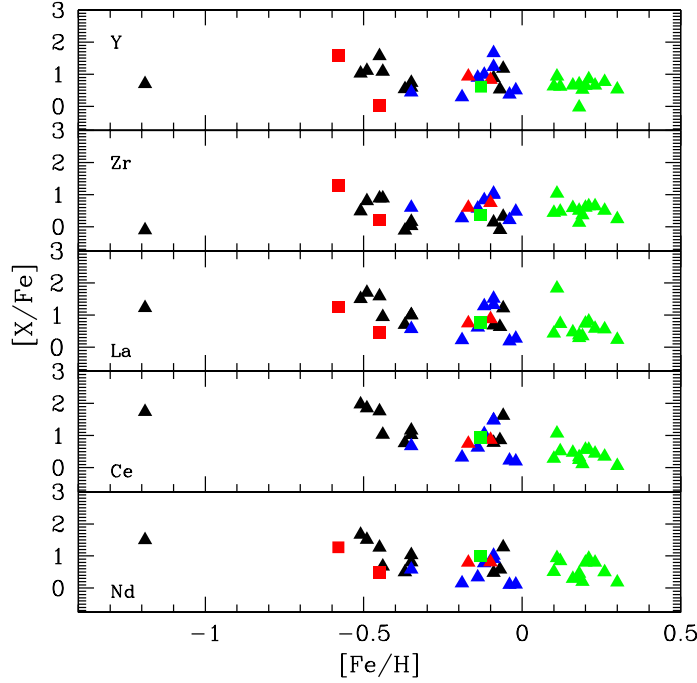


Figura 5.6: Abundâncias dos elementos do processo-s nas estrelas de bário NGC 5822-2 e -201 relativas às estrelas de Bário no campo. O quadrado verde representa as estrelas de Bário no campo estudadas por Pereira et al. (2011) enquanto que os outros símbolos são como na figura 5.5.

et al. (2006) e Luck & Heiter (2007). Este fato fica estabelecido no painel inferior dessa mesma figura, pois a média das abundâncias do processo-s $[s/Fe]$ para as duas estrelas NGC 5822-2 e NGC 5822-201 é também muito superior. As abundâncias de Zr I foram levadas em conta para calcular a razão $[s/Fe]$ e os índices de eficiência do processo-s, $[ls]$, $[hs]$ e, $[hs/ls]$ ¹. Na literatura não existem resultados para as abundâncias do Zr I em gigantes de campo.

A figura 5.6 mostra que as abundâncias dos elementos do processo-s para as duas estrelas de Bário no aglomerado aberto NGC 5822 são similares as abundâncias do processo-s para as estrelas de Bário no campo encontradas na literatura. Portanto, devido à posição de NGC 5822-2 and -201 nessa figura, elas podem ser consideradas como duas típicas estrelas de Bário.

A tabela 5.2 mostra os índices do processo-s nas 26 estrelas dos dois aglomerados NGC 3114 e NGC 5822. A eficiência do processo-s dada por $[hs/ls]$ é baixa para a maioria das estrelas, a exceção é a “Red straggler” NGC 5822-4 que apresenta um valor de 0.44.

¹Sendo $[hs]=([La/Fe]+[Ce/Fe]+[Nd/Fe])/3$; $[ls]=([Y/Fe]+[Zr/Fe])/2$; e $[hs/ls]=hs-ls$.

Tabela 5.2: Eficiência do processo-s nas estrelas da amostra.

NGC 3114-#	[Fe/H]	[hs]	[ls]	[hs/ls]	[s/Fe]
6	-0.03	0.16	0.03	0.14	0.11
150	-0.01	—	—	—	—
170	-0.73	0.13	—	—	0.08
181	0.02	0.14	-0.10	0.24	0.07
238	0.07	0.12	-0.03	0.15	0.06
262	-0.03	0.21	0.10	0.11	0.17
283	0.03	0.09	-0.06	0.15	0.01
NGC 5822-#					
1	-0.09	0.28	0.06	0.22	0.19
2	-0.15	0.77	0.76	0.00	0.77
3	-0.10	0.36	0.19	0.17	0.29
4	-0.27	0.55	0.11	0.44	0.37
6	-0.04	0.34	0.16	0.18	0.27
8	-0.08	0.29	0.05	0.24	0.20
11	-0.16	0.30	0.05	0.25	0.20
51	0.01	0.28	0.13	0.15	0.22
80	-0.02	0.36	0.12	0.24	0.27
102	-0.13	0.22	0.13	0.10	0.18
151	-0.17	0.25	0.02	0.23	0.16
201	-0.11	0.86	0.79	0.07	0.83
224	0.01	0.36	0.18	0.18	0.29
240	-0.14	0.35	0.07	0.28	0.24
312	-0.32	0.25	0.01	0.24	0.15
316	-0.05	0.37	0.06	0.31	0.25
348	-0.13	0.23	0.00	0.23	0.14
375	-0.09	0.30	0.07	0.23	0.21
443	-0.03	0.35	0.20	0.15	0.29

Se aproximadamente 1% das gigantes de campo são estrelas de Bário (MacConnel et al. 1972) e sendo que nos aglomerados abertos NGC 2420 e NGC 5822 foram encontradas duas estrelas em cada, o que dá um 10%, então por que não mais estrelas de Bário foram encontradas nos outros aglomerados abertos estudados na literatura? Pode-se especular sobre as razões pelas quais mais de 20 anos se passaram desde a última descoberta de uma estrela de Bário em um aglomerado aberto. Primeiro, após a publicação de Mermilliod et al. (2008), 1309 estrelas gigantes em 166 aglomerados abertos foram identificadas, permitindo assim o estudo de novos objetos, sendo que alguns deles são sistemas binários. Em segundo lugar, existe um baixo número de análises de abundâncias dos elementos do processo-s em aglomerados abertos e, mesmo quando isso foi feito, as abundâncias foram determinadas com base em ou um dois elementos com poucas linhas (Maiorca et al. 2011). Portanto com novas pesquisas utilizando espectroscopia de alta resolução de gigantes em aglomerados abertos, provavelmente novas estrelas de Bário serão descobertas.

Capítulo 6

Conclusões e perspectivas

Nesta tese foi feita uma análise espectroscópica em alta resolução de 26 estrelas gigantes pertencentes a dois aglomerados abertos, um deles jovem, NGC 3114 com idade de 0.16 Gano e o outro, NGC 5822 com idade de 0.89 Gano. Além dos parâmetros estelares e metalicidades, foram calculadas as abundâncias químicas de Sódio e Alumínio, dos elementos do grupo do ferro, elementos alfa e elementos do processo-s. Os resultados obtidos foram comparados com gigantes de campo no mesmo intervalo de metalicidades e com gigantes de outros aglomerados abertos observados preferencialmente em alta resolução.

Os resultados mostram que existem 7 interessantes estrelas, 3 em NGC 3114 e 4 em NGC 5822, que se destacam respeito às outras estrelas dos seus respectivos aglomerados. Em NGC 3114, foi encontrada uma estrela (HD 87526) que não pertence ao aglomerado e duas estrelas (HD 87479 e, HD 304864) com velocidades rotacionais altas. No aglomerado NGC 5822, foram encontradas duas estrelas de Bário (NGC 5822-2 e -201) e duas estrelas candidatas a “red stragglers” (NGC 5822-4 e -312).

6.1 Conclusões

NGC 3114 e NGC 5822 são dois aglomerados jovens (0.16 Ganos e 0.89 Ganos) com massas do turn-off de $4.2 M_{\odot}$ e $2.02 M_{\odot}$ respectivamente. Eles apresentam metalicidades próximas do valor solar, $[Fe/H] = -0.01 \pm 0.03$ e -0.10 ± 0.05 respectivamente em concordância com estudos prévios de fotometria. Na literatura existem poucos aglomerados com massa do “turn-off” calculada, portanto a determinação

da massa do “turn-off” para NGC 3114 adiciona mais um ponto para esta amostra (ver a figura 4.18).

A estrela HD 87526 pertence ao disco espesso/halo galáctico pois as suas metalicidades e abundâncias são muito diferentes das outras gigantes do aglomerado e, portanto, não é um membro de NGC 3114. Os resultados espectroscópicos obtidos nesta tese concordam com os obtidos fotometricamente por Frye et al. (1970).

As estrelas HD 87479 e HD 304864, especialmente a primeira, pertencem ao grupo das gigantes frias com maior rotação até agora encontradas. Isto pode ser visto na figura 4.2. O aglomerado NGC 3114 é peculiar nesse sentido porque da amostra de estrelas observadas, todas apresentam velocidades de rotação maiores do que 2 Km s^{-1} . Até o momento é um dos aglomerados abertos com maior fração de gigantes frias com alta rotação.

A análise dos elementos leves revelou que as estrelas da amostra apresentam baixas abundâncias de Carbono e altas abundâncias de Nitrogênio, resultados similares às gigantes no campo e nos outros aglomerados abertos. A razão $[\text{N}/\text{C}]$ mostrou valores consistentes para os dois aglomerados em concordância com os modelos de Schaller et al. (1992) para gigantes após a primeira dragagem. As razões isotópicas $^{12}\text{C}/^{13}\text{C} \geq 18$ e $^{12}\text{C}/^{13}\text{C} \geq 16$ para NGC 3114 e NGC 5822 respectivamente, são levemente inferiores aos valores preditos para aglomerados abertos com massas do “turn-off” de $4.0 M_{\odot}$ e $2.0 M_{\odot}$ respectivamente. Não obstante, a razão isotópica do Carbono em NGC 3114 apresenta um valor similar ao aglomerado M 11 (aglomerado com a mesma idade e massa do “turn-off”), estudado por González & Wallerstein (2000).

Os resultados das abundâncias de Oxigênio e Sódio nos dois aglomerados NGC 3114 e NGC 5822, estudados nesta tese, não fornecem evidência conclusiva para a anti-correlação entre estes dois elementos. Este comportamento está em concordância com os resultados encontrados em outros aglomerados abertos publicados na literatura mas não com os resultados obtidos por Geisler et al. (2012) no aglomerado aberto velho NGC 6791. Mais aglomerados abertos analisados em alta resolução são fundamentais para verificar se o resultado de Geisler et al. (2012) é uma particularidade desse aglomerado.

Os dois aglomerados NGC 3114 e NGC 5822 apresentam sobre-abundâncias dos elementos do processo-s que seguem a tendência observada em outros aglomerados abertos jovens (e.g. Maiorca et al. 2011). O caso do aglomerado NGC 5822 é destacável, pois as abundâncias dos elementos do processo-s são muito altas para um aglomerado de idade intermediária. Esta sobre-abundância em NGC 5822 ocorre em

ambas as estrelas (não-binárias e binárias), este aglomerado é um dos aglomerados abertos com maiores abundâncias dos elementos do processo-s encontrados.

Dentro do aglomerado NGC 5822 existem duas estrelas de Bário NGC 5822-2 e -201 cujas abundâncias médias do processo-s ($[s/Fe]=0.77\pm0.12$ e 0.83 ± 0.05 , respectivamente) são muito maiores que as outras estrelas do aglomerado. As abundâncias do Carbono para essas duas estrelas também são maiores em relação às outras estrelas do aglomerado, destacando-se a estrela NGC 5822-201 cuja abundância $[C/Fe]=0.15$ é notavelmente superior. As sobre-abundâncias dos elementos do processo-s e do Carbono nas duas estrelas de Bário são também notáveis quando comparadas às gigantes no campo e nos outros aglomerados abertos. As duas estrelas NGC 5822-2 e -201 quando comparadas com as outras estrelas de Bário publicadas na literatura mostram valores de abundâncias do processo-s e de Carbono típicas de esse tipo de estrelas.

No aglomerado NGC 5822 foram encontradas duas candidatas a “Red Stragglers”, NGC 5822-4 e NGC 5822-312 com velocidades de microturbulência de $\xi=0.00\text{ km s}^{-1}$ e 0.70 km s^{-1} respectivamente. Valores muito baixos para serem estrelas gigantes. Também é importante notar o efeito do velamento nas metalicidades e abundâncias dessas duas estrelas. Fato que fica mais evidente nas abundâncias de Titânio $[Ti/H]=-0.65$ e -0.61 respectivamente. Mais análises espectroscópicas de estrelas localizadas na parte vermelha dos diagramas cor magnitude de aglomerados abertos e globulares são necessários para estabelecer se a baixa microturbulência e o velamento no espectro são características desse tipo de estrelas. NGC 5822-4 e NGC 5822-312 são as primeiras “Red Stragglers” espectroscopicamente identificadas.

As luminosidades das estrelas NGC 5822-2 e -201 ($105 L_{\odot}$ e $52 L_{\odot}$ respectivamente) são muito baixas para serem classificadas como estrelas AGB e estarem auto-enriquecidas com elementos do processo-s. As duas estrelas foram classificadas como binárias por Mermiliod et al. (1989), Mermiliod & Mayor (1990) e, Mermiliod et al. (2007). Portanto a hipótese da transferência de massa é o melhor cenário para explicar as sobre-abundâncias do processo-s e o Carbono. Pode-se portanto concluir que, NGC 5822 apresenta um enriquecimento dos elementos do processo-s em dois cenários diferentes, um através da transferência de massa e outro desconhecido que pode ser devido ao prévio enriquecimento da nuvem progenitora do aglomerado ou talvez a uma maior eficiência na nucleossíntese do processo-s.

A grande maioria das análises espectroscópicas de aglomerado abertos se limitam algumas poucas estrelas observadas por aglomerados, no máximo 7 estrelas observadas em um mesmo aglomerado. Este trabalho é um dos primeiros em analisar

19 estrelas em alta resolução do mesmo aglomerado. As duas estrelas de Bário e as duas candidatas a “Red Straggler” foram encontradas em NGC 5822, porque foi observado um número maior de estrelas de um mesmo aglomerado.

6.2 Perspectivas

Análise espectroscópica adicional de outros aglomerados jovens será bem-vinda, a fim de investigar o padrão de abundância em estrelas de massa intermediária à medida que evoluem para fora da sequência principal. Por outro lado, alguns estudos de anãs em aglomerados jovens (Ford et al 2005; Stütz et al. 2006; Pace et al. 2010; Villanova et al. 2009) mostraram que o oxigênio tem abundância solar e não mostra esgotamento visto em gigantes desses aglomerados. Isso indica que os aspectos evolutivos e de processos de mistura mudaram a abundância das gigantes em aglomerados. Análises de abundância a partir de anãs e subgigantes nestes aglomerados também são bem-vindos.

Não existem muitos aglomerados abertos com abundâncias de CNO determinadas. Um maior número destes objetos estudados em alta resolução é importante para descartar ou, talvez, encontrar a anti-correlação entre Oxigênio e Sódio. Situação análoga acontece com os elementos do processo-s. A descoberta, depois de mais de 20 anos, de duas estrelas de Bário no aglomerado NGC 5822 gera uma questão interessante sobre a frequência deste tipo de estrelas em aglomerados estelares. Análises espectroscópicas de várias estrelas no mesmo aglomerado são um fator determinante na tomada de uma contribuição em ambas as frentes. Graças ao acordo ON-ESO mais estrelas gigantes de aglomerados abertos foram observadas em alta resolução com o espectrógrafo FEROS e, os espectros estão disponíveis para continuar a análise espectroscópica. Assim, observações existem para realizar pesquisa e tentar fazer contribuições pois está o fato que além de mais estrelas observadas por aglomerado e de mais aglomerados observados, a amostra obtida é talvez a mais uniforme pois é difícil encontrar uma amostra de aproximadamente 200 estrelas (em 17 aglomerados abertos) observadas com o mesmo espectrografo e telescópio. Isto é fundamental porque em vários estudos relatados na literatura são mostrados resultados muito diferentes do mesmo objeto observado com configurações observacionais (diferente telescópio e instrumento) diferentes.

Do hemisfério norte também temos observações que podem ser importantes na análise de aglomerados abertos, foram observadas gigantes vermelhas de vários aglo-

merados utilizando o espectrógrafo CAFE no observatório Calar Alto na Espanha. A resolução do espectrógrafo é próxima do FEROS e o diâmetro (2.5 mt) do telescópio também. É importante notar que alguns dos aglomerados observados em Calar alto tem estudos de abundâncias em baixa e media resolução. Além das observações já feitas com os espectrógrafos FEROS e CAFE em La silla e Calar alto, respectivamente, está a possibilidade de solicitar tempo de observação em instrumentos de maior resolução. Com a entrada do Brasil no ESO e com o espectrógrafo STELLES do SOAR abre-se uma série de possibilidades e futuros projetos que certamente poderiam contribuir ao estudo dos aglomerados estelares.

No trabalho realizado nesta tese, foram estudados aglomerados abertos no disco galáctico. No entanto, no bojo da Via Lactea existem alguns aglomerados abertos identificados que podem ser observados no infravermelho. Esta possibilidade é interessante porque graças à participação brasileira no telescópio Gemini, um caminho de exploração adicional se abre para estudar aglomerados fora do disco galáctico e em outra região do espectro electromagnético.

Bibliografia

- Albrow, M.D, Gilliland, R.L., Brown, T.M., Edmonds, P.D., Guhathakurta, P. & Sarajedini, A. 2001, *The Astrophysical Journal*, 559, 1060.
- Allen, D.M. & Barbuy, B. 2006, *Astronomy and Astrophysics*, 454, 917.
- Alonso, A., Arribas, S. & Martínez-Roger, C. 1999, *Astronomy and Astrophysics Supplement Series*, 140, 261.
- Antipova, L. I., Boyarchuk, A. A., Pakhomov, Yu. V. & Yushkin, M. V. 1985, *Astronomy Reports*, 49, 535.
- Anthony-Twarog, B.J., Twarog, B. A., Heim, E. A. & Caldwell, N. 1991, *The Astronomical Journal*, 102, 1056.
- Asplund, M., Grevesse, N., Sauval, A. J. & Scott P. 2009, *Astronomy and Astrophysics*, 47, 481.
- Barbuy, B., Jorissen, A., Rossi, S. C. F. & Arnould, M. 1992, *Astronomy and Astrophysics*, 262, 216.
- Beers, T. C. & Carollo, D. 2009, *Nature Physics*, 5, 463.
- Bessel, M.S., Castelli, F. & Plez, B. 1998, *Astronomy and Astrophysics*, 333, 231.
- Bertelli, G., Bressan, A., Chiosi, C., Fagotto, F. & Nasi, E. 1994, *Astronomy and Astrophysics Supplement Series*, 106, 275.
- Bidelman, W.P. 1981, *The Astronomical Journal*, 86, 553.
- Biémont, E., & Godefroid, M. 1980, *Physica Scripta*, 22, 231.
- Biémont, E., Palmeri, P. & Quinet, P. 1999, *Astrophysics and Space Science*, 269, 635.

- Blackwell, D. E., Booth, A. J., Menon, S. L. R. & Petford, A. D. 1986, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 220, 289.
- Boyarchuk, A. A., Antipova, L. I., Boyarchuk, M. E. & Savanov, I. S. 2001, *Astronomy Reports*, 45, 301.
- Bragaglia, A., Carretta, E., Gratton, R. G., Tosi, M., Bonanno, G., Bruno, P., Cali, A. et al. 2001, *The Astronomical Journal*, 121, 327.
- Brown, J. A., Sneden, C., Lambert, D. L. & Dutchover, E. Jr. 1989, *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 71, 293.
- Brown, J. A., Wallerstein, G., Geisler, D. & Oke, J.B. 1996, *The Astronomical Journal*, 112, 1551.
- Carbon, D. F., Barbuy, B., Kraft, R. P., Friel, E. D. & Suntzeff, N. B. 1987, *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 99, 335.
- Carlberg, J. K., Majewski, S. R., Patterson, R. J., Bizayev, D., Smith, V. V. & Cunha, K. 2011, *The Astrophysical Journal*, 732, 39.
- Carraro, G. & Patat, F., 2001, *Astronomy and Astrophysics*, 379, 136.
- Carraro, G., Bresolin, F., Villanova, S., Matteucci, F., Patat, F. & Romaniello, M. 2004, *The Astronomical Journal*, 128, 1676.
- Carraro, G., Geisler, D., Villanova, S., Frinchaboy, P. M. & Majewski, S. R. 2007, *Astronomy and Astrophysics*, 476, 217.
- Carrera, R. & Pancino, E. 2011, *Astronomy and Astrophysics*, 535, 30.
- Carretta, E., Gratton, R., Cohen, J. G., Beers, T. C. & Christlieb, N. 2002, *The Astronomical Journal*, 124, 481.
- Carretta, E., Bragaglia, A., Gratton, R. G. & Tosi, M. 2005, *Astronomy and Astrophysics*, 441, 131.
- Carretta E., Bragaglia, A., Gratton, R. G., Leone, F., Recio-Blanco, A. & Lucatello, S., 2006, *Astronomy and Astrophysics*, 450, 523.
- Carretta, E., Bragaglia, A. & Gratton, R. G. 2007, *Astronomy and Astrophysics*, 473, 129.

- Castro, S., Rich, R. M., Grenon, M., Barbuy, B. & McCarthy, J. K. 1997, *The Astronomical Journal*, 114, 376.
- Cayrel, R., 1988, Data Analysis. in *The Impact of Very High S/N Spectroscopy on Stellar Physics* Kluwer, Dordrecht, p.345, eds G. Cayrel de Strobel & M. Spite.
- Charbonnel, C & Lagarde, N., 2005, *Astronomy and Astrophysics*, 522, A10.
- Chen, L., Hou, J. L. & Wang, J. J., 2003, *The Astronomical Journal*, 125, 1397.
- Chen, Y.Q., Zhao, G., Nissen, P.E., Bai, G.S. & Qiu, H.M. 2003, *The Astrophysical Journal*, 591, 925.
- Clariá, J. J., Lapasset, E. & Minniti, D. 1989, *Astronomy and Astrophysics*, 78, 363.
- Clegg, R. E. S., Tomkin, J. & Lambert, D. L. 1981, *The Astrophysical Journal*, 250, 262.
- de Medeiros, J. R., Udry, S., Burki, G. & Mayor, M. 2002, *Astronomy and Astrophysics*, 395, 97.
- de Silva, G. M., Gibson, B.K., Lattanzio, J. & Asplund, M. 2009, *Astronomy and Astrophysics*, 500, L25.
- Denisenkov, P.A. & Ivanov, V.V., 1987, *Soviet Astronomy Letters*, 13, 214.
- Denisenkov, P.A., 1988, *Soviet Astronomy Letters*, 14, 435.
- Depagne, E., Hill, V., Spite, M., Spite, F., Plez, B., Beers, T. C. & Barbuy, B. et al. 2002, *Astronomy and Astrophysics*, 390, 187.
- Dias, W. S., Lépine, J. R. D. & Alessi, B. S. 2002, *Astronomy and Astrophysics*, 388, 168.
- Dobbie, P.D., Day-Jones, A., Williams, K.A., Casewell, S.L., Burleigh, M.R., Lodieu, N., Parker, Q.A. & Baxter, R. 2012, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 423, 2815.
- Drake, J. J. & Smith, G. 1991, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 250, 89.

- Drake, N. A. & Pereira, C. B. 2008, *The Astronomical Journal*, 135, 1070.
- Drake, N. A. & Pereira, C. B. 2011, *Astronomy and Astrophysics*, 531, 133.
- Edvardsson, B., Andersen, J., Gustafsson, B., Lambert, D. L., Nissen, P. E. & Tomkin, J., 1993, *Astronomy and Astrophysics*, 275, 101.
- Eggen, O.J., 1981, *The Astrophysical Journal*, 247, 503.
- Eggen, O.J., 1983, *The Astronomical Journal*, 88, 813.
- Ford, A., Jeffries, R. D. & Smalley, B. 2005, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 364, 272.
- Frinchaboy, P., Muñoz, R. R., Phelps, R. L., Majewski, S. R. & Kunkel, W, E. 2007, *The Astronomical Journal*, 131, 922.
- Friel, E. D., 1995, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 33, 381.
- Friel, E. D., Jacobson, H. R. & Pilachowski, C. A. 2005, *The Astronomical Journal*, 129, 2725.
- Friel, E. D., Jacobson, H.R., & Pilachowski, C.A. 2010, *The Astronomical Journal*, 139, 1942.
- Frye, R. L., MacConnell, D. J. & Humpherys, R. M. 1970, *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 82, 1360.
- Fulbright, J. P. 2000, *The Astronomical Journal*, 120, 1841.
- Geisler, D., Villanova, S., Carraro, G., Pilachowski, C., Cummings, J., Johnson, C. I. & Bresolin, F., 2012, *The Astrophysical Journal*, 756, 40.
- Gilroy, K. K. 1989, *The Astrophysical Journal*, 347, 835.
- González, J. F. & Lapasset, E. 2001, *The Astronomical Journal*, 121, 2657.
- Gonzalez, G. & Wallerstein, G. 2000, *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 112, 1081.
- Gratton, R., Sneden, C. & Carretta, E., 2004, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 42, 385.
- Gratton, R. G. & Sneden, C. 1988, *Astronomy and Astrophysics*, 204, 193.

- Gratton, R. G. & Contarini, G. 1994, *Astronomy and Astrophysics*, 283, 911
- Gratton, R. G., Carretta, E., Eriksson, K. & Gustafsson, B. 1999, *Astronomy and Astrophysics*, 350, 955.
- Grevesse, N. & Sauval, A. J. 1998, *Space Science Reviews*, 85, 161.
- Hamdani, H., North, P., Nowlavi, N. Raboud, D. & Mermilliod, J.C. 2000, *Astronomy and Astrophysics*, 360, 509.
- Harris, W. E. & Pudritz, R. E., 1994, *The Astrophysical Journal*, 429, 177.
- Hill, V., Andrievsky, S. & Spite, M. 1995, *Astronomy and Astrophysics*, 293, 347.
- Hill, V. & Pasquini, L. 1999, *Astronomy and Astrophysics*, 348, L21.
- Hobbs, L. M., Thorburn, J. A. & Rebull, L. M. 1999, *The Astrophysical Journal*, 523, 797.
- Iben, I. 1966, *The Astrophysical Journal*, 71, 858.
- Iben, I. 1967, *The Astrophysical Journal*, 147, 624.
- Jacobson, H. R., Friel, E. D. & Pilachowski, C. A. 2008, *The Astronomical Journal*, 135, 2341.
- Jacobson, H. R. & Pilachowski, C. A. & Friel, E. D. 2011, *The Astronomical Journal*, 142, 59.
- Jankowitz, N. E. & McCosh, C. J. 1963, *Monthly Notes of the Astronomical Society of Southern Africa*, 22, 18.
- Kaluzny, J. 2003, *Acta Astronomica*, 53, 51.
- Katime Santrich, O.J., Pereira, C.B. & Drake, N.A. 2013, *Astronomy and Astrophysics*, 554, A2. DOI:10.1051/0004-6361/201220252.
- Katime Santrich, O.J., Pereira, C.B. & de Castro, D.B. 2013, *The Astronomical Journal*, 146, 39. DOI:10.1088/0004-6256/146/2/39.
- Kaufer, A., Stahl, O., Tubbesing, S., Norregaard, P., Avila, G., Francois, P. & Pasquini, L. 1999, *The Messenger*, 95, 8.

- Kupka, F., Piskunov, N., Ryabchikova, T.A., Stempels, H. C. & Weiss, W.W. 1999, *Astronomy and Astrophysics Supplement Series*, 138, 119.
- Kurucz, R.L. 1993, CD-ROM 13, Atlas9 Stellar Atmosphere Programs and 2 km s⁻¹ Grid (Cambridge: Smithsonian Astrophys. Obs)
- Lambert, D. L. 1981. The chemical composition of red giants - The first dredge-up phase. I. 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, *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 103, 183
- Lattanzio, J.C. 1986, *The Astrophysical Journal*, 311, 708
- Lattanzio, J. C. & Wood, P.R. 2004, *Evolution, Nucleosynthesis and Pulsations of AGB stars*, in Asymptotic giant branch stars, by Harm J. Habing and Hans Olofsson. Astronomy and astrophysics library, New York, Berlin: Springer.
- Luck, R. E. & Heiter, U. 2007, *The Astronomical Journal*, 133, 2464.
- Luck, R. E. 1994, *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 91, 309.
- MacConnell, D.J., Frye, R.L. & Upgren, A.R. 1972, *The Astronomical Journal*, 77, 384
- Magrini, L., Víchez, J. M., Mampaso, A., Corradi, R. L. M. & Leisy, P. 2007, *Astronomy and Astrophysics*, 470, 865.
- Magrini, L., Sestito, P., Randich, S. & Galli, D. 2009, *Astronomy and Astrophysics*, 494, 95.
- Maiorca, E., Randich, S., Busso, M., Magrini, L. & Palmerini, S. 2011, *The Astrophysical Journal*, 736, 120
- Mathieu, R.D, Van Den Berg, M., Torres, G., Latham, D., Verbunt, F. & Stassun, K. 2003, *The Astronomical Journal*, 125, 246.
- Martin, G. A. Fuhr, J. R. & Wiese, W. L. 1988, *Journal of Physical Chemistry Ref. Data*, 17, 4.

- Martin, W. C., Fuhr, J. R., Kelleher, D. E., Musgrove, A. et al. 1999, NIST Atomic Spectra Database Version 2.0 (Online Available), NIST Standard Reference Database, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg Maryland.
- Mashonkina, L., Ryabtsev, A. & Frebel, A. 2012, *Astronomy and Astrophysics*, 540, 98.
- McClure, R.D., Forrester, W.T. & Gibson, J. 1974, *The Astrophysical Journal*, 189, 409.
- McWilliam, A. & Rich, M. R. 1994, *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 91, 749.
- Melo, C. H. F., Pasquini, L. & de Medeiros, J. R. 2001, *Astronomy and Astrophysics*, 375, 851.
- Mermilliod, J.C., Mayor, M., Andersen, J., Nordstrom, B., Lindgren, H. & Duquennoy, A. 1989, *Astronomy and Astrophysics Supplement Series*, 79, 11.
- Mermilliod, J.C. & Mayor, M. 1990, *Astronomy and Astrophysics*, 237, 61.
- Mermilliod, J. C., Mayor, M. & Udry, S. 2008, *Astronomy and Astrophysics*, 485, 303.
- Mikolaitis, Š., Tautvaišienė, G., Gratton, R., Bragaglia, A. & Carretta, E. 2010, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 407, 1866.
- Mikolaitis, Š., Tautvaišienė, G., Gratton, R., Bragaglia, A. & Carretta, E. 2011, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 416, 1092.
- Mikolaitis, Š., Tautvaišienė, G., Gratton, R., Bragaglia, A. & Carretta, E. 2011, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 413, 2199.
- Mikolaitis, Š., Tautvaišienė, G., Gratton, R., Bragaglia, A. & Carretta, E. 2012, *Astronomy and Astrophysics*, 541, A137.
- Mishenina, T. V., Bienaymé, O., Gorbaneva, T. I., Charbonnel, C., Soubiran, C., Korotin, S. A. & Kovtyukh, V. V. 2006, *Astronomy and Astrophysics*, 456, 1109.
- Mishenina, T. V., Gorbaneva, T. I., Bienaymé, O., Soubiran, C., Kovtyukh, V. V., & Orlova, L. F. 2007, *Astronomy Reports*, 51, No. 5, 382.

- Nordström, B., Andersen, J. & Andersen, M. I. 1996, *Astronomy and Astrophysics Supplement Series*, 118, 407.
- Pace, G., Danziger, J., Carraro, G., Meléndez, J., François, P., Matteucci, F. & Santos, N. C. 2010, *Astronomy and Astrophysics*, 515, 28.
- Pakhomov, Yu. V., Antipova, L. I., Boyarchuk, A. A., Bizyaev, D. V., Zhao, G. & Liang, Y. 2009, *Astronomy Reports*, 53, 660.
- Pancino, E., Carrera, R., Rossetti, E. & Gallart, C. 2010, *Astronomy and Astrophysics*, 511, 56.
- Pasquini, L., Randich, S. & Pallavicini, R. 2001, *Astronomy and Astrophysics*, 374, 1017.
- Pasquini, L., Randich, S., Zoccali, M., Hill, V., Charbonnel, C., & Nordström, B. 2004, *Astronomy and Astrophysics*, 424, 951.
- Paunzen, E., Pintado, O. I. & Maitzen, H. M. 2003, *Astronomy and Astrophysics*, 412, 721.
- Pavlenko, Ya. V., Jenkins, J.S., Jones, H.R.A., Ivanyuk, O. & Pinfield, D.J., 2012, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 422, 542.
- Peña Suárez V.J. 2012, *Comunicação privada*, Observatório Nacional.
- Pereira, C. B. & Drake, N. A. 2009, *Astronomy and Astrophysics*, 496, 791.
- Pereira, C.B. & Drake, N.A. 2011, *The Astronomical Journal*, 141, 79.
- Pereira, C.B., Sales Silva, J.V., Chavero, C., Roig, F. & Jilinski, E. 2011, *Astronomy and Astrophysics*, 533, 51.
- Pols, O.R. & Marinus, M. 1994, *Astronomy and Astrophysics*, 288, 475.
- Reddy, B. E., Bakker, E. J. & Hrivnak, B. J. 1999, *The Astrophysical Journal*, 524, 831.
- Reddy, A.B.S., Giridhar, S. & Lambert, D. L. 2012, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 419, 1350.
- Reyniers, M., Van Winckel, H., Gallino, R. & Straniero, O. 2004, *Astronomy and Astrophysics*, 417, 269.

- Sagar, R. & Sharples, R. M. 1991, *Astronomy and Astrophysics Supplement Series*, 88, 47.
- Santos, N. C., Lovis C., Pace, G., Meléndez, J. & Naef, D. 2009, *Astronomy and Astrophysics*, 493, 309.
- Sales Silva, J. V. 2011, *Disertação de mestrado*, Observatório Nacional.
- Schaller, G., Schaerer, D., Meynet, G. & Maeder, A. 1992, *Astronomy and Astrophysics Supplement Series*, 96, 269.
- Schneider, H. & Weiss, W. W. 1988, *Astronomy and Astrophysics Supplement Series*, 75, 353.
- Sestito, P., Randich, S. & Bragaglia, A. 2007, *Astronomy and Astrophysics*, 465, 185.
- Sestito, P., Bragaglia, A., Randich, S., Pallavicini, R., Andrievsky, S. M. & Korotin, S. A. 2008, *Astronomy and Astrophysics*, 488, 943.
- Smiljanic, R., Porto de Mello, G.F. & da Silva, L. 2007, *Astronomy and Astrophysics*, 468, 679.
- Smiljanic, R., Gauderon, R., North, P., Barbuy, B., Charbonnel, C. & Mowlavi, N. 2009, *Astronomy and Astrophysics*, 502, 267.
- Smith, G., Edvardsson, B. & Frisk, U. 1986, *Astronomy and Astrophysics*, 165, 126.
- Smith, V.V. & Suntzeff, N.B. 1987, *The Astronomical Journal*, 93, 359.
- Smith, V. V., Cunha, K. & Lambert, D. L. 1995, *The Astronomical Journal*, 110, 2827.
- Smith, V. V., Lambert, D. L. & Nissen, P. E. 1998, *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 506, 405.
- Smith, V. V., Cunha, K., Jorissen, A. & Boffin, H. M. J. 1996, *Astronomy and Astrophysics*, 315, 179.
- Sneden, C. 1973, *Ph.D. Thesis*, Univ. of Texas.
- Sneden, C., McWilliam, A., Preston, G. W., Cowan, J. J., Burris, D. L., Armosky, B. J. 1996, *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 467, 819

- Stancliffe, R. J., Glebbeek, E., Izzard, R. G. & Pols, O. R. 2007, *Astronomy and Astrophysics*, 464, L57.
- Stütz, Ch., Bagnulo, S., Jehin, E., Ledoux, C., Cabanac, R., Melo, C. & Smoker, J. V. 2006, *Astronomy and Astrophysics*, 451, 285.
- Tautvaišienė, G., Edvardsson, B., Tuominen, I. & Ilyin, I. 2000, *Astronomy and Astrophysics*, 360, 499.
- Tautvaišienė, G., Edvardsson, B., Pužeras, E. & Ilyin, I. 2005, *Astronomy and Astrophysics*, 431, 933.
- Tautvaišienė, G., Edvardsson, B., Pužeras, E., Barisevičius, G & Ilyin, I. 2010, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 509, 1213.
- Tomkin, J. & Lambert, D. L. 1984, *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 279, 220.
- Twarog, B. A., Ashman, K. M., & Anthony-Twarog, B. J. 1997, *The Astronomical Journal*, 114, 2556.
- van Winckel, H. & Reyniers, M. 2000, *Astronomy and Astrophysics*, 345, 135.
- Vassiliadis, E. & Wood, P.R. 1993, *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 413, 641.
- Villanova, S., Carraro, G., Bresolin, F. & Patat, F. 2005, *The Astronomical Journal*, 130, 652.
- Villanova S., Carraro, G. & Saviane, I. 2009, *Astronomy and Astrophysics*, 504, 845.
- von Hippel, T., Gilmore, G. & Jones, D.H.P. 1995, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 273, L39.
- Wiese, W. L., Smith, M. W. & Miles, B. M. 1969, *National Bureau of Standards Ref. Data. Ser.*
- Yong, D., Carney, B. W. & Teixeira de Almeida, M. L. 2005, *The Astronomical Journal*, 130, 597.
- Zács, L., Alksnis, O., Barzdis, A., Laure, A., Musaev, F. A., Bondar, A. & Sperauskas, J. 2011, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 417, 649.

Anexos: Listas de linhas e artigos

O material anexo desta tese está formado pelas listas de linhas dos elementos químicos observados nas estrelas do aglomerado NGC 5822 e pelos dois artigos publicados. As linhas observadas nas estrelas gigantes do aglomerado NGC 3114 e nas duas estrelas de Bário fazem parte dos anexos nos correspondentes artigos.

O primeiro artigo corresponde à descoberta das duas gigantes frias de alta rotação no aglomerado NGC 3114, este trabalho está publicado no volume 554 de junho/2013 do jornal europeio *Astronomy and Astrophysics*, o número DOI é 10.1051/0004 – 6361/201220252.

O segundo artigo corresponde à descoberta das estrelas de Bário no aglomerado NGC 5822, este trabalho está publicado no volume 146 de agosto/2013 do jornal americano *The Astronomical Journal*, o número DOI é 10.1088/0004–6256/146/2/39.

Tabela 6.1: Linhas de Ferro I e II observadas no aglomerado NGC 5822. Os números indicam a identificação (NGC 5822-#) dentro do aglomerado.

Elemento	λ	χ (eV)	$\log gf$	1	3	4	6	8	11	51	80	102	151	224	240	312	316	348	375	443
Fe I	5123.72	1.01	-3.070	—	—	110	—	—	—	—	140	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	5133.68	4.18	0.201	—	—	112	—	—	—	—	—	—	—	—	—	116	—	—	—	—
	5150.84	0.99	-3.000	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	131	—	—	—	—
	5151.91	1.01	-3.320	—	—	99	—	—	—	—	—	—	—	—	—	108	—	147	—	—
	5159.05	4.28	-0.650	—	—	—	—	—	—	81	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	5162.27	4.18	0.079	—	148	—	121	144	124	129	130	—	121	—	—	110	—	144	—	—
	5194.94	1.56	-2.090	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	147	—	—	—	—
	5198.71	2.22	-2.140	—	146	—	135	148	137	—	131	—	—	—	—	114	—	139	—	—
	5202.33	2.18	-1.840	—	—	122	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	5242.49	3.63	-0.970	130	111	75	111	112	108	113	107	113	110	111	130	80	114	114	127	131
	5250.20	0.12	-4.920	—	126	—	111	125	—	119	118	126	117	—	—	98	—	—	—	—
	5253.03	2.28	-3.790	89	59	—	49	61	48	52	49	—	53	—	84	42	57	59	76	65
	5281.79	3.04	-0.830	—	—	128	—	—	—	—	—	—	—	—	—	136	—	—	—	—
	5288.52	3.69	-1.510	—	89	58	84	89	91	84	83	81	84	85	—	68	85	83	114	117
	5302.30	3.28	-0.740	—	—	104	—	—	—	—	—	—	—	—	—	113	—	140	—	—
	5307.36	1.61	-2.970	—	131	94	—	141	123	—	127	—	—	—	—	100	143	136	—	—
	5315.05	4.37	-1.400	71	52	46	66	56	—	59	59	—	—	—	—	39	53	—	79	70
	5321.10	4.43	-1.190	80	63	43	57	62	—	62	56	58	—	63	79	47	65	67	76	77
	5322.04	2.28	-2.840	132	105	67	94	104	93	99	92	95	99	98	132	75	102	97	123	119
	5339.92	3.27	-0.680	—	—	105	—	—	—	—	150	—	—	—	—	110	—	—	—	—
	5364.87	4.45	0.230	150	141	90	133	135	136	—	129	—	134	—	—	95	139	127	149	—
	5367.46	4.42	0.439	—	—	—	138	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	144	—	—
	5373.70	4.47	-0.710	96	87	54	73	81	77	79	76	76	79	80	98	59	83	80	94	96
	5389.47	4.42	-0.250	—	—	72	96	—	97	102	—	95	—	—	118	76	—	99	114	—
	5393.16	3.24	-0.720	—	—	119	—	—	—	—	—	—	—	—	—	132	—	145	—	—
	5410.91	4.47	0.400	—	—	—	126	—	128	131	—	—	—	—	150	—	—	130	—	—
	5417.03	4.42	-1.530	71	58	39	53	56	51	58	—	50	56	56	71	40	57	54	68	66
	5425.24	3.20	-3.210	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	56	—	—	—	—	—
	5441.33	4.31	-1.580	74	56	38	52	56	50	52	48	46	54	51	74	41	58	55	67	70
	5445.04	4.39	0.041	142	133	89	131	130	123	—	122	130	127	—	136	90	136	128	149	146
	5487.74	4.32	-0.650	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	103	—
	5522.44	4.21	-1.400	81	66	47	62	69	62	72	64	55	61	63	80	50	67	62	85	75
	5532.74	3.57	-2.000	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	77	74	—	—
	5560.21	4.43	-1.040	84	72	50	67	73	69	73	67	67	69	69	82	53	72	72	82	81
	5569.61	3.42	-0.490	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	115	—	—	—	—
	5572.84	3.40	-0.280	—	—	135	—	—	—	—	—	—	—	—	—	142	—	—	—	—
	5576.08	3.43	-0.850	—	140	94	134	139	135	—	128	—	—	131	—	101	135	126	—	—
	5584.76	3.57	-2.170	84	68	47	57	70	60	67	63	65	60	61	90	48	67	62	83	78
	5624.00	4.39	-1.330	—	70	41	70	73	69	74	66	—	70	—	—	54	—	—	—	—
	5633.94	4.99	-0.120	—	82	57	84	85	77	82	81	87	79	83	95	61	86	—	95	97
	5635.82	4.26	-1.740	64	52	37	51	54	51	52	47	—	48	52	67	36	57	56	66	71
	5638.26	4.22	-0.720	121	101	67	94	101	97	99	87	94	96	99	118	73	102	103	114	115
	5686.53	4.55	-0.450	108	96	67	89	95	89	94	87	—	96	96	113	66	95	—	106	108

Tabela 1 continuação.

Elemento	λ	χ (eV)	$\log gf$	1	3	4	6	8	11	51	80	102	151	224	240	312	316	348	375	443
Fe I	5691.49	4.30	-1.370	—	73	51	70	74	67	75	60	—	—	—	—	—	63	63	90	73
	5705.46	4.30	-1.360	75	61	42	57	61	60	60	—	61	59	59	76	44	65	60	76	72
	5717.83	4.28	-0.979	105	90	—	—	—	—	71	—	79	—	86	105	—	95	89	105	103
	5731.76	4.26	-1.150	95	84	54	73	80	78	77	69	77	77	—	99	59	84	—	99	97
	5806.72	4.61	-0.900	88	72	53	72	—	71	75	70	72	72	71	93	54	78	76	89	87
	5814.80	4.28	-1.820	58	42	29	38	41	37	39	43	37	40	40	57	30	43	42	55	52
	5852.21	4.55	-1.180	—	66	—	62	68	62	68	58	64	66	64	—	51	68	64	—	88
	5883.81	3.96	-1.210	104	90	—	89	91	91	87	83	87	88	86	—	76	94	91	103	104
	5916.24	2.45	-2.990	125	—	—	—	98	91	91	—	93	—	94	—	76	99	93	124	120
	5934.65	3.93	-1.020	121	102	72	94	102	98	98	94	95	98	97	126	80	104	101	—	118
	6024.05	4.55	-0.060	136	120	88	119	126	123	114	114	117	121	119	127	90	131	107	120	141
	6027.05	4.08	-1.090	104	90	64	83	89	85	88	83	78	84	87	108	72	—	86	—	107
	6056.00	4.73	-0.400	100	89	66	80	88	83	84	—	82	84	84	96	64	—	90	101	113
	6065.48	2.61	-1.530	—	—	117	—	—	—	—	—	—	—	—	—	134	—	—	—	—
	6079.00	4.65	-0.970	80	65	47	59	69	62	66	60	63	62	64	77	51	69	67	78	72
	6082.71	2.22	-3.580	109	79	55	71	81	67	72	—	73	72	—	109	—	78	70	97	99
	6093.64	4.61	-1.350	62	47	36	47	53	46	48	44	44	45	49	65	37	50	50	60	62
	6096.66	3.98	-1.780	—	61	42	56	62	57	58	53	50	56	56	79	45	63	60	78	78
	6120.24	0.91	-5.950	76	33	—	—	32	—	28	26	29	—	29	77	—	30	28	60	60
	6136.61	2.45	-1.400	—	—	125	—	—	—	—	—	—	—	—	—	134	—	—	—	—
	6137.69	2.59	-1.400	—	—	138	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	6151.61	2.18	-3.290	123	90	66	84	91	82	88	79	81	84	85	125	74	90	86	115	114
	6157.72	4.08	-1.110	—	97	—	91	104	94	93	88	90	91	90	—	—	102	93	103	—
	6165.36	4.14	-1.470	85	68	50	64	67	66	68	62	64	66	68	89	54	71	68	86	85
	6170.50	4.79	-0.380	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	107
	6173.33	2.22	-2.880	150	112	81	—	115	106	108	97	102	107	103	—	93	113	106	141	133
	6187.99	3.94	-1.570	95	75	53	67	75	70	71	—	71	73	73	96	60	79	74	94	91
	6191.55	2.43	-1.420	—	—	128	—	—	—	—	—	—	—	—	—	142	—	—	—	—
	6200.31	2.60	-2.440	140	113	83	101	114	107	108	98	104	107	107	142	—	115	109	134	136
	6213.43	2.22	-2.480	—	128	93	120	129	118	124	114	114	123	124	—	103	140	—	—	—
	6252.55	2.40	-1.720	—	—	124	—	—	—	—	—	—	—	—	—	139	—	—	—	—
	6265.13	2.18	-2.550	—	141	—	130	141	130	—	125	125	134	126	—	—	138	135	—	—
	6311.50	2.83	-3.230	—	63	48	43	52	57	55	—	—	57	—	85	—	65	60	79	73
	6322.68	2.59	-2.430	—	120	—	110	118	108	112	109	100	114	111	150	—	121	111	142	140
	6380.74	4.19	-1.320	—	82	—	78	83	74	77	72	75	69	79	104	—	72	72	100	96
	6392.53	2.28	-4.030	79	48	—	43	52	44	44	40	—	49	—	84	40	51	49	75	72
	6393.60	2.43	-1.430	—	—	129	—	—	—	—	—	—	—	—	—	139	—	—	—	—
	6411.64	3.65	-0.660	—	144	109	141	146	—	—	133	—	—	—	—	116	139	147	—	—
	6419.95	4.73	-0.090	122	104	80	100	105	101	108	96	100	102	101	122	86	106	102	120	120
	6432.68	2.89	-3.580	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	55	—	—	—	—	—
	6436.40	4.19	-2.460	42	26	—	—	—	—	25	28	22	25	24	—	—	25	23	40	36
	6469.19	4.83	-0.620	—	—	—	84	—	—	88	76	77	—	—	—	—	—	82	—	—
	6518.36	2.83	-2.300	—	—	68	87	—	—	90	—	91	95	—	130	78	—	—	—	—
	6551.67	0.99	-5.790	—	37	27	—	35	—	34	35	—	—	—	—	36	31	29	63	61
	6574.22	0.99	-5.020	134	90	—	75	86	76	78	68	70	87	—	134	—	83	82	122	—
	6591.31	4.59	-2.070	38	23	—	—	—	—	24	—	—	—	—	27	—	18	24	25	20
	6592.91	2.72	-1.470	—	—	116	—	—	—	—	145	—	—	—	—	129	—	150	—	—

Tabela 1 continuação.

Elemento	λ	$\chi(\text{eV})$	$\log gf$	1	3	4	6	8	11	51	80	102	151	224	240	312	316	348	375	443
Fe I	6593.87	2.44	-2.420	—	133	—	121	—	124	—	—	121	—	125	—	—	128	125	—	149
	6597.56	4.79	-0.920	69	62	47	59	61	59	61	58	55	56	61	73	51	68	61	76	64
	6608.02	2.28	-4.030	91	57	38	50	55	46	50	46	52	54	52	95	41	55	51	81	80
	6609.11	2.56	-2.690	—	113	—	104	115	104	107	—	103	109	—	—	—	115	107	—	142
	6646.93	2.61	-3.990	—	40	28	37	40	36	34	31	29	40	35	—	34	34	36	—	—
	6653.85	4.14	-2.520	35	22	—	—	—	—	24	—	25	—	27	39	—	23	20	31	33
	6699.14	4.59	-2.190	31	—	—	—	—	—	—	—	18	—	20	—	—	17	17	26	25
	6703.56	2.76	-3.160	—	78	—	70	79	69	73	69	71	75	72	106	—	77	72	100	98
	6704.48	4.22	-2.660	21	—	—	—	—	—	—	—	—	—	14	—	—	13	12	20	20
	6713.74	4.79	-1.600	46	35	26	33	36	32	34	35	33	34	36	49	—	37	37	50	46
	6739.52	1.56	-4.950	—	42	37	36	43	41	39	—	42	50	42	84	32	43	42	66	69
	6745.95	4.07	-2.770	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	14	15	—	25
	6750.15	2.42	-2.620	—	118	—	108	119	108	113	106	110	115	111	—	97	117	111	142	146
	6752.70	4.64	-1.200	—	—	—	65	66	61	46	59	60	42	56	64	—	58	51	70	83
	6783.70	2.59	-3.980	—	—	—	43	47	42	47	—	45	49	—	—	—	—	—	—	—
	6793.25	4.07	-2.470	45	25	21	—	30	—	28	24	23	29	26	44	—	30	28	40	45
	6806.84	2.73	-3.210	107	74	56	69	77	67	70	64	69	71	71	—	—	76	71	92	101
	6810.26	4.61	-0.990	81	70	52	78	72	66	65	60	68	67	68	85	57	72	72	82	82
	6820.37	4.64	-1.170	—	67	—	59	66	61	63	62	59	65	64	80	—	66	63	77	75
	6841.33	4.61	-0.600	—	89	64	—	85	—	—	91	—	79	—	—	—	90	—	95	97
	6851.63	1.61	-5.320	—	34	22	28	35	—	31	—	—	—	—	—	—	26	—	48	44
	6858.15	4.61	-0.930	85	76	45	68	73	69	70	72	65	71	72	84	61	74	72	88	80
	7130.92	4.22	-0.700	128	114	—	118	119	117	—	107	—	95	—	—	—	122	—	—	139
	7132.98	4.08	-1.610	82	65	48	64	65	62	—	67	—	65	—	89	59	71	67	81	82
Fe II	4993.34	2.81	-3.670	55	58	—	54	58	—	58	53	60	56	64	62	—	—	58	67	—
	5132.65	2.81	-4.000	41	43	32	39	49	—	42	39	47	37	—	49	38	—	43	57	—
	5197.55	3.23	-2.250	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	113	109
	5234.61	3.22	-2.240	94	106	71	106	107	101	109	95	—	100	104	101	85	106	105	109	106
	5284.09	2.89	-3.010	79	86	57	81	88	84	86	77	—	78	—	—	70	92	89	95	96
	5325.55	3.22	-3.170	53	62	—	56	60	55	62	61	60	57	58	—	50	—	—	—	62
	5414.04	3.22	-3.620	35	45	30	45	48	42	45	44	40	41	42	43	37	48	44	44	48
	5425.24	3.20	-3.210	54	61	43	57	61	58	62	54	58	56	62	66	46	63	63	61	65
	5534.83	3.25	-2.770	—	—	—	—	—	—	—	69	—	—	—	—	—	81	—	83	83
	5991.36	3.15	-3.560	48	54	41	50	54	49	52	52	51	51	52	51	—	58	54	62	56
	6084.09	3.20	-3.800	—	42	28	39	40	37	42	—	—	37	35	39	34	43	37	43	—
	6149.24	3.89	-2.720	43	48	36	50	49	49	51	44	45	45	46	45	42	58	49	54	51
	6247.54	3.89	-2.340	—	64	49	75	—	69	76	—	69	58	75	60	—	70	69	—	—
	6416.92	3.89	-2.680	—	57	—	—	58	53	55	51	56	52	55	53	49	58	52	56	56
	6432.68	2.89	-3.580	61	64	46	—	67	—	62	58	61	56	68	—	—	66	61	63	62

Tabela 6.2: Linhas dos elementos desde o Sódio até o Níquel na mesma ordem de número atômico para as estrelas no aglomerado NGC 5822.

Elemento	λ	χ (eV)	$\log gf$	1	3	4	6	8	11	51	80	102	151	224	240	312	316	348	375	443
Na I	6154.22	2.10	-1.510	109	76	53	69	77	68	71	69	67	68	69	99	59	74	70	94	93
	6160.75	2.10	-1.210	111	84	60	85	90	84	86	84	86	91	87	109	71	93	84	101	112
Mg I	4730.04	4.34	-2.390	95	94	58	—	84	79	—	78	—	85	—	101	61	93	88	—	—
	5711.10	4.34	-1.750	—	124	84	118	—	117	—	125	112	120	117	144	—	128	121	140	142
	6318.71	5.11	-1.940	69	62	38	60	53	63	52	—	59	63	61	70	54	71	62	74	75
	6319.24	5.11	-2.160	49	41	28	41	36	42	34	40	38	42	43	53	33	54	49	29	22
	6319.49	5.11	-2.670	23	18	—	17	15	15	17	—	19	—	17	24	17	22	—	—	—
	6765.45	5.75	-1.940	38	—	—	—	—	16	16	—	—	23	—	27	—	—	—	—	26
	6894.89	5.75	-2.390	—	—	—	—	—	—	—	26	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	6965.41	5.75	-1.720	51	47	—	48	46	—	—	49	42	51	50	—	29	54	35	54	52
	7387.70	5.75	-0.870	85	—	56	73	79	73	83	79	73	—	—	—	66	—	80	—	—
	8712.69	5.93	-1.260	—	62	35	—	58	65	43	61	55	—	69	—	36	62	60	82	—
	8717.83	5.91	-0.700	—	94	—	87	—	—	—	79	—	92	89	99	—	103	83	98	—
	8736.04	5.94	-0.340	123	131	102	126	129	118	—	120	—	132	123	136	—	148	135	—	141
Al I	6696.03	3.14	-1.481	79	52	43	56	53	51	50	37	47	59	52	88	46	57	57	79	76
	6698.67	3.14	-1.630	66	40	31	35	58	36	39	33	35	—	—	69	28	37	36	57	56
	7835.32	4.04	-0.580	78	62	43	50	50	50	53	58	53	59	60	93	50	52	53	77	61
	7836.13	4.02	-0.400	81	70	50	60	65	58	60	61	66	69	73	94	59	66	65	79	82
	8772.88	4.02	-0.250	—	—	—	—	88	91	—	—	75	100	95	116	—	88	70	94	—
	8773.91	4.02	-0.070	100	91	77	88	—	—	91	96	—	—	101	—	—	—	—	112	—
Si I	5793.08	4.93	-2.060	67	66	47	57	58	57	63	60	55	58	58	68	47	61	60	70	69
	6125.03	5.61	-1.540	—	46	34	44	43	45	45	43	38	42	45	43	38	46	43	45	50
	6131.58	5.62	-1.685	31	35	25	29	30	30	34	34	33	35	34	35	26	36	33	36	37
	6145.02	5.61	-1.430	52	50	38	47	53	45	49	47	44	50	46	47	40	—	46	47	49
	6155.14	5.62	-0.770	94	92	66	86	93	87	90	83	86	86	88	93	70	96	91	96	99
	7760.64	6.20	-1.280	25	34	19	—	—	24	24	27	23	34	29	19	25	22	27	—	24
	7800.00	6.18	-0.720	49	53	46	—	58	61	67	54	44	56	51	55	49	62	58	58	53
	8728.01	6.18	-0.360	76	—	59	—	—	73	77	85	71	—	73	—	72	79	—	70	—
	8742.45	5.87	-0.510	98	105	—	105	112	100	107	96	—	109	100	93	—	100	88	89	87
Ca I	6102.73	1.88	-0.790	—	—	119	—	—	—	150	152	—	—	—	—	126	—	—	—	—
	6122.23	1.89	-0.320	—	—	145	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	6161.30	2.52	-1.270	122	92	65	—	93	92	87	81	—	97	86	120	78	94	—	115	121
	6166.44	2.52	-1.140	126	99	71	91	100	91	98	91	90	95	97	130	78	98	94	117	114
	6169.04	2.52	-0.800	147	120	86	104	120	117	117	105	105	109	110	—	91	113	119	145	143
	6169.56	2.53	-0.480	—	130	93	114	131	134	130	115	114	120	117	—	98	125	134	—	—
	6455.60	2.51	-1.290	122	89	69	85	91	83	90	80	84	89	88	124	76	85	89	115	114
	6471.66	2.51	-0.690	148	123	88	117	124	120	120	115	116	120	118	150	102	120	119	142	141
	6493.79	2.52	-0.110	—	—	115	144	150	146	—	—	142	151	145	—	143	150	—	—	—
Ti I	4512.74	0.84	-0.480	143	113	60	—	107	98	106	99	98	104	104	—	—	107	—	138	137
	4518.03	0.83	-0.320	—	115	—	109	121	108	—	—	107	116	106	—	—	114	115	147	146
	4533.25	0.85	0.480	—	—	—	131	137	—	—	—	131	—	134	—	—	—	—	—	—
	4534.78	0.84	0.280	—	140	84	139	141	—	139	126	141	141	139	—	—	144	—	—	—

Tabela 2 continuação.

Elemento	λ	χ (eV)	$\log gf$	1	3	4	6	8	11	51	80	102	151	224	240	312	316	348	375	443
Ti I	4548.77	0.83	-0.350	—	—	70	—	104	—	112	105	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	4555.49	0.85	-0.489	—	—	66	99	103	92	106	—	98	104	101	—	—	107	104	136	134
	4562.64	0.02	-2.660	100	61	31	44	48	45	51	50	43	52	46	108	30	52	45	84	86
	4563.43	2.43	-0.380	52	30	16	26	31	34	31	—	29	32	35	68	14	39	29	59	60
	4617.28	1.75	0.389	129	103	58	91	101	87	94	91	91	96	88	134	62	97	—	123	119
	4639.95	1.74	-0.190	103	80	—	67	—	73	—	—	71	79	71	—	—	79	78	—	109
	4681.92	0.05	-1.070	—	—	73	116	120	110	—	—	65	116	111	—	—	126	112	—	150
	4758.12	2.25	0.420	100	—	39	67	73	72	—	—	66	68	68	103	—	74	73	97	94
	4759.28	2.25	0.511	108	—	44	68	77	79	76	—	33	—	72	108	—	77	74	100	97
	4778.26	2.24	-0.330	71	42	22	39	38	40	41	40	69	37	36	71	23	38	41	62	55
	4981.72	0.84	0.500	—	—	—	—	—	—	156	153	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	4997.10	0.00	-2.120	124	—	51	—	83	74	—	—	—	76	72	—	52	82	75	—	127
	4999.51	0.83	0.250	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	117	—	—	—	—
	5009.66	0.02	-2.260	—	—	—	79	—	74	—	—	75	—	76	—	—	—	83	—	121
	5016.17	0.85	-0.570	150	113	69	104	113	104	109	106	102	99	104	147	72	109	106	—	138
	5022.87	0.83	-0.429	150	119	71	111	117	113	113	105	105	115	115	—	79	120	115	150	—
	5039.96	0.02	-1.130	—	143	79	118	125	118	—	119	116	123	126	—	—	128	122	—	—
	5040.61	0.83	-1.790	—	—	33	48	51	53	—	—	—	62	—	—	33	59	55	93	—
	5043.59	0.84	-1.730	108	—	—	54	59	57	62	—	58	60	60	111	43	61	57	95	97
	5062.10	2.16	-0.460	80	43	—	39	42	38	39	—	37	43	40	82	25	39	38	66	66
	5087.06	1.43	-0.840	—	73	—	—	—	—	73	66	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	5113.45	1.44	-0.780	99	70	42	60	63	59	63	—	59	64	59	107	42	66	63	—	92
	5145.47	1.46	-0.570	113	80	49	66	79	69	74	68	65	72	70	119	49	73	66	100	100
	5147.48	0.00	-2.010	150	99	55	81	86	82	93	81	86	89	82	—	71	86	—	121	127
	5152.19	0.02	-2.020	135	—	55	—	86	—	—	—	—	—	76	137	59	84	81	—	—
	5173.75	0.00	-1.120	—	146	91	—	—	—	135	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	5210.39	0.05	-0.879	—	—	91	142	145	142	—	—	142	—	142	—	104	142	145	—	—
	5219.71	0.02	-2.290	—	88	56	70	88	64	—	77	72	80	78	—	59	84	80	123	119
	5223.63	2.09	-0.561	80	43	26	40	37	—	38	—	40	47	50	90	32	46	44	—	70
	5282.44	1.05	-1.300	—	—	36	—	58	—	62	58	—	—	—	—	35	52	—	—	—
	5295.78	1.05	-1.631	85	45	29	38	44	41	—	36	38	44	39	91	30	44	40	75	77
	5490.16	1.46	-0.932	92	60	42	56	63	57	57	—	53	59	55	108	42	61	56	94	88
	5503.90	2.58	-0.190	60	32	17	—	26	34	—	—	24	35	37	76	—	37	34	59	56
	5662.16	2.32	-0.110	98	—	—	43	61	—	59	55	46	59	46	97	—	60	50	90	79
	5689.48	2.30	-0.470	74	38	—	32	37	33	36	35	31	37	35	76	27	36	35	60	57
	5866.46	1.07	-0.839	—	104	—	92	90	92	97	—	90	99	94	—	—	99	117	126	—
	5922.12	1.05	-1.470	122	67	41	57	64	58	61	—	54	59	57	110	—	63	59	93	100
	5978.55	1.87	-0.500	99	61	41	55	60	56	56	54	54	64	59	104	—	60	58	91	90
	6091.18	2.27	-0.370	86	44	—	35	35	37	44	45	36	43	39	84	—	42	38	66	66
	6126.22	1.05	-1.370	121	71	—	57	68	61	65	58	57	65	60	124	—	66	62	102	104
	6258.11	1.44	-0.360	135	—	—	86	98	88	96	88	84	92	86	143	—	95	91	125	124
	6261.10	1.43	-0.480	—	—	—	91	102	95	97	90	91	99	93	—	—	104	98	—	—
	6554.24	1.44	-1.220	108	52	—	53	50	49	56	44	52	60	53	116	—	57	53	96	95
Cr I	4789.34	2.54	-0.370	—	—	—	—	—	—	—	93	—	—	—	—	72	—	—	—	—
	4801.03	3.12	-0.130	107	85	54	74	82	75	80	80	—	—	—	—	—	—	—	109	—
	4814.26	3.09	-1.170	—	—	26	—	29	—	—	39	—	41	—	—	—	—	—	—	—

Tabela 2 continuação.

Elemento	λ	χ (eV)	$\log gf$	1	3	4	6	8	11	51	80	102	151	224	240	312	316	348	375	443
Cr I	4836.34	3.11	-0.220	—	—	—	—	32	36	39	41	36	43	—	60	—	40	39	54	53
	4936.34	3.11	-0.220	99	72	44	65	75	66	70	65	68	70	75	97	45	73	71	89	87
	4954.80	3.12	-0.140	93	79	49	69	78	75	74	—	70	67	72	95	53	77	73	93	86
	4964.93	0.94	-2.530	—	—	—	70	77	—	75	—	—	—	—	—	—	—	77	—	107
	5193.50	3.42	-0.900	55	31	22	28	25	26	27	—	29	29	29	—	14	36	30	—	—
	5196.45	3.45	-0.200	—	—	39	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	50	56	78	—
	5200.18	3.38	-0.530	—	55	34	48	—	51	55	53	47	55	53	80	—	—	52	—	—
	5214.13	3.37	-0.740	51	31	18	29	34	28	—	44	27	31	35	51	21	31	31	45	49
	5214.61	3.32	-0.660	80	—	22	47	49	50	—	—	44	44	—	—	36	54	51	69	—
	5238.96	2.71	-1.300	—	39	24	34	36	35	—	35	37	38	36	63	24	38	40	55	55
	5243.36	3.39	-0.570	—	—	—	—	—	—	—	—	—	54	—	—	—	—	36	—	—
	5247.57	0.96	-1.631	—	129	82	122	125	118	126	121	113	123	—	—	94	124	116	—	—
	5272.00	3.45	-0.420	62	45	29	37	48	43	41	36	36	43	42	65	27	40	—	56	58
	5296.70	0.98	-1.240	—	139	92	126	—	132	133	129	132	136	133	—	—	139	134	—	—
	5298.28	0.98	-1.170	—	157	96	139	150	147	—	—	142	—	142	—	123	150	149	—	—
	5300.75	0.98	-2.130	142	105	67	94	106	95	100	91	93	98	97	147	71	103	101	—	130
	5304.18	3.46	-0.690	52	34	21	27	33	26	31	30	27	31	26	48	18	30	29	45	45
	5312.86	3.45	-0.561	—	50	24	36	37	—	—	—	34	38	—	59	—	37	37	58	48
	5318.77	3.44	-0.690	64	37	18	31	32	33	32	—	29	41	31	64	22	34	31	58	50
	5340.45	3.44	-0.730	—	—	—	40	—	39	—	—	—	—	—	57	—	43	31	52	56
	5345.80	1.00	-0.971	—	—	110	—	—	—	—	—	—	—	—	—	125	—	—	—	—
	5348.33	1.00	-1.290	—	144	95	136	143	133	140	136	124	145	134	—	102	143	140	—	—
	5409.79	1.03	-0.710	—	—	139	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	5628.65	3.42	-0.770	47	30	20	30	31	32	—	26	26	28	27	54	19	31	27	45	44
	5702.32	3.45	-0.680	—	—	—	—	—	—	—	47	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	5781.18	3.32	-0.879	68	39	28	32	43	—	36	32	43	—	—	—	—	—	43	—	—
	5781.75	3.32	-0.750	71	49	—	—	48	—	45	39	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	5783.07	3.32	-0.400	76	55	38	51	54	53	55	48	52	56	53	86	43	57	61	77	74
	5783.86	3.32	-0.300	—	—	—	—	72	71	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	5784.97	3.32	-0.380	80	56	39	50	56	53	54	53	50	57	54	87	42	60	56	75	77
	5787.93	3.32	-0.080	96	74	49	62	71	65	69	67	63	66	65	96	54	73	70	86	86
	6330.10	0.94	-2.920	123	78	54	66	75	66	72	63	65	71	68	124	60	72	67	103	101
Ni I	4513.00	3.71	-1.520	—	33	—	28	28	26	31	—	26	29	31	46	22	29	38	—	41
	4740.17	3.48	-1.780	—	—	26	—	45	—	—	—	—	—	—	—	—	30	39	—	—
	4904.42	3.54	-0.190	—	—	68	—	115	105	—	—	—	109	104	—	—	111	107	122	127
	4913.98	3.74	-0.600	92	77	51	75	79	76	79	69	71	78	77	93	53	74	79	98	89
	4935.83	3.94	-0.340	89	78	54	73	83	72	74	76	68	72	79	—	—	78	75	—	—
	4953.21	3.74	-0.620	—	—	53	77	85	78	80	76	74	78	75	—	53	83	78	—	—
	4967.52	3.80	-1.600	41	30	17	29	30	27	28	27	29	34	35	42	18	29	29	49	39
	4995.66	3.63	-1.611	58	35	—	36	35	32	35	—	39	36	38	44	28	44	37	49	—
	5003.75	1.68	-3.130	91	—	—	59	68	59	65	59	55	67	67	93	—	73	64	87	—
	5010.94	3.63	-0.900	78	73	46	64	68	62	68	62	61	65	—	76	—	74	—	80	75
	5084.11	3.68	-0.180	—	—	—	—	—	—	—	89	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	5094.42	3.83	-1.120	60	47	—	40	51	43	44	42	44	45	44	66	—	48	56	59	60
	5115.40	3.83	-0.280	—	91	—	—	—	—	—	87	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	5157.98	3.61	-1.719	46	36	25	30	37	31	34	34	32	32	34	47	22	35	34	42	46

Tabela 6.3: Linhas dos elementos do processo-s desde o Ítrio até o Neodímio na mesma ordem de número atômico para as estrelas no aglomerado NGC 5822.

Elemento	λ	χ	$\log gf$	1	3	4	6	8	11	51	80	102	151	224	240	312	316	348	375	443
Y II	4883.68	1.08	0.070	—	101	66	—	103	86	—	93	98	97	—	—	76	99	95	117	123
	5087.43	1.08	-0.170	—	87	54	80	86	75	86	84	80	79	88	—	63	85	81	—	—
	5123.21	0.99	-0.930	—	—	—	—	—	—	—	—	68	—	—	—	—	—	—	—	—
	5200.41	0.99	-0.570	106	81	53	72	84	72	81	69	76	78	81	98	61	76	75	96	104
	5205.72	1.03	-0.340	106	—	55	72	89	86	—	74	75	—	82	—	70	—	76	—	101
	5289.81	1.03	-1.850	35	26	—	20	20	16	22	21	18	19	25	37	21	22	19	29	31
	5402.78	1.84	-0.440	65	49	33	35	43	33	50	42	—	36	43	56	35	37	37	50	50
Zr I	4772.30	0.62	-0.060	71	27	18	36	25	31	26	25	24	29	30	72	15	28	28	53	53
	4784.94	0.69	-0.600	—	—	—	—	—	13	—	—	—	—	—	28	—	—	—	19	30
	4805.87	0.69	-0.580	41	—	10	—	12	15	—	—	—	—	10	39	—	—	—	26	25
	4809.47	1.58	0.350	26	—	—	—	—	—	—	—	—	—	12	22	—	—	—	—	13
	4815.05	0.65	-0.380	—	—	—	—	—	—	—	—	—	10	—	52	17	—	—	—	—
	4815.63	0.60	-0.270	—	34	12	—	20	24	17	—	27	21	27	60	—	21	17	42	37
	4828.05	0.62	-0.750	40	10	—	15	—	—	—	—	—	—	—	39	—	—	—	22	21
	5046.55	1.53	-0.180	13	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	15	—	—	—	—	—
	5385.13	0.52	-0.640	47	19	13	15	10	13	16	10	—	13	12	46	10	10	12	31	38
	5879.79	0.15	-1.030	—	18	—	—	13	—	11	—	18	10	—	50	—	19	11	29	32
	5955.34	0.00	-1.700	—	11	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	18	12
	6032.60	1.48	-0.350	14	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	6127.46	0.15	-1.060	62	17	10	15	14	19	11	12	12	15	17	65	11	15	11	37	40
	6134.57	0.00	-1.280	58	18	10	15	14	16	17	10	—	12	12	60	12	11	13	39	38
	6140.46	0.52	-1.410	22	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	18	—	—	—	11	—
	6143.18	0.07	-1.100	70	23	16	—	14	16	16	15	18	20	20	71	18	18	15	46	46
La II	4086.71	0.00	-0.160	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	4934.83	1.25	-0.920	—	—	—	—	14	—	—	—	—	10	—	21	—	12	—	—	—
	5122.90	0.32	-0.930	—	51	29	37	—	34	46	—	34	35	46	—	—	46	36	—	56
	5303.53	0.32	-1.350	49	29	18	23	30	29	28	22	20	21	26	47	25	27	21	43	42
	5880.63	0.23	-1.830	29	15	—	12	11	16	16	14	17	—	20	43	20	16	18	30	31
	6320.43	0.17	-1.520	55	29	23	23	24	24	27	23	22	24	27	58	29	35	26	50	47
	6390.48	0.32	-1.410	60	33	21	22	26	24	27	—	26	27	32	57	29	28	22	44	43
	6774.33	0.12	-1.709	—	—	18	—	—	—	—	—	—	—	22	49	28	—	—	—	39
Ce II	4073.47	0.48	0.320	—	72	—	—	—	—	—	60	—	—	—	—	—	73	—	—	—
	4120.84	0.32	-0.240	66	—	—	46	55	53	—	—	—	51	55	—	—	55	—	—	—
	4127.38	0.68	0.240	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	4222.60	0.12	-0.180	—	—	—	50	69	62	—	—	61	—	—	—	—	65	—	—	—
	4418.79	0.86	0.310	—	54	33	—	—	57	—	—	—	—	60	—	36	—	—	—	58
	4486.91	0.30	-0.360	—	—	36	—	62	—	—	—	—	—	—	—	—	63	56	—	—
	4562.37	0.48	0.330	91	72	42	63	70	68	70	67	61	64	70	90	49	72	61	82	85
	4628.16	0.52	0.260	83	71	40	59	69	63	61	56	60	61	68	90	47	69	70	87	84
	5117.17	1.40	0.010	26	—	—	13	15	13	16	—	13	—	—	23	12	—	13	29	23
	5187.46	1.21	0.300	51	41	26	31	35	28	35	—	28	30	—	53	27	34	39	49	45
	5274.24	1.28	0.389	56	39	24	34	39	35	36	39	32	33	39	53	29	39	33	50	50

