



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

sid.inpe.br/mtc-m21d/2023/07.25.19.42-TDI

**ESTRELAS ANÃS F-G HOSPEDEIRAS DE PLANETAS
POSSIVELMENTE ROCHOSOS: RAZÕES DE
ABUNDÂNCIAS CHAVE**

Matheus Vieira da Costa

Dissertação de Mestrado do Curso
de Pós-Graduação em Astrofísica,
orientada pelo Dr. André de Castro
Milone, aprovada em 24 de maio de
2023.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34T/49GL3GL>>

INPE
São José dos Campos
2023

PUBLICADO POR:

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Coordenação de Ensino, Pesquisa e Extensão (COEPE)
Divisão de Biblioteca (DIBIB)
CEP 12.227-010
São José dos Campos - SP - Brasil
Tel.:(012) 3208-6923/7348
E-mail: pubtc@inpe.br

CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO DA PRODUÇÃO INTELLECTUAL DO INPE - CEPPII (PORTARIA Nº 176/2018/SEI-INPE):

Presidente:

Dra. Marley Cavalcante de Lima Moscati - Coordenação-Geral de Ciências da Terra (CGCT)

Membros:

Dra. Ieda Del Arco Sanches - Conselho de Pós-Graduação (CPG)
Dr. Evandro Marconi Rocco - Coordenação-Geral de Engenharia, Tecnologia e Ciência Espaciais (CGCE)
Dr. Rafael Duarte Coelho dos Santos - Coordenação-Geral de Infraestrutura e Pesquisas Aplicadas (CGIP)
Simone Angélica Del Ducca Barbedo - Divisão de Biblioteca (DIBIB)

BIBLIOTECA DIGITAL:

Dr. Gerald Jean Francis Banon
Clayton Martins Pereira - Divisão de Biblioteca (DIBIB)

REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:

Simone Angélica Del Ducca Barbedo - Divisão de Biblioteca (DIBIB)
André Luis Dias Fernandes - Divisão de Biblioteca (DIBIB)

EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:

Ivone Martins - Divisão de Biblioteca (DIBIB)
André Luis Dias Fernandes - Divisão de Biblioteca (DIBIB)



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

sid.inpe.br/mtc-m21d/2023/07.25.19.42-TDI

**ESTRELAS ANÃS F-G HOSPEDEIRAS DE PLANETAS
POSSIVELMENTE ROCHOSOS: RAZÕES DE
ABUNDÂNCIAS CHAVE**

Matheus Vieira da Costa

Dissertação de Mestrado do Curso
de Pós-Graduação em Astrofísica,
orientada pelo Dr. André de Castro
Milone, aprovada em 24 de maio de
2023.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34T/49GL3GL>>

INPE
São José dos Campos
2023

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Costa, Matheus Vieira da.

C823e Estrelas anãs F-G hospedeiras de planetas possivelmente rochosos: razões de abundâncias chave / Matheus Vieira da Costa. – São José dos Campos : INPE, 2023.
xxiv + 73 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m21d/2023/07.25.19.42-TDI)

Dissertação (Mestrado em Astrofísica) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2023.
Orientador : Dr. André de Castro Milone.

1. Anãs F-G. 2. Planetas rochosos. 3. Voláteis. 4. Litófilos.
5. Siderófilos. I.Título.

CDU 524.314



Esta obra foi licenciada sob uma Licença [Creative Commons Atribuição-NãoComercial 3.0 Não Adaptada](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0 Unported License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).



MINISTÉRIO DA
CIÊNCIA, TECNOLOGIA
E INOVAÇÃO



INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS
Serviço de Pós-Graduação - SEPGR

DEFESA FINAL DE DISSERTAÇÃO DE MATHEUS VIEIRA DA COSTA
REG. 291203/2021, BANCA Nº 112/2023

No dia 24 de maio de 2023, por videoconferência, o(a) aluno(a) mencionado(a) acima defendeu seu trabalho final (apresentação oral seguida de arguição) perante uma Banca Examinadora, cujos membros estão listados abaixo. O(A) aluno(a) foi APROVADO(A) pela Banca Examinadora, por unanimidade, em cumprimento ao requisito exigido para obtenção do Título de Mestre em Astrofísica, com a exigência de que o trabalho final a ser publicado deverá incorporar as correções sugeridas pela Banca Examinadora, com revisão pelo(s) orientador(es).

Título: ESTRELAS ANÃS F-G HOSPEDEIRAS DE PLANETAS POSSIVELMENTE ROCHOSOS: RAZÕES DE ABUNDÂNCIAS CHAVE

Observações da banca: O aluno deverá incorporar as sugestões e recomendações feitas pelos membros da banca e a revisão final do texto ficará sob responsabilidade do orientador.

Membros da banca:

Dr. Carlos Alexandre Wuensche de Souza – Presidente – INPE

Dr. André de Castro Milone – Orientador – INPE

Dr. Jorge Luis Melendez Moreno – Membro Externo – IAG/USP

Dr. Ronaldo Oliveira da Silva – Membro Externo – INAF/Itália



Documento assinado eletronicamente por **andré de Castro Milone, Pesquisador**, em 26/05/2023, às 13:43 (horário oficial de Brasília), com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Carlos Alexandre Wuensche de Souza, Chefe da Divisão de Astrofísica**, em 26/05/2023, às 14:01 (horário oficial de Brasília), com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Ronaldo Oliveira da Silva (E), Usuário Externo**, em 30/05/2023, às 04:06 (horário oficial de Brasília), com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Jorge Luis Melendez moreno (E), Usuário Externo**, em 08/06/2023, às 11:17 (horário oficial de Brasília), com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site <https://sei.mcti.gov.br/verifica.html>, informando o código verificador **11078925** e o código CRC **52DDB1A8**.

Referência: Processo nº 01340.004128/2023-59

SEI nº 11078925

*“Uma linha reta pode ser a distância mais curta entre dois pontos,
mas não é de forma alguma a mais interessante.”*

O TERCEIRO DOUTOR
em “Doctor Who: The Time Warrior”, 1973

*As quatro mulheres da minha vida minha avó **Terezinha**,
minha mãe **Dileuza** e minhas tias **Genice** e **Elbina**.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, por me proporcionar a oportunidade de seguir neste mestrado.

Um agradecimento especial as quatro mulheres da minha vida, minha avó Terezinha, minha mãe Dileuza e minhas tias Genice e Elbina, por sempre me motivarem e me apoiarem nos meus objetivos.

Agradeço a Eduarda Satira, por ser essa pessoa especial que sempre me apoiou. Obrigado por ser a melhor irmã de coração de todas.

Agradeço a Giovani Vieira, por me ajuda com linguagem de programação quando precisei.

Agradeço a minha família e amigos, por se fazerem presentes em minha vida e me incentivarem nesta jornada.

Agradeço a Nathaiany e Isabella, duas pessoas importantes em minha vida. Obrigado por sempre estarem comigo.

Agradeço ao meu orientador, André Milone, que teve toda a paciência para me ensinar, ajudar e motivar em cada passo do meu projeto.

Agradeço a Fernando Campos pela ajuda com linguagem de programação em python.

Agradeço a Capes pelo apoio financeiro.

Por fim, um agradecimento especial ao meu professor de física do ensino médio Nilson Ned Silva de Almeida por ser o responsável por me fazer gostar e escolher a física.

RESUMO

Neste trabalho, propomos tentar obter possíveis indicadores químicos que possam relacionar a presença de planetas possivelmente rochosos com sua estrela hospedeira. Para isso, foram estabelecidos critérios para a seleção de amostras de estrelas da sequência principal que permitiriam a realização deste estudo. Duas amostras foram feitas, uma contendo 160 anãs F-G com ao menos um planeta possivelmente rochoso detectado em cada, e outra de comparação com 835 anãs F-G cobrindo os mesmos intervalos de parâmetros fotosféricos (T_{ef} , $[\text{Fe}/\text{H}]$ e $\log g$) da amostra anterior, porém sem nenhum tipo de planeta detectado em cada estrela. Além disso, foi realizada previamente uma classificação cinemática a fim de usar apenas estrelas com uma alta probabilidade de pertencerem ao disco fino (acima de 70%). Com ambas as amostras selecionadas, foram feitas análises estatísticas: (i) análises das distribuições de razões de abundâncias (na escala $[\text{X}/\text{H}]$, onde $\text{X} = \text{Fe}, \text{C}, \text{N}, \text{O}, \text{Na}, \text{Mg}, \text{Al}, \text{Si}, \text{Ca}, \text{Ti}, \text{V}, \text{Cr}, \text{Mn}, \text{Ni}$ e Y); (ii) árvores de classificação para as amostras ao longo do espaço de abundâncias ($[\text{X}/\text{H}]$), onde as razões de abundâncias usadas em cada árvore foram distribuídas em grupos específicos (todos os elementos, voláteis, litófilos e siderófilos); (iii) análise de discriminante linear no espaço de abundâncias $[\text{X}/\text{H}]$; (iv) análise de razões de abundâncias chave entre metais $[\text{E1}/\text{E2}]$ através de testes de hipótese nula (testes de Welch, Student e variância) em conjunto com distribuições de kernel; (v) análise de múltiplos gráficos de $[\text{X}/\text{H}]$ para os 15 elementos usados neste trabalho e para razões $[\text{C}/\text{O}]$, $[\text{Mg}/\text{Si}]$ e $[\text{Ni}/\text{Fe}]$ ligadas respectivamente aos voláteis, litófilos e siderófilos, tal que todas as razões de abundâncias são dispostas em função da metalicidade $[\text{Fe}/\text{H}]$. Verificamos que os métodos usados apresentam um bom potencial classificatório. Além disso, o sódio (Na) aparenta ser um bom indicador da presença de planetas possivelmente rochosos em anãs F-G. Não excluindo da análise as estrelas com $[\text{N}/\text{H}] < -0,647$ dex, à primeira vista, o nitrogênio poderia ser tomado como um bom indicador da presença deste tipo de planetas em anãs F-G. Contudo, ao verificar a situação da razão $[\text{N}/\text{H}]$ com base nos resultados dos demais métodos, concluímos que este resultado não pode ser considerado confiável. As razões $[\text{Ni}/\text{Fe}]$ e $[\text{C}/\text{O}]$ mostram-se como indicadores sutis quanto à presença de planetas rochosos a partir dos resultados das árvores de classificação (siderófilos e voláteis respectivamente), que são consistentes com os resultados da análise $[\text{E1}/\text{E2}]$ versus $[\text{Fe}/\text{H}]$.

Palavras-chave: Anãs F-G. Planetas rochosos. Voláteis. Litófilos. Siderófilos. Árvore de classificação. Análise de discriminante linear. Abundâncias químicas estelares.

F-G DWARF STARS HOSTING POSSIBLY ROCKY PLANETS: KEY ABUNDANCE RATIOS

ABSTRACT

In this work, we propose to obtain possible chemical indicators that can relate the presence of possibly rocky planets with their host star. To do that, some criteria were established for the selection of samples of main sequence stars that would allow this study to be carried out. Two samples have been defined, one containing 160 F-G dwarfs with at least one possibly rocky planet detected in each, and another for comparison with 835 F-G dwarfs covering the same ranges of photospheric parameters (T_{ef} , $[\text{Fe}/\text{H}]$ and $\log g$) as the previous sample but with no planet detected around each star. Furthermore, a kinematic classification was previously performed in order to use only stars with a high probability of belonging to the thin disk (above 70%). With both samples selected, statistical analyzes were performed: (i) analyzes of distributions of abundance ratios (on the $[\text{X}/\text{H}]$ scale, where $\text{X} = \text{Fe}, \text{C}, \text{N}, \text{O}, \text{Na}, \text{Mg}, \text{Al}, \text{Si}, \text{Ca}, \text{Ti}, \text{V}, \text{Cr}, \text{Mn}, \text{Ni}$ and Y); (ii) classification trees for the sample over the abundance space ($[\text{X}/\text{H}]$), where the abundance ratios used in each tree were distributed into specific groups (all elements, volatiles, lithophiles and siderophiles); (iii) linear discriminant analysis in the abundance space $[\text{X}/\text{H}]$; (iv) analysis of key abundance ratios between metals $[\text{E1}/\text{E2}]$ through null hypothesis testing (Welch, Student and variance tests) together with kernel distributions; (v) analysis of multiple graphs of $[\text{X}/\text{H}]$ for the major elements observed in the previous methods and for $[\text{C}/\text{O}]$, $[\text{Mg}/\text{Si}]$ and $[\text{Ni}/\text{Fe}]$ ratios, respectively representing the volatile, lithophiles and siderophiles groups where all abundance ratios are arranged as a function of metallicity $[\text{Fe}/\text{H}]$. We verified that the applied methods present a good classification potential. In addition, sodium (Na) seems to be a good indicator of the presence of possibly rocky planets around F-G dwarfs. Keeping the stars with $[\text{N}/\text{H}] < -0.647$ dex in the analysis, this ratio would be considered as a good indicator for the presence of possibly rocky planets around F-G dwarfs. However, after verifying the situation of $[\text{N}/\text{H}]$ based on the results from other methods, we conclude that this result is not reliable. The $[\text{Ni}/\text{Fe}]$ and $[\text{C}/\text{O}]$ ratios are subtle indicators of the presence of rocky planets based on the classification tree results (siderophiles and volatiles groups respectively), which are consistent with the results of the analysis $[\text{E1}/\text{E2}]$ versus $[\text{Fe}/\text{H}]$.

Keywords: F-G dwarfs. Rocky planets. Volatiles. Lithophiles. Siderophiles. Classification tree. Linear discriminant analysis. Stellar chemical abundances.

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
1.1	2
2.1	11
2.2	13
3.1	16
3.2	17
3.3	19
3.4	20
3.5	22
3.6	25
4.1	27
4.2	29
4.3	32
4.4	34
4.5	38
4.6	40
4.7	42
4.8	43
4.9	44

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
3.1 Tabela listando os filtros estelares e planetários usados para obter a amostra ampla de anãs F-G-K-M com metalicidade em torno da solar hospedeiras de planetas potencialmente rochosos.	15
3.2 Tabela listando os resultados obtidos através da regressão linear.	23
4.1 Tabela de índices de discriminantes lineares das razões de abundâncias obtidas através de LDA.	37
A.1 Raio (R_{\oplus}) com erro, Massa (M_{\oplus}) com erro, Densidade média (g.cm^{-3}) com erro e método de medição de medição da Massa dos 195 planetas da amostra final de estudo com 160 anãs F-G.	57
B.1 Parâmetros fotosféricos com erros da amostra final de estudo com 160 anãs F-G (T_{ef} , $\log g$, $[\text{Fe}/\text{H}]$), compilados do NASA Exoplanet Archive.	61
C.1 Abundâncias $[\text{X}/\text{H}]$ (para $\text{X} = \text{Fe}, \text{C}, \text{N}, \text{O}$ e Na e seus respectivos erros) dos 15 elementos da amostra final de estudo com 160 anãs F-G, advindos do catálogo Hypatia.	65
C.2 Abundâncias $[\text{X}/\text{H}]$ (para $\text{X} = \text{Mg}, \text{Al}, \text{Si}, \text{Ca}$ e Ti e seus respectivos erros) dos 15 elementos da amostra final de estudo com 160 anãs F-G, advindos do catálogo Hypatia.	68
C.3 Abundâncias $[\text{X}/\text{H}]$ (para $\text{X} = \text{V}, \text{Cr}, \text{Mn}, \text{Ni}$ e Y e seus respectivos erros) dos 15 elementos da amostra final de estudo com 160 anãs F-G, advindos do catálogo Hypatia	71

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

KDE	–	Kernel Estimation Density
LDA	–	Linear Discriminant Analysis
LSR	–	Local Standard of Rest
NASA	–	National Aeronautics and Space Administration
PDF	–	Function Density Probability
RMS	–	Root Mean Square
RV	–	Radial Velocity
TTV	–	Transite Timing Variations

LISTA DE SÍMBOLOS

R_{\oplus}	– Raio da Terra (cm)
R	– Raio do planeta (R_{\oplus})
M_{\oplus}	– Massa da Terra (g)
M	– Massa do planetas (M_{\oplus})
ρ	– Densidade de um planeta (g.cm^{-3})
T_{ef}	– Temperatura efetiva da estrela (K)
g	– gravidade surperfical da estrela (cm.s^{-2})
$\log g$	– logarítimo da gravidade surperfical da estrela (dex)
$n(\text{E1})/n(\text{E2})$	– Razão de abundância numérica dos elementos E1 e E2
$[\text{E1}/\text{E2}]$	– Logarítimo da razão $n(\text{E1})/n(\text{E2})$ em relação ao Sol (dex)
$P_{\text{disco fino}}$	– Probabilidade de um estrela pertencer ao disco fino
$P_{\text{disco espesso}}$	– Probabilidade de um estrela pertencer ao disco espesso
P_{halo}	– Probabilidade de um estrela pertencer ao halo
d0	– Anãs F-G sem planetas detectados
d1	– Anãs F-G com planetas possivelmente rochosos

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
1 INTRODUÇÃO	1
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICO-OBSERVACIONAL	7
2.1 Formação de planetas	7
2.2 Distribuição de massa e raio de exoplanetas	9
3 SELEÇÃO DA AMOSTRA ESTELAR DE ESTUDO	15
3.1 Amostras amplas F-G-K-M hospedeiras de planetas potencialmente e possivelmente rochosos	15
3.2 Amostra estelar de estudo com abundâncias elementais da literatura . . .	18
3.3 Classificação cinemática	19
3.4 Amostra final de estrelas	21
3.5 Amostra de controle	22
4 ANÁLISE E RESULTADOS	27
4.1 Distribuições de abundâncias $[X/H]$	28
4.2 Árvore de classificação	28
4.3 Análise de Discriminante Linear	36
4.4 Densidade de kernel aplicada a distribuições de razões $[E1/E2]$	38
4.5 Razões de abundâncias versus presença de planetas rochosos	41
5 CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS	47

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	51
APÊNDICE A - TABELA DE PARÂMETROS PLANETÁRIOS DOS 195 PLANETAS DA AMOSTRA FINAL DE ESTUDO COM 160 ANÃS F-G	57
APÊNDICE B - TABELA COM OS PARÂMETROS FOTOSFÉRI- COS DA AMOSTRA FINAL DE ESTUDO COM 160 ANÃS (CA- TÁLOGO NASA EXOPLANET ARCHIVE)	61
APÊNDICE C - TABELA DAS RAZÕES DE ANUMDÂNCIAS DA AMOSTRA FINAL DE ESTUDO COM 160 ANÃS F-G (CA- TÁLOGO HYPATIA)	65

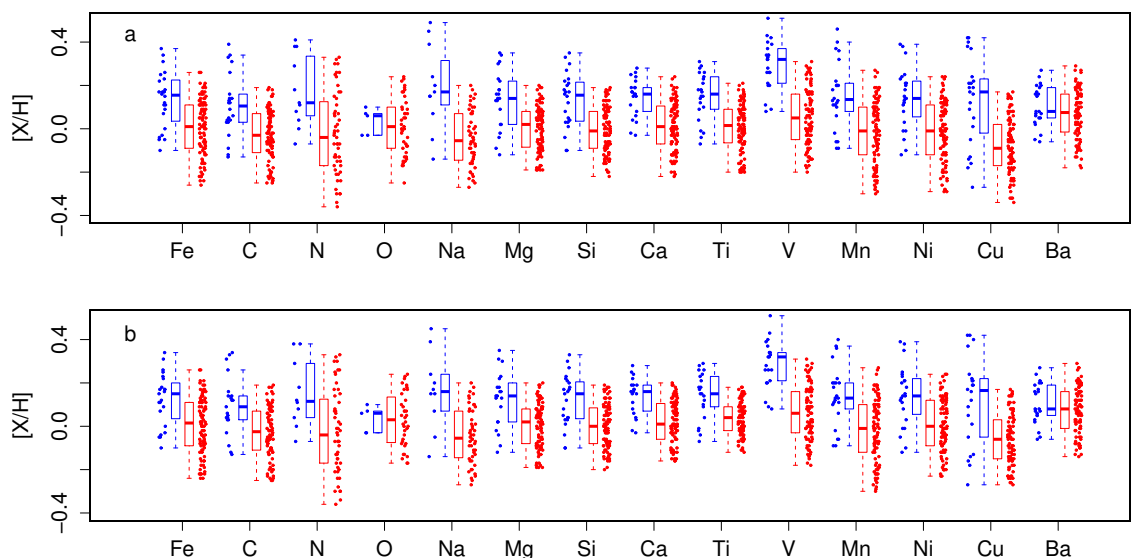
1 INTRODUÇÃO

Ao que se diz respeito à formação de estrelas e seus planetas, uma característica fundamental atrelada a esta vem ser a composição química primordial de suas nuvens de gás e poeira. Como estrelas e seus planetas são formados a partir de uma mesma nuvem, é comum considerar que a fotosfera de estrelas anãs da sequência principal, que ainda não passaram por mudanças devido a processos evolutivos, atue como um registro fóssil da composição química do material da qual a estrela se formou.

Proporcionalmente, estrelas que hospedam um ou mais planetas gasosos gigantes são mais abundantes em ferro quando comparadas com estrelas em torno das quais nenhum planeta foi detectado. Por exemplo, segundo [Fischer e Valenti \(2005\)](#) uma estrela possui uma probabilidade de ser hospedeira de um planeta gasoso gigante proporcional a $10^{2[\text{Fe}/\text{H}]}$. Tal comportamento não é exclusivo do ferro, mas é compartilhado por vários outros metais como elementos alfa (Ne, Mg, Si, S, Ar, Ca e Ti) e elementos do pico do ferro (V, Cr, Mn, Fe, Co e Ni) ([SILVA et al., 2015](#); [ADIBEKYAN et al., 2012](#); [GILLI et al., 2006](#); [NEVES et al., 2009](#)). A Figura 1.1 de [Silva et al. \(2015\)](#) deixa isso bem evidente, na qual podemos ver um pequeno acréscimo (principalmente no vanádio) em várias razões de abundâncias de elementos para anãs F-G-K hospedeiras de planetas gasosos gigantes (em azul) em relação a estrelas sem planetas detectados (em vermelho).

Para um disco protoplanetário de gás e poeira, além da linha de gelo, a eficiência das colisões e junções de planetésimos para formação de embriões planetários e núcleos de planetas gigantes estão rigorosamente relacionadas com as abundâncias de carbono, nitrogênio e oxigênio. Isso acontece pois para regiões mais afastadas da protoestrela central, os planetésimos cobertos por gelos apresentam uma intensificação no processo de aderência de gás e poeira ([HAGHIGHIPOUR, 2013](#)). O artigo de [Marboeuf, Ulysse et al. \(2014\)](#) apresenta um modelo de cálculo da composição química e da razão de massa de gelo/rocha em planetésimos gelados, em discos protoplanetários de massas distintas. De acordo com o modelo, o gelo dos planetésimos é predominantemente composto de H_2O , CO , CO_2 , CH_3OH e NH_3 . É previsto pelos modelos que a razão de massa de gelo/rocha em planetésimos gelados seja igual a 1 ($\pm 0,5$). Esse valor é cerca 2 a 3 vezes menor do que é considerado para modelos de formação de planetas. Portanto, a constituição química estelar inicial de um disco protoplanetário vem a desempenhar um papel significativo na formação de planetas, e isso fica registrado na estrutura e constituição dos planetas a serem formados. Possuir abundâncias de elementos chave de estrelas hospedeiras de planetas permite

Figura 1.1 - Boxplot para a comparação entre as abundâncias elementares $[X/H]$ de 120 estrelas anãs F-G-K da vizinhança solar com e sem planetas, mostradas em azul e vermelho, respectivamente.



O painel superior mostra a distribuição de 120 anãs em todo o espaço de abundância $[X/H]$, enquanto o painel inferior restringe a comparação àquelas estrelas com $-0,25 \leq [Fe/H] < +0,35$. Os pontos de dados originais são mostrados ao lado de cada caixa correspondente para permitir a visualização da dispersão intrínseca. O recorte de dois sigmas foi aplicado a todas as distribuições de abundância antes da comparação, para evitar “outliers” de abundância.

Fonte: Silva et al. (2015).

o estabelecimento de relações que podem ser de suma importância para modelos de formação de planetas em discos protoplanetários.

As relações entre as razões de abundâncias elementais e idade para gêmeas solares também podem ser usadas como diagnósticos indiretos da presença de planetas em torno de estrelas (NISSEN; GUSTAFSSON, 2018). Segundo Meléndez et al. (2012), estrelas gêmeas do Sol são anãs da sequência principal com T_{ef} , $\log g$ e $[Fe/H]$ em torno dos valores solares em ± 100 K, $\pm 0,10$ dex e $\pm 0,10$ dex respectivamente, onde g é a gravidade superficial dada no sistema c.g.s e $[Fe/H] = \log(n(Fe)/n(H))_{estrela} - \log(n(Fe)/n(H))_{sol}$ tal que $n(X)$ é a densidade ou abundância numérica do elemento X. Ou seja, gêmeas solares são estrelas com massa em torno de $1 M_{\odot}$ possuindo idades diversas e estão localizadas em torno da posição do Sol no diagrama H-R. O trabalho de Botelho et al. (2018) deixam a sugerir que grande parte das gêmeas

solares do disco fino galáctico apresentam o mesmo potencial que o Sol de hospedar planetas rochosos com mantos convectivos, além disso, estes podem ser adequados para a habitabilidade.

A presença de planetas rochosos aparenta deixar a estrela hospedeira deficiente em elementos refratários, relativamente aos voláteis, quando comparada com estrelas similares não-hospedeiras de planetas. Isto se deve ao fato de que durante o processo de formação planetária, enquanto a estrela central se forma, parte dos refratários contidos no disco protoplanetário é retida pela formação deste tipo de planeta. De qualquer maneira, a modificação na composição química superficial da estrela hospedeira é praticamente ínfima, sendo mensurável no caso de anãs da sequência principal com massas próximas do valor solar, visto que o envoltório convectivo compreende uma fração de poucos porcentos da massa da estrela (MELÉNDEZ et al., 2009).

Além da massa e raio de um planeta, as proporções de C, O e elementos formadores de rocha como O, Na, Mg, Al, Si, Ca, Sc, Ti, V, Mn, Y e Fe podem ser usados para determinar a estrutura, mineralogia e geodinâmica de planetas de tipo terrestre (NISSEN; GUSTAFSSON, 2018). Os primeiros trabalhos acerca da conexão estrela-planeta buscaram diferenças nas relações de razão de abundância $[X/Fe]$ contra a metalicidade (comumente traçada por $[Fe/H]$) para diversos elementos em amostras de anãs da sequência principal com e sem planetas gasosos gigantes detectados (SILVA et al., 2015). Por exemplo, segundo Robinson et al. (2006) ao comparar estrelas hospedeiras de planetas gasosos gigantes contra estrelas sem planetas detectados deste tipo na mesma escala de metalicidade, percebeu-se para estrelas hospedeiras de planetas uma sobreabundância nas razões $[Si/Fe]$ e $[Ni/Fe]$. O trabalho de Brugamyer et al. (2011) veio a reafirmar o enriquecimento de $[Si/Fe]$ para estrelas hospedeiras de planetas gasosos gigantes. Em contrapartida, os trabalhos de Gonzalez e Laws (2007) e Mena et al. (2010) não constataram esse resultado para $[Si/Fe]$. Além disso, Mena et al. (2010) também não observaram nenhuma diferença especial para as razões de $[C/Fe]$ e $[O/Fe]$, porém, para a razão $[Mg/Fe]$ é encontrado uma sobreabundância para estrelas sem planetas gasosos gigantes. Contudo, tal comportamento não fica evidente para estrelas análogas solares. Esses trabalhos investigaram se a formação de planetas tem uma conexão ou dependência com a composição química estelar comparando-se especialmente estrelas na mesma faixa de metalicidade. Todavia, a situação em essência é bastante abrangente e diversificada. Embora, assim como para o silício, controvérsias ocorram para alguns elementos, assim como é visto nos trabalhos de Neves et al. (2009), Kang et al. (2011) e Adibekyan et al. (2012).

De algum modo, a composição química de uma estrela hospedeira traça a constituição química de seu conjunto de planetas, podendo aquela ser analisada mais detalhadamente por meio do espectro estelar em alta resolução espectral, com a determinação dos parâmetros fotosféricos fundamentais T_{ef} , $\log g$, $[\text{Fe}/\text{H}]$ e V_{micro} . Planetas rochosos apresentariam composições similares a da Terra quando formados em torno de estrelas de metalicidade solar (NISSEN; GUSTAFSSON, 2018). Um questionamento interessante seria: “o que mudaria com relação as estrelas que apresentam metalicidade diferente da solar?”. Segundo Hinkel et al. (2019), os elementos químicos chave ligados à formação de planetas podem ser agrupados e classificados de acordo com os grupos a seguir:

- **Voláteis (C, N, O):** importantes para as atmosferas planetárias.
- **Litófilos (Na, Mg, Al, Si, Ca, Sc, Ti, V, Mn, Y):** se combinam para formar minerais óxidos característicos de rochas e formam parte do núcleo de planetas gigantes gasosos por acreção.
- **Siderófilos (Cr, Co, Ni + Fe):** são elementos do pico de ferro mais pesados que, para condições semelhantes à da Terra, ligam-se ao ferro e estão presentes nos núcleos de planetas rochosos formando ligas metálicas.

A estrutura de um planeta de tipo rochoso resulta do próprio processo de formação, baseado na colisão e acreção de planetésimos com sedimentação mineralógica diferencial e também pelo balanço do calor interno (BOTELHO, 2022). Os planetas rochosos são gigantescos motores térmicos. Eles perdem calor interno para a superfície por meio de alguma combinação de condução, convecção e advecção, conduzindo processos internos como geração de dínamo, vulcanismo ou placas tectônicas (NIMMO et al., 2020). Como protótipo de planeta rochoso geologicamente dinâmico, a Terra possui um núcleo de dínamo metálico parcialmente cristalizado e um manto liquefeito de silicatos, cuja convecção mantém a tectônica de placas de sua crosta rochosa (BOTELHO, 2022). Segundo Nimmo et al. (2020), o calor interno surge de três formas: energia gravitacional liberada à medida que o planeta se forma, aquecimento das marés e decaimento de elementos radioativos.

O interesse no estudo de exoplanetas vem crescendo bastante. Por exemplo, temos a missão TESS (sigla inglesa para Transiting Exoplanet Survey Satellite) que visa detectar trânsitos planetários em torno das estrelas mais próximas e brilhantes da vizinhança solar com o intuito de identificar centenas de pequenos planetas com raio

de até $4 R_{\oplus}$ e determinar a massa de 50 deles por meio de observações espectroscópicas sistemáticas (GUERRERO et al., 2021). Com o objetivo de varrer a região do céu por quase toda a sua totalidade, a pesquisa fornece dados fotométricos de alta precisão na região do visível (com uma cadência de aproximadamente 2 minutos) para uma gama de mais de 200.000 estrelas durante 2 anos (SPACE TELESCOPE SCIENCE INSTITUTE, 2018). Assim como o TESS, há outras missões em andamento como a missão CHEOPS (sigla do Inglês para CHaracterising ExOPlanet Satellite) e também missões que ocorrerão futuramente como a missão PLATO (PLANetary Transits and Oscillations of stars), cujo o objetivo principal é detectar e caracterizar exoplanetas, incluindo planetas terrestres em zona habitável de suas estrelas hospedeiras. Ocorrerá também a missão ARIEL (Atmospheric Remote-Sensing Infrared Exoplanet Large-survey), cujo lançamento está previsto para 2028 e terá uma duração de 4 anos. Ao cobrir o espectro eletromagnético com uma abrangência da luz visível ao infravermelho médio, a missão ARIEL realizará um levantamento espectroscópico das atmosferas de cerca de 1.000 exoplanetas em trânsito, fornecendo à comunidade científica o primeiro levantamento espectroscópico de uma amostra estatisticamente significativa de atmosferas planetárias. Todas estas missões, que estão em andamento ou futuramente ocorrerão, são de suma importância para a compreensão da conexão química que possa estar atrelada à formação de planetas rochosos e suas respectivas estrelas hospedeiras. Como consequência, mais vínculos observacionais serão compilados para avaliar o potencial de habitabilidade que um planeta rochoso, tipo terrestre ou não, possa ter.

O foco deste trabalho é tentar identificar bons indicadores químicos estelares que possam ser característicos da presença de planetas rochosos. Uma amostra de anãs de sequência principal, da vizinhança solar e membros do disco fino da Galáxia, hospedeiras de planetas possivelmente rochosos foi selecionada para este propósito, além de uma amostra estelar de anãs de controle para fins de comparação. Métodos estatísticos diversos foram empregados de modo complementar, como árvores de classificação, análises de discriminantes lineares e testes de hipóteses para comparação de médias amostrais em conjunto com análises de distribuição de densidade de kernel. Para estes métodos foi usado um conjunto de dados no espaço de razões de abundâncias envolvendo elementos de grupos distintos ligados à composição de planetas de tipo rochoso-metálico.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICO-OBSERVACIONAL

2.1 Formação de planetas

É amplamente aceito que a formação de planetas começa em um disco circunestelar de gás e poeira, conhecido como nebulosa, a partir da coagulação e crescimento de partículas de poeira que darão origem a objetos maiores. Segundo [Haghighipour \(2013\)](#) o processo de formação tem uma alta dependência da massa e das propriedades dinâmicas da nebulosa e ocorre em quatro etapas:

- i a formação de objetos de tamanho centimétrico e decimétrico que ocorre através da coagulação de partículas de poeira por colisões e aderências suaves;
- ii crescimento de corpos de tamanho centimétrico e decimétrico para planetésimos de tamanho quilométricos;
- iii colisão e acreção de planetésimos dando origem a embriões planetários (objetos do tamanho da Lua a Marte) na parte interna do Sistema Solar e formando núcleos de planetas gigantes nas partes externas (além da linha de gelos);
- iv acreção gravitacional descontrolada de gás formando planetas gasosos gigantes ou crescimento colisional de embriões planetários formando planetas de tipo rochoso.

Segundo [D'Angelo et al. \(2010\)](#) o processo inicial é o mesmo tanto para planetas gasosos gigantes quanto para planetas rochosos. Na primeira etapa os grãos de poeira sofrem uma variedade de movimentos aleatórios e sistemáticos resultando em frequentes colisões entre si. Partículas menores que $100 \mu\text{m}$ estão principalmente sujeitas ao movimento browniano ¹e colidem com velocidades relativas menores que $1 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$. Ocorre então a coagulação dessas partículas para maiores da ordem centímetros. Objetos maiores, embora um pouco mais rápidos, ainda estão fortemente acoplados ao gás, e sua dinâmica é governada pela atração gravitacional da estrela central, forças não gravitacionais como a pressão de radiação e sua interação com a nebulosa através do arrasto do gás. A turbulência no gás faz com que os grãos de poeira colidam. Como as colisões das partículas de poeira são suaves, as forças de van

¹Movimento browniano consiste em um movimento aleatório de partículas suspensas em um fluido (líquido ou gás), como resultado da sua colisão com átomos rápidos ou moléculas no fluido.

der Waals agem entre suas superfícies e colam as partículas de poeira umas às outras. A coagulação ou então algum outro processo não compreendido completamente irá continuar o crescimento até formar corpos que são nomeados de planetésimos. À medida que um planetésimo cresce, a zona de influência de seu campo gravitacional se expande e, como resultado, atrai mais material de seus arredores. Em outras palavras, mais material estará disponível para a acreção do planetésimo, e a taxa de crescimento aumenta. Conhecido como crescimento descontrolado, esse processo resulta no crescimento de planetésimos de tamanho da ordem de quilômetros dando origem a corpos maiores em um curto espaço de tempo. A partir deste ponto, os objetos podem possuir a massa necessária para que suas interações gravitacionais passem a reger parte do processo; e seu crescimento ocorre por meio de colisões e acreção de planetésimos até se originarem os embriões planetários (HAGHIGHIPOUR, 2013).

Uma vez que é formado o embrião planetário, a etapa iii se faz concluída. Então duas direções podem ser seguidas pelo embrião: temos o crescimento colisional que nos resulta em planetas rochosos ou então o embrião prossegue com uma acreção descontrolada de gás, o que irá resultar na formação de planetas gasosos gigantes. Quando um embrião é massivo o suficiente sua atração gravitacional captura o gás disponível ao longo de sua órbita ou então acreta os planetésimos próximos ao seu raio orbital.

Um corpo do Sistema Solar pode ser classificado como um planeta se atender as seguintes condições:

- i o corpo celeste deve orbitar o Sol;
- ii ter massa o suficiente para que sua própria gravidade possa superar as forças dos demais corpos de tal maneira que assuma o equilíbrio hidrostático e tenha forma esférica;
- iii tenha “limpado” a região ao longo de sua órbita.

Esses critérios foram definidos em 2006 pela União Astronômica Internacional (IAU). Ao tomar um planeta extrassolar ou então exoplaneta, os critérios acima também poderiam ser empregados. Porém, o critério i seria adaptado para a respectiva estrela hospedeira. Além disso, visto a diversidade de planetas presentes em nosso próprio Sistema Solar, a NASA (National Aeronautics and Space Administration, EUA) ² propõe uma classificação que possa facilitar a identificação dos exoplanetas. Os

²<<https://exoplanets.nasa.gov/what-is-an-exoplanet/planet-types/overview/>>

exoplanetas então foram divididos em:

- i **terrestres:** exoplanetas rochosos do tipo terrestre são aqueles entre a metade do tamanho da Terra e o dobro do seu raio e alguns podem ser ainda menores. Em nosso sistema planetário, Terra, Marte, Mercúrio e Vênus são planetas terrestres ou rochosos.
- ii **superterras:** são mais massivos que a Terra, porém menos massivos que gigantes de gelo como Netuno e Urano, e podem ser feitas de gás, rocha ou uma combinação de ambos. Suas dimensões são acima do dobro do tamanho da Terra e até 10 vezes a massa terrestre.
- iii **netunos:** semelhantes em tamanho a Netuno ou Urano. Os planetas netunianos normalmente têm atmosferas dominadas por hidrogênio e hélio com núcleos de rocha e metais mais pesados. Sua massa vem a ser da ordem de 17 massas terrestres (M_{\oplus}).
- iv **gasosos gigantes:** constituídos principalmente de hidrogênio e hélio. Possuem massas comparáveis a Júpiter e Saturno, seus tamanhos são superiores a 10 raios terrestres (R_{\oplus}).

2.2 Distribuição de massa e raio de exoplanetas

A comunidade científica sempre apresentou um grande interesse na possível existência de planetas extrassolares (ou exoplanetas) ou até mesmo sistemas planetários que pudessem ser similares ao Sistema Solar. Em 1995, foi anunciada a descoberta do primeiro exoplaneta ao redor de uma estrela de tipo solar denominada de 51 Peg. O planeta em questão apresentava sua massa próxima a de Júpiter, contudo muito próximo de sua estrela hospedeira e com um período orbital de menos de 10 dias (MAYOR; QUELOZ, 1995). Todavia, o primeiro exoplaneta foi descoberto em torno de um pulsar, chamado de PSR B1257+12, em 1992 por Aleksander Wolszczan e Dale Frail (WOLSZCZAN, 2012). Ao realizar uma análise dos dados referentes ao pulsar PSR B1257+12, verificou-se a ocorrência de uma variabilidade dos tempos de chegada dos pulsos. Após algumas observações posteriores de PSR B1257+12, a conclusão tomada foi da existência de pelo menos 2 exoplanetas de massa terrestre em sua órbita. Um terceiro planeta com massa comparável com a da Lua foi descoberto posteriormente em 1994 (WOLSZCZAN, 1994). Desde então, a quantidade de exoplanetas detectados tem crescido consideravelmente, com uso de uma diversidade de métodos observacionais para suas detecções. De acordo com o Nasa

Exoplanet Archive ([CALIFORNIA INSTITUTE OF TECHNOLOGY, 2005](#)) mais de 5300 exoplanetas já estão catalogados.

Os exoplanetas descobertos durante as últimas três décadas cobrem uma ampla gama de massas e tamanhos. Nas faixas de $1 - 20M_{\oplus}$ e $1 - 4R_{\oplus}$, planetas de classes diversas têm sido identificados. Os planetas com densidades de massa elevadas são considerados metálicos ou rochosos, enquanto os de baixas densidades são classificados como anões gasosos ou planetas de gelo ou aquosos. Acredita-se que os anões gasosos tenham um núcleo rochoso coberto por um envoltório gasoso de H_2 -He, enquanto os mundos de gelo ou aquosos contêm uma quantidade significativa de gelos/fluidos multicomponentes dominados por H_2O , além de rocha e gás ([ZENG et al., 2019](#)).

O trabalho de [Mayo et al. \(2018\)](#), ao estudar uma amostra de mais de 4000 exoplanetas confirmados ou candidatos oriundos da missão Kepler da NASA, revelou uma distribuição bimodal de tamanhos de planetas na faixa de 1 a $4 R_{\oplus}$ (ver Figura 2.1). Tal característica também foi encontrada anteriormente no trabalho de [Fulton et al. \(2017\)](#) onde os picos da distribuição foram localizados em $\sim 1,3$ e $\sim 2,4 R_{\oplus}$. Ao utilizar raios asterossísmicos, [Eylen et al. \(2018\)](#) detectaram uma distribuição bimodal com uma lacuna em $2 R_{\oplus}$. Esta distribuição bimodal foi então interpretada como uma evidência de populações distintas de planetas ([ZENG et al., 2019](#)) e a lacuna em $2 R_{\oplus}$ seria uma transição física real entre planetas rochosos e aqueles com atmosferas extensas ([MARTINEZ et al., 2019](#)).

Planetas com núcleos rochosos podem ter seus raios estimados por meio da relação $R=M^{1/3.7}$ ([ZENG et al., 2016](#)), e planetas com núcleos de gelo podem ter seus raios estimados a partir da relação $R=fM^{1/3.7}$, onde f é uma função crescente da fração de massa de gelo “ x ” descrita pela Equação 2.1.

$$f = 1 + 0.55x - 0.14x^2 \quad (2.1)$$

A Figura 2.1 apresenta a distribuição de raio em função da massa para exoplanetas com massas (diretamente) medidas pelo método de velocidade radial estelar ($1,4 - 1,9$ e $2 - 3 R_{\oplus}$; sigla RV para radial velocity), mais precisamente, a massa mínima é medida por este método. São apresentados também exoplanetas com raios medidos pelo método das variações temporais de trânsito (sigla TTV do termo inglês Transiting Time Variations), por este método o raio do exoplaneta é medido diretamente. A distribuição bimodal do tamanho dos planetas medidos por RV se-

para dois grupos diferentes de planetas em $R = 2R_{\oplus}$. Os histogramas ao longo eixo dos raios compara dados observacionais (em amarelo) com simulações feitas com o método de Monte-Carlo (azul claro), feita por Zeng et al. (2019). Dois conjuntos de relações/curvas Massa-Raio para planetas do tipo "aquoso" (100% de H_2O , em azul, e 50% de H_2O por massa e 50% de um núcleo rochoso tipo terrestre, em ciano) são também apresentados na Figura 2.1 para o caso de um envoltório líquido-gasoso isotérmico a temperaturas distintas (300, 500, 700 e 1000 K, respectivamente curvas roxa, azul piscina, verde claro e verde alga), o qual se situa sobre uma camada de gelo sob uma pressão de derretimento apropriada. A curva em vermelho corresponde a planetas puramente ferrosos (100%Fe) enquanto a curva em laranja representa os planetas com constituição rochosa-metálica, análoga a da Terra (33%Fe + 67%MgSiO₃).

Figura 2.1 - Diagrama de raio versus massa de exoplanetas.

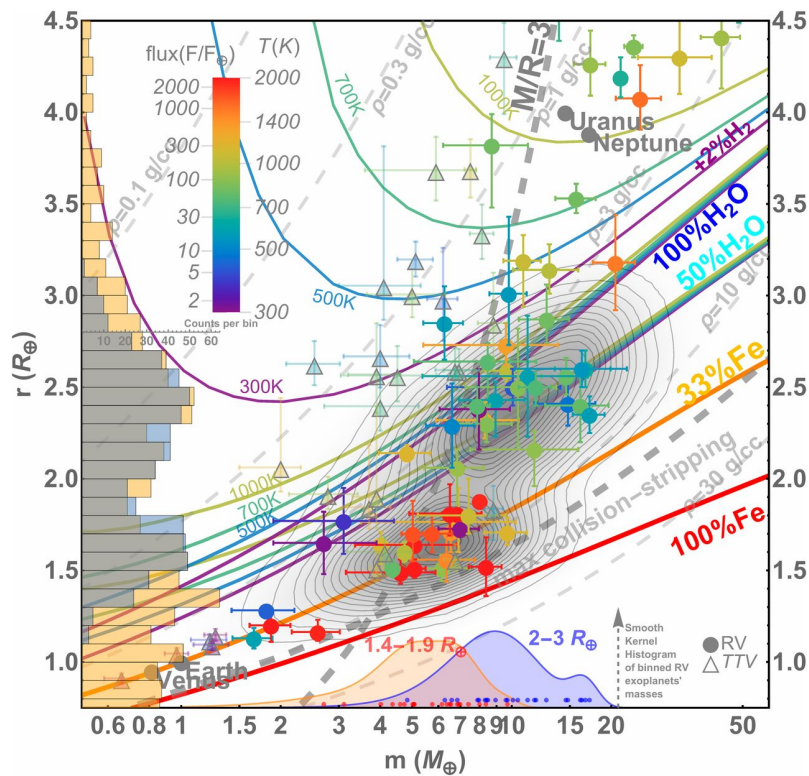


Diagrama de raio versus massa de exoplanetas em torno dos intervalos de 0,6-50 M_{\oplus} e 0,75-4,5 R_{\oplus} .

Fonte: Zeng et al. (2019).

Para planetas mais massivos, os raios se concentram na região em torno de $2,5 R_{\oplus}$, e esta região é condizente com as curvas de planetas com concentração de H_2O entre 50% e 100%, o que sugere se tratar de mundos de água sob uma transição de fase sólida-fluida ou planetas ricos em H_2O (ou simploriamente mundos aquosos). Os exoplanetas com maior concentração de rocha e ferro estão mais agrupados na região próxima a $1,5R_{\oplus}$. Os raios de $2,5R_{\oplus}$ e $1,5R_{\oplus}$ condizem com região dos picos da distribuição bimodal de tamanho, apresentada no histograma da Figura 2.1.

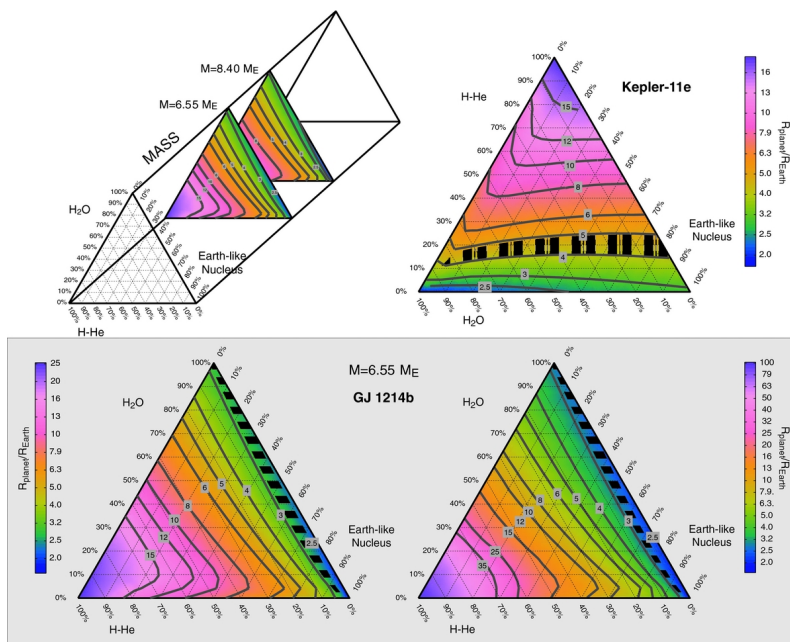
Segundo Zeng et al. (2019), os exoplanetas podem ser classificados em 4 categorias principais, com base na distribuição acumulativa do raio (deles) e no diagrama massa-raio apresentado na Figura 2.1:

- i **planetas rochosos ($< 2 R_{\oplus}$):** consistem principalmente de silicatos (rochas), óxidos de Mg-Si e ligas metálicas (especialmente de Fe e Ni); eles seguem amplamente a extrapolação da relação massa-raio da Terra e Vênus,
- ii **planetas ricos em gelo de H_2O ou aquosos ($2 \leq \text{raio} < 4 R_{\oplus}$):** contêm frações significativas ($> 1/4$, e possivelmente mais de $1/2$, em massa) de H_2O sob uma transição de fase entre sólido e fluido, além de um núcleo rochoso (modelado com composição similar ou igual à do planeta Terra). Os planetas TTV nesta faixa de raio são consistentes com um núcleo menos massivo que possui um envoltório gasoso; eles tendem a ser encontrados em torno de estrelas pobres em metais,
- iii **planetas de transição ou netunos ($4 \leq \text{raio} \leq 10 R_{\oplus}$):** são ricos em gelos/fluidos (supostamente de H_2O) e contêm envoltórios gasosos (com fração de massa $\leq 5 - 10\%$). Têm massa tipicamente de algumas dezenas de massa terrestre, representando ou formando uma transição entre pequenos exoplanetas e gigantes gasosos no diagrama massa-raio (exemplos são Urano e Netuno).
- iv **planetas gasosos gigantes ou jupitéres (raio $> 10 R_{\oplus}$):** são constituídos predominantemente de H_2 -He e têm massas e raios comparáveis a Júpiter.

A fim de caracterizar fisicamente um planeta, é imprescindível fazer uma inferência sobre sua composição química. Para isso, ter o conhecimento de seu raio e sua massa passa a ser algo de suma importância. Como visto na Figura 2.1, modelos variados

de planetas são apresentados tomando como base a composição química. Segundo Valencia et al. (2013), planetas que possuem envoltórios de 100% H/He em sua composição são ligeiramente menores quando comparados com planetas que apresentam um envoltório composto de 90% H/He + 10% água/gelo. Quanto maior a fração de água na atmosfera, mais o efeito de densidade prevalece, o que resulta em um efeito de degenerescência. Fixando a massa do envoltório planetário, duas combinações diferentes de H/He + H₂O/gelos fornecem o mesmo raio numa dada idade. Daí, a importância de se empregar modelos evolutivos em contraste com os estacionários. Tal degenerescência diverge daquela que surge da mistura alcançada entre três ou mais substâncias/compostos com pesos moleculares diferentes, tais como núcleos de ferro, mantos de silicato, envoltórios de água/gelo ou H/He (VALENCIA et al., 2007; ADAMS et al., 2008; ROGERS; SEAGER, 2010).

Figura 2.2 - Diagramas ternários para GJ 1214b e Kepler-11e.



Diagramas ternários para GJ 1214b e Kepler-11e. Esses diagramas triangulares relacionam a composição x em termos de fração de núcleo semelhante à Terra, fração de água/gelo e fração de H/He com a massa total, com o raio de uma massa planetária específica. A barra de cores mostra o raio em termos de raios da Terra, e as linhas cinzas são as curvas de isoraios rotuladas em termos de raios da Terra.

Fonte: Valencia et al. (2013).

O estudo da composição dos exoplanetas vem a ser um fator crucial para uma melhor compreensão da constituição química que possa estar conectada com o processo de formação (e evolução) do planeta. A Figura 2.2 deixa isso evidente. Através de uma combinação de muitos modelos, esta apresenta um diagrama ternário onde se relacionam a composição de água/gelo, H/He e fração de núcleo semelhante a terra com o raio para os planetas GJ 1214b e Kepler-11e. Com esta figura é perceptível e surpreendente a diferença que um planeta pode apresentar simplesmente ao tentar se modelar a composição de sua atmosfera de muitas formas distintas. Com novas missões que visam o estudo de exoplanetas (missão ARIEL por exemplo), a compreensão da formação e composição química de exoplanetas pode se tornar muito mais esclarecedora. Isto nos permitiria preencher muitas lacunas que ainda existem com relação ao entendimento da relação que há entre exoplanetas e suas estrelas hospedeiras.

3 SELEÇÃO DA AMOSTRA ESTELAR DE ESTUDO

Este capítulo apresenta os critérios usados para a seleção de uma amostra estelar ampla com anãs F-G-K-M hospedeiras de planetas potencialmente rochosos ¹ e possivelmente rochosos ², além de outras restrições aplicadas a fim de particularizar a cobertura da amostra estelar de estudo, de modo a especificar melhor em termos de constituição o conjunto de planetas possivelmente rochosos. Por fim, uma amostra de controle abrangendo anãs F-G-K-M sem planetas detectados também foi elaborada com base no intervalo de parâmetros fotosféricos da amostra de estrelas de estudo.

3.1 Amostras amplas F-G-K-M hospedeiras de planetas potencialmente e possivelmente rochosos

Inicialmente, selecionamos uma amostra de anãs F-G-K-M com metalicidade em torno da solar que hospedassem planetas que inicialmente foram classificados como ‘potencialmente’ rochosos. Esta seleção inicial foi realizada a partir do acervo de dados planetários do “NASA Exoplanet Archive” (NASA) [California Institute of Technology \(2005\)](#). A Tabela 3.1 apresenta os filtros utilizados para obter tal amostra inicial. No total, esta amostra inicial (anãs F-G-K-M de metalicidade em torno da solar com planetas “potencialmente” rochosos) contém 1251 estrelas que hospedam 1612 exoplanetas (potencialmente rochosos).

Tabela 3.1 - Tabela listando os filtros estelares e planetários usados para obter a amostra ampla de anãs F-G-K-M com metalicidade em torno da solar hospedeiras de planetas potencialmente rochosos.

Parâmetros	Filtro	Intervalo
Fotosféricos	$T_{\text{ef}}(\text{K})$	[2500 , 6200]
	$\log g(g \text{ em cm.s}^{-2})$	[3,5 , 5,5]
	$[\text{Fe}/\text{H}](\text{dex})$	[-0,66 , 0,66]
Planetários	$R(R_{\oplus})$	[0,5 , 5,0]
	$M(M_{\oplus})$	[0,3 , 100]
	$\rho(\text{g.cm}^{-3})$	$\geq 3,0$

A Figura 3.1 apresenta um gráfico de Raio versus Massa gerado a partir do banco de dados do catálogo NASA. Cada ponto azul representa um exoplaneta e podemos ver

¹planetas potencialmente rochosos: oriundos dos filtros planetários da Tabela 3.1, especialmente com densidade média a partir de 3 g.cm^{-3} .

²planetas possivelmente rochosos: advindos de uma restrição contra modelos de composição química homogênea, como mostrado na Fig. 3.3 (basicamente planetas entre as curvas de modelos de planetas 100% ferrosos e 100% rochosos).

a distribuição de 3 grupos de exoplanetas. O primeiro grupo são dos exoplanetas, cujos raios foram obtidos pelo método de trânsito e cujas massas foram estimadas por uma dada relação M-R. O segundo grupo segue uma relação M-R de tipo rochoso terrestre (descrita pela linha lilás), enquanto o terceiro grupo segue uma relação M-R genérica admitida para superterras. Como foi visto na Seção 2.2, exoplanetas do tipo rochoso comumente possuem raios até $2 R_{\oplus}$. O retângulo vermelho representa os possíveis exoplanetas de tipo rochoso terrestre com base no limite de raio de $2 R_{\oplus}$ e na relação M-R em lilás, onde temos um limite massa de até $15 M_{\oplus}$. Contudo, a Tabela 3.1 apresenta um intervalo para massa e raio planetário maior que $2 R_{\oplus}$ e $15 M_{\oplus}$. Ao extrapolar a curva de relação M-R de planetas do tipo terrestre para além de $2 R_{\oplus}$ e $15 M_{\oplus}$, podemos ver que ocorre a presença de planetas que satisfazem a relação M-R de tipo rochoso terrestre. Tal situação sugere uma possível negligência desses possíveis planetas rochosos além do intervalo até $2 R_{\oplus}$ e $15 M_{\oplus}$. No intuito de considerar estes possíveis planetas negligenciados, os intervalos de massa e raio considerados na seleção da amostra foram estendidos para os que são apresentados na Tabela 3.1.

Figura 3.1 - Diagrama massa-raio para exoplanetas com raios até $5 R_{\oplus}$.

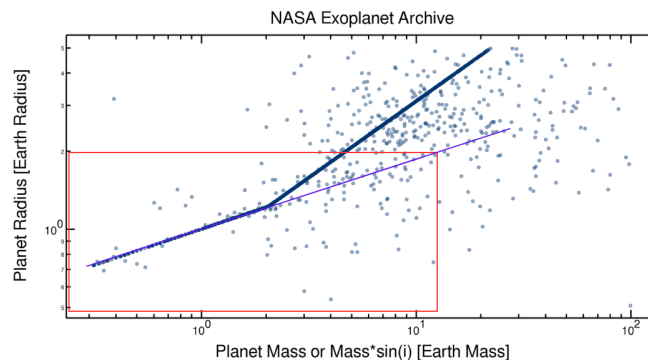


Diagrama massa-raio para exoplanetas confirmados, conforme extraído do catálogo NASA Exoplanet Archive sem nenhum filtro paramétrico, seja para as estrelas seja para planetas. As escalas de ambos os eixos estão em unidade logarítmica relativas aos valores terrestres de massa e raio.

Fonte: California Institute of Technology (2005).

A amostra estelar ampla abrangendo anãs com planetas potencialmente rochosos foi dividida nos tipos espectrais F, G, K e M. Entende-se como planetas potencialmente rochosos, os planetas encontrados a partir da aplicação direta dos filtros estelares e planetários no catálogo NASA Exoplanet Archive, conforme apresentados na Tabela 3.1. As anãs de tipo F (verde) estão limitadas ao intervalo de temperatura de 6000 - 6200 K, as de tipo G (amarelo) 5300 - 6000 K, as de tipo K (laranja) 3800 - 5300 K e as de tipo M (vermelho) 2500 - 3800 K. A Figura 3.2 apresenta o diagrama H-R para tal amostra estelar inicial ampla, mostrando as anãs hospedeiras de planetas potencialmente rochosos separadas por tipo espectral.

Figura 3.2 - Diagrama H-R das anãs da amostra ampla inicial.

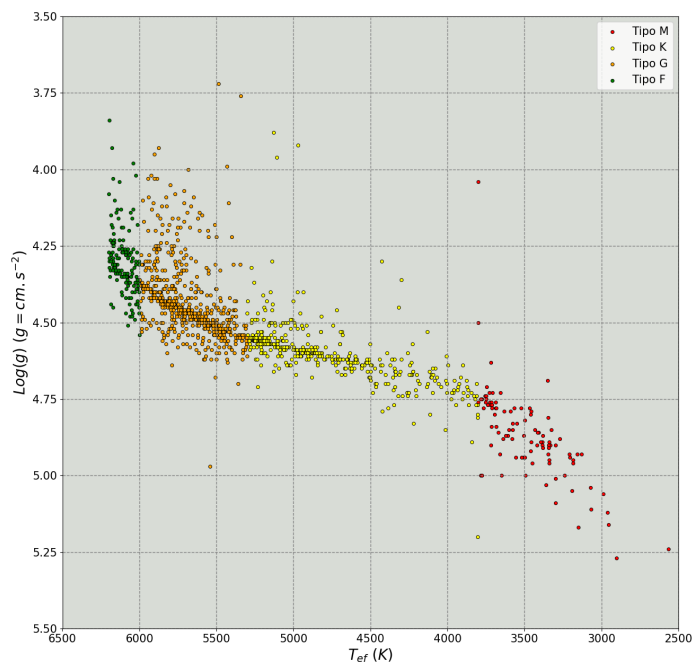


Diagrama H-R do $\log g$ em função de T_{ef} das anãs ($3,5 \leq \log g \leq 5,5$) com $-0,66 \leq [\text{Fe}/\text{H}] \leq +0,66$ dex hospedeiras de planetas potencialmente rochosos. A classificação das estrelas por tipo espectral está descrita na legenda da Figura.

A fim de obter a amostra estelar ampla de anãs F-G-K-M, com metalicidade entre cerca de 4 vezes menor e maior que a metalicidade solar na escala $[\text{Fe}/\text{H}]$, hospedeiras de planetas ‘potencialmente’ rochosos, perfizemos comparações contra modelos

de interiores de planetas. Alguns destes modelos são mostrados na Figura 2.1. De fato, adotamos apenas 2 modelos do trabalho de Zeng et al. (2019)³: (i) planetas puramente rochosos (100% de silicatos), o qual não é mostrado nesta figura, e (ii) planetas puramente metálicos ou ferrosos (100% Fe, curva sólida em vermelho). Na Figura 3.3(a) apresentamos o diagrama de exoplanetas (pontos azuis) com raio em função massa para a amostra estelar ampla (anãs F-G-K-M de metalicidade em torno da solar hospedeiras de planetas potencialmente rochosos) e comparadas com os modelos de interiores planetários de Zeng et al. (2019) (curvas coloridas). Dentre os planetas hospedados pelas anãs F-G-K-M da amostra, parte deles possui raio medido diretamente por TTV enquanto a massa é estimada a partir de uma relação M-R. A distribuição deste grupo de planetas fica facilmente perceptível na Figura 3.3(b) ao comparar os pontos com a curva de distribuição de planetas do tipo rochoso terrestre (magenta). Os planetas que têm raio e massa medidos individualmente por RV obrigatoriamente não seguem nenhuma relação M-R.

Tomando as curvas dos modelos de planetas puramente rochosos e puramente metálicos, a amostra ampla de anãs F-G-K-M com planetas possivelmente rochosos abrangerá aquelas anãs que hospedam planetas, cuja massa e raio ficam compreendidas entre estas 2 curvas sem considerar o erro em cada um dos dois parâmetros. Esta amostra possui no total 544 estrelas com 641 exoplanetas.

3.2 Amostra estelar de estudo com abundâncias elementais da literatura

Dentre as 544 estrelas com planetas possivelmente rochosos foi selecionada um conjunto de estrelas que possuíssem abundâncias catalogadas. Para cumprir este critério de seleção foi utilizado o catálogo Hypatia⁴. Ao realizar essa identificação, foram obtidas um total de 228 anãs F-G-K-M com planetas possivelmente rochosos que possuem abundâncias catalogadas de diversos elementos. Das muitas abundâncias elementais presentes no catálogo Hypatia, foram selecionadas 15 razões de abundâncias cujas distribuições fossem qualitativamente similares entre si como pode ser visto na Figura 3.4. Esta apresenta histogramas da temperatura efetiva para cada uma das razões de abundância selecionada. De fato percebe-se que as distribuições de temperatura são bem similares entre si. Há uma quantidade superior de estrelas acima de 5400 K quando comparadas com estrelas mais frias. Na faixa dos 6000 K aparenta ter um padrão de distribuição bimodal. As razões [N/H], [O/H] e [Y/H] apresentam uma distribuição um pouco diferente das demais em termos quantitati-

³Os modelos de Zeng et al. (2019) estão disponíveis no endereço do “Center for Astrophysics”, através do link <<https://lweb.cfa.harvard.edu/~lzeng/planetmodels.html>>.

⁴<<https://www.hypatiacatalog.com/hypatia/default/launch?mode=hist>>

Figura 3.3 - Diagrama massa-raio para os exoplanetas potencialmente rochosos (gráfico à esquerda) e possivelmente rochosos (gráfico à direita).

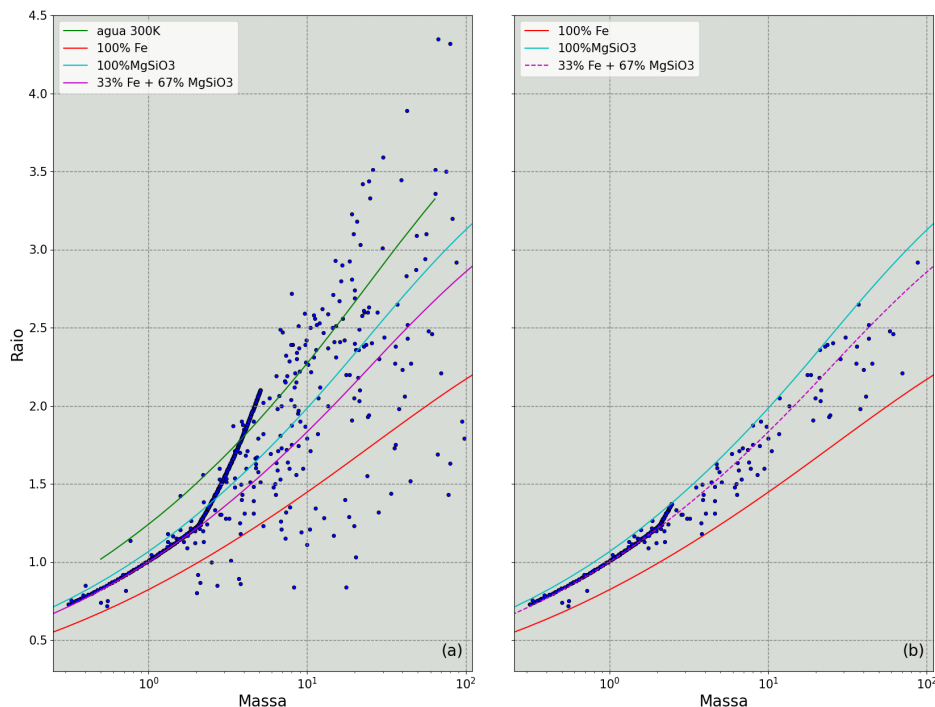


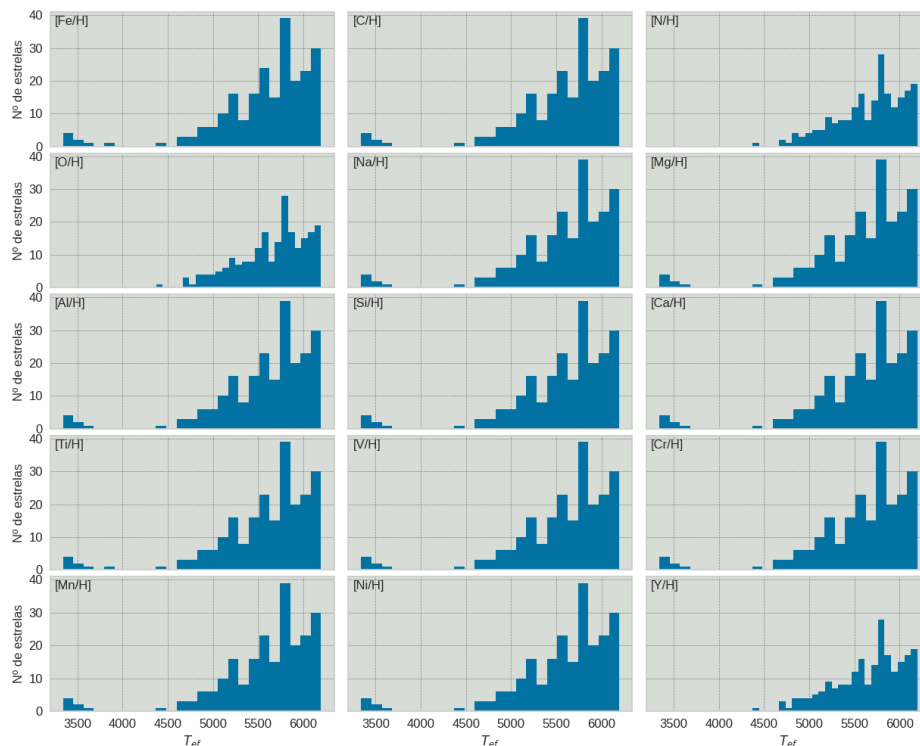
Diagrama massa-raio, $\text{Raio}_{\text{planeta}}$ (escala linear em unidade do raio da Terra) versus $\text{Massa}_{\text{planeta}}$ (escala logarítmica em unidade da massa da Terra), (a) dos 1612 planetas potencialmente rochosos e (b) dos 641 planetas possivelmente rochosos da amostra estelar ampla (anãs F-G-K-M hospedeiras deste tipo de planeta e com metalicidade $-0,66 \leq [\text{Fe}/\text{H}] \leq +0,66$ dex). Os modelos de interiores planetários de Zeng et al. (2016) para 4 constituições diferentes são representados pelas curvas coloridas, conforme legenda interna ao gráfico.

vos, mas ainda assim com um comportamento parecido.

3.3 Classificação cinemática

No intuito minimizar efeitos devido à evolução química da Galáxia e tornar mais homogênea a amostra de estudo de estrelas (nesta ótica), uma classificação cinemática das estrelas foi feita e a partir desta classificação foram selecionadas as estrelas que pertencessem à componente fina do disco. Para poder determinar a probabilidade de que uma estrela esteja no disco fino, disco espesso ou no halo da Galáxia, foi utilizado um código feito em Fortran, o qual foi gentilmente cedido pelo Prof.

Figura 3.4 - Histograma de T_{ef} das anãs F-G-K-M hospedeiras de planetas possivelmente rochosos para cada um dos 15 elementos inspecionados.



Histograma da temperatura efetiva T_{ef} das estrelas para cada razão de abundância $[X/H]$ da amostra de anãs F-G-K-M com planetas possivelmente rochosos que possuem abundâncias catalogadas.

Dr. Jorge Meléndez (IAG-USP/SP). O código usa como parâmetros de entrada para cada estrela, sua paralaxe, movimento próprio, coordenadas equatoriais e velocidade radial heliocêntrica (todos obtidos do catálogo GAIA ⁵). O código usa as equações de Johnson e Soderblom (1987) para o cálculo das componentes da velocidade espacial galáctica de uma estrela (U_{LSR} , V_{LSR} e W_{LSR}) em relação ao padrão local de repouso (LSR, do inglês Local Standard of Rest). Para o Sol foi adotado $U_{LSR} = 7,5$, $V_{LSR} = 13,5$ e $W_{LSR} = 6,8 \text{ km.s}^{-1}$ (FRANCIS; ANDERSON, 2009). Uma vez obtidas as componentes da velocidade espacial galáctica, as equações de Reddy et al. (2006) são usadas para calcular a probabilidade da estrela pertencer a cada uma das

⁵ <<https://gea.esac.esa.int/archive/>>

três populações.

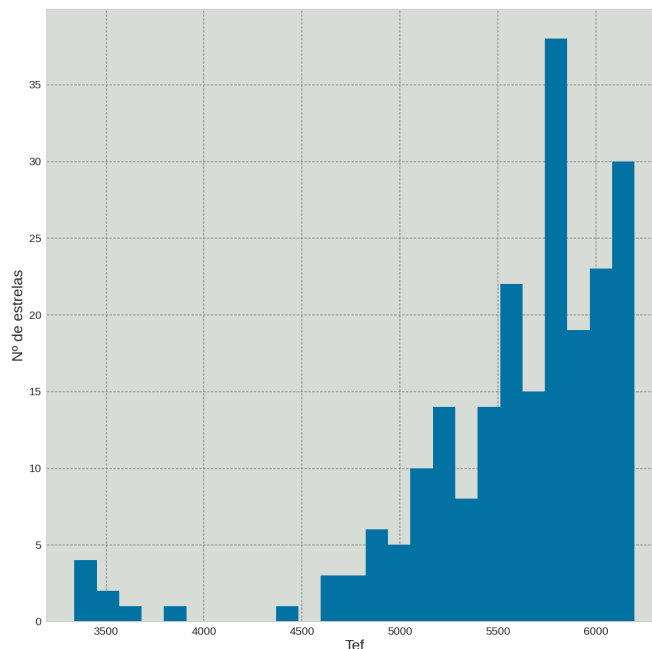
Uma vez calculadas as probabilidades de $P_{\text{disco fino}}$, $P_{\text{disco espesso}}$ e P_{halo} , caso uma das probabilidades seja maior que 70% (REDDY et al., 2006), a estrela em questão se classifica como um membro do disco fino, disco espesso ou do halo. Considerando estes fatores a amostra de 228 anãs F-G-K-M foi reduzida para 219 anãs F-G-K-M do disco fino com 268 planetas possivelmente rochosos.

3.4 Amostra final de estrelas

A Figura 3.5 apresenta o histograma da temperatura efetiva da atual amostra de estrelas, no qual as estrelas têm maior concentração no intervalo de 5400 a 6200 K. Além disso, na faixa de temperatura de 3600 a 4600 K percebe-se uma lacuna de estrelas sem abundâncias, fatos estes que também podem ser observados na Figura 3.4 onde a maioria das razões apresenta um padrão de distribuição similar. Devido à falta de estrelas com abundâncias catalogadas no intervalo de 3600 a 5400 K foi optado em trabalhar com a amostra no intervalo de 5400 a 6200 K. Ao selecionar as estrelas no intervalo de 5400 a 6200 K foi obtida uma amostra de 161 anãs F-G do disco fino com planetas possivelmente rochosos onde todas as estrelas apresentam razões de abundâncias segundo a seleção mostrada na Figura 3.4, ou seja, com abundâncias para 14 elementos (C, N, O, Na, Mg, Al, Si, Ca, Ti, V, Cr, Mn, Ni e Y) além do ferro.

Destas 161 estrelas, foi feita uma verificação para saber quantas estrelas abrigavam mais de um planeta e constatado que todas as estrelas possuem apenas 1 planeta detectado cada com exceção de Kepler-145 que possui dois planetas detectados, sendo estes Kepler-145 b e Kepler-145 c. Contudo, ao verificar as informações de massa e raio de cada planeta, obtemos que Kepler-145 b possui $37,1 M_{\oplus}$ e $2,65 R_{\oplus}$, enquanto Kepler-145 c possui $79,4 M_{\oplus}$ e $4,32 R_{\oplus}$. Embora ambos satisfaçam o filtro da Tabela 3.1, apenas Kepler-145 b foi selecionado como planeta possivelmente rochoso. Tomando em consideração os critérios de distribuição de planetas vistos na Seção 2.2, Kepler-145 c seria classificado como um planeta de transição entre Netunos e gasosos gigantes. Então, foi optado pela remoção da estrela Kepler-145 a fim de manter uma amostra de anãs F-G com somente planetas possivelmente rochosos detectados. Com isto, temos uma amostra final de estrelas de 160 anãs F-G do disco fino com planetas possivelmente rochosos.

Figura 3.5 - Histograma da temperatura efetiva da amostra de estrelas com planetas.



Histograma da temperatura efetiva da amostra de 219 estrelas (anãs F-G-K-M) do disco fino com 268 planetas possivelmente rochosos.

3.5 Amostra de controle

A amostra de estrelas de controle foi obtida a partir das estrelas sem planetas detectados contidas no catálogo Hypatia. Inicialmente foram selecionadas as estrelas contidas nos intervalos dos parâmetros fotosféricos (T_{ef} , $\log g$ e $[\text{Fe}/\text{H}]$) da amostra atual. Contudo, os parâmetros fotosféricos da amostra de estrelas no catálogo NASA são diferentes se comparados com os parâmetros fotosféricos equivalentes no catálogo Hypatia. O catálogo Hypatia usa como referência para T_{ef} e $\log g$ o catálogo do Exoplanets ⁶ enquanto $[\text{Fe}/\text{H}]$ possui uma referência diferente para cada estrela. Portanto, acaba sendo plausível a disparidade entre os parâmetros fotosféricos entre os dois catálogos. No intuito de tentar contornar este problema, uma regressão linear foi feita para T_{ef} , $\log g$ e $[\text{Fe}/\text{H}]$ dos catálogos NASA e Hypatia. A regressão linear foi feita de tal forma a obtermos uma relação entre os parâmetros NASA-Hypatia como apresentada na Equação 3.1.

⁶ <<http://exoplanets.org/>>

$$Y_{\text{Hypatia}} = a * X_{\text{NASA}} + b \pm rms \quad (3.1)$$

Uma vez identificadas as constantes a , b e rms ⁷ (Tabela 3.2) para cada T_{ef} , $\log g$ e $[\text{Fe}/\text{H}]$, os intervalos de parâmetros fotosféricos do catálogo NASA são aplicados na Equação 3.1 no objetivo de encontrar um intervalo equivalente no catálogo Hypatia. Para o valor mínimo do intervalo dos parâmetros fotosféricos é usada a Equação 3.1 subtraindo 1 rms característico, enquanto para o intervalo máximo é adicionado 1 rms . Assim, são obtidos os intervalos dos parâmetros fotosféricos a serem usados na amostra de controle que podem ser vistos na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Tabela listando os resultados obtidos através da regressão linear.

Parâmetros	NASA	Hypatia	$a \pm a_{\text{erro}}$	$b \pm b_{\text{erro}}$	rms
T_{ef}	5400 a 6200	5196 a 6335	$1,07 \pm 0,05$	$-440,39 \pm 303,59$	141,09
$\log g$	3,84 a 4,64	3,69 a 4,62	$0,74 \pm 0,11$	$1,02 \pm 0,48$	0,17
$[\text{Fe}/\text{H}]$	-0,46 a 0,41	-0,58 a 0,48	$0,94 \pm 0,06$	$-0,03 \pm 0,01$	0,12

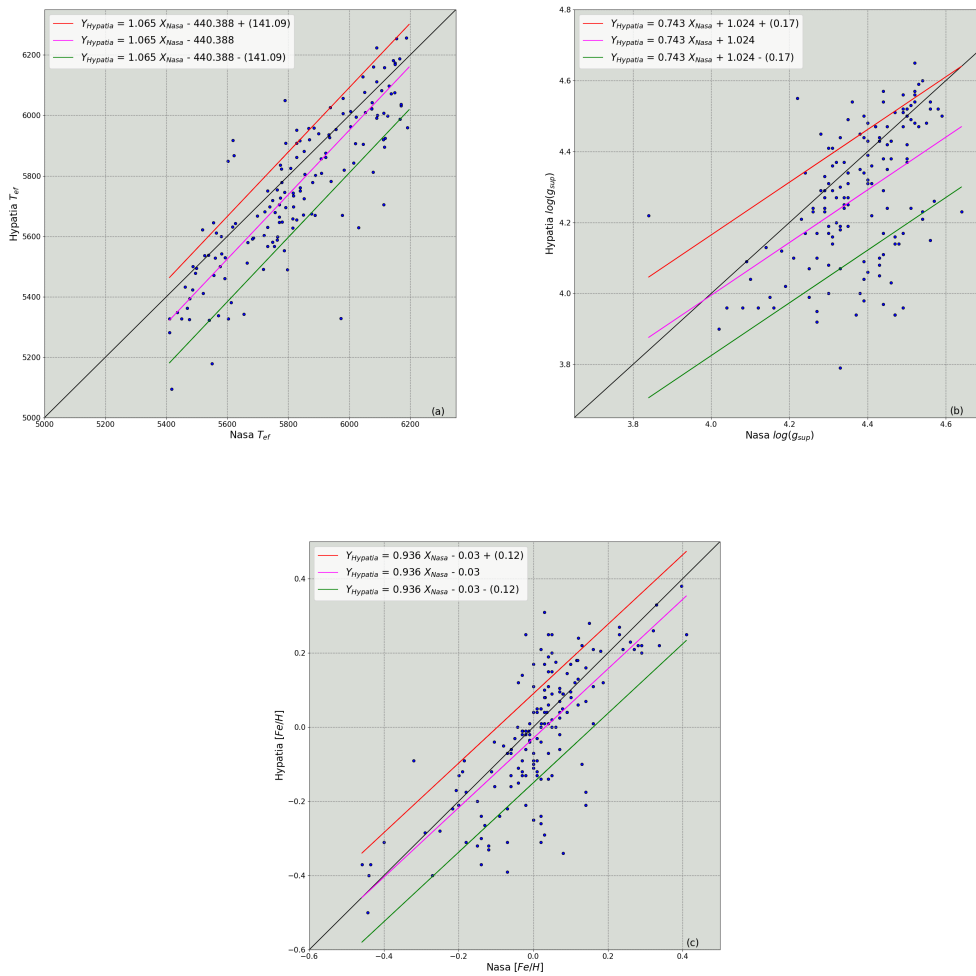
A Figura 3.6 apresenta a regressão linear representada pela curva magenta, assim como a regressão linear com a adição e subtração de 1 rms representadas pelas curvas em vermelho e verde respectivamente. A equação que descreve cada curva é apresentada na legenda da própria figura, onde as constantes são aquelas mostradas na Tabela 3.2. A curva em preto representa a função identidade que seria a representação esperada dos parâmetros fotosféricos entre os catálogos caso a distinção entre os valores não ocorresse. Assim como teve essa discrepância de informações dos parâmetros fotosféricos dos catálogos NASA e Hypatia, o mesmo poderia ocorrer com a informação das possíveis estrelas sem planetas detectados. Como o catálogo Hypatia fornece todos os nomes que identificam uma estrela, foi possível comparar com as estrelas do catálogo NASA e verificar se existiam estrelas com planetas detectados que não tiveram essa informação inserida no catálogo Hypatia. Foram identificadas 74 estrelas do catálogo Hypatia com nenhum planeta detectado que no catálogo NASA estão registradas como estrelas com planetas detectados e retiradas da amostra de controle. Além disso, como nossa amostra de anãs F-G com planetas possivelmente rochosos são de estrelas com alta probabilidade de pertencerem ao disco fino, o mesmo deve ocorrer com a amostra de controle, e então o procedimento

⁷RMS é um sigla do inglês para “*Root Mean Square*”. É definido como $x_{rms} = \sqrt{\frac{\sum_i^n x_i^2}{n}}$ sendo x_i um elemento de um conjunto X.

descrito na Seção 3.3 foi empregado para as estrelas sem planetas detectados do catálogo Hypatia e uma vez os intervalos fotosféricos de interesse definidos, agora é possível obter uma amostra de anãs F-G sem planetas detectados também pertencentes ao disco fino para servir de referência, obtida a partir do catálogo Hypatia. Tal amostra dita de controle possui um total de 835 anãs F-G tal que os 3 parâmetros fotosféricos (T_{ef} , $\log g$, $[\text{Fe}/\text{H}]$) apresentam coberturas (equivalentes OU análogas) aos da amostra de estudo anãs F-G do disco fino com planetas possivelmente rochosos.

No decorrer do mestrado, os catálogos usados sofriam constantes atualizações de informação, além de que novos planetas e estrelas eram registrados. A medida que nosso trabalho era desenvolvido as tabelas usadas eram atualizadas com alguma frequência a fim de manter a amostra mais recente possível. Para este trabalho, as tabelas usadas nas amostras tiveram a sua última atualização em: catálogo NASA - 30 de novembro de 2022 e catálogo Hypatia - 23 de novembro de 2022.

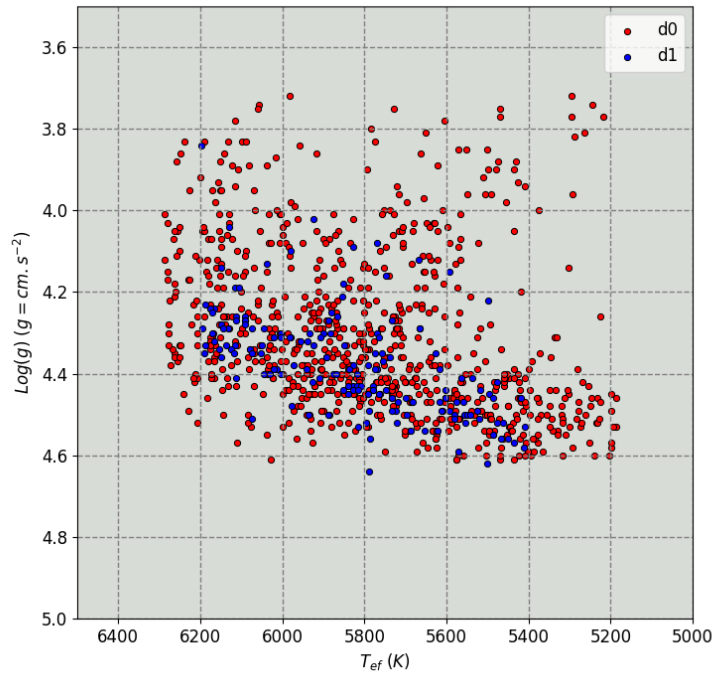
Figura 3.6 - Regressão linear para T_{ef} , $\log g$ e $[\text{Fe}/\text{H}]$ entre a mostra de estudo e a mostra de controle.



4 ANÁLISE E RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos com base na amostra de anãs F-G do disco fino hospedeiras de planetas possivelmente rochosos dispondo de abundâncias medidas para 15 elementos (Fe incluído), conforme descrito no Capítulo 3. Alguns métodos estatísticos foram usados no intuito de explorar as propriedades de nossa amostra. O interesse foi em encontrar diferenças significativas nas propriedades de estrelas com e sem nenhum planeta rochoso conhecido. Além disso, para uma melhor organização das amostras de estudo e comparação são adotadas as nomenclaturas de “d” (dwarf) representando estrelas anãs F-G, “0” para a amostra de anãs sem planetas detectados de qualquer tipo (amostra de controle/referência) e “1” para a amostra de anãs com planetas possivelmente rochosos (amostra de estudo). A Figura 4.1 apresenta um diagrama HR do $\log g$ em função de T_{ef} que representa a distribuição do conjunto total de 995 anãs F-G (160 d1 e 835 d0).

Figura 4.1 - Diagrama HR $\log g$ vs. T_{ef} da amostra de 160 estrelas d1 (azul) e 835 (vermelho) estrelas d0.



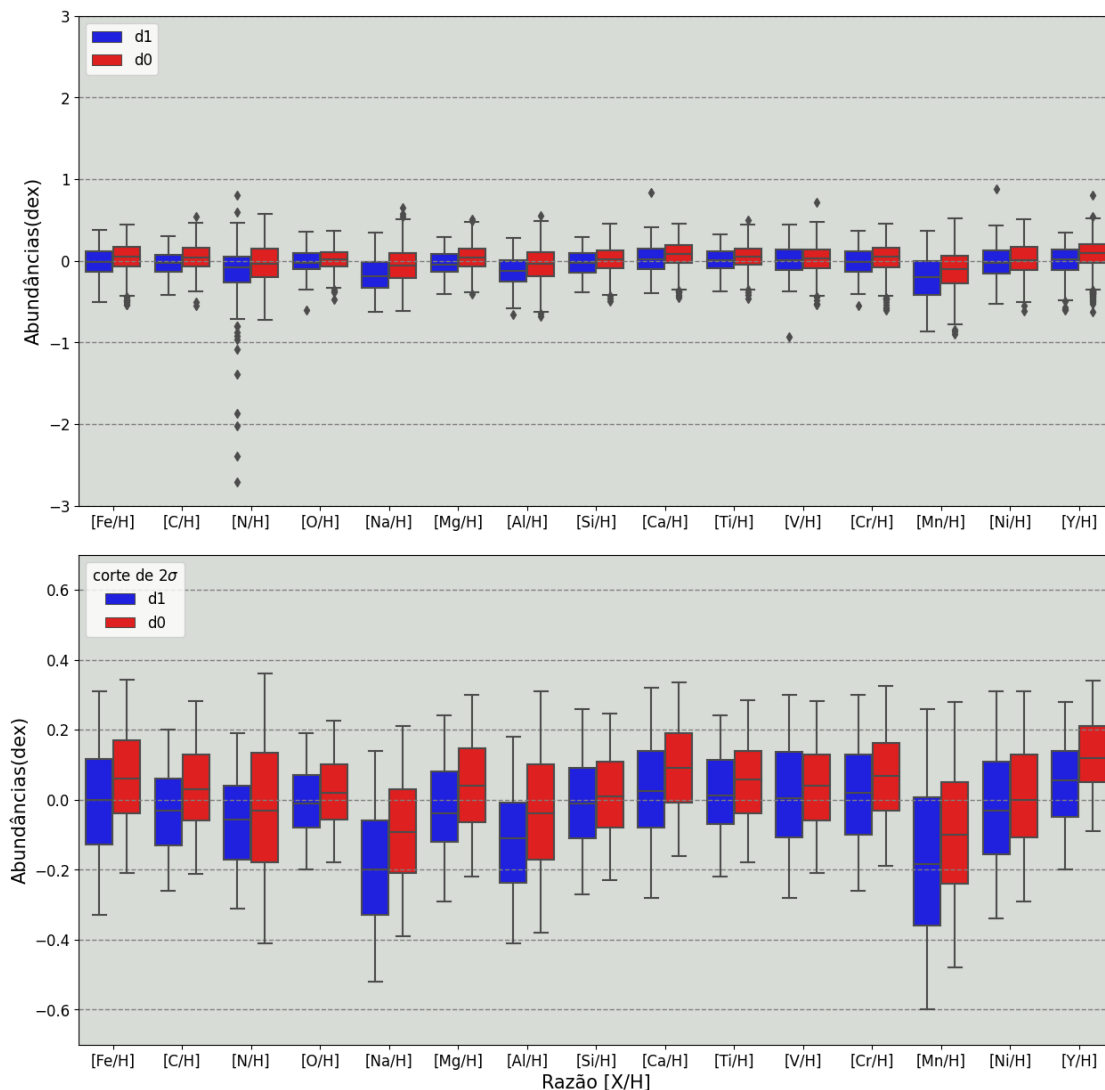
4.1 Distribuições de abundâncias [X/H]

Inicialmente, comparamos as distribuições de abundâncias de 15 elementos na escala [X/H] entre as amostras d0 e d1 (respectivamente representadas em vermelho e azul daqui em diante). As distribuições são apresentadas na Figura 4.2, onde temos um “*boxplot*” para cada elemento, cujas divisões de quartis (caixas e bigodes) resumem graficamente os percentis de cada distribuição. A linha que divide cada caixa em duas partes indica a mediana da distribuição, enquanto as bordas superior e inferior da caixa indicam o intervalo interquartil. A parte superior da Figura 4.2 apresenta a comparação das amostras com os “*outliers*”. Na parte inferior da mesma figura a amostra teve um corte de 2σ nos dados de abundância de cada elemento para a eliminação dos “*outliers*” com uma visualização ampliada da distribuição das abundâncias. A comparação mostra uma tendência de que as estrelas anãs F-G com planetas possivelmente rochosos (d1) apresentam medianas de abundâncias em todos os elementos ligeiramente menores quando comparadas com as anãs sem planetas (d0). Em outras palavras, as anãs F-G hospedeiras de planetas possivelmente tenderiam a ser menos enriquecidas em metais do que as estrelas sem planetas, diferentemente do que é percebido para estrelas hospedeiras de planetas gigantes gasosos (HINKEL et al., 2019; SILVA et al., 2015). Dentre todas as razões de abundâncias analisadas, as que tem uma maior diferença entre as medianas das amostras d1 e d0 são [C/H], [Na/H], [Mg/H], [Al/H], [Ca/H] e [Y/H], tal que a diferença se apresenta da ordem de um quartil, mas nunca igual ou maior.

4.2 Árvore de classificação

Assumindo que há uma conexão entre abundâncias químicas em estrelas e a presença de planetas (gasosos ou rochosos), propomos investigar quais razões de abundâncias chave indicariam a presença de planetas rochosos (ou no caso deste trabalho, planetas possivelmente rochosos). Para fazer isso, foi aplicada uma árvore de classificação a um conjunto completo de abundâncias [X/H] (mostradas na Figura 3.4) para as anãs hospedeiras de planetas possivelmente rochosos da amostra de estudo em confrontação contra as anãs da amostra de comparação (sem planetas). As árvores de classificação fornecem uma separação ideal das observações oriundas de classes ou populações distintas, através de algoritmos de aprendizagem. Para nosso problema, foram consideradas duas classes: (i) estrelas hospedando apenas planetas possivelmente rochosos e (ii) estrelas sem planetas detectados de qualquer tipo. A nossa árvore de classificação foi desenvolvida através de particionamento recursivo do espaço de abundâncias, com objetivo de obter folhas com a maior pureza possível, isto

Figura 4.2 - Boxplot para a comparação entre as abundâncias elementares de estrelas anãs com planetas possivelmente rochosos e sem nenhum planeta detectado, mostradas em azul e vermelho, respectivamente.



é, possuindo a maioria ou todas as estrelas da folha pertencentes à mesma classe. Uma árvore de classificação possui nós, ramos e folhas. Os nós apresentam uma regra de divisão com base em uma variável (selecionada a partir do espaço de abundâncias através de uma métrica, neste trabalho foi adotada a métrica de Gini¹) que particiona a amostra para um ramo ou outro. Caso a regra de divisão seja satisfeita, amostra é dividida e guardada nos dois ramos, o ramo esquerdo armazena a informação da amostra que satisfaz a regra de divisão (usualmente uma desigualdade)

¹A métrica de Gini é um dado valor G tal que $G = \sum_k P_k(1 - P_k)$, onde P é proporção dos k -ésimos elementos pertencentes a uma mesma classe em relação a sub-amostra.

enquanto o ramo direito guarda a informação que não satisfaz a regra. O primeiro nó de uma árvore de classificação é chamado de nó raiz e, dentre todas as possíveis variáveis da amostra, representa a variável de maior relevância para o particionamento da amostra e distinção das classes. Os nós subsequentes ao nó raiz (ou sub-nós) são classificados como nós de decisão. As folhas apresentam as estatísticas da amostra particionada, assim como a classe dominante na amostra da folha.

Para facilitar a identificação das classes as folhas foram marcadas e compiladas por cores. As folhas marcadas com “0” (vermelho) representam a classe de estrelas que não hospedam planeta de nenhum tipo e “1” (azul) representa estrelas hospedeiras de planetas possivelmente rochosos. Abaixo de cada folha são apresentados dois números, onde o da esquerda é o número de estrelas contidas na folha e o da direita representa a porcentagem destas estrelas com planeta(s) possivelmente rochoso(s). Para uma melhor análise da árvore de classificação, quatro considerações também foram empregadas:

- i Os nós de decisão que resultarem em folhas com uma porcentagem de estrelas anãs com planeta possivelmente rochoso menor que 70% também serão considerados da classe "0", assim dando destaque para as folhas com maior pureza.
- ii Caso um nó secundário gere duas folhas com mais de 70% de pureza cada, estas duas folhas irão colapsar com este nó transformando este nó em uma folha (perdendo assim sua identidade de nó).
- iii Caso um nó secundário gere duas folhas com pureza menor que 70%, estas duas folhas irão colapsar com este nó transformando este nó em uma folha (perdendo assim sua identidade de nó).
- iv Caso um nó secundário apresente mais de uma possibilidade de elemento químico para sua condição matemática (desigualdade em $[X/H]$), este nó irá colapsar em uma folha, perdendo assim sua identidade como um nó.

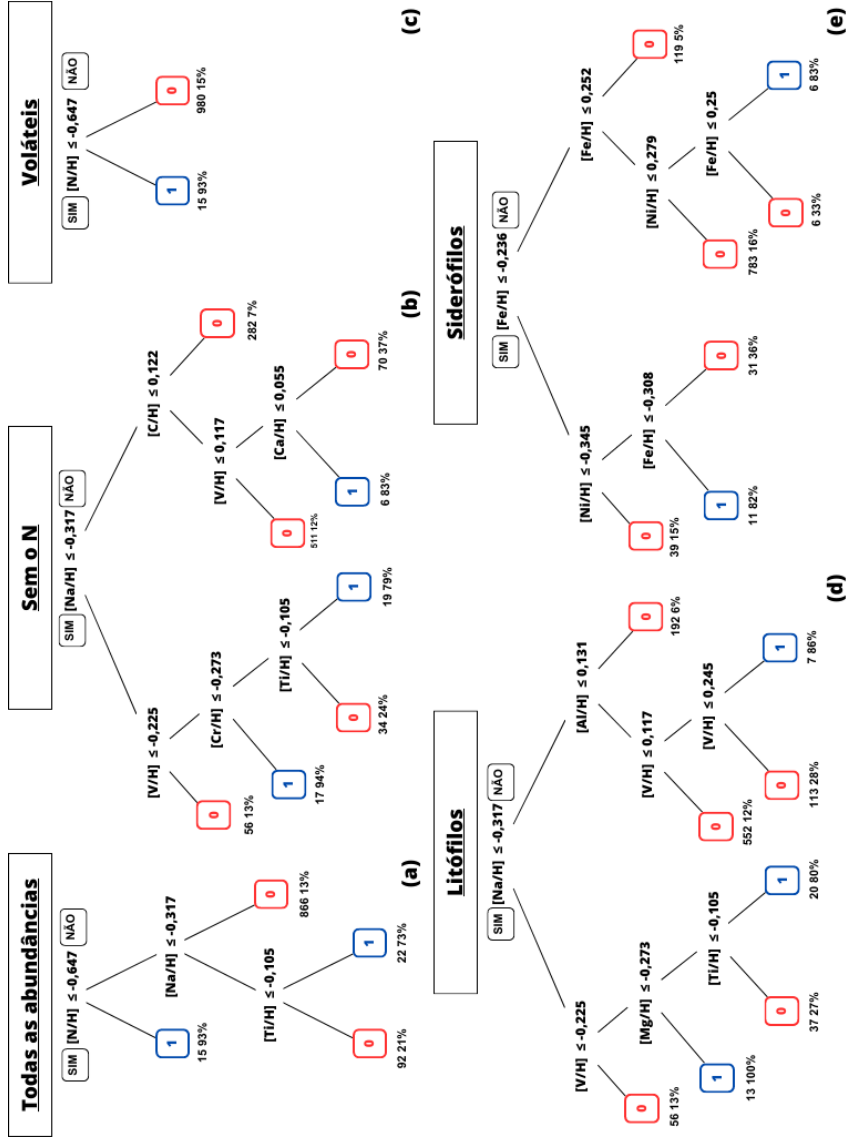
A árvore de classificação foi feita ao usar as duas amostras (de estudo d1 e de comparação d0) somando 995 anãs F-G. O método de classificação realiza a partição até obter as folhas mais puras possíveis e isso pode gerar um problema conhecido como “*overfitting*”, pois com uma amostra deste tamanho a árvore resultante pode gerar uma grande quantidade nós, ramos e folhas, aumentando a sua complexidade. Tendo isto em consideração será feito uma “poda” para reduzir a profundidade da

árvore. Isto facilita a compreensão e interpretação da árvore e pode servir para verificar quais abundâncias $[X/H]$ são mais relevantes nos dados da amostra. A poda foi feita ao reduzir o número de interações para no máximo 3 nós de decisão resultantes de cada ramo do nó raiz.

A Figura 4.3 apresenta as árvores de classificação para 5 grupos de elementos químicos: todos os 15 elementos (como mostrados na Figura 4.2), todos os elementos excluindo o nitrogênio, voláteis, litófilos e siderófilos. Embora o espaço de abundâncias seja formado por 15 razões distintas, apenas 3 foram necessárias para uma boa partição: N, Na e Ti. A árvore com todos os elementos apresenta duas folhas com alta pureza de estrelas d1, em outras palavras, mais de 70% das estrelas de cada folha hospedam planetas possivelmente rochosos. O nitrogênio aparenta ser um bom indicativo da presença de planetas rochosos, pois com $[N/H] \leq -0,647$ dex gera uma folha que apresenta 93% das estrelas com planetas possivelmente rochosos. Por outro lado, ao considerar $[N/H] > -0,647$ dex, $[Na/H] \leq -0,317$ dex e $[Ti/H] > -0,105$ dex obtemos uma segunda folha com alta pureza de estrelas d1, com 73% de suas estrelas hospedando planetas possivelmente rochosos. A primeira folha obtida, a partir do nitrogênio, é um nó que foi colapsado em folha por atender o critério ii citado anteriormente. Além disso, o nó em questão apresentava uma ambiguidade na seleção da variável (razão de abundância) que definiria a regra de divisão dos ramos pois, pelos critérios de seleção do próprio método, vários elementos eram adequados como variável do nó. A métrica é quem define qual variável tem maior importância para a partição das classes, associando cada variável a um valor numérico de 0 a 1 (índice de Gini) obtido com base na amostra contida no nó e quanto mais próximo de 0 é este valor mais pura é amostra segundo a variável em questão. Considerando que em um determinado nó mais de uma variável apresente um mesmo índice de Gini e este seja o valor de maior pureza da amostra, as variáveis em questão seriam aptas a se tornarem nós e como só pode ter uma variável por nó uma decisão deve ser feita (neste caso o próprio algoritmo decide de forma aleatória qual variável usar).

Devido a esta ambiguidade, uma nova árvore de classificação foi feita retirando o nitrogênio a fim de verificar se a ambiguidade ainda se mantinha (ver painel (b) da Figura 4.3). De fato, tal ambiguidade deixou de existir. A remoção do nitrogênio justifica-se porque, além da ambiguidade, existe uma quantidade apreciável de estrelas com abundâncias $[N/H]$ bem negativas além de 2 sigma da média (outliers) como mostrado no painel superior da Figura 4.2, as quais provavelmente estão falseando o resultado das árvores de classificação que envolvem o nitrogênio.

Figura 4.3 - Árvores de classificação aplicadas para a amostra de 995 estrelas.



Árvores de classificação feitas a partir do espaço de abundâncias no formato $[X/H]$ e variáveis selecionadas com base na métrica de Gini, as variáveis de cada classificação são: (a) todas as abundâncias, (b) todas as abundâncias, com exceção do nitrogênio, (c) grupo dos voláteis, (d) grupo dos litófilos e (e) grupo dos siderófilos.

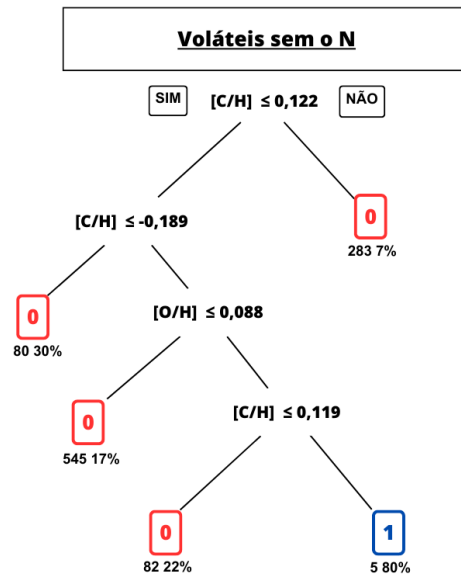
Ao retirar o nitrogênio como uma variável, a árvore ficou um pouco mais complexa e houve um aumento no número de variáveis usadas na árvore. O nó raiz passou a ser o sódio onde a regra de divisão dos ramos se manteve a mesma. Curiosamente, a maioria das variáveis selecionadas pertencem ao grupo dos litófilos (exceto Cr e C). Agora, a árvore de classificação apresenta 3 folhas de alta pureza da classe d1 e o número de variáveis necessárias para classificar uma folha desta classe aumentou. A primeira folha se origina ao tomar $[\text{Na}/\text{H}] \leq -0,317$ dex, $[\text{V}/\text{H}] > -0,225$ dex e $[\text{Cr}/\text{H}] \leq -0,273$ dex, a qual tem 93% de pureza de estrelas d1 para um conjunto de 17 estrelas. Ainda no mesmo ramo obtemos a segunda folha ao tomar $[\text{Na}/\text{H}] \leq -0,317$ dex, $[\text{V}/\text{H}] > -0,225$ dex, $[\text{Cr}/\text{H}] > -0,273$ dex e $[\text{Ti}/\text{H}] > -0,105$ dex a qual tem 79% de pureza para um conjunto 19 estrelas. A terceira folha é obtida ao tomar $[\text{Na}/\text{H}] > -0,317$ dex, $[\text{C}/\text{H}] \leq 0,122$ dex, $[\text{V}/\text{H}] > 0,117$ dex e $[\text{Ca}/\text{H}] \leq 0,055$ dex a qual apresenta 83% de pureza para um conjunto de apenas 6 estrelas.

As Figuras 4.3(c), 4.3(d) e 4.3(e) são árvores de classificação onde as variáveis usadas são as abundâncias pertencentes aos grupos dos voláteis, litófilos e siderófilos respectivamente. Com relação ao grupo dos voláteis temos apenas um elemento de classificação que vem a ser o nitrogênio. Contudo, a distribuição de abundâncias do nitrogênio para a amostra d1 apresenta uma assimetria acentuada para valores sub-solares (há muitas estrelas outliers sob o critério de 2 sigma abaixo da média). Tal assimetria precisa ser investigada criteriosamente verificando os trabalhos que fornecem as medidas de abundância do nitrogênio para estas estrelas bem como quais estrelas seriam estas individualmente ou coletivamente. A folha do ramo esquerdo (para $[\text{N}/\text{H}] \leq -0,647$ dex) apresenta um conjunto de 15 estrelas onde 93% são estrelas d1, o que condiz com o primeiro resoldado da árvore da Figura 4.3(a). A folha do ramo direito (para $[\text{N}/\text{H}] > -0,647$ dex) apresenta um conjunto 980 estrelas com 15% delas d1, sendo que esses 15% equivalem a 145 das 160 estrelas que compõe toda a amostra de estudo d1, o que poderia resultar em outros possíveis nós com classe d1. Porém, os demais nós do ramo direito resultaram somente em folhas cuja a classe predominante é d0, o que resultou no colapso destes nós até obter a folha em questão vista na árvore do grupo dos voláteis.

Assim como mostrado na Figura 4.3(b), foi realizada uma árvore de classificação para o grupo do voláteis retirando a razão $[\text{N}/\text{H}]$ (Figura 4.4). Ao tomar apenas o carbono e o oxigênio para classificação do grupo dos voláteis, a árvore ficou com mais nós do que quando o nitrogênio estava incluso, porém a classificação da folha se tornou bem simplificada. A árvore em questão apresenta uma única folha de pureza elevada de anãs d1 com um conjunto de 5 estrelas e uma pureza de 80%.

Essa folha indica que a presença de planetas possivelmente rochosos estaria em destaque quando o carbono apresenta uma abundância em torno de um dado valor ($[C/H] \approx 0,121$ dex), enquanto o oxigênio deve ser sobressolar ($[O/H] > 0,088$ dex). Tomando a abundância relativa ao oxigênio temos que $[C/O] < 0,03$ dex ² tal que a razão de abundâncias numéricas nesse limite é $n(C)/n(O) = 0,59$ ³, apontando um intervalo de valores sugestivos para a formação de planetas de silicatos e óxidos de Mg-Si ($n(C)/n(O) < 0,8$) (BEDELL et al., 2018; NISSEN; GUSTAFSSON, 2018). Sumariamente, uma baixa concentração do carbono relativa ao oxigênio favoreceria a formação de planetas rochosos (ou ainda, uma maior abundância de oxigênio relativa ao carbono).

Figura 4.4 - Árvore de classificação aplicada para a amostra de 995 estrelas para o grupo dos voláteis sem o nitrogênio.



Árvore de classificação feitas a partir do espaço de abundâncias no formato $[X/H]$ e variáveis selecionadas com base na métrica de Gini. As variáveis de classificação pertencem ao grupo dos voláteis, com exceção do nitrogênio.

Os litófilos passam a ter uma maior relevância para a classificação de estrelas d1, com um destaque para o sódio como nó raiz e ao vanádio que aparece nos dois ramos

² $[C/O] = [C/H] - [O/H]$
³ $n(C)/n(O) = 10^{[C/O] + \log(\epsilon_{C,\odot}) - \log(\epsilon_{O,\odot})}$, onde para uma dado elemento X $\log(\epsilon_X) = \log(n(X)/n(H)) + 12$ e com relação aos valores solares (subíndice \odot) foram obtidos de Asplund et al. (2009)

a partir do nó raiz. Para o grupo dos litófilos temos que o nó raiz vem a ser o sódio, que é justamente a segunda variável relevante para a partição de classes segundo a primeira árvore de classificação. A árvore apresenta 3 folhas alta de pureza de classe d1 e o vanádio aparece em 3 nós secundários como uma variável de decisão. Um folha é obtida com $[\text{Na}/\text{H}] \leq -0,317$ dex, $[\text{V}/\text{H}] > -0,225$ dex e $[\text{Mg}/\text{H}] \leq -0,273$ dex a qual possui 100% de pureza de estrelas d1 para um grupo de 13 anãs. Um outra folha é obtida com $[\text{Na}/\text{H}] \leq -0,317$ dex, $[\text{V}/\text{H}] > -0,225$ dex, $[\text{Mg}/\text{H}] > -0,273$ dex e $[\text{Ti}/\text{H}] > -0,105$ dex onde temos uma folha com 20 estrelas e dentre elas há 80% da classe d1. Olhando agora para $[\text{Na}/\text{H}] > -0,317$ dex temos apenas uma folha de alta pureza resultante e como dois dos três nós de decisão apresentam uma mesma variável ($[\text{V}/\text{H}]$) a classificação da folha fica mais simplificada, ao considerar $[\text{Al}/\text{H}] \leq 0,131$ dex e $[\text{V}/\text{H}] > 0,245$ dex aparecem 7 estrelas sendo 86% delas da amostra d1.

A árvore de classificação dos siderófilos (elementos que participam da constituição de núcleos de planetas rochosos do tipo terrestre) apresenta duas folhas com pureza elevada de anãs d1, as quais apresentam resultados aparentemente contraditórios com relação à abundância do elemento do nó raiz, o ferro. A folha contendo 11 estrelas e com 82% de pureza que aparece no ramo principal da esquerda na árvore indica que a presença de planetas possivelmente rochosos seria acentuada quando o ferro é subsolar (i.e. $[\text{Fe}/\text{H}] \leq -0,308$ dex), tendo o níquel não tão subsolar assim ($[\text{Ni}/\text{H}] > -0,348$ dex). Por outro lado, a folha no ramo direito principal, contendo 6 estrelas e pureza equivalente (83%), indica que a presença de planetas possivelmente rochosos seria acentuada quando o ferro é sobressolar exibindo uma abundância em torno de um certo valor ($[\text{Fe}/\text{H}] \approx 0,251$ dex), sendo que o níquel precisaria também estar mais enriquecido ($[\text{Ni}/\text{H}] > 0,279$ dex). Em suma, a presença/formação de planetas rochosos parece ser intensificada quando o ferro é subsolar e o níquel não tanto subsolar como também quando o ferro é sobressolar (em torno de um dado valor) e o níquel mais sobressolar ainda. Ou seja, a concentração de níquel relativa ao ferro seria um indicador da presença de planetas (possivelmente) rochosos, mostrada por uma razão $[\text{Ni}/\text{Fe}]$ em torno da solar (-0,04 dex) ou sobressolar preferencialmente.

Ao observar a Figura 4.3 como um todo podemos ver que as classificações para a classe d1 se apresentam com valores baixos de razão de abundâncias (com algumas exceções) o que remete um pouco a Figura 4.2 no que diz respeito a distribuição das abundâncias, onde para as estrelas d1 apresentam uma distribuição abaixo ou próxima das d0. Na árvore com todas as abundâncias (Figura 4.3(a)) temos que a variável (dentre todas as 15) que melhor discrimina as classes d0 e d1 é nitrogênio,

porém ao comparar com a Figura 4.2 vemos que a mediana de $[N/H]$ para ambas são bem próximas. A mesma comparação entre as figuras pode ser feita com o sódio, em contra partida este aparenta ser um bom indicador da presença de planetas possivelmente rochosos tanto no “boxplot” quanto na árvore de classificação. Embora, à primeira vista, o “boxplot” apresente uma boa noção da distribuição das razões de abundâncias entre as estrelas d0 e d1, algumas razões (visualmente não relevantes ao boxplot) são consideradas relevantes apenas na classificação de árvore enquanto outras apresentam concordância de relevâncias nas duas situações.

4.3 Análise de Discriminante Linear

Uma outra abordagem investigativa sobre a amostra de estudo pode ser feita através de uma análise de discriminante linear (LDA, sigla inglesa para Linear Discriminant Analysis). A LDA consiste basicamente em um método estatístico para caracterizar ou separar duas ou mais classe distintas. Essa separação de classes é feita através da obtenção de uma combinação linear de propriedades observadas que melhor as discrimina. Como resultado, é obtido um coeficiente, ou um conjunto destes, que pode atuar como um classificador linear. Diferentemente de uma árvore de classificação que consiste na divisão recursiva de propriedades únicas no intuito de adquirir a classe com a maior pureza possível, a LDA busca rotações do espaço multiparamétrico original que leve à melhor categorização das classes em todo o espaço (SILVA et al., 2015).

Aplicamos a LDA sobre o conjunto completo das 15 razões de abundâncias (vistas na Figura 4.2) de estrelas anãs, a fim de encontrar a melhor combinação linear que possa discriminar as amostras d0 e d1. Como resultado, obtemos os índices apresentados na Tabela 4.1. Ao realizar uma combinação linear na forma descrita pela Equação 4.1, onde a_i representa o índice de discriminante linear associado ao elemento X_i de uma dada estrela j , obtemos um conjunto de valores Z (onde $Z = [Z_1, Z_2, \dots, Z_j, \dots, Z_n]$ para n estrelas) que representam as amostras d0 e d1. A Figura 4.5 apresenta os histogramas para as distribuições da variável Z para as estrelas d0 e d1 (como este se refere ao conjunto Z , chamaremos de Z_0 e Z_1 para as estrelas d0 e d1 respectivamente). O painel superior representa o conjunto Z_0 (histograma vermelho) enquanto Z_1 (histograma azul) está mostrado no painel inferior. As curvas em preto representam a distribuição de kernel para os conjuntos Z_0 e Z_1 e os pequenos triângulos brancos representam a posição média em cada distribuição. A partir de um aspecto mais visual Z_0 e Z_1 aparentam ter distribuições distintas. Se considerarmos que uma combinação linear de razões de abundâncias estelares sejam uma boa

Tabela 4.1 - Tabela de índices de discriminantes lineares das razões de abundâncias obtidas através de LDA.

Razão de abudnância	Discriminante linear
[Fe/H]	-20,052
[C/H]	-3,251
[N/H]	-2,098
[O/H]	3,108
[Na/H]	-11,162
[Mg/H]	-10,744
[Al/H]	-3,688
[Si/H]	10,436
[Ca/H]	-4,664
[Ti/H]	10,703
[V/H]	3,405
[Cr/H]	7,453
[Mn/H]	0,568
[Ni/H]	22,858
[Y/H]	-3,787

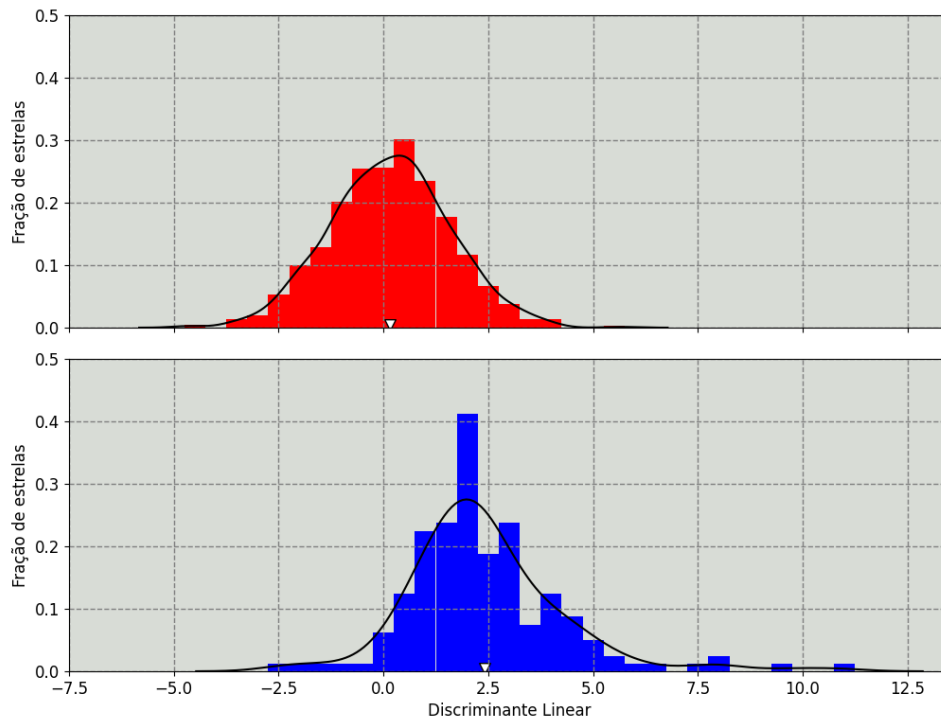
representação da distinção de estrelas com ou sem planetas possivelmente rochosos, então os índices da Tabela 4.1 poderiam ser usados para discriminar as classes d0 e d1. Utilizamos o teste f da variância e o teste t de Welsch (teste de Student para variâncias diferentes) para avaliar quantitativamente se as variâncias e as médias dessas distribuições são significativamente diferentes umas das outras. Ambos os testes são testes de hipóteses que usam conceitos estatísticos para rejeitar ou não uma hipótese nula quando a estatística de teste segue uma determinada distribuição. A partir destas distribuições e do uso de outros parâmetros relacionados (ex. s_1 e s_0 que são as variâncias amostrais de cada amostra) determina-se a probabilidade (p) de aceitar a hipótese nula. O teste f segue a distribuição de Fisher-Snedecor ⁴ enquanto o teste t segue a distribuição de Student ⁵. Foi considerada a rejeição da hipótese nula para ambos os testes quando a probabilidade fosse $p \leq 0,01$ ($\leq 1\%$). Para a aplicação do teste f foi calculada a variância amostral de cada distribuição. A probabilidade calculada foi de $p = 1,78 * 10^{-6}$, o que rejeita a hipótese nula (variâncias iguais), de modo que as variâncias são diferentes. Quando as variâncias forem diferentes, aplicamos o teste de Welch para Z0 e Z1. Rejeitamos então a hipótese nula (médias iguais) ao obter uma probabilidade de $p = 1,78 * 10^{-33}$, logo as médias são significativamente diferentes tal que a diferença absoluta entre as médias de Z0 e Z1 é $\Delta\mu = 2,269$ dex (unidade da escala de abundâncias [X/H]).

⁴<https://pt.wikipedia.org/wiki/Distribui%C3%A7%C3%A3o_F_de_Fisher-Snedecor>

⁵<https://pt.wikipedia.org/wiki/Teste_t_de_Student>

$$Z_j = \sum_{i=1}^n a_i \left[\frac{X_i}{H} \right]_j \quad (4.1)$$

Figura 4.5 - Histogramas e distribuição de Kernel dos índices discriminantes lineares com base nos índices definidos na Tabela 4.1.



4.4 Densidade de kernel aplicada a distribuições de razões [E1/E2]

A estimativa de densidade de kernel (KDE, sigla inglesa para Kernel Estimation Density) é uma técnica para estimar a função de densidade de probabilidade (PDF, sigla inglesa para Function Density Probability). Um histograma representando a distribuição de uma variável qualquer é fortemente influenciado pelo “*data binning*”, o qual interfere na localização individual dos dados que ficam reamostrados em intervalos arbitrários. Isso faz com que a forma do histograma se torne descontínua e plana em cada intervalo amostral. Por outro lado, a técnica do kernel produz uma estimativa suave da PDF, usa todas as localizações dos pontos amostrais e sugere

de forma mais convincente a multimodalidade. Em suas aplicações bidimensionais, a estimativa do kernel é ainda melhor, pois o histograma 2D requer adicionalmente a definição da orientação dos bins 2D (WEGLARCZYK, 2018).

$$E_{12} \equiv \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_1 \\ H \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} E_2 \\ H \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

$$(erro_{E_{12}})^2 = (erro_{[E_1/H]})^2 + (erro_{[E_2/H]})^2 \quad (4.3)$$

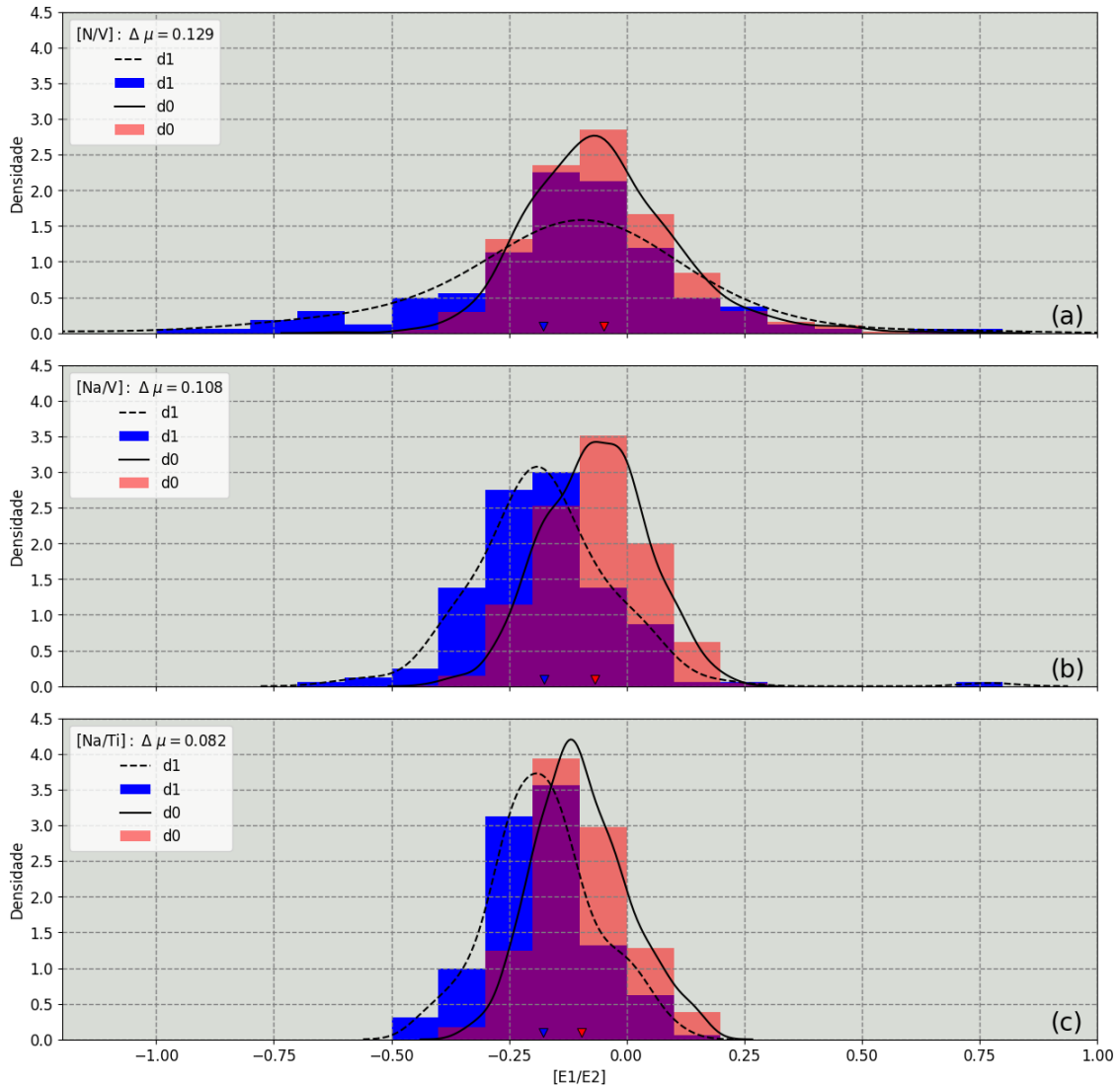
$$\Delta\mu_{erro} = \frac{1}{2} \left[\mu_{erro_{E_{12}}}^{d0} + \mu_{erro_{E_{12}}}^{d1} \right] \quad (4.4)$$

A partir dos 15 elementos selecionados, foram exploradas todas as razões de abundâncias calculadas a partir da Equação 4.2 (um total de 105 combinações). O erro de cada razão $[E_1/E_2]$ é estimado com base na Equação 4.3⁶. Para a visualização das distribuições de cada razão foram usados histogramas e KDE para as amostras d0 e d1. Para as 105 razões de abundâncias possíveis utilizamos o teste f de variância. Caso a hipótese nula (variâncias iguais) do teste f fosse rejeitada, o teste t de Welch (teste t de Student para variâncias diferente) é aplicado para encontrar razões com médias distintas entre as amostras d1 e d0. Caso a hipótese nula do teste f fosse aceita, o teste t de Student para variâncias iguais é utilizado. Assim como foi feito na Seção 4.3 a variância usada no teste f foi obtida a partir do cálculo da variância amostral. Foi calculada também a média das amostras ($\mu_{E_{12}}^{d0}$ e $\mu_{E_{12}}^{d1}$), d0 e d1 para cada $[E_1/E_2]$ e o mesmo foi feito para o conjunto de erros equivalentes (média dos erros, $\mu_{erro_{E_{12}}}^{d0}$ e $\mu_{erro_{E_{12}}}^{d1}$). Das médias de d0 e d1 foi calculado o módulo da sua diferença ($\Delta\mu = \left| \mu_{E_{12}}^{d0} - \mu_{E_{12}}^{d1} \right|$) e por fim foi estimado o erro de cada razão $[E_1/E_2]$ (erro característico) para a amostra completa d1 + d0 ao usar a Equação 4.4.

Uma vez feito os testes de variâncias e médias, foram selecionadas quais razões de abundâncias tinham média significativamente diferentes e dentre as razões selecionadas foram escolhidas as que possuísssem a diferença das médias pelo menos igual ou superior ao erro característico ($\Delta\mu \geq \Delta\mu_{erro}$). A partir deste critério obtemos 3 razões de abundâncias, com variâncias diferentes temos $[N/V]$ e $[Na/V]$ e com variâncias iguais temos $[Na/Ti]$. A Figura 4.6 apresenta a distribuição de kernel para

⁶As Equações 4.2 e 4.3 foram aplicadas para cada estrela individualmente, formando dois conjuntos, o da razão $\begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \end{bmatrix}$ e o conjunto de erros associados.

Figura 4.6 - Histogramas e Funções de densidade de probabilidade de kernel para as razões de abundâncias relevantes, $[N/V]$, $[Na/V]$ e $[Na/V]$ selecionadas pelos testes de hipóteses.



estas 3 razões de abundâncias (nomeadas pela legenda) e é mostrado também os histogramas para uma comparação, nas legendas são informados os esquemas de cores e o formato das curvas para classificar as distribuições como referentes às amostras d0 e d1, os pequenos triângulos representam a média de cada distribuição e suas cores são classificadas com base na legenda que também mostra a diferença entre essas médias. A região em lilás é a região de interseção entre as distribuições. Ao comparar as densidades de kernel com seus respectivos histogramas podemos ver que as densidades representam bem as distribuições das estrelas. As médias das distribuições ficam relativamente próximas à posição do pico da distribuição, o quê

lembra uma distribuição simétrica em torno da média (lembrando uma Gaussiana na maioria dos casos). Por outro lado, ao observar o diagrama da razão $[N/V]$ temos que a distribuição de kernel para estrelas d1 é relativamente diferente: a média da distribuição é um pouco mais afastada da posição do pico se comparada com as demais, a intersecção dos histogramas toma as duas distribuições quase que por completo, além disso, a distribuição das estrelas d1 é levemente diferente das demais enquanto $[Na/V]$ e $[Na/Ti]$ tem suas distribuições limitadas no intervalo de $[-1, 1]$ dex, $[N/V]$ tem sua distribuição estendida para um pouco abaixo de -2 dex. Este comportamento levemente diferente se deve a razão $[N/H]$ da amostra d1 apresentar algumas estrelas com abundância de nitrogênio bastante negativas (subsolares) se comparadas com a maior parte da amostra. Com relação $[Na/V]$ e $[Na/Ti]$, embora haja uma região considerável de intersecção entre as distribuições, estas razões abundâncias parecem distinguir bem se as estrelas são ou não hospedeiras de planetas possivelmente rochosos.

4.5 Razões de abundâncias versus presença de planetas rochosos

Até o momento vimos alguns métodos com o intuito de tentar obter indicadores químicos estelares ligados à presença de planetas possivelmente rochosos. A Figura 4.7 apresenta um conjunto de gráficos onde tomamos as abundâncias de 14 elementos em escala $[X/H]$ em função de $[Fe/H]$. Na parte horizontal e vertical de cada gráfico temos histogramas e distribuições de kernel que representam as amostras d0 e d1 com base nos eixos principais de cada gráfico (horizontal: $[Fe/H]$, vertical: $[X/H]$). De maneira geral, a dispersão dos pontos lembra um comportamento linear crescente ao longo da relação 1:1 visto que cada metal segue o ferro de um modo geral na faixa de metalicidade da amostra de estudo (filtro inicial $-0,66 \leq [Fe/H] \leq +0,66$ dex). A figura mostra que boa parte dos elementos dos dados nos planos $[X/H]$ vs. $[Fe/H]$ apresenta uma dispersão menor para a amostra d1 em comparação com a amostra d0, principalmente para o cálcio e o cromo. Por outro lado, apenas no caso do nitrogênio, há um conjunto de estrelas bem empobrecidas deste elemento. Essa situação nos remete à discussão feita sobre a Figura 4.6(a). Além disso o conjunto de pontos em questão está relacionado com a árvore de classificação da Figura 4.3(a) e (c) onde para estrelas com $[N/H] \leq -0,647$ dex foi obtida uma pureza de estrelas d1 de 93%. A assimetria na distribuição de abundâncias do nitrogênio para a amostra d1 precisa ser investigada criteriosamente, como dito anteriormente. Ao observar os gráficos referentes ao magnésio (Figura 4.7) podemos verificar nos histogramas e nas distribuições de kernel que o magnésio aparenta ter um caráter de distribuição bimodal tanto para a amostra d0 quanto para amostra d1, embora a

bimodalidade seja mais aparente para d0. Já para o vanádio essa tendência bimodal aparece apenas para o grupo de estrela d1. Das discussões feitas com relação a Figura 4.2, verificamos que as estrelas da amostra d1 tendem a ser ligeiramente menos enriquecidas em metais do que as estrelas da amostra d0. O mesmo comportamento pode ser observado nas distribuições de kernel das Figuras 4.7 e 4.8, tal que as distribuições de abundâncias $[X/H]$ da amostra d1 tendem a ser deslocadas para valores menores com relação às distribuições respectivas da amostra d0.

Figura 4.7 - Múltiplos gráficos para $[X/H]$ vs. $[Fe/H]$ dos elementos C, N, O, Na, Mg, Al, Si, Ca, Ti, V, Cr, Mn, Ni e Y para estrelas d0 e d1.

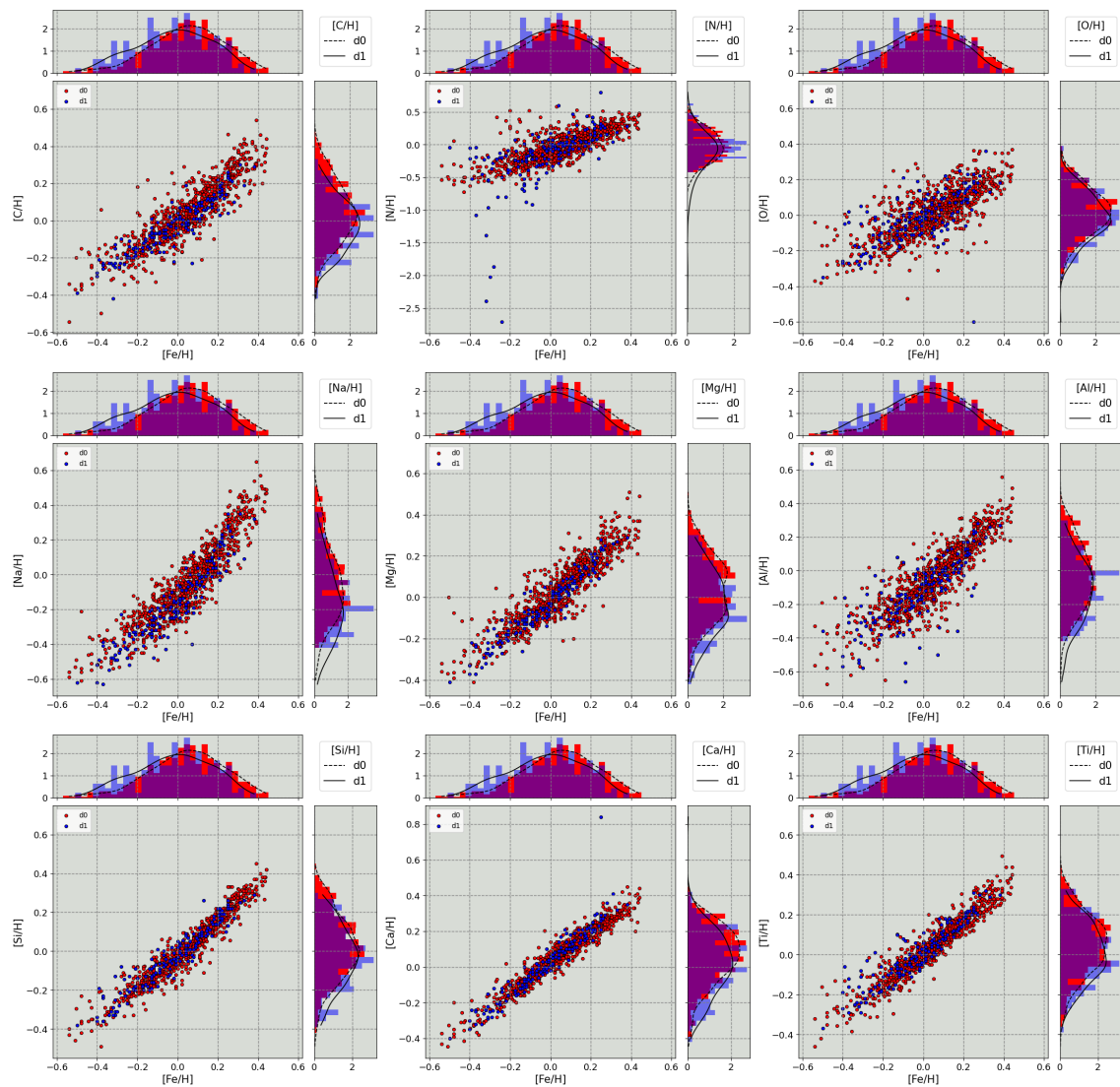
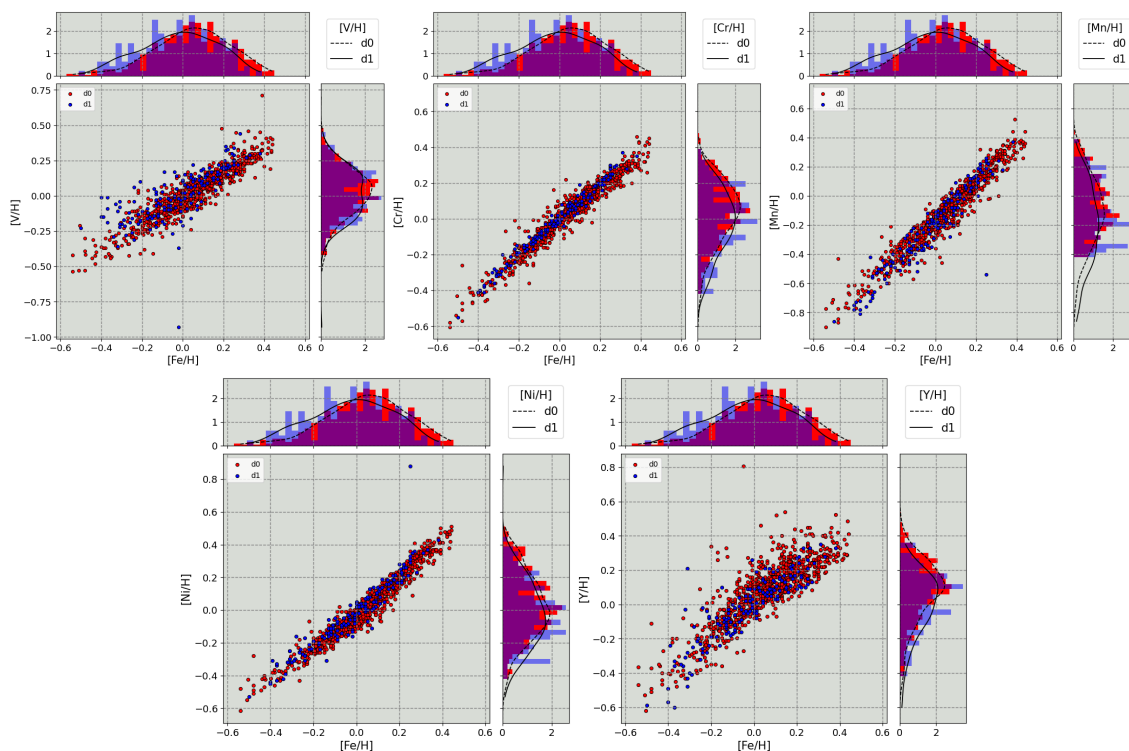


Figura 4.8 - Continuação da Figura 4.7



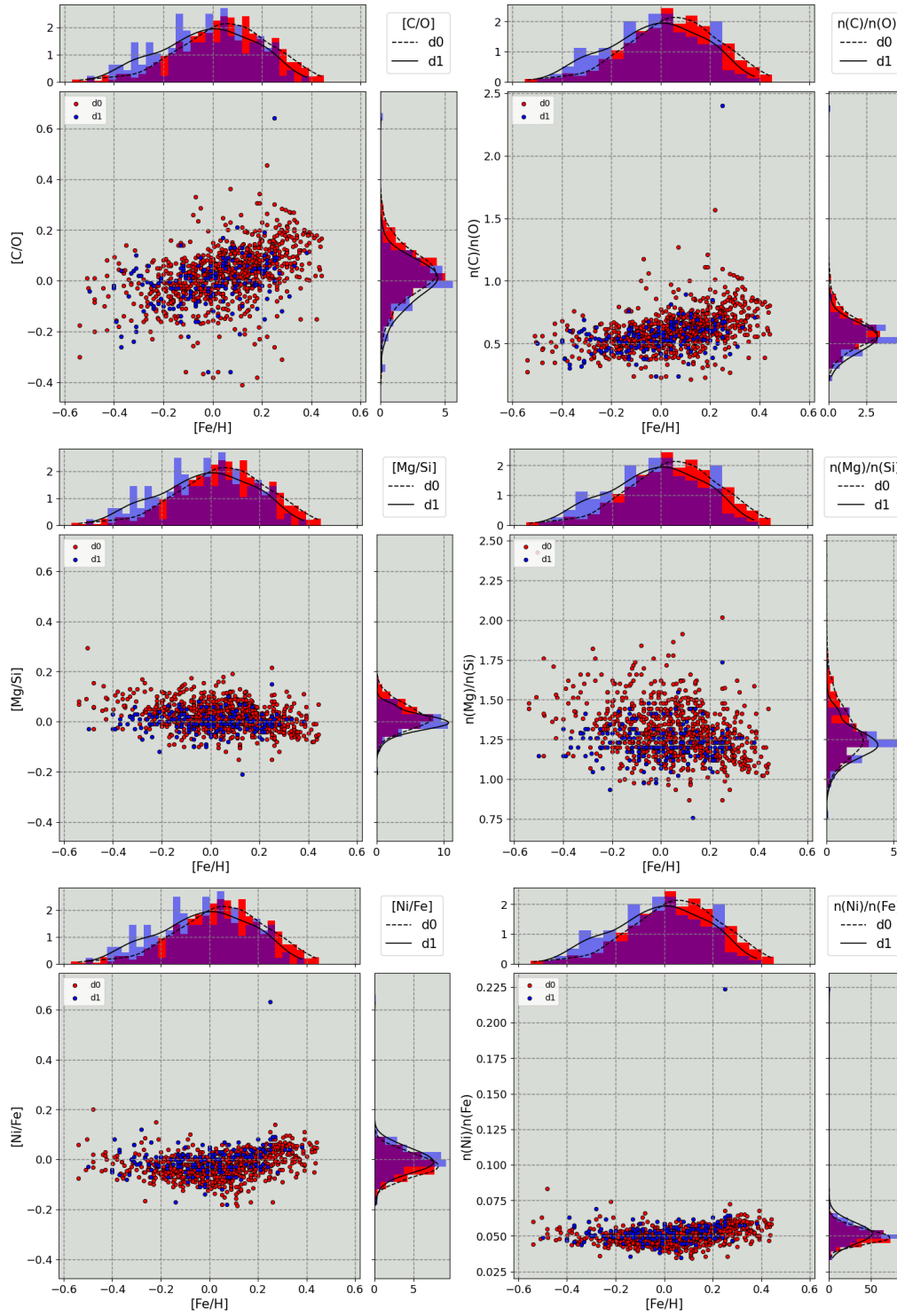
A Figura 4.9 apresenta um conjunto de gráficos de algumas razões de abundâncias de metais $[E1/E2]$ versus $[Fe/H]$, razões estas relacionadas à constituição de planetas rochosos: $[C/O]$ (razão que distingue planetas de carbonetos, quando $n(C)/n(O) > 0,8$, de planetas de silicatos e óxidos de Mg-Si, se $n(C)/n(O) < 0,8$ (BEDELL et al., 2018; NISSEN; GUSTAFSSON, 2018)), $[Mg/Si]$ (mineralogia) e $[Ni/Fe]$ (razão associada à constituição do núcleo de planetas rochosos, por exemplo ligas metálicas). Além das razões $[E1/E2]$ (gráficos à esquerda), também são apresentadas as mesmas razões de abundâncias na escala numérica (gráficos à direita). A composição das informações destes gráficos é análoga àquela mostrada nas Figuras 4.7 e 4.8.

As distribuições da razão C/O têm dispersões de valores comparáveis entre as amostras d1 e d0, que foram verificadas pelo teste de variância ($S_{d0} = 0,11$ dex e $S_{d1} = 0,11$ dex ⁷). Enquanto a maioria das estrelas da amostra d1 apresentam $n(C)/n(O) < 0,8$ (com exceção de um "outlier" próximo a 2,4 dex e três estrelas entre 0,8 e 0,9 dex), a grande maioria das estrelas da amostra d0 está abaixo deste valor também (98% das estrelas d1 e 92% das estrelas d0). As médias das distribuições desta razão são indistinguíveis tanto na escala logarítmica como na escala de

⁷ S_{di} é o desvio padrão amostral de uma dada distribuição d_i , e é definido como a raiz quadrada de sua variância (S^2), ($S_{d1} = \sqrt{S_{di}^2}$).

abundâncias numéricas, somente quando o erro característico da razão é levado em conta.

Figura 4.9 - Múltiplos gráficos para $[C/O]$, $[Mg/Si]$, $[Ni/Fe]$ e suas razões equivalente na escala numérica, ambas em função de $[Fe/H]$ para estrelas d0 e d1.



A razão Mg/Si mostra uma maior dispersão de valores para a amostra d0 em comparação com a amostra d1 ($S_{d0} = 0,05$ dex e $S_{d1} = 0,07$ dex). As médias das distribuições desta razão são indistinguíveis tanto na escala logarítmica como na escala de abundâncias numéricas, somente quando o erro característico da razão é levado em conta. Ambas as amostras d1 e d0 mostram $1 < n(\text{Mg})/n(\text{Si}) < 2$, com exceção de pouquíssimas estrelas com $n(\text{Mg})/n(\text{Si})$ menor que 1, denotando que tanto as estrelas d1 como as estrelas d0 são/seriam sítios para abrigar/formar planetas rochosos com mineralogia terrestre.

Por outro lado, somente a razão Ni/Fe mostra uma tendência de ter médias de distribuições diferentes para as amostras d1 e d0 (a diferença das médias é 0,019 dex para $[\text{Ni}/\text{Fe}]$, onde $\mu_{d1} = 0.003$ dex e $\mu_{d0} = 0.022$ dex). Ambas as distribuições desta razão têm dispersões distinguíveis ($S_{d0} = 0,05$ dex e $S_{d1} = 0,04$). A diferença das médias não passou no teste de significância estatística simplesmente porque não satisfaz a condição empregada ao erro característico, assim como ocorreu com as razões anteriores, onde temos um erro característico da razão $[\text{Ni}/\text{Fe}]$ de 0,07 dex, ou seja, a diferença é cerca de 4 vezes menor que o erro.

Especificamente para $[\text{Ni}/\text{Fe}]$, tínhamos percebido com base na árvore de classificação dos siderófilos que a presença de planetas possivelmente rochosos parecia estar marcada por um valor em torno ou acima da razão solar. Daí, calculamos a porcentagem de estrelas d1 com relação à amostra total d1+d0 acima e abaixo de um dado valor de $[\text{Ni}/\text{Fe}]$ apontado por duas folhas de alta pureza desta árvore de classificação (ver Figura 4.3 (e) e final da Seção 4.2). Notamos que a porcentagem de estrelas d1 com $[\text{Ni}/\text{Fe}] \geq -0,04$ dex é mais do que o dobro da porcentagem de estrelas d1 com $[\text{Ni}/\text{Fe}] < -0,04$ dex (20% contra 8%), talvez indicando realmente uma tendência de presença de planetas rochosos quando $[\text{Ni}/\text{Fe}]$ é sobressolar.

De modo análogo à razão Ni/Fe, percebemos com base na árvore de classificação dos voláteis sem o nitrogênio (Figura 4.4) que um certo valor da razão C/O ($[\text{C}/\text{O}] \approx 0,03$ dex ou $n(\text{C})/n(\text{O}) \approx 0,59$) parece distinguir anãs F-G quanto à presença de planetas possivelmente rochosos. Assim, calculamos a fração de estrelas d1 com relação ao total d1+d0 acim e abaixo desse valor, que foi apontado pela única folha de pureza alta da árvore dos voláteis. Para as estrelas que possuem $[\text{C}/\text{O}] \geq 0,03$ dex temos uma porcentagem de 12% das estrelas d1, enquanto para $[\text{C}/\text{O}] < 0,03$ dex temos um valor de 19%. Temos que a porcentagem de estrelas com $[\text{C}/\text{O}] < 0,03$ é cerca de 1,6 vezes maior, o que pode remeter a uma tendência sutil da presença de planetas rochosos quando $[\text{C}/\text{O}]$ é menor que o valor solar.

5 CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS

O objetivo central deste trabalho foi buscar por razões de abundâncias em anãs F-G que pudessem ser indicadores químicos da presença de planetas rochosos (de fato, possivelmente rochosos, cujos valores de massa e raio ficam compreendidos entre curvas de modelos de planetas totalmente rochosos e planetas puramente ferrosos).

Aplicamos análises estatísticas diversas comparando abundâncias elementais de nossa amostra de estudo de anãs F-G hospedeiras somente deste tipo de planetas (selecionada a partir do NASA Exoplanet Archive) contra abundâncias de uma amostra de referência de anãs F-G sem planetas detectados de qualquer tipo (confeccionada a partir do catálogo Hypatia). Ambas as amostras estelares consideram anãs unicamente do disco fino da Galáxia e cobrem o mesmo espaço paramétrico de T_{ef} , $\log g$ e $[\text{Fe}/\text{H}]$ tentando minimizar efeitos de possíveis diferenças sistemáticas entre as escalas dos catálogos usados ($5400 \leq T_{\text{ef}} \leq 6335$ K; $3,69 \leq \log g \leq 4,62$ dex; $-0,58 \leq [\text{Fe}/\text{H}] \leq 0,48$ dex).

Sumariamente, as análises aplicadas foram: (i) distribuições de abundâncias $[\text{X}/\text{H}]$ via “*boxplot*”, (ii) árvores de classificação usando abundâncias no espaço $[\text{X}/\text{H}]$, (iii) análise de discriminante linear também no espaço $[\text{X}/\text{H}]$, (iv) distribuições de razões de abundâncias $[\text{E1}/\text{E2}]$ representadas por estimativa de densidade de probabilidade tipo kernel, e (v) distribuições de abundâncias $[\text{X}/\text{H}]$ e $[\text{E1}/\text{E2}]$ em função da metalicidade $[\text{Fe}/\text{H}]$.

Primeiramente, a partir das distribuições de abundâncias $[\text{X}/\text{H}]$ via “*boxplot*”, concluímos que existe uma tendência relativamente sutil de que anãs F-G hospedeiras de planetas possivelmente rochosos tenham abundâncias de 15 metais na escala $[\text{X}/\text{H}]$ ligeiramente menores em comparação a anãs F-G sem planetas detectados. Sódio mostra-se ser o elemento menos abundante em anãs com planetas em comparação com anãs sem planetas (a diferença entre as medianas das distribuições de $[\text{Na}/\text{H}]$ é da ordem de 1 quartil “médio” após a remoção de “*outliers*”). Por outro lado, silício e níquel mostraram distribuições e suas medianas indistinguíveis entre as amostras com e sem planetas. Tal característica remete a algo totalmente oposto do que é visto para estrelas hospedeiras de planetas gigantes gasosos, as quais se mostram mais enriquecidas em metais de um modo geral em confrontação contra estrelas sem planetas (i.e. a probabilidade de abrigar/formar planeta gigante gasoso é proporcional à metalicidade do material a partir do qual a estrela também é formada).

A respeito da árvore de classificação, temos que a razão $[\text{Na}/\text{H}]$ poderia ser vista

como um possível indicativo de estrelas anãs hospedarem planetas possivelmente rochosos. Embora $[N/H]$, como nó raiz, gere diretamente uma folha com uma pureza de 93%, o que faria dele um elemento tão importante quanto o sódio para identificar anãs F-G com planetas possivelmente rochosos, todavia não consideramos a razão $[N/H]$ como um bom indicador. Podemos dizer que as estatísticas apresentadas na folha em questão não são muito confiáveis devido à presença dos “*outliers*”. Como vimos nas Figuras 4.2 e 4.7, o conjunto de estrelas que está associado a esta folha representa um conjunto de estrelas com abundâncias entre 1 e 3 ordens de grandeza menores do que as demais estrelas de toda a distribuição que giram em torno do valor solar. Estes “*outliers*” muito discrepantes não sugerem uma boa confiabilidade a folha em questão.

Por meio da análise de discriminante linear, temos que os discriminantes da Tabela 4.1 podem representar de modo coletivo um bom indicador da presença de planetas possivelmente rochosos em anãs F-G. Das distribuições da estimativa de kernel temos que as razões de abundâncias $[Na/V]$ e $[Na/Ti]$ (Figura 4.6) também poderiam ser tomadas como boas referências para indicar anãs F-G hospedeiras de planetas possivelmente rochosos. As distribuições respectivas apresentam médias que (pelos testes de hipóteses) podem ser significativamente distintas. Embora a razão $[N/V]$ apresente a maior diferença entre as médias ($\Delta\mu$), em relação às outras duas distribuições de razões de abundâncias entre metais, $[N/V]$ apresenta médias significativamente diferentes justamente pelo o que ocorre com o nitrogênio. Infelizmente, não houve tempo hábil para nos aprofundarmos o suficiente para entender o porquê de haver razões tão discrepantes. Uma perspectiva deste trabalho seria verificar as possíveis mudanças que ocorreriam nos resultados se retirássemos as estrelas com $[N/H] \leq -0,647$ dex ou então manter as estrelas e não usar a razão $[N/H]$ no procedimento (assim como foi feito na árvore de classificação), ou então verificar o porquê de algumas anãs F-G apresentam abundâncias de $[N/H]$ tão discrepantes das demais.

Além da questão do nitrogênio, há também o problema visto na Seção 3.5 onde temos a diferenças talvez sistemáticas entre as escalas dos parâmetros fotosféricos usados nos catálogos NASA Exoplanet Archive e Hypatia. A princípio tentamos relacionar as escalas paramétricas entre os dois catálogos por meio de regressões lineares simples, contudo as transposições das escalas de parâmetros estelares do NASA Exoplanet Archive para as escalas do Hypatia apenas tentam minimizar possíveis efeitos sistemáticos. Como perspectiva seria interessante obter uma solução que melhor se adequasse a este problema.

Com relação às razões $[\text{Ni}/\text{Fe}]$ e $[\text{C}/\text{O}]$, temos que ambas mostram-se como indicadores sutis no que se diz respeito a presença de planetas possivelmente rochosos com base nos resultados das árvores de classificação (siderófilos e voláteis sem o $[\text{N}/\text{H}]$ respectivamente), que são comuns e consistentes com os resultados vistos na análise $[\text{E1}/\text{E2}]$ versus $[\text{Fe}/\text{H}]$ (Figura 4.9).

Como perspectiva imediata, devemos investigar outras razões de abundâncias chave $[\text{E1}/\text{E2}]$ que poderiam ser indicadas por meio dos resultados das árvores de classificação tanto do grupo completo de elementos (N excluído) como do grupo dos litófilos, especialmente confrontando contra as distribuições $d1$ e $d0$ de cada razão $[\text{E1}/\text{E2}]$ como também analisando tais distribuições no plano $[\text{E1}/\text{E2}] \times [\text{Fe}/\text{H}]$.

Dentre as 228 anãs F-G-K-M com planetas possivelmente rochosos (Seção 3.2), uma fração destas além de apresentar estrelas hospedeiras de mais de um planeta também podem ter planetas na região de zona habitável. Neste sentido, uma perspectiva deste trabalho seria fazer uma análise química destas anãs F-G-K-M com potencial alto de habitabilidade planetária e então extrair informações que possam relacionar a possível habitabilidade com parâmetros planetários e fotosféricos.

O desenvolvimento dos muitos códigos em Python para a automatização de algumas tarefas foram de extrema importância, uma vez que os catálogos eram atualizados com frequência todos os resultados que foram obtidos ao longo do mestrado necessitavam de atualização. A experiência adquirida em linguagem de programação será de grande ajuda para o doutorado, tanto para melhorar a automatização dos códigos já redigidos quanto para novos procedimentos que sejam futuramente empregados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADAMS, E. R.; SEAGER, S.; ELKINS-TANTON, L. Ocean planet or thick atmosphere: On the mass-radius relationship for solid exoplanets with massive atmospheres. **The Astrophysical Journal**, v. 673, n. 2, p. 1160, feb 2008. Disponível em: <<<https://dx.doi.org/10.1086/524925>>>. 13
- ADIBEKYAN, V. Z.; SANTOS, N. C.; SOUSA, S. G.; ISRAELIAN, G.; MENA, E. D.; HERNÁNDEZ, J. I. G.; MAYOR, M.; LOVIS, C.; UDRY, S. Overabundance of metals in exoplanet-hosting stars. **Astronomy Astrophysics**, v. 543, p. A89, 2012. Disponível em: <<<https://doi.org/10.1051/0004-6361/201219564>>>. 1, 3
- ASPLUND, M.; GREVESSE, N.; SAUVAL, A. J.; SCOTT, P. The chemical composition of the sun. **Annual Review of Astronomy and Astrophysics**, v. 47, n. 1, p. 481–522, 2009. Disponível em: <<<https://doi.org/10.1146/annurev.astro.46.060407.145222>>>. 34
- BEDELL, M.; BEAN, J. L.; MELÉNDEZ, J.; SPINA, L.; RAMÍREZ, I.; ASPLUND, M.; ALVES-BRITO, A.; SANTOS, L. dos; DREIZLER, S.; YONG, D.; MONROE, T.; CASAGRANDE, L. The chemical homogeneity of sun-like stars in the solar neighborhood. **The Astrophysical Journal**, v. 865, n. 1, p. 68, sep 2018. Disponível em: <<<https://dx.doi.org/10.3847/1538-4357/aad908>>>. 34, 43
- BOTELHO, R. B. **Grupo CNO e Tório em anãs do tipo solar: vínculos para evolução química da vizinhança solar, formação planetária e habitabilidade e planetas rochosos**. 231 p. Tese (Doutorado em Astrofísica) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2022. Disponível em: <<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34T/47N7R85>>>. 4
- BOTELHO, R. B.; MILONE, A. d. C.; MELÉNDEZ, J.; BEDELL, M.; SPINA, L.; ASPLUND, M.; SANTOS, L. dos; BEAN, J. L.; RAMÍREZ, I.; YONG, D.; DREIZLER, S.; ALVES-BRITO, A.; GALARZA, J. Y. Thorium in solar twins: implications for habitability in rocky planets. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 482, n. 2, p. 1690–1700, 10 2018. Disponível em: <<<https://doi.org/10.1093/mnras/sty2791>>>. 2
- BRUGAMYER, E.; DODSON-ROBINSON, S. E.; COCHRAN, W. D.; SNEDEN, C. Silicon and oxygen abundances in planet-host stars. **The Astrophysical Journal**, v. 738, n. 1, p. 97, aug 2011. Disponível em: <<<https://dx.doi.org/10.1088/0004-637X/738/1/97>>>. 3
- CALIFORNIA INSTITUTE OF TECHNOLOGY. **NASA exoplanet archive**. 2005. Disponível em: <<<https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/>>>. Acesso em: 1 maio 2022. 10, 15, 16
- D'ANGELO, G.; DURISEN, R. H.; LISSAUER, J. J. Giant Planet Formation. In: Seager, S. (Ed.). **Exoplanets**. [s.n.], 2010. p. 319–346. Disponível em: <<<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2010exop.book..319D>>>. 7

EYLEN, V. V.; AGENTOFT, C.; LUNDKVIST, M. S.; KJELDSSEN, H.; OWEN, J. E.; FULTON, B. J.; PETIGURA, E.; SNELLEN, I. An asteroseismic view of the radius valley: stripped cores, not born rocky. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 479, n. 4, p. 4786–4795, 07 2018. ISSN 0035-8711. Disponível em: <<<https://doi.org/10.1093/mnras/sty1783>>>. 10

FISCHER, D. A.; VALENTI, J. The planet-metallicity correlation. **The Astrophysical Journal**, v. 622, n. 2, p. 1102, apr 2005. Disponível em: <<<https://dx.doi.org/10.1086/428383>>>. 1

FRANCIS, C.; ANDERSON, E. Calculation of the local standard of rest from 20574 local stars in the new hipparcos reduction with known radial velocities. **New Astronomy**, v. 14, n. 7, p. 615–629, 2009. ISSN 1384-1076. Disponível em: <<<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1384107609000384>>>. 20

FULTON, B. J.; PETIGURA, E. A.; HOWARD, A. W.; ISAACSON, H.; MARCY, G. W.; CARGILE, P. A.; HEBB, L.; WEISS, L. M.; JOHNSON, J. A.; MORTON, T. D.; SINUKOFF, E.; CROSSFIELD, I. J. M.; HIRSCH, L. A. The california-kepler survey. iii. a gap in the radius distribution of small planets*. **The Astronomical Journal**, v. 154, n. 3, p. 109, aug 2017. Disponível em: <<<https://dx.doi.org/10.3847/1538-3881/aa80eb>>>. 10

GILLI, G.; ISRAELIAN, G.; ECUVILLON, A.; SANTOS, N. C.; MAYOR, M. Abundances of refractory elements in the atmospheres of stars with extrasolar planets. **Astronomy Astrophysics**, v. 449, n. 2, p. 723–736, 2006. Disponível em: <<<https://doi.org/10.1051/0004-6361:20053850>>>. 1

GONZALEZ, G.; LAWS, C. Parent stars of extrasolar planets – VIII. Chemical abundances for 18 elements in 31 stars. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 378, n. 3, p. 1141–1152, 06 2007. ISSN 0035-8711. Disponível em: <<<https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2007.11867.x>>>. 3

GUERRERO, N. M.; SEAGER, S.; HUANG, C. X.; VANDERBURG, A.; SOTO, A. G.; MIRELES, I.; HESSE, K.; FONG, W.; GLIDDEN, A.; SHPORER, A.; LATHAM, D. W.; COLLINS, K. A.; QUINN, S. N.; BURT, J.; DRAGOMIR, D.; CROSSFIELD, I.; VANDERSPEK, R.; FAUSNAUGH, M.; BURKE, C. J.; RICKER, G.; DAYLAN, T.; ESSACK, Z.; GÜNTHER, M. N.; OSBORN, H. P.; PEPPER, J.; ROWDEN, P.; SHA, L.; JR., S. V.; YAHALOMI, D. A.; YU, L.; BALLARD, S.; BATALHA, N. M.; BERARDO, D.; CHONTOS, A.; DITTMANN, J. A.; ESQUERDO, G. A.; MIKAL-EVANS, T.; JAYARAMAN, R.; KRISHNAMURTHY, A.; LOUIE, D. R.; MEHRLE, N.; NIRLAULA, P.; RACKHAM, B. V.; RODRIGUEZ, J. E.; ROWDEN, S. J. L.; SOUSA-SILVA, C.; WATANABE, D.; WONG, I.; ZHAN, Z.; ZIVANOVIC, G.; CHRISTIANSEN, J. L.; CIARDI, D. R.; SWAIN, M. A.; LUND, M. B.; MULLALLY, S. E.; FLEMING, S. W.; RODRIGUEZ, D. R.; BOYD, P. T.; QUINTANA, E. V.; BARCLAY, T.; COLÓN, K. D.; RINEHART, S. A.; SCHLIEDER, J. E.; CLAMPIN, M.; JENKINS, J. M.; TWICKEN, J. D.; CALDWELL, D. A.; COUGHLIN, J. L.; HENZE, C.; LISSAUER, J. J.; MORRIS, R. L.; ROSE, M. E.;

SMITH, J. C.; TENENBAUM, P.; TING, E. B.; WOHLER, B.; BAKOS, G. ; BEAN, J. L.; BERTA-THOMPSON, Z. K.; BIERYLA, A.; BOUMA, L. G.; BUCHHAVE, L. A.; BUTLER, N.; CHARBONNEAU, D.; DOTY, J. P.; GE, J.; HOLMAN, M. J.; HOWARD, A. W.; KALTENEGGER, L.; KANE, S. R.; KJELDSSEN, H.; KREIDBERG, L.; LIN, D. N. C.; MINSKY, C.; NARITA, N.; PAEGERT, M.; PÁL, A.; PALLE, E.; SASSELOV, D. D.; SPENCER, A.; SOZZETTI, A.; STASSUN, K. G.; TORRES, G.; UDRY, S.; WINN, J. N. The tess objects of interest catalog from the tess prime mission. **The Astrophysical Journal Supplement Series**, v. 254, n. 2, p. 39, jun 2021. Disponível em: <<<https://dx.doi.org/10.3847/1538-4365/abefe1>>>. 5

HAGHIGHIPOUR, N. The formation and dynamics of super-earth planets. **Annual Review of Earth and Planetary Sciences**, v. 41, n. 1, p. 469–495, 2013. Disponível em: <<<https://doi.org/10.1146/annurev-earth-042711-105340>>>. 1, 7, 8

HINKEL, N. R.; UNTERBORN, C.; KANE, S. R.; SOMERS, G.; GALVEZ, R. A recommendation algorithm to predict giant exoplanet host stars using stellar elemental abundances. **The Astrophysical Journal**, v. 880, n. 1, p. 49, jul 2019. Disponível em: <<<https://dx.doi.org/10.3847/1538-4357/ab27c0>>>. 4, 28

Johnson, D. R. H.; Soderblom, D. R. Calculating Galactic Space Velocities and Their Uncertainties, with an Application to the Ursa Major Group. **The Astronomical Journal**, v. 93, p. 864, abr. 1987. Disponível em: <<<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1987AJ.....93..864J>>>. 20

KANG, W.; LEE, S.-G.; KIM, K.-M. Abundances of refractory elements for g-type stars with extrasolar planets. **The Astrophysical Journal**, v. 736, n. 2, p. 87, jul 2011. Disponível em: <<<https://dx.doi.org/10.1088/0004-637X/736/2/87>>>. 3

Marboeuf, Ulysse; Thiabaud, Amaury; Alibert, Yann; Cabral, Nahuel; Benz, Willy. From stellar nebula to planetesimals. **Astronomy Astrophysics**, v. 570, p. A35, 2014. Disponível em: <<<https://doi.org/10.1051/0004-6361/201322207>>>. 1

MARTINEZ, C. F.; CUNHA, K.; GHEZZI, L.; SMITH, V. V. A spectroscopic analysis of the california-kepler survey sample. i. stellar parameters, planetary radii, and a slope in the radius gap. **The Astrophysical Journal**, v. 875, n. 1, p. 29, apr 2019. Disponível em: <<<https://dx.doi.org/10.3847/1538-4357/ab0d93>>>. 10

MAYO, A. W.; VANDERBURG, A.; LATHAM, D. W.; BIERYLA, A.; MORTON, T. D.; BUCHHAVE, L. A.; DRESSING, C. D.; BEICHMAN, C.; BERLIND, P.; CALKINS, M. L.; CIARDI, D. R.; CROSSFIELD, I. J. M.; ESQUERDO, G. A.; EVERETT, M. E.; GONZALES, E. J.; HIRSCH, L. A.; HORCH, E. P.; HOWARD, A. W.; HOWELL, S. B.; LIVINGSTON, J.; PATEL, R.; PETIGURA, E. A.; SCHLIEDER, J. E.; SCOTT, N. J.; SCHUMER, C. F.; SINUKOFF, E.; TESKE, J.; WINTERS, J. G. 275 candidates and 149 validated planets orbiting bright stars in k2 campaigns 0–10. **The Astronomical Journal**, v. 155, n. 3,

p. 136, mar 2018. Disponível em:

<<<https://dx.doi.org/10.3847/1538-3881/aaadff>>>. 10

MAYOR, M.; QUELOZ, D. A Jupiter-mass companion to a solar-type star.

Nature, v. 378, n. 6555, p. 355–359, nov. 1995. Disponível em:

<<<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1995Natur.378..355M>>>. 9

MELÉNDEZ, J.; ASPLUND, M.; GUSTAFSSON, B.; YONG, D. The peculiar solar composition and its possible relation to planet formation. **The**

Astrophysical Journal, v. 704, n. 1, p. 66–70, out. 2009. Disponível em:

<<<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2009ApJ...704L..66M>>>. 3

MELÉNDEZ, J.; BERGEMANN, M.; COHEN, J. G.; ENDL, M.; KARAKAS, A. I.; RAMÍREZ, I.; COCHRAN, W. D.; YONG, D.; MACQUEEN, P. J.;

KOBAYASHI, C.; ASPLUND, M. The remarkable solar twin hip 56948: a prime target in the quest for other earths. **Astronomy Astrophysics**, v. 543, p. A29,

2012. Disponível em: <<<https://doi.org/10.1051/0004-6361/201117222>>>. 2

MENA, E. D.; ISRAELIAN, G.; HERNÁNDEZ, J. I. G.; BOND, J. C.; SANTOS, N. C.;

UDRY, S.; MAYOR, M. Chemical clues on the formation of planetary systems: C/o versus mg/si for harps gto sample. **The Astrophysical Journal**,

v. 725, n. 2, p. 2349, dec 2010. Disponível em:

<<<https://dx.doi.org/10.1088/0004-637X/725/2/2349>>>. 3

NEVES, V.; SANTOS, N. C.; SOUSA, S. G.; CORREIA, A. C. M.; ISRAELIAN, G. Chemical abundances of 451 stars from the harps gto planet search program

*** - thin disc, thick disc, and planets. **Astronomy Astrophysics**, v. 497, n. 2, p. 563–581, 2009. Disponível em:

<<<https://doi.org/10.1051/0004-6361/200811328>>>. 1, 3

NIMMO, F.; PRIMACK, J.; FABER, S. M.; RAMIREZ-RUIZ, E.;

SAFARZADEH, M. Radiogenic heating and its influence on rocky planet dynamos and habitability. **The Astrophysical Journal Letters**, v. 903, n. 2, p. L37, nov

2020. Disponível em: <<<https://dx.doi.org/10.3847/2041-8213/abc251>>>. 4

NISSEN, P. E.; GUSTAFSSON, B. High-precision stellar abundances of the elements: methods and applications. **The Astronomy and Astrophysics**

Review, v. 26, n. 6, p. 1–70, 2018. Disponível em:

<<<https://doi.org/10.1007/s00159-018-0111-3>>>. 2, 3, 4, 34, 43

REDDY, B. E.; LAMBERT, D. L.; PRIETO, C. A. Elemental abundance survey of the Galactic thick disc. **Monthly Notices of the Royal Astronomical**

Society, v. 367, n. 4, p. 1329–1366, 03 2006. ISSN 0035-8711. Disponível em:

<<<https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2006.10148.x>>>. 20, 21

ROBINSON, S. E.; LAUGHLIN, G.; BODENHEIMER, P.; FISCHER, D. Silicon and nickel enrichment in planet host stars: Observations and implications for the

core accretion theory of planet formation. **The Astrophysical Journal**, v. 643, n. 1, p. 484, may 2006. Disponível em: <<<https://dx.doi.org/10.1086/502795>>>.

3

- ROGERS, L. A.; SEAGER, S. A framework for quantifying the degeneracies of exoplanet interior compositions. **The Astrophysical Journal**, v. 712, n. 2, p. 974, mar 2010. Disponível em: <<<https://dx.doi.org/10.1088/0004-637X/712/2/974>>>. 13
- SILVA, R. da; MILONE, A. d. C.; ROCHA-PINTO, H. J. Homogeneous abundance analysis of fgk dwarf, subgiant, and giant stars with and without giant planets. **Astronomy Astrophysics**, v. 580, p. A24, 2015. Disponível em: <<<https://doi.org/10.1051/0004-6361/201525770>>>. 1, 2, 3, 28, 36
- SPACE TELESCOPE SCIENCE INSTITUTE. **Mikulski Archive for Space Telescopes - TESS**. 2018. Disponível em: <<<https://archive.stsci.edu/missions-and-data/tess>>>. Acesso em: 13 fevereiro 2023. 5
- VALENCIA, D.; GUILLOT, T.; PARMENTIER, V.; FREEDMAN, R. S. Bulk composition of gj 1214b and other sub-neptune exoplanets. **The Astrophysical Journal**, v. 775, n. 1, p. 10, aug 2013. Disponível em: <<<https://dx.doi.org/10.1088/0004-637X/775/1/10>>>. 13
- VALENCIA, D.; SASSELOV, D. D.; O'CONNELL, R. J. Detailed models of super-earths: How well can we infer bulk properties? **The Astrophysical Journal**, v. 665, n. 2, p. 1413, aug 2007. Disponível em: <<<https://dx.doi.org/10.1086/519554>>>. 13
- WEGLARCZYK, S. Kernel density estimation and its application. **ITM Web Conference**, v. 23, p. 00037, 2018. Disponível em: <<<https://doi.org/10.1051/itmconf/20182300037>>>. 39
- WOLSZCZAN, A. Confirmation of earth-mass planets orbiting the millisecond pulsar psr b1257 + 12. **Science**, v. 264, n. 5158, p. 538–542, 1994. Disponível em: <<<https://www.science.org/doi/abs/10.1126/science.264.5158.538>>>. 9
- _____. Discovery of pulsar planets. **New Astronomy Reviews**, v. 56, n. 1, p. 2–8, 2012. ISSN 1387-6473. Exoplanets: Birth of a New Field of Study. Disponível em: <<<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1387647311000418>>>. 9
- ZENG, L.; JACOBSEN, S. B.; SASSELOV, D. D.; PETAEV, M. I.; VANDERBURG, A.; LOPEZ-MORALES, M.; PEREZ-MERCADER, J.; MATTSSON, T. R.; LI, G.; HEISING, M. Z.; BONOMO, A. S.; DAMASSO, M.; BERGER, T. A.; CAO, H.; LEVI, A.; WORDSWORTH, R. D. Growth model interpretation of planet size distribution. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 116, n. 20, p. 9723–9728, 2019. Disponível em: <<<https://www.pnas.org/doi/abs/10.1073/pnas.1812905116>>>. 10, 11, 12, 18
- ZENG, L.; SASSELOV, D. D.; JACOBSEN, S. B. Mass–radius relation for rocky planets based on prem. **The Astrophysical Journal**, v. 819, n. 2, p. 127, mar 2016. Disponível em: <<<https://dx.doi.org/10.3847/0004-637X/819/2/127>>>. 10

APÊNDICE A - TABELA DE PARÂMETROS PLANETÁRIOS DOS 195 PLANETAS DA AMOSTRA FINAL DE ESTUDO COM 160 ANÃS F-G

Tabela A.1 - Raio (R_{\oplus}) com erro, Massa (M_{\oplus}) com erro, Densidade média (g.cm^{-3}) com erro e método de medição de medição da Massa dos 195 planetas da amostra final de estudo com 160 anãs F-G.

Planeta	R (R_{\oplus})	+e _R	-e _R	M (M_{\oplus})	+e _M	-e _M	ρ (g.cm^{-3})	+e _{ρ}	-e _{ρ}	método de medição de massa
Kepler-381 d	1,067			1,23			5,57			M-R relationship
Kepler-338 b	2,44	0,13	-0,13	30,6	24,2	-21,1	11,6			Mass
Kepler-338 e	1,56	0,07	-0,07	8,5	7,2	-6,3	12,3			Mass
Kepler-1300 b	1,37	0,3	-0,31	2,45			5,24			M-R relationship
Kepler-129 c	2,52	0,07	-0,07	43,0	13,0	-12,0	14,8	4,3	-4,3	Mass
Kepler-23 d	2,2	0,09	-0,09	17,6	13,7	-11,9	9,08			Mass
Kepler-36 b	1,498	0,061	-0,049	3,83	0,11	-0,1	6,26	0,79	-0,64	Mass
Kepler-101 c	1,25	0,19	-0,17	3,78			10,5			Mass
Kepler-381 b	0,99	0,22	-0,22	0,937			5,31			M-R relationship
Kepler-381 c	1,12	0,25	-0,25	1,46			5,71			M-R relationship
Kepler-84 b	2,23	0,1	-0,1	40,0	13,7	-10,3	19,8			Mass
Kepler-997 b	1,36	0,33	-0,26	2,42			5,29			M-R relationship
Kepler-363 b	1,16	0,19	-0,19	1,65			5,81			M-R relationship
Kepler-1311 b	1,24	0,25	-0,26	2,07			5,97			M-R relationship
Kepler-1311 c	1,22	0,28	-0,24	1,98			5,99			M-R relationship
Kepler-212 b	1,09	0,21	-0,21	1,32			5,6			M-R relationship
Kepler-312 b	1,29	0,25	-0,25	2,21			5,66			M-R relationship
Kepler-907 b	1,2	0,06	-0,05	1,87			5,95			M-R relationship
Kepler-107 c	1,597	0,026	-0,026	9,39	1,77	-1,77	12,65	2,45	-2,45	Mass
Kepler-85 c	2,18	0,1	-0,1	20,9	6,2	-5,6	11,1			Mass
Kepler-393 b	1,29	0,25	-0,25	2,21			5,66			M-R relationship
Kepler-393 c	1,33	0,31	-0,31	2,33			5,44			M-R relationship
Kepler-136 b	2,05	0,38	-0,38	19,8	11,7	-10,4	12,6			Mass
Kepler-348 c	1,33	0,25	-0,25	2,33			5,44			M-R relationship
Kepler-1408 b	0,89	68,91	-0,15	0,64			4,99			M-R relationship
Kepler-1412 b	0,83	0,15	-0,13	0,498			4,79			M-R relationship
Kepler-208 d	1,2	0,23	-0,23	1,87			5,95			M-R relationship
Kepler-336 b	1,02	0,19	-0,19	1,04			5,39			M-R relationship
Kepler-507 b	1,3	0,24	-0,17	2,24			5,6			M-R relationship
Kepler-1084 b	1,11	0,23	-0,15	1,41			5,67			M-R relationship
Kepler-1199 b	1,15	0,21	-0,16	1,6			5,78			M-R relationship
Kepler-135 c	1,16	0,23	-0,23	1,65			5,81			M-R relationship
Kepler-1385 b	0,85	0,2	-0,13	0,543			4,86			M-R relationship
Kepler-403 b	1,25	0,22	-0,22	2,1			5,91			M-R relationship
Kepler-1445 b	0,96	0,2	-0,13	0,84			5,22			M-R relationship
Kepler-402 b	1,22	0,24	-0,24	1,98			5,99			M-R relationship
Kepler-1288 b	1,12	0,47	-0,16	1,46			5,71			M-R relationship
Kepler-144 b	1,33	0,26	-0,26	2,33			5,44			M-R relationship
Kepler-144 c	1,35	0,26	-0,26	2,39			5,34			M-R relationship
Kepler-1514 c	1,176	0,057	-0,044	1,74			5,88			M-R relationship
Kepler-380 b	1,19	0,24	-0,24	1,81			5,9			M-R relationship
Kepler-380 c	1,27	0,28	-0,28	2,15			5,77			M-R relationship
Kepler-653 c	0,78	0,13	-0,12	0,399			4,62			M-R relationship
Kepler-887 c	1,13	0,17	-0,11	1,51			5,75			M-R relationship
Kepler-1285 b	0,97	0,1	-0,08	0,871			5,24			M-R relationship

Continua

Tabela A.1 – Continuação

Planeta	R (R_{\oplus})	+ e_R	- e_R	M (M_{\oplus})	+ e_M	- e_M	ρ (g.cm^{-3})	+ e_{ρ}	- e_{ρ}	método de medição de massa
Kepler-130 b	1,02	0,04	-0,04	1,04			5,39			M-R relationship
Kepler-1587 b	1,33	0,47	-0,24	2,33			5,44			M-R relationship
Kepler-197 b	1,02	0,04	-0,04	1,04			5,39			M-R relationship
Kepler-197 d	1,22	0,1	-0,1	1,98			5,99			M-R relationship
Kepler-197 e	0,91	0,04	-0,04	0,693			5,05			M-R relationship
Kepler-376 b	1,07	0,22	-0,22	1,24			5,56			M-R relationship
Kepler-806 b	1,14	0,33	-0,24	1,55			5,75			M-R relationship
Kepler-115 b	1,09	0,21	-0,21	1,32			5,6			M-R relationship
Kepler-1193 b	1,32	0,21	-0,17	2,3			5,5			M-R relationship
Kepler-132 b	1,21	0,24	-0,24	1,92			5,96			M-R relationship
Kepler-132 c	1,28	0,25	-0,25	2,18			5,71			M-R relationship
Kepler-134 c	1,26	0,25	-0,25	2,13			5,85			M-R relationship
Kepler-1581 b	0,8	0,14	-0,09	0,437			4,69			M-R relationship
Kepler-206 b	1,2	0,24	-0,24	1,87			5,95			M-R relationship
Kepler-206 d	1,19	0,24	-0,24	1,81			5,9			M-R relationship
Kepler-1568 b	1,3	0,21	-0,15	2,24			5,6			M-R relationship
Kepler-1617 b	1,2	0,37	-0,16	1,87			5,95			M-R relationship
Kepler-392 b	1,0	0,21	-0,21	0,972			5,34			M-R relationship
Kepler-392 c	1,1	0,23	-0,23	1,37			5,66			M-R relationship
Kepler-1082 b	1,12	0,18	-0,13	1,46			5,71			M-R relationship
Kepler-1213 b	1,19	0,13	-0,1	1,81			5,9			M-R relationship
Kepler-1253 b	1,33	0,18	-0,18	2,33			5,44			M-R relationship
Kepler-1276 b	1,19	0,2	-0,11	1,81			5,9			M-R relationship
Kepler-1395 b	0,8	0,09	-0,06	0,437			4,69			M-R relationship
Kepler-1607 b	0,92	0,33	-0,14	0,721			5,09			M-R relationship
Kepler-1224 b	1,33	0,12	-0,08	2,33			5,44			M-R relationship
Kepler-1398 b	0,9	0,28	-0,12	0,666			5,02			M-R relationship
Kepler-1398 c	1,03	0,37	-0,15	1,08			5,43			M-R relationship
Kepler-1547 b	0,9	0,28	-0,12	0,666			5,02			M-R relationship
Kepler-826 b	1,25	0,2	-0,14	2,1			5,91			M-R relationship
K2-38 b	1,906	0,336	-0,336	19,0698	9,5349	-9,5349	17,5	8,5	-6,2	Mass
Kepler-10 b	1,481	0,049	-0,029	4,60853	1,27132	-1,46202	8,0	3,0	-3,0	Mass
Kepler-1169 b	0,94	0,06	-0,06	0,779			5,15			M-R relationship
Kepler-1278 b	1,01	0,31	-0,12	1,01			5,39			M-R relationship
Kepler-1352 b	0,89	0,25	-0,11	0,64			4,99			M-R relationship
Kepler-1590 b	1,14	0,34	-0,15	1,55			5,75			M-R relationship
Kepler-387 b	1,03	0,24	-0,24	1,08			5,43			M-R relationship
Kepler-387 c	0,89	0,22	-0,22	0,64			4,99			M-R relationship
Kepler-1248 b	1,18	0,2	-0,11	1,76			5,89			M-R relationship
Kepler-1406 b	1,1	0,18	-0,13	1,37			5,66			M-R relationship
Kepler-215 d	2,39	0,55	-0,55	23,6	17,3	-11,9	9,5			Mass
Kepler-1047 c	0,99	0,13	-0,09	0,937			5,31			M-R relationship
Kepler-132 e	1,18	0,16	-0,12	1,76			5,89			M-R relationship
Kepler-1141 b	0,82	0,12	-0,08	0,477			4,75			M-R relationship
Kepler-334 b	1,12	0,21	-0,21	1,46			5,71			M-R relationship
Kepler-908 b	1,22	0,1	-0,08	1,98			5,99			M-R relationship
Kepler-1365 b	0,92	0,14	-0,1	0,721			5,09			M-R relationship
Kepler-1365 c	0,8	0,12	-0,08	0,437			4,69			M-R relationship
Kepler-1424 b	1,16	0,16	-0,12	1,65			5,81			M-R relationship
Kepler-157 b	1,32	0,26	-0,26	2,3			5,5			M-R relationship
Kepler-1598 b	0,95	0,28	-0,1	0,809			5,18			M-R relationship
Kepler-299 b	1,32	0,27	-0,27	2,3			5,5			M-R relationship
Kepler-524 c	0,96	0,08	-0,07	0,84			5,22			M-R relationship
Kepler-647 b	1,17	0,14	-0,11	1,71			5,87			M-R relationship
Kepler-1473 b	1,19	0,09	-0,08	1,81			5,9			M-R relationship

Continua

Tabela A.1 – Continuação

Planeta	R (R_{\oplus})	+ e_R	- e_R	M (M_{\oplus})	+ e_M	- e_M	ρ (g.cm^{-3})	+ e_{ρ}	- e_{ρ}	método de medição de massa
Kepler-1576 b	1,04	0,29	-0,13	1,12			5,47			M-R relationship
Kepler-1601 b	0,82	0,24	-0,11	0,477			4,75			M-R relationship
Kepler-173 b	1,29	0,64	-0,64	2,21			5,66			M-R relationship
Kepler-431 b	0,764			0,37			4,56			M-R relationship
Kepler-431 d	1,11			1,41			5,67			M-R relationship
Kepler-804 c	1,14	0,2	-0,14	1,55			5,75			M-R relationship
Kepler-1338 b	0,92	0,19	-0,1	0,721			5,09			M-R relationship
Kepler-1542 b	0,76	0,11	-0,08	0,363			4,54			M-R relationship
Kepler-1542 d	0,87	0,12	-0,09	0,59			4,92			M-R relationship
Kepler-1542 e	0,76	0,1	-0,08	0,363			4,54			M-R relationship
Kepler-406 b	1,43	0,03	-0,03	6,35	1,4	-1,4	11,82	2,7	-2,7	Mass
Kepler-520 c	1,07	0,07	-0,05	1,24			5,56			M-R relationship
K2-265 b	1,71	0,11	-0,11	6,54	0,84	-0,84	7,1	1,8	-1,8	Mass
Kepler-466 c	1,25	0,1	-0,07	2,1			5,91			M-R relationship
Kepler-105 c	1,31	0,07	-0,07	4,6	0,92	-0,85	11,2	3,0	-2,56	Mass
Kepler-1417 b	1,0	0,2	-0,11	0,972			5,34			M-R relationship
Kepler-1560 b	0,89	0,18	-0,09	0,64			4,99			M-R relationship
Kepler-1588 b	0,76	0,11	-0,07	0,363			4,54			M-R relationship
Kepler-603 d	1,32	0,25	-0,13	2,3			5,5			M-R relationship
Kepler-97 b	1,48	0,13	-0,13	3,51	1,9	-1,9	5,44	3,48	-3,48	Mass
Kepler-1156 b	1,32	0,14	-0,09	2,3			5,5			M-R relationship
Kepler-1328 b	0,98	0,2	-0,09	0,904			5,28			M-R relationship
Kepler-1464 c	1,0	0,22	-0,11	0,972			5,34			M-R relationship
Kepler-1525 b	0,91	0,06	-0,04	0,693			5,05			M-R relationship
Kepler-1619 b	0,76	0,15	-0,08	0,363			4,54			M-R relationship
Kepler-162 b	1,26	0,67	-0,67	2,13			5,85			M-R relationship
Kepler-22 b	2,38	0,13	-0,13	36,0			14,7			Mass
Kepler-295 b	1,22	0,64	-0,64	1,98			5,99			M-R relationship
Kepler-295 c	1,17	0,62	-0,62	1,71			5,87			M-R relationship
Kepler-295 d	1,36	0,72	-0,72	2,42			5,29			M-R relationship
Kepler-1035 b	1,17	0,28	-0,11	1,71			5,87			M-R relationship
Kepler-1258 b	0,86	0,13	-0,08	0,566			4,89			M-R relationship
Kepler-1264 b	1,18	0,22	-0,12	1,76			5,89			M-R relationship
Kepler-1563 b	0,75	0,12	-0,08	0,347			4,52			M-R relationship
Kepler-20 b	1,868	0,066	-0,034	9,7	1,41	-1,44	8,2	1,5	-1,3	Mass
Kepler-1440 b	1,26	0,23	-0,14	2,13			5,85			M-R relationship
Kepler-192 d	1,02	0,1	-0,07	1,04			5,39			M-R relationship
Kepler-282 b	1,01	0,25	-0,25	1,01			5,39			M-R relationship
Kepler-282 c	1,2	0,29	-0,29	1,87			5,95			M-R relationship
Kepler-746 b	1,11	0,13	-0,09	1,41			5,67			M-R relationship
Kepler-831 b	1,27	0,1	-0,07	2,15			5,77			M-R relationship
Kepler-1240 b	1,15	0,2	-0,1	1,6			5,78			M-R relationship
Kepler-1425 b	0,94	0,19	-0,13	0,779			5,15			M-R relationship
Kepler-150 b	1,25	0,19	-0,19	2,1			5,91			M-R relationship
Kepler-1572 b	0,94	0,19	-0,08	0,779			5,15			M-R relationship
Kepler-384 b	1,12	0,32	-0,32	1,46			5,71			M-R relationship
Kepler-384 c	1,13	0,33	-0,33	1,51			5,75			M-R relationship
Kepler-374 b	1,03	0,54	-0,54	1,08			5,43			M-R relationship
Kepler-374 c	1,1	0,57	-0,57	1,37			5,66			M-R relationship
Kepler-374 d	1,31	0,7	-0,7	2,27			5,55			M-R relationship
Kepler-1055 b	1,23	0,07	-0,06	2,04			6,02			M-R relationship
Kepler-1067 b	0,8	0,12	-0,06	0,437			4,69			M-R relationship
Kepler-1117 b	1,11	0,17	-0,08	1,41			5,67			M-R relationship
Kepler-238 f	2,0	0,85	-0,17	13,5	2,9	-2,5	9,27			Mass
Kepler-251 b	1,33	0,24	-0,24	2,33			5,44			M-R relationship

Continua

Tabela A.1 – Continuação

Planeta	R (R_{\oplus})	+ e_R	- e_R	M (M_{\oplus})	+ e_M	- e_M	ρ ($g.cm^{-3}$)	+ e_{ρ}	- e_{ρ}	método de medição de massa
Kepler-625 c	1,05	0,05	-0,03	1,16			5,51			M-R relationship
Kepler-85 d	1,2	0,19	-0,19	1,87			5,95			M-R relationship
Kepler-1012 b	1,29	0,08	-0,06	2,21			5,66			M-R relationship
Kepler-1139 b	1,19	0,17	-0,08	1,81			5,9			M-R relationship
Kepler-1235 b	0,79	0,12	-0,06	0,418			4,66			M-R relationship
Kepler-1393 b	0,8	0,04	-0,08	0,437			4,69			M-R relationship
Kepler-183 c	2,27	0,98	-0,98	35,7	30,9	-24,2	16,8			Mass
Kepler-286 b	1,24	0,25	-0,25	2,07			5,97			M-R relationship
Kepler-286 c	1,37	0,27	-0,27	2,45			5,24			M-R relationship
Kepler-286 d	1,33	0,27	-0,27	2,33			5,44			M-R relationship
Kepler-534 c	1,227			2,02			6,01			M-R relationship
Kepler-1332 b	1,37	0,09	-0,05	2,45			5,24			M-R relationship
Kepler-59 b	1,1			1,37			5,66			M-R relationship
Kepler-783 b	0,78	0,04	-0,08	0,399			4,62			M-R relationship
Kepler-1312 c	1,027			1,07			5,42			M-R relationship
Kepler-271 b	1,23	0,08	-0,07	2,04			6,02			M-R relationship
Kepler-271 c	0,95	0,06	-0,06	0,809			5,18			M-R relationship
Kepler-310 b	1,19	0,56	-0,56	1,81			5,9			M-R relationship
Kepler-605 c	0,86	0,11	-0,06	0,566			4,89			M-R relationship
Kepler-882 b	1,23	0,15	-0,09	2,04			6,02			M-R relationship
Kepler-1507 b	0,84	0,09	-0,09	0,52			4,82			M-R relationship
Kepler-282 d	2,46	1,0	-0,2	61,0	35,9	-36,1	22,5			Mass
Kepler-301 b	1,35	0,72	-0,72	2,39			5,34			M-R relationship
Kepler-301 c	1,35	0,72	-0,72	2,39			5,34			M-R relationship
Kepler-1185 b	1,33	0,08	-0,05	2,33			5,44			M-R relationship
Kepler-1505 b	0,93	0,05	-0,05	0,749			5,12			M-R relationship
Kepler-404 b	1,27	0,55	-0,55	2,15			5,77			M-R relationship
Kepler-743 b	1,21	0,03	-0,05	1,92			5,96			M-R relationship
Kepler-1130 c	0,792			0,422			4,66			M-R relationship
Kepler-373 b	1,36	0,67	-0,67	2,42			5,29			M-R relationship
Kepler-373 c	1,24	0,62	-0,62	2,07			5,97			M-R relationship
Kepler-775 b	1,19	0,04	-0,04	1,81			5,9			M-R relationship
Kepler-1027 b	0,89	0,04	-0,02	0,64			4,99			M-R relationship
Kepler-1130 b	0,8	0,16	-0,03	0,437			4,69			M-R relationship
Kepler-285 b	1,34	0,58	-0,58	2,36			5,39			M-R relationship
Kepler-285 c	1,12	0,49	-0,49	1,46			5,71			M-R relationship
Kepler-226 c	2,27	0,9	-0,9	45,2	22,5	-19,1	21,2			Mass
Kepler-226 d	1,22	0,49	-0,49	1,98			5,99			M-R relationship
Kepler-399 b	0,96	0,51	-0,51	0,84			5,22			M-R relationship
Kepler-362 b	0,88	0,38	-0,38	0,615			4,96			M-R relationship

APÊNDICE B - TABELA COM OS PARÂMETROS FOTOSFÉRICOS DA AMOSTRA FINAL DE ESTUDO COM 160 ANÃS (CATÁLOGO NASA EXOPLANET ARCHIVE)

Tabela B.1 - Parâmetros fotosféricos com erros da amostra final de estudo com 160 anãs F-G (T_{ef} , $\log g$, $[\text{Fe}/\text{H}]$), compilados do NASA Exoplanet Archive.

hostname	T_{ef} (K)	$+e_{T_{\text{ef}}}$	$-e_{T_{\text{ef}}}$	$\log g$ $\text{g}(\text{cm.s}^{-2})$	$+e_{\log g}$	$-e_{\log g}$	met (dex)	$+e_{\text{met}}$	$-e_{\text{met}}$
Kepler-381	6197	135	-111	3,84	0,23	-0,09	-0,32	0,15	-0,15
Kepler-338	5923	77	-77	4,02	0,07	-0,07	-0,029	0,014	-0,014
Kepler-1300	6130	87	-109	4,04	0,17	-0,12	0,05	0,102	-0,064
Kepler-129	5770	83	-83	4,08	0,01	-0,01	0,29	0,1	-0,1
Kepler-23	5828	100	-100	4,09	0,06	-0,06	-0,112	0,026	-0,026
Kepler-36	5979	60	-60	4,1	0,1	-0,1	-0,18	0,04	-0,04
Kepler-101	5667	50	-50	4,12	0,11	-0,09	0,33	0,07	-0,07
Kepler-84	6039	98	-96	4,13	0,15	-0,15	-0,07	0,107	-0,114
Kepler-997	6150	63	-55	4,14	0,15	-0,14	0,05	0,081	-0,077
Kepler-363	5593	100	-100	4,15	0,15	-0,15	0,397	0,026	-0,026
Kepler-1311	5748	87	-72	4,16	0,18	-0,14	0,09	0,101	-0,073
Kepler-212	5852	100	-100	4,18	0,15	-0,15	0,116	0,043	-0,043
Kepler-312	6115	100	-100	4,19	0,15	-0,15	0,121	0,051	-0,051
Kepler-907	6106	84	-82	4,19	0,01	-0,02	-0,15	0,12	-0,1
Kepler-107	5854	61	-61	4,21	0,01	-0,01	0,321	0,065	-0,065
Kepler-85	5499	88	-66	4,22	0,15	-0,15	0	0,101	-0,103
Kepler-393	6189	100	-100	4,23	0,15	-0,15	0,032	0,022	-0,022
Kepler-136	6165	100	-100	4,24	0,15	-0,15	0	0,012	-0,012
Kepler-348	6177	100	-100	4,24	0,15	-0,15	0,07	0,098	-0,089
Kepler-1408	6170	99	-2360	4,25	0,14	-3,51	0	0,147	-0,219
Kepler-1412	5880	81	-69	4,25	0,13	-0,13	0,04	0,086	-0,089
Kepler-208	6092	100	-100	4,26	0,15	-0,15	-0,042	0,012	-0,012
Kepler-336	5867	100	-100	4,26	0,15	-0,15	0,337	0,047	-0,047
Kepler-507	6113	66	-68	4,26	0,11	-0,12	0,06	0,081	-0,076
Kepler-1084	6113	64	-76	4,27	0,12	-0,13	-0,02	0,083	-0,108
Kepler-1199	5889	84	-65	4,27	0,13	-0,13	-0,27	0,116	-0,128
Kepler-135	6090	120	-120	4,27	0,15	-0,15	-0,105	0,012	-0,012
Kepler-1385	5732	65	-58	4,27	0,13	-0,14	0,41	0,038	-0,038
Kepler-403	6090	100	-100	4,27	0,15	-0,15	0,079	0,011	-0,011
Kepler-1445	6150	71	-61	4,28	0,11	-0,13	-0,03	0,084	-0,111
Kepler-402	6090	120	-120	4,28	0,15	-0,15	-0,08	0,023	-0,023
Kepler-1288	6132	88	-136	4,29	0,1	-0,24	0,14	0,157	-0,143
Kepler-144	6075	131	-131	4,29	0,15	-0,15	-0,185	0,013	-0,013
Kepler-1514	6145	99	-80	4,29	0,02	-0,02	0,119	0,08	-0,075
Kepler-380	6045	147	-147	4,29	0,15	-0,15	-0,06	0,106	-0,104
Kepler-653	5665	55	-61	4,29	0,12	-0,11	0,23	0,077	-0,078
Kepler-887	6194	62	-50	4,29	0,08	-0,1	0,08	0,079	-0,077
Kepler-1285	6170	67	-62	4,3	0,06	-0,07	0,16	0,089	-0,088
Kepler-130	5884	75	-75	4,3	0,05	-0,05	-0,199	0,005	-0,005
Kepler-1587	5933	79	-78	4,3	0,11	-0,11	0,07	0,09	-0,087
Kepler-197	6004	102	-102	4,3	0,05	-0,05	-0,441	0,014	-0,014
Kepler-376	5900	100	-100	4,3	0,15	-0,15	-0,104	0,012	-0,012
Kepler-806	5770	60	-68	4,3	0,14	-0,19	0	0,07	-0,149
Kepler-115	5979	132	-132	4,31	0,15	-0,15	-0,05	0,015	-0,015
Kepler-1193	5908	75	-61	4,31	0,11	-0,11	0,12	0,074	-0,076
Kepler-132	6003	146	-146	4,31	0,15	-0,15	-0,216	0,013	-0,013
Kepler-134	5983	150	-150	4,31	0,15	-0,15	-0,207	0,013	-0,013
Kepler-1581	6022	82	-67	4,31	0,1	-0,12	0,07	0,084	-0,083

Continua

Tabela B.1 – Continuação

hostname	T_{ef} (K)	$+e_{T_{\text{ef}}}$	$-e_{T_{\text{ef}}}$	$\log g$ (cm.s^{-2})	$+e_{\log g}$	$-e_{\log g}$	met (dex)	$+e_{\text{met}}$	$-e_{\text{met}}$
Kepler-206	5764	100	-100	4,31	0,15	-0,15	0,021	0,013	-0,013
Kepler-1568	5956	69	-55	4,32	0,1	-0,11	0,09	0,082	-0,079
Kepler-1617	6167	85	-78	4,32	0,09	-0,2	0,01	0,123	-0,165
Kepler-392	5938	226	-226	4,32	0,15	-0,15	-0,436	0,017	-0,017
Kepler-1082	5923	81	-64	4,33	0,11	-0,1	-0,06	0,105	-0,125
Kepler-1213	6050	75	-82	4,33	0,07	-0,08	0,13	0,076	-0,083
Kepler-1253	5850	66	-56	4,33	0,11	-0,1	-0,14	0,147	-0,145
Kepler-1276	6188	65	-55	4,33	0,07	-0,09	-0,02	0,084	-0,096
Kepler-1395	6138	67	-61	4,33	0,06	-0,07	0,12	0,073	-0,068
Kepler-1607	6116	119	-199	4,33	0,11	-0,22	0,05	0,135	-0,146
Kepler-1224	6155	65	-57	4,34	0,04	-0,06	0,14	0,081	-0,082
Kepler-1398	6126	115	-125	4,34	0,09	-0,19	0,01	0,136	-0,172
Kepler-1547	6078	94	-139	4,34	0,09	-0,19	0,04	0,134	-0,151
Kepler-826	6079	90	-96	4,34	0,1	-0,11	-0,12	0,121	-0,129
K2-38	5757	60	-60	4,35	0,08	-0,08	0,28		
Kepler-10	5627	44	-44	4,35	0,06	-0,06	-0,15	0,04	-0,04
Kepler-1169	6191	81	-76	4,35	0,03	-0,03	0,26	0,067	-0,059
Kepler-1278	6074	112	-128	4,35	0,09	-0,19	0,02	0,134	-0,161
Kepler-1352	6118	107	-116	4,35	0,09	-0,18	0	0,136	-0,192
Kepler-1590	6053	123	-137	4,35	0,09	-0,19	0,03	0,134	-0,161
Kepler-387	5774	154	-154	4,35	0,15	-0,15	-0,4	0,042	-0,042
Kepler-1248	6149	83	-74	4,36	0,03	-0,04	0,24	0,075	-0,077
Kepler-1406	5892	61	-56	4,36	0,09	-0,11	0,04	0,095	-0,083
Kepler-215	5739	164	-164	4,36	0,15	-0,15	-0,443	0,012	-0,012
Kepler-1047	5754	84	-76	4,37	0,07	-0,09	0,29	0,065	-0,062
Kepler-1141	5791	58	-65	4,38	0,09	-0,1	0,04	0,087	-0,091
Kepler-334	5828	100	-100	4,38	0,15	-0,15	-0,012	0,013	-0,013
Kepler-908	5973	89	-96	4,38	0,04	-0,06	0,15	0,056	-0,063
Kepler-1365	5770	86	-88	4,39	0,08	-0,11	0,03	0,089	-0,097
Kepler-1424	5838	95	-90	4,39	0,08	-0,1	0,01	0,085	-0,09
Kepler-157	5774	125	-125	4,39	0,15	-0,15	-0,059	0,013	-0,013
Kepler-1598	5940	75	-89	4,39	0,08	-0,19	0,04	0,145	-0,16
Kepler-299	5617	112	-112	4,39	0,15	-0,15	-0,01	0,09	-0,104
Kepler-524	6014	75	-86	4,39	0,05	-0,06	0,02	0,081	-0,081
Kepler-647	6020	81	-73	4,39	0,07	-0,1	-0,14	0,117	-0,12
Kepler-1473	6046	77	-64	4,4	0,04	-0,06	-0,01	0,092	-0,097
Kepler-1576	5876	105	-148	4,4	0,08	-0,18	0,05	0,147	-0,161
Kepler-1601	5869	91	-119	4,4	0,09	-0,2	0,05	0,145	-0,154
Kepler-173	6031	200	-200	4,4	0,3	-0,3	0,036	0,014	-0,014
Kepler-431	6004	75	-75	4,4	0,15	-0,15	0,07	0,1	-0,1
Kepler-804	5817	93	-79	4,4	0,07	-0,1	0	0,09	-0,104
Kepler-1338	5909	114	-139	4,41	0,08	-0,15	0	0,155	-0,177
Kepler-1542	5564	63	-63	4,41	0,1	-0,11	0,06	0,084	-0,078
Kepler-406	5538	75	-75	4,41	0,02	-0,02	0,18	0,07	-0,07
Kepler-520	6112	69	-61	4,41	0,03	-0,03	-0,03	0,094	-0,099
K2-265	5477	27	-27	4,42	0,05	-0,05	0,078	0,02	-0,02
Kepler-466	5927	77	-69	4,42	0,05	-0,07	-0,01	0,092	-0,091
Kepler-105	5827	94	-94	4,43	0,09	-0,06	-0,19	0,1	-0,1
Kepler-1417	5839	94	-138	4,43	0,07	-0,15	0,02	0,154	-0,162
Kepler-1560	5815	103	-136	4,43	0,07	-0,15	0,04	0,141	-0,154
Kepler-1588	5817	69	-57	4,43	0,07	-0,1	-0,14	0,126	-0,13
Kepler-603	5808	90	-143	4,43	0,07	-0,16	0,03	0,134	-0,166
Kepler-97	5779	74	-74	4,43	0,08	-0,08	-0,2	0,07	-0,07
Kepler-1156	5778	67	-59	4,44	0,06	-0,08	0,02	0,096	-0,095
Kepler-1328	5780	92	-90	4,44	0,07	-0,15	0	0,131	-0,177
Kepler-1464	5828	112	-170	4,44	0,07	-0,13	0,03	0,147	-0,162
Kepler-1525	5748	70	-66	4,44	0,03	-0,04	0,27	0,07	-0,066

Continua

Tabela B.1 – Continuação

hostname	T_{ef} (K)	$+e_{T_{\text{ef}}}$	$-e_{T_{\text{ef}}}$	$\log g$ (cm.s^{-2})	$+e_{\log g}$	$-e_{\log g}$	met (dex)	$+e_{\text{met}}$	$-e_{\text{met}}$
Kepler-1619	5852	91	-81	4,44	0,07	-0,14	-0,07	0,147	-0,22
Kepler-162	5816	200	-200	4,44	0,3	-0,3	0,03	0,132	-0,149
Kepler-22	5518	44	-44	4,44	0,06	-0,06	-0,29	0,06	-0,06
Kepler-295	5603	200	-200	4,44	0,3	-0,3	-0,01	0,144	-0,167
Kepler-1035	5763	114	-121	4,45	0,07	-0,17	-0,03	0,135	-0,183
Kepler-1258	5839	79	-73	4,45	0,06	-0,12	-0,07	0,145	-0,182
Kepler-1264	5791	109	-145	4,45	0,07	-0,14	-0,02	0,139	-0,18
Kepler-1563	5765	100	-107	4,45	0,06	-0,13	0,02	0,143	-0,169
Kepler-20	5495	50	-50	4,45	0,01	-0,01	0,07	0,08	-0,08
Kepler-1440	5698	67	-69	4,46	0,06	-0,14	0,04	0,137	-0,171
Kepler-192	5487	66	-61	4,46	0,06	-0,07	0,13	0,087	-0,096
Kepler-282	5602	155	-155	4,46	0,15	-0,15	-0,25	0,132	-0,132
Kepler-746	5418	87	-90	4,46	0,08	-0,09	0,09	0,096	-0,093
Kepler-831	5732	75	-60	4,46	0,04	-0,06	0,02	0,094	-0,098
Kepler-1240	5682	103	-117	4,47	0,06	-0,14	0,04	0,138	-0,159
Kepler-1425	5718	170	-174	4,47	0,07	-0,13	-0,03	0,142	-0,181
Kepler-150	5560	100	-100	4,47	0,15	-0,15	-0,02	0,099	-0,106
Kepler-1572	5618	63	-71	4,47	0,06	-0,16	0,08	0,138	-0,141
Kepler-384	5577	145	-145	4,47	0,15	-0,15	-0,459	0,077	-0,077
Kepler-374	5977	200	-200	4,48	0,3	-0,3	0,111	0,013	-0,013
Kepler-1055	5723	76	-62	4,49	0,03	-0,04	-0,02	0,098	-0,099
Kepler-1067	5592	63	-66	4,49	0,05	-0,14	0,03	0,132	-0,172
Kepler-1117	5612	83	-102	4,49	0,05	-0,12	0,03	0,136	-0,152
Kepler-238	5732	65	-72	4,49	0,04	-0,3	0,23	0,076	-0,08
Kepler-251	5526	100	-100	4,49	0,15	-0,15	-0,02	0,107	-0,115
Kepler-625	5789	47	-44	4,49	0,01	-0,01	0,1	0,087	-0,085
Kepler-1012	5556	78	-68	4,5	0,03	-0,05	0,05	0,109	-0,102
Kepler-1139	5550	105	-154	4,5	0,05	-0,12	0,05	0,128	-0,152
Kepler-1235	5541	79	-83	4,5	0,05	-0,12	0,01	0,145	-0,173
Kepler-1393	5697	65	-57	4,5	0,03	-0,05	-0,09	0,113	-0,125
Kepler-183	5888	200	-200	4,5	0,3	-0,3	0,101	0,085	-0,085
Kepler-286	5580	131	-131	4,5	0,15	-0,15	-0,12	0,11	-0,112
Kepler-534	5936	94	-130	4,5	0,02	-0,11	0,07	0,15	-0,15
Kepler-1332	5581	83	-70	4,51	0,03	-0,03	0	0,098	-0,1
Kepler-59	6074			4,51			0,02	0,141	-0,169
Kepler-783	5521	67	-53	4,51	0,03	-0,05	0,01	0,102	-0,103
Kepler-1312	5721	103	-126	4,52	0,03	-0,11	0,02	0,15	-0,15
Kepler-271	5555	60	-59	4,52	0,04	-0,05	-0,13	0,121	-0,122
Kepler-310	5797	200	-200	4,52	0,3	-0,3	-0,07	0,152	-0,178
Kepler-605	5462	67	-74	4,52	0,04	-0,11	0,02	0,135	-0,165
Kepler-882	5476	142	-157	4,52	0,05	-0,1	-0,03	0,14	-0,165
Kepler-1507	5410	63	-70	4,53	0,04	-0,1	-0,03	0,15	-0,173
Kepler-301	5815	200	-200	4,53	0,3	-0,3	0,187	0,036	-0,036
Kepler-1185	5622	68	-59	4,54	0,01	-0,01	-0,04	0,092	-0,086
Kepler-1505	5686	65	-54	4,54	0,01	-0,01	-0,18	0,099	-0,111
Kepler-404	5654	200	-200	4,54	0,3	-0,3	-0,04	0,25	-0,26
Kepler-743	5486	77	-79	4,55	0,01	-0,01	0,01	0,093	-0,095
Kepler-1130	5450	108	-108	4,56	0,02	-0,09	0,1	0,15	-0,15
Kepler-373	5787	200	-200	4,56	0,3	-0,3	0,07	0,1	-0,1
Kepler-775	5468	68	-70	4,56	0,01	-0,01	-0,04	0,103	-0,1
Kepler-1027	5436	67	-58	4,57	0,01	-0,01	-0,06	0,107	-0,087
Kepler-285	5411	200	-200	4,58	0,3	-0,3	0,16	0,15	-0,15
Kepler-226	5571	200	-200	4,59	0,3	-0,3	0,16	0,15	-0,15
Kepler-399	5502	200	-200	4,62	0,3	-0,3	0,14	0,15	-0,1
Kepler-362	5788	200	-200	4,64	0,3	-0,3	0,14	0,15	-0,15

Continua

APÊNDICE C - TABELA DAS RAZÕES DE ANUMDÂNCIAS DA AMOSTRA FINAL DE ESTUDO COM 160 ANÃS F-G (CATÁLOGO HYPATIA)

Tabela C.1 - Abundâncias $[X/H]$ (para $X = \text{Fe}, \text{C}, \text{N}, \text{O}$ e Na e seus respectivos erros) dos 15 elementos da amostra final de estudo com 160 anãs F-G, advindos do catálogo Hypatia.

hostname	[Fe/H]	$e_{\text{Fe}/H}$	[C/H]	$e_{\text{C}/H}$	[N/H]	$e_{\text{N}/H}$	[O/H]	$e_{\text{O}/H}$	[Na/H]	$e_{\text{Na}/H}$
hostname	[Fe/H]	Fe_err	[C/H]	C_err	[N/H]	N_err	[O/H]	O_err	[Na/H]	Na_err
Kepler-212	0,18	0,04	0,14	0,09	0,24	0,11	0,25	0,09	0,14	0,04
Kepler-1424	0,05	0,04	-0,02	0,09	0,03	0,11	-0,07	0,09	-0,16	0,04
Kepler-1141	0,06	0,04	0,06	0,09	-0,02	0,11	-0,03	0,09	-0,05	0,04
Kepler-310	-0,22	0,04	-0,2	0,09	-0,8	0,11	-0,11	0,09	-0,37	0,04
Kepler-362	-0,21	0,04	-0,19	0,09	-0,09	0,11	-0,19	0,09	-0,33	0,04
Kepler-1352	-0,25	0,04	-0,19	0,09	-0,2	0,11	-0,18	0,09	-0,43	0,04
Kepler-22	-0,285	0,015	-0,23	0,02	-0,28	0,1	-0,215	0,025	-0,43	0,02
Kepler-36	-0,175	0,005	-0,145	0,005	0,075	0,195	-0,035	0,045	-0,345	0,015
Kepler-150	0,25	0,04	0,04	0,09	0,8	0,11	-0,6	0,09	0,08	0,04
Kepler-338	-0,01	0,04	-0,04	0,09	-0,08	0,11	0,02	0,09	-0,22	0,04
Kepler-1082	-0,16	0,04	-0,11	0,09	-0,34	0,11	0,0	0,09	-0,32	0,04
Kepler-286	-0,32	0,04	-0,24	0,09	-2,39	0,11	-0,28	0,09	-0,39	0,04
Kepler-376	-0,16	0,04	-0,1	0,09	-0,25	0,11	-0,07	0,09	-0,32	0,04
Kepler-282	-0,28	0,04	-0,1	0,09	-1,87	0,11	0,02	0,09	-0,23	0,04
Kepler-1328	-0,1	0,04	-0,01	0,09	-0,08	0,11	0,21	0,09	-0,19	0,04
Kepler-406	0,205	0,015	0,155	0,025	0,065	0,005	0,125	0,055	0,095	0,005
Kepler-466	-0,04	0,04	-0,03	0,09	-0,15	0,11	-0,07	0,09	-0,13	0,04
Kepler-197	-0,4	0,04	-0,28	0,09	-0,05	0,11	-0,26	0,09	-0,52	0,04
Kepler-431	-0,06	0,04	-0,09	0,09	-0,53	0,11	0,07	0,09	-0,2	0,04
Kepler-23	-0,12	0,04	-0,09	0,09	-0,26	0,11	-0,03	0,09	-0,26	0,04
Kepler-403	0,09	0,04	0,05	0,09	-0,14	0,11	0,03	0,09	-0,13	0,04
Kepler-804	-0,09	0,04	-0,06	0,09	-0,1	0,11	-0,08	0,09	-0,3	0,04
Kepler-1581	0,095	0,04	0,075	0,09	-0,03	0,11	0,095	0,09	-0,055	0,04
Kepler-1406	-0,14	0,015	-0,15	0,015	-0,68	0,12	-0,05	0,005	-0,34	0,015
Kepler-144	-0,09	0,04	-0,12	0,09	-0,22	0,11	-0,08	0,09	-0,36	0,04
K2-265	0,05	0,04	0,0	0,09	-0,11	0,11	-0,08	0,09	-0,07	0,04
Kepler-1587	0,105	0,04	0,095	0,09	0,06	0,11	0,095	0,09	0,0	0,04
Kepler-1332	-0,11	0,015	-0,12	0,025	-0,39	0,01	-0,14	0,015	-0,32	0,03
Kepler-135	-0,04	0,04	0,02	0,09	0,04	0,11	-0,02	0,09	-0,25	0,04
Kepler-1248	0,21	0,04	0,18	0,09	0,35	0,11	0,14	0,09	0,01	0,04
Kepler-1398	-0,09	0,04	-0,06	0,09	0,16	0,11	-0,06	0,09	-0,24	0,04
Kepler-173	0,04	0,04	0,19	0,09	0,6	0,11	0,02	0,09	-0,18	0,04
Kepler-1412	-0,07	0,04	-0,09	0,09	-0,34	0,11	0,01	0,09	-0,35	0,04
Kepler-1139	0,25	0,04	0,26	0,09	0,28	0,11	0,18	0,09	0,35	0,04
Kepler-1312	0,05	0,04	-0,05	0,09	-0,21	0,11	-0,12	0,09	-0,21	0,04
Kepler-130	-0,13	0,04	-0,06	0,09	-0,52	0,11	-0,2	0,09	-0,29	0,04
Kepler-299	0,01	0,04	0,02	0,09	0,07	0,11	0,0	0,09	-0,07	0,04
Kepler-1601	0,0	0,04	0,01	0,09	0,0	0,11	-0,01	0,09	-0,22	0,04
K2-38	0,22	0,04	0,2	0,09	0,14	0,11	0,15	0,09	0,23	0,04
Kepler-1258	-0,39	0,04	-0,21	0,09	-0,52	0,11	-0,05	0,09	-0,49	0,04
Kepler-887	0,09	0,04	0,06	0,09	-0,08	0,11	0,09	0,09	-0,13	0,04
Kepler-1568	0,145	0,04	0,11	0,09	0,065	0,11	0,01	0,09	0,08	0,04
Kepler-348	-0,02	0,015	-0,22	0,02	-0,29	0,005	0,14	0,0	-0,16	0,01
Kepler-392	-0,37	0,04	-0,23	0,09	-1,08	0,11	-0,27	0,09	-0,63	0,04
Kepler-1576	0,2	0,04	0,06	0,09	-0,07	0,11	0,08	0,09	0,01	0,04
Kepler-1117	0,1	0,04	0,05	0,09	0,0	0,11	-0,16	0,09	0,04	0,04

Continua

Tabela C.1 – Continuação

hostname	[Fe/H]	$e_{\text{Fe/H}}$	[C/H]	$e_{\text{C/H}}$	[N/H]	$e_{\text{N/H}}$	[O/H]	$e_{\text{O/H}}$	[Na/H]	$e_{\text{Na/H}}$
Kepler-1199	-0,4	0,04	-0,3	0,09	-0,21	0,11	-0,27	0,09	-0,62	0,04
Kepler-10	-0,2	0,04	-0,15	0,09	-0,4	0,11	-0,05	0,09	-0,3	0,04
Kepler-336	0,22	0,04	0,14	0,09	0,25	0,11	0,07	0,09	0,19	0,04
Kepler-831	-0,14	0,04	-0,08	0,09	-0,25	0,11	-0,05	0,09	-0,21	0,04
Kepler-183	0,08	0,04	0,08	0,09	0,04	0,11	0,0	0,09	0,13	0,04
Kepler-625	0,17	0,04	0,09	0,09	0,05	0,11	0,11	0,09	0,08	0,04
Kepler-1213	-0,1	0,04	-0,07	0,09	-0,11	0,11	0,0	0,09	-0,28	0,04
Kepler-271	-0,265	0,04	-0,235	0,09	-0,22	0,11	-0,23	0,09	-0,39	0,04
Kepler-1507	-0,01	0,015	-0,04	0,005	-0,06	0,21	-0,06	0,08	-0,2	0,04
Kepler-1505	-0,31	0,04	-0,25	0,09	-0,96	0,11	-0,3	0,09	-0,49	0,04
Kepler-1130	0,095	0,04	0,01	0,09	-0,05	0,11	-0,04	0,09	-0,04	0,04
Kepler-115	-0,03	0,005	-0,01	0,0	-0,21	0,02	-0,02	0,0	-0,25	0,02
Kepler-1542	0,0	0,04	0,04	0,09	-0,07	0,11	0,09	0,09	-0,15	0,04
Kepler-192	0,22	0,04	0,17	0,09	0,19	0,11	0,09	0,09	0,18	0,04
Kepler-783	-0,12	0,04	-0,13	0,09	-0,18	0,11	-0,17	0,09	-0,24	0,04
Kepler-1560	0,19	0,04	0,12	0,09	0,02	0,11	0,07	0,09	0,04	0,04
Kepler-806	-0,25	0,04	-0,2	0,09	-0,13	0,11	-0,11	0,09	-0,48	0,04
Kepler-101	0,33	0,04	0,19	0,09	0,19	0,11	0,13	0,09	0,09	0,04
Kepler-1193	0,06	0,04	0,05	0,09	0,03	0,11	0,04	0,09	0,0	0,04
Kepler-826	-0,33	0,04	-0,23	0,09	-0,23	0,11	-0,26	0,09	-0,48	0,04
Kepler-1607	0,02	0,04	-0,02	0,09	-0,02	0,11	0,12	0,09	-0,09	0,04
Kepler-524	0,0	0,04	-0,07	0,09	0,17	0,11	0,05	0,09	-0,21	0,04
Kepler-285	0,11	0,04	0,0	0,09	-0,07	0,11	-0,06	0,09	-0,06	0,04
Kepler-743	0,04	0,04	-0,03	0,09	-0,21	0,11	-0,1	0,09	-0,19	0,04
Kepler-136	0,11	0,04	0,01	0,09	0,47	0,11	0,22	0,09	-0,06	0,04
Kepler-1035	0,14	0,04	0,06	0,09	-0,06	0,11	0,0	0,09	-0,01	0,04
Kepler-1185	0,12	0,04	0,03	0,09	0,13	0,11	-0,08	0,09	-0,13	0,04
Kepler-384	-0,37	0,04	-0,24	0,09	-0,19	0,11	0,02	0,09	-0,39	0,04
Kepler-1547	0,11	0,04	0,08	0,09	0,05	0,11	0,15	0,09	-0,02	0,04
Kepler-1572	-0,34	0,04	-0,23	0,09	-0,45	0,11	-0,17	0,09	-0,55	0,04
Kepler-746	0,04	0,04	0,07	0,09	-0,06	0,11	0,07	0,09	0,04	0,04
Kepler-1300	-0,13	0,04	-0,17	0,09	-0,6	0,11	-0,03	0,09	-0,36	0,04
Kepler-1285	0,21	0,04	0,03	0,09	0,41	0,11	0,18	0,09	-0,03	0,04
Kepler-534	0,04	0,04	-0,04	0,09	-0,07	0,11	-0,1	0,09	-0,22	0,04
Kepler-162	0,04	0,04	0,07	0,09	-0,28	0,11	-0,02	0,09	-0,09	0,04
Kepler-387	-0,31	0,04	-0,13	0,09	-0,55	0,11	-0,23	0,09	-0,46	0,04
Kepler-1055	-0,02	0,04	-0,08	0,09	-0,43	0,11	-0,04	0,09	-0,25	0,04
Kepler-251	-0,13	0,04	0,01	0,09	0,01	0,11	0,1	0,09	-0,34	0,04
Kepler-1027	-0,07	0,04	-0,05	0,09	-0,21	0,11	0,04	0,09	-0,25	0,04
Kepler-1224	0,16	0,04	0,11	0,09	-0,14	0,11	0,07	0,09	0,08	0,04
Kepler-373	0,07	0,04	-0,05	0,09	-0,01	0,11	-0,18	0,09	-0,06	0,04
Kepler-1288	0,07	0,04	-0,23	0,09	-0,11	0,11	0,13	0,09	-0,4	0,04
Kepler-215	-0,5	0,04	-0,39	0,09	-0,04	0,11	-0,35	0,09	-0,62	0,04
Kepler-59	-0,24	0,04	-0,14	0,09	-2,71	0,11	-0,03	0,09	-0,52	0,04
Kepler-907	-0,32	0,04	-0,42	0,09	-1,39	0,11	-0,18	0,09	-0,48	0,04
Kepler-208	0,0	0,04	0,01	0,09	0,01	0,11	-0,01	0,09	-0,06	0,04
Kepler-105	-0,12	0,04	-0,07	0,09	-0,23	0,11	-0,13	0,09	-0,29	0,04
Kepler-1619	-0,31	0,04	-0,15	0,09	-0,54	0,11	0,05	0,09	-0,4	0,04
Kepler-1445	-0,09	0,04	-0,07	0,09	-0,92	0,11	-0,025	0,09	-0,205	0,04
Kepler-206	0,01	0,0	0,01	0,01	-0,03	0,84	0,03	0,045	-0,15	0,065
Kepler-1240	0,25	0,04	0,24	0,09	0,25	0,11	0,19	0,09	0,27	0,04
Kepler-84	-0,07	0,04	-0,17	0,09	-0,66	0,11	-0,01	0,09	-0,12	0,04
Kepler-1514	0,18	0,04	0,12	0,09	0,435	0,11	0,135	0,09	0,065	0,04
Kepler-908	0,28	0,01	0,1	0,01	0,16	0,025	0,22	0,035	0,12	0,045
Kepler-129	0,22	0,04	0,16	0,09	0,31	0,11	0,23	0,09	0,21	0,04
Kepler-374	0,12	0,04	0,08	0,09	0,1	0,11	-0,05	0,09	-0,01	0,04
Kepler-1408	-0,07	0,04	-0,07	0,09	-0,59	0,11	-0,04	0,09	-0,18	0,04

Continua

Tabela C.1 – Continuação

hostname	[Fe/H]	$e_{\text{Fe}/\text{H}}$	[C/H]	$e_{\text{C}/\text{H}}$	[N/H]	$e_{\text{N}/\text{H}}$	[O/H]	$e_{\text{O}/\text{H}}$	[Na/H]	$e_{\text{Na}/\text{H}}$
Kepler-404	-0,15	0,04	-0,14	0,09	-0,46	0,11	-0,14	0,09	-0,29	0,04
Kepler-1617	-0,13	0,04	-0,09	0,09	-0,71	0,11	-0,11	0,09	-0,32	0,04
Kepler-1393	-0,24	0,04	-0,2	0,09	-0,2	0,11	-0,18	0,09	-0,34	0,04
Kepler-1385	0,25	0,04	0,23	0,09	0,32	0,11	0,23	0,09	0,28	0,04
Kepler-647	-0,3	0,04	-0,2	0,09	-2,02	0,11	-0,22	0,09	-0,49	0,04
Kepler-301	0,12	0,04	0,1	0,09	0,02	0,11	0,2	0,09	-0,04	0,04
Kepler-1598	0,01	0,04	0,01	0,09	-0,33	0,11	-0,02	0,09	-0,25	0,04
Kepler-1440	0,15	0,04	0,12	0,09	0,04	0,11	0,12	0,09	0,03	0,04
Kepler-1338	0,17	0,04	0,12	0,09	0,23	0,11	0,13	0,09	0,1	0,04
Kepler-1012	0,15	0,04	0,07	0,09	0,04	0,11	-0,03	0,09	0,01	0,04
Kepler-1417	-0,31	0,04	-0,23	0,09	-0,19	0,11	-0,05	0,09	-0,41	0,04
Kepler-1264	-0,21	0,04	-0,17	0,09	-0,43	0,11	-0,1	0,09	-0,43	0,04
Kepler-1311	0,04	0,04	-0,02	0,09	-0,15	0,11	0,06	0,09	-0,19	0,04
Kepler-653	0,25	0,04	0,23	0,09	0,14	0,11	0,14	0,09	0,12	0,04
Kepler-1464	0,01	0,04	0,02	0,09	0,0	0,11	0,01	0,09	-0,17	0,04
Kepler-997	0,09	0,04	0,04	0,09	0,19	0,11	-0,09	0,09	-0,08	0,04
Kepler-1047	0,2	0,04	0,22	0,09	0,16	0,11	0,18	0,09	0,17	0,04
Kepler-1278	0,05	0,04	0,07	0,09	-0,12	0,11	0,1	0,09	-0,04	0,04
Kepler-520	-0,12	0,04	-0,13	0,09	-0,88	0,11	-0,18	0,09	-0,48	0,04
Kepler-1590	-0,29	0,04	-0,25	0,09	-0,37	0,11	-0,27	0,09	-0,45	0,04
Kepler-399	-0,175	0,04	-0,165	0,09	-0,24	0,11	-0,16	0,09	-0,33	0,04
Kepler-334	-0,01	0,025	-0,04	0,055	-0,22	0,05	-0,1	0,01	-0,24	0,04
Kepler-1156	-0,26	0,04	-0,18	0,09	-0,8	0,11	-0,24	0,09	-0,42	0,04
Kepler-1169	0,23	0,04	0,12	0,09	0,08	0,11	0,16	0,09	0,17	0,04
Kepler-132	-0,22	0,04	-0,15	0,09	-0,17	0,11	-0,14	0,09	-0,33	0,04
Kepler-1588	-0,24	0,04	-0,11	0,09	-0,5	0,11	-0,01	0,09	-0,35	0,04
Kepler-238	0,27	0,04	0,21	0,09	0,26	0,11	0,18	0,09	0,22	0,04
Kepler-1067	0,17	0,04	0,07	0,09	-0,02	0,11	0,02	0,09	-0,01	0,04
Kepler-1253	-0,37	0,04	-0,26	0,09	-0,04	0,11	-0,04	0,09	-0,41	0,04
Kepler-157	-0,06	0,04	-0,05	0,09	-0,31	0,11	-0,11	0,09	-0,2	0,04
Kepler-393	0,08	0,04	-0,07	0,09	0,12	0,11	0,06	0,09	-0,22	0,04
Kepler-380	-0,13	0,04	-0,04	0,09	0,01	0,11	-0,09	0,09	-0,26	0,04
Kepler-775	-0,11	0,04	-0,07	0,09	-0,17	0,11	-0,08	0,09	-0,25	0,04
Kepler-1473	-0,035	0,04	-0,03	0,09	-0,025	0,11	-0,075	0,09	-0,185	0,04
Kepler-381	-0,09	0,005	-0,17	0,02	-0,15	0,035	-0,11	0,025	-0,3	0,045
Kepler-1276	-0,06	0,04	-0,07	0,09	0,12	0,11	0,01	0,09	-0,43	0,04
Kepler-363	0,38	0,04	0,29	0,09	0,28	0,11	0,18	0,09	0,32	0,04
Kepler-603	0,31	0,04	0,3	0,09	0,04	0,11	0,36	0,09	0,35	0,04
Kepler-134	-0,17	0,04	-0,12	0,09	-0,1	0,11	-0,09	0,09	-0,41	0,04
Kepler-402	-0,05	0,04	-0,02	0,09	-0,31	0,11	-0,11	0,09	-0,36	0,04
Kepler-1365	0,08	0,04	0,01	0,09	0,0	0,11	0,06	0,09	-0,19	0,04
Kepler-312	0,24	0,04	0,14	0,09	-0,21	0,11	0,03	0,09	0,02	0,04
Kepler-1084	-0,01	0,04	0,01	0,09	0,08	0,11	-0,03	0,09	-0,16	0,04
Kepler-1395	0,13	0,04	0,06	0,09	0,3	0,11	0,07	0,09	-0,07	0,04
Kepler-1235	-0,03	0,04	0,1	0,09	-0,05	0,11	0,19	0,09	-0,1	0,04
Kepler-20	0,025	0,04	0,005	0,09	-0,055	0,11	0,025	0,09	-0,135	0,04
Kepler-226	0,01	0,005	0,07	0,005	-0,1	0,035	0,09	0,005	-0,14	0,005
Kepler-1563	0,21	0,04	0,13	0,09	0,07	0,11	-0,06	0,09	0,16	0,04
Kepler-1525	0,21	0,04	0,19	0,09	0,42	0,11	0,09	0,09	0,19	0,04
Kepler-107	0,26	0,04	0,22	0,09	0,29	0,11	0,13	0,09	0,25	0,04
Kepler-882	-0,02	0,04	0,0	0,09	-0,08	0,11	-0,01	0,09	-0,15	0,04
Kepler-85	0,04	0,04	-0,01	0,09	0,01	0,11	0,01	0,09	-0,17	0,04
Kepler-1425	-0,13	0,04	-0,07	0,09	-0,62	0,11	0,09	0,09	-0,2	0,04
Kepler-507	0,175	0,04	0,11	0,09	0,04	0,11	0,125	0,09	0,04	0,04
Kepler-605	-0,04	0,005	-0,09	0,0	-0,3	0,01	-0,07	0,015	-0,2	0,02
Kepler-295	-0,02	0,04	-0,14	0,09	-0,1	0,11	-0,11	0,09	-0,21	0,04
Kepler-97	-0,21	0,04	-0,145	0,09	-0,38	0,11	-0,155	0,09	-0,345	0,04

Tabela C.2 - Abundâncias [X/H] (para X = Mg, Al, Si, Ca e Ti e seus respectivos erros) dos 15 elementos da amostra final de estudo com 160 anãs F-G, advindos do catálogo Hypatia.

hostname	[Mg/H]	e _{Mg/H}	[Al/H]	e _{Al/H}	[Si/H]	e _{Si/H}	[Ca/H]	e _{Ca/H}	[Ti/H]	e _{Ti/H}
hostname	[Mg/H]	Mg_err	[Al/H]	Al_err	[Si/H]	Si_err	[Ca/H]	Ca_err	[Ti/H]	Ti_err
Kepler-212	0,14	0,07	0,06	0,06	0,18	0,05	0,16	0,06	0,14	0,05
Kepler-1424	0,0	0,07	-0,01	0,06	0,01	0,05	0,17	0,06	0,08	0,05
Kepler-1141	0,08	0,07	0,07	0,06	0,01	0,05	0,08	0,06	0,06	0,05
Kepler-310	-0,18	0,07	-0,28	0,06	-0,2	0,05	-0,19	0,06	-0,15	0,05
Kepler-362	-0,16	0,07	-0,13	0,06	-0,2	0,05	-0,08	0,06	-0,06	0,05
Kepler-1352	-0,24	0,07	-0,31	0,06	-0,27	0,05	-0,2	0,06	-0,2	0,05
Kepler-22	-0,24	0,0	-0,33	0,01	-0,215	0,025	-0,245	0,005	-0,24	0,01
Kepler-36	-0,175	0,005	-0,29	0,07	-0,175	0,015	-0,145	0,015	-0,1	0,0
Kepler-150	0,28	0,07	-0,1	0,06	0,13	0,05	0,84	0,06	0,31	0,05
Kepler-338	-0,09	0,07	-0,16	0,06	-0,07	0,05	0,0	0,06	0,0	0,05
Kepler-1082	-0,12	0,07	-0,25	0,06	-0,13	0,05	-0,09	0,06	-0,07	0,05
Kepler-286	-0,27	0,07	-0,53	0,06	-0,29	0,05	-0,24	0,06	-0,26	0,05
Kepler-376	-0,13	0,07	-0,17	0,06	-0,17	0,05	-0,15	0,06	-0,09	0,05
Kepler-282	-0,15	0,07	-0,14	0,06	-0,08	0,05	-0,12	0,06	-0,03	0,05
Kepler-1328	0,03	0,07	0,05	0,06	0,01	0,05	-0,03	0,06	0,08	0,05
Kepler-406	0,195	0,015	0,125	0,055	0,185	0,015	0,195	0,005	0,185	0,015
Kepler-466	-0,06	0,07	-0,03	0,06	-0,12	0,05	0,03	0,06	0,06	0,05
Kepler-197	-0,37	0,07	-0,57	0,06	-0,34	0,05	-0,35	0,06	-0,27	0,05
Kepler-431	-0,09	0,07	-0,18	0,06	-0,04	0,05	0,01	0,06	-0,02	0,05
Kepler-23	-0,13	0,07	-0,22	0,06	-0,16	0,05	-0,07	0,06	-0,11	0,05
Kepler-403	0,02	0,07	-0,12	0,06	0,02	0,05	0,1	0,06	0,11	0,05
Kepler-804	-0,07	0,07	-0,14	0,06	-0,09	0,05	-0,04	0,06	-0,08	0,05
Kepler-1581	0,06	0,07	-0,005	0,06	0,04	0,05	0,125	0,06	0,1	0,05
Kepler-1406	-0,26	0,01	-0,25	0,095	-0,2	0,01	-0,1	0,025	-0,05	0,03
Kepler-144	-0,14	0,07	-0,55	0,06	-0,1	0,05	-0,07	0,06	-0,02	0,05
K2-265	0,05	0,07	-0,01	0,06	0,03	0,05	0,09	0,06	0,06	0,05
Kepler-1587	0,09	0,07	-0,025	0,06	0,045	0,05	0,14	0,06	0,075	0,05
Kepler-1332	-0,08	0,03	-0,18	0,035	-0,11	0,005	-0,05	0,03	-0,1	0,035
Kepler-135	-0,1	0,07	-0,02	0,06	-0,09	0,05	-0,02	0,06	-0,03	0,05
Kepler-1248	0,13	0,07	0,13	0,06	0,2	0,05	0,15	0,06	0,21	0,05
Kepler-1398	-0,12	0,07	-0,16	0,06	-0,11	0,05	-0,01	0,06	-0,08	0,05
Kepler-173	0,06	0,07	-0,03	0,06	0,09	0,05	0,06	0,06	0,05	0,05
Kepler-1412	-0,07	0,07	-0,16	0,06	-0,06	0,05	0,02	0,06	-0,04	0,05
Kepler-1139	0,23	0,07	0,18	0,06	0,24	0,05	0,29	0,06	0,24	0,05
Kepler-1312	-0,06	0,07	-0,17	0,06	-0,05	0,05	0,09	0,06	0,01	0,05
Kepler-130	-0,07	0,07	-0,15	0,06	-0,14	0,05	-0,11	0,06	-0,04	0,05
Kepler-299	0,03	0,07	-0,04	0,06	0,04	0,05	0,05	0,06	0,04	0,05
Kepler-1601	-0,03	0,07	-0,01	0,06	0,02	0,05	0,06	0,06	0,06	0,05
K2-38	0,21	0,07	0,17	0,06	0,21	0,05	0,2	0,06	0,21	0,05
Kepler-1258	-0,22	0,07	-0,16	0,06	-0,19	0,05	-0,24	0,06	-0,06	0,05
Kepler-887	0,06	0,07	-0,1	0,06	0,02	0,05	0,04	0,06	0,15	0,05
Kepler-1568	0,13	0,07	0,035	0,06	0,105	0,05	0,135	0,06	0,115	0,05
Kepler-348	-0,1	0,01	-0,46	0,005	-0,01	0,015	0,1	0,035	0,01	0,015
Kepler-392	-0,37	0,07	-0,31	0,06	-0,36	0,05	-0,32	0,06	-0,29	0,05
Kepler-1576	0,08	0,07	-0,03	0,06	0,14	0,05	0,23	0,06	0,15	0,05
Kepler-1117	0,09	0,07	0,09	0,06	0,06	0,05	0,18	0,06	0,12	0,05
Kepler-1199	-0,33	0,07	-0,51	0,06	-0,36	0,05	-0,3	0,06	-0,19	0,05
Kepler-10	-0,12	0,07	-0,06	0,06	-0,14	0,05	-0,1	0,06	-0,11	0,05
Kepler-336	0,12	0,07	0,13	0,06	0,16	0,05	0,29	0,06	0,22	0,05

Continua

Tabela C.2 – Continuação

hostname	[Mg/H]	e _{Mg/H}	[Al/H]	e _{Al/H}	[Si/H]	e _{Si/H}	[Ca/H]	e _{Ca/H}	[Ti/H]	e _{Ti/H}
Kepler-831	-0,11	0,07	-0,2	0,06	-0,09	0,05	-0,12	0,06	-0,15	0,05
Kepler-183	0,09	0,07	-0,07	0,06	0,09	0,05	0,19	0,06	0,04	0,05
Kepler-625	0,15	0,07	-0,36	0,06	0,15	0,05	0,19	0,06	0,12	0,05
Kepler-1213	-0,13	0,07	-0,38	0,06	-0,18	0,05	-0,08	0,06	-0,1	0,05
Kepler-271	-0,185	0,07	-0,25	0,06	-0,145	0,05	-0,205	0,06	-0,185	0,05
Kepler-1507	-0,08	0,025	-0,08	0,03	-0,04	0,075	0,03	0,015	-0,05	0,015
Kepler-1505	-0,27	0,07	-0,39	0,06	-0,33	0,05	-0,29	0,06	-0,24	0,05
Kepler-1130	0,05	0,07	0,005	0,06	0,07	0,05	0,1	0,06	0,08	0,05
Kepler-115	-0,05	0,0	-0,18	0,005	-0,06	0,01	-0,02	0,01	-0,05	0,0
Kepler-1542	0,07	0,07	0,07	0,06	0,05	0,05	0,06	0,06	0,11	0,05
Kepler-192	0,17	0,07	0,09	0,06	0,19	0,05	0,2	0,06	0,16	0,05
Kepler-783	-0,13	0,07	-0,15	0,06	-0,12	0,05	-0,1	0,06	-0,1	0,05
Kepler-1560	0,11	0,07	0,03	0,06	0,14	0,05	0,22	0,06	0,14	0,05
Kepler-806	-0,21	0,07	-0,28	0,06	-0,2	0,05	-0,21	0,06	-0,1	0,05
Kepler-101	0,27	0,07	0,26	0,06	0,26	0,05	0,32	0,06	0,29	0,05
Kepler-1193	0,04	0,07	0,02	0,06	0,05	0,05	0,09	0,06	0,0	0,05
Kepler-826	-0,29	0,07	-0,35	0,06	-0,31	0,05	-0,26	0,06	-0,24	0,05
Kepler-1607	-0,06	0,07	-0,24	0,06	-0,02	0,05	0,08	0,06	0,02	0,05
Kepler-524	-0,04	0,07	-0,08	0,06	-0,03	0,05	-0,02	0,06	0,03	0,05
Kepler-285	0,07	0,07	0,0	0,06	0,08	0,05	0,09	0,06	0,09	0,05
Kepler-743	0,02	0,07	-0,11	0,06	0,03	0,05	0,07	0,06	0,04	0,05
Kepler-136	0,04	0,07	-0,11	0,06	0,09	0,05	0,13	0,06	0,18	0,05
Kepler-1035	0,15	0,07	0,13	0,06	0,08	0,05	0,21	0,06	0,16	0,05
Kepler-1185	0,07	0,07	-0,03	0,06	0,1	0,05	0,19	0,06	0,17	0,05
Kepler-384	-0,23	0,07	-0,27	0,06	-0,24	0,05	-0,24	0,06	-0,16	0,05
Kepler-1547	0,1	0,07	0,02	0,06	0,12	0,05	0,1	0,06	0,08	0,05
Kepler-1572	-0,34	0,07	-0,41	0,06	-0,33	0,05	-0,32	0,06	-0,25	0,05
Kepler-746	0,01	0,07	0,01	0,06	0,08	0,05	0,14	0,06	0,07	0,05
Kepler-1300	-0,15	0,07	-0,3	0,06	-0,16	0,05	-0,08	0,06	-0,09	0,05
Kepler-1285	0,14	0,07	0,05	0,06	0,17	0,05	0,25	0,06	0,2	0,05
Kepler-534	0,04	0,07	-0,08	0,06	-0,02	0,05	0,09	0,06	0,04	0,05
Kepler-162	0,04	0,07	-0,04	0,06	0,01	0,05	0,0	0,06	0,07	0,05
Kepler-387	-0,25	0,07	-0,43	0,06	-0,31	0,05	-0,28	0,06	-0,29	0,05
Kepler-1055	-0,14	0,07	-0,25	0,06	-0,04	0,05	0,03	0,06	-0,08	0,05
Kepler-251	-0,12	0,07	-0,23	0,06	-0,19	0,05	-0,14	0,06	-0,06	0,05
Kepler-1027	-0,09	0,07	-0,23	0,06	-0,02	0,05	-0,02	0,06	-0,09	0,05
Kepler-1224	0,11	0,07	0,01	0,06	0,11	0,05	0,21	0,06	0,12	0,05
Kepler-373	0,05	0,07	-0,05	0,06	-0,05	0,05	0,08	0,06	0,05	0,05
Kepler-1288	-0,1	0,07	-0,5	0,06	-0,02	0,05	0,21	0,06	0,04	0,05
Kepler-215	-0,41	0,07	-0,36	0,06	-0,38	0,05	-0,4	0,06	-0,37	0,05
Kepler-59	-0,27	0,07	-0,31	0,06	-0,21	0,05	-0,25	0,06	-0,16	0,05
Kepler-907	-0,32	0,07	-0,55	0,06	-0,33	0,05	-0,24	0,06	-0,16	0,05
Kepler-208	-0,04	0,07	-0,19	0,06	0,02	0,05	0,01	0,06	-0,04	0,05
Kepler-105	-0,1	0,07	-0,19	0,06	-0,08	0,05	-0,08	0,06	-0,09	0,05
Kepler-1619	-0,16	0,07	-0,21	0,06	-0,13	0,05	-0,15	0,06	-0,08	0,05
Kepler-1445	-0,095	0,07	-0,235	0,06	-0,065	0,05	-0,025	0,06	-0,05	0,05
Kepler-206	0,01	0,005	-0,07	0,045	0,03	0,015	0,01	0,005	0,0	0,0
Kepler-1240	0,23	0,07	0,18	0,06	0,23	0,05	0,26	0,06	0,22	0,05
Kepler-84	-0,1	0,07	-0,35	0,06	-0,0	0,05	-0,04	0,06	0,0	0,05
Kepler-1514	0,14	0,07	0,01	0,06	0,165	0,05	0,215	0,06	0,175	0,05
Kepler-908	0,16	0,01	0,16	0,05	0,17	0,025	0,36	0,045	0,3	0,005
Kepler-129	0,16	0,07	0,11	0,06	0,17	0,05	0,21	0,06	0,17	0,05
Kepler-374	0,16	0,07	0,12	0,06	0,09	0,05	0,15	0,06	0,16	0,05
Kepler-1408	-0,11	0,07	-0,3	0,06	-0,08	0,05	-0,02	0,06	-0,05	0,05
Kepler-404	-0,17	0,07	-0,29	0,06	-0,18	0,05	-0,12	0,06	-0,17	0,05
Kepler-1617	-0,11	0,07	-0,25	0,06	-0,13	0,05	-0,07	0,06	-0,06	0,05
Kepler-1393	-0,22	0,07	-0,3	0,06	-0,21	0,05	-0,14	0,06	-0,16	0,05

Continua

Tabela C.2 – Continuação

hostname	[Mg/H]	$e_{\text{Mg}/\text{H}}$	[Al/H]	$e_{\text{Al}/\text{H}}$	[Si/H]	$e_{\text{Si}/\text{H}}$	[Ca/H]	$e_{\text{Ca}/\text{H}}$	[Ti/H]	$e_{\text{Ti}/\text{H}}$
Kepler-1385	0,24	0,07	0,24	0,06	0,26	0,05	0,27	0,06	0,22	0,05
Kepler-647	-0,28	0,07	-0,58	0,06	-0,31	0,05	-0,25	0,06	-0,19	0,05
Kepler-301	0,08	0,07	-0,05	0,06	0,08	0,05	0,11	0,06	0,1	0,05
Kepler-1598	0,01	0,07	-0,12	0,06	-0,05	0,05	0,02	0,06	-0,03	0,05
Kepler-1440	0,1	0,07	0,04	0,06	0,09	0,05	0,18	0,06	0,09	0,05
Kepler-1338	0,15	0,07	0,1	0,06	0,15	0,05	0,15	0,06	0,12	0,05
Kepler-1012	0,09	0,07	-0,01	0,06	0,12	0,05	0,15	0,06	0,12	0,05
Kepler-1417	-0,22	0,07	-0,31	0,06	-0,25	0,05	-0,22	0,06	-0,11	0,05
Kepler-1264	-0,21	0,07	-0,38	0,06	-0,09	0,05	-0,16	0,06	-0,18	0,05
Kepler-1311	-0,01	0,07	-0,08	0,06	-0,01	0,05	0,05	0,06	0,04	0,05
Kepler-653	0,24	0,07	0,22	0,06	0,22	0,05	0,21	0,06	0,23	0,05
Kepler-1464	0,02	0,07	-0,06	0,06	-0,0	0,05	0,07	0,06	0,02	0,05
Kepler-997	0,01	0,07	-0,06	0,06	0,03	0,05	0,04	0,06	0,03	0,05
Kepler-1047	0,21	0,07	0,17	0,06	0,22	0,05	0,21	0,06	0,18	0,05
Kepler-1278	0,03	0,07	-0,07	0,06	0,07	0,05	0,11	0,06	0,11	0,05
Kepler-520	-0,11	0,07	-0,37	0,06	-0,16	0,05	-0,11	0,06	-0,07	0,05
Kepler-1590	-0,27	0,07	-0,3	0,06	-0,28	0,05	-0,28	0,06	-0,22	0,05
Kepler-399	-0,115	0,07	-0,23	0,06	-0,18	0,05	-0,13	0,06	-0,165	0,05
Kepler-334	-0,03	0,015	-0,15	0,06	-0,04	0,02	0,03	0,03	-0,04	0,035
Kepler-1156	-0,22	0,07	-0,35	0,06	-0,23	0,05	-0,25	0,06	-0,18	0,05
Kepler-1169	0,19	0,07	0,1	0,06	0,19	0,05	0,3	0,06	0,22	0,05
Kepler-132	-0,2	0,07	-0,41	0,06	-0,19	0,05	-0,19	0,06	-0,19	0,05
Kepler-1588	-0,11	0,07	-0,03	0,06	-0,13	0,05	-0,12	0,06	0,01	0,05
Kepler-238	0,25	0,07	0,28	0,06	0,22	0,05	0,29	0,06	0,2	0,05
Kepler-1067	0,14	0,07	0,05	0,06	0,08	0,05	0,17	0,06	0,16	0,05
Kepler-1253	-0,24	0,07	-0,31	0,06	-0,23	0,05	-0,25	0,06	-0,12	0,05
Kepler-157	-0,08	0,07	-0,2	0,06	-0,07	0,05	-0,01	0,06	-0,11	0,05
Kepler-393	-0,04	0,07	-0,34	0,06	-0,03	0,05	0,14	0,06	0,18	0,05
Kepler-380	-0,13	0,07	-0,39	0,06	-0,09	0,05	-0,08	0,06	-0,07	0,05
Kepler-775	-0,06	0,07	-0,14	0,06	-0,07	0,05	-0,07	0,06	-0,07	0,05
Kepler-1473	-0,055	0,07	-0,145	0,06	-0,045	0,05	-0,01	0,06	-0,02	0,05
Kepler-381	-0,13	0,005	-0,66	0,055	-0,11	0,005	-0,04	0,01	0,07	0,0
Kepler-1276	-0,09	0,07	-0,22	0,06	-0,04	0,05	-0,06	0,06	-0,06	0,05
Kepler-363	0,29	0,07	0,27	0,06	0,29	0,05	0,35	0,06	0,3	0,05
Kepler-603	0,26	0,07	0,2	0,06	0,25	0,05	0,41	0,06	0,32	0,05
Kepler-134	-0,17	0,07	-0,33	0,06	-0,2	0,05	-0,16	0,06	-0,16	0,05
Kepler-402	-0,05	0,07	-0,21	0,06	-0,13	0,05	-0,03	0,06	-0,01	0,05
Kepler-1365	0,03	0,07	-0,02	0,06	0,01	0,05	0,1	0,06	0,07	0,05
Kepler-312	0,09	0,07	-0,15	0,06	0,1	0,05	0,23	0,06	0,2	0,05
Kepler-1084	-0,06	0,07	-0,17	0,06	-0,05	0,05	0,04	0,06	0,03	0,05
Kepler-1395	0,05	0,07	-0,06	0,06	0,26	0,05	0,11	0,06	0,18	0,05
Kepler-1235	0,05	0,07	0,01	0,06	0,02	0,05	0,0	0,06	0,04	0,05
Kepler-20	0,02	0,07	-0,08	0,06	0,055	0,05	0,055	0,06	0,015	0,05
Kepler-226	0,0	0,01	-0,02	0,03	-0,01	0,015	0,05	0,015	-0,02	0,005
Kepler-1563	0,18	0,07	0,13	0,06	0,15	0,05	0,25	0,06	0,19	0,05
Kepler-1525	0,18	0,07	0,09	0,06	0,22	0,05	0,21	0,06	0,2	0,05
Kepler-107	0,23	0,07	0,23	0,06	0,22	0,05	0,27	0,06	0,21	0,05
Kepler-882	-0,05	0,07	-0,11	0,06	-0,04	0,05	-0,03	0,06	-0,07	0,05
Kepler-85	0,0	0,07	-0,12	0,06	-0,0	0,05	0,0	0,06	-0,01	0,05
Kepler-1425	0,02	0,07	0,08	0,06	-0,04	0,05	0,0	0,06	0,1	0,05
Kepler-507	0,145	0,07	-0,01	0,06	0,14	0,05	0,175	0,06	0,13	0,05
Kepler-605	-0,06	0,015	-0,05	0,04	-0,05	0,0	-0,04	0,015	-0,01	0,02
Kepler-295	-0,08	0,07	-0,17	0,06	-0,14	0,05	-0,01	0,06	-0,05	0,05
Kepler-97	-0,18	0,07	-0,28	0,06	-0,18	0,05	-0,16	0,06	-0,185	0,05

Tabela C.3 - Abundâncias [X/H] (para X = V, Cr, Mn, Ni e Y e seus respectivos erros) dos 15 elementos da amostra final de estudo com 160 anos F-G, advindos do catálogo Hypatia

hostname	[V/H]	e _{V/H}	[Cr/H]	e _{Cr/H}	[Mn/H]	e _{Mn/H}	[Ni/H]	e _{Ni/H}	[Y/H]	e _{Y/H}
hostname	[V/H]	V_err	[Cr/H]	Cr_err	[Mn/H]	Mn_err	[Ni/H]	Ni_err	[Y/H]	Y_err
Kepler-212	0,09	0,07	0,18	0,045	0,12	0,056	0,21	0,05	0,23	0,085
Kepler-1424	0,22	0,07	0,09	0,045	-0,17	0,056	0,0	0,05	0,21	0,085
Kepler-1141	0,12	0,07	0,08	0,045	-0,02	0,056	0,13	0,05	0,07	0,085
Kepler-310	-0,2	0,07	-0,17	0,045	-0,45	0,056	-0,21	0,05	-0,04	0,085
Kepler-362	0,1	0,07	-0,19	0,045	-0,4	0,056	-0,24	0,05	-0,24	0,085
Kepler-1352	-0,26	0,07	-0,26	0,045	-0,48	0,056	-0,27	0,05	-0,32	0,085
Kepler-22	-0,215	0,035	-0,29	0,02	-0,525	0,005	-0,3	0,01	-0,25	0,04
Kepler-36	-0,09	0,04	-0,16	0,02	-0,51	0,01	-0,21	0,0	-0,19	0,03
Kepler-150	0,34	0,07	0,24	0,045	-0,54	0,056	0,88	0,05	0,12	0,085
Kepler-338	-0,06	0,07	-0,03	0,045	-0,19	0,056	-0,05	0,05	0,03	0,085
Kepler-1082	-0,15	0,07	-0,15	0,045	-0,46	0,056	-0,16	0,05	-0,12	0,085
Kepler-286	-0,36	0,07	-0,36	0,045	-0,42	0,056	-0,32	0,05	-0,03	0,085
Kepler-376	-0,24	0,07	-0,17	0,045	-0,41	0,056	-0,16	0,05	-0,24	0,085
Kepler-282	-0,28	0,07	-0,2	0,045	-0,5	0,056	-0,16	0,05	-0,13	0,085
Kepler-1328	0,03	0,07	-0,08	0,045	-0,3	0,056	-0,05	0,05	0,0	0,085
Kepler-406	0,25	0,03	0,19	0,02	0,1	0,02	0,25	0,01	0,195	0,055
Kepler-466	0,17	0,07	0,02	0,045	-0,18	0,056	-0,08	0,05	0,05	0,085
Kepler-197	-0,15	0,07	-0,41	0,045	-0,75	0,056	-0,44	0,05	-0,49	0,085
Kepler-431	-0,1	0,07	-0,07	0,045	-0,37	0,056	-0,09	0,05	-0,09	0,085
Kepler-23	-0,15	0,07	-0,13	0,045	-0,36	0,056	-0,13	0,05	-0,16	0,085
Kepler-403	-0,04	0,07	0,03	0,045	-0,1	0,056	0,06	0,05	0,09	0,085
Kepler-804	-0,08	0,07	-0,07	0,045	-0,26	0,056	-0,08	0,05	-0,12	0,085
Kepler-1581	0,075	0,07	0,085	0,045	-0,08	0,056	0,095	0,05	0,135	0,085
Kepler-1406	0,05	0,025	-0,14	0,025	-0,37	0,0	-0,31	0,005	-0,08	0,015
Kepler-144	0,17	0,07	-0,1	0,045	-0,52	0,056	-0,18	0,05	-0,02	0,085
K2-265	0,12	0,07	0,05	0,045	-0,06	0,056	0,07	0,05	0,06	0,085
Kepler-1587	0,075	0,07	0,085	0,045	0,01	0,056	0,115	0,05	0,105	0,085
Kepler-1332	-0,06	0,045	-0,1	0,055	-0,34	0,02	-0,11	0,035	-0,1	0,005
Kepler-135	-0,01	0,07	-0,02	0,045	-0,34	0,056	-0,15	0,05	0,02	0,085
Kepler-1248	0,32	0,07	0,22	0,045	0,09	0,056	0,22	0,05	0,24	0,085
Kepler-1398	-0,2	0,07	-0,11	0,045	-0,3	0,056	-0,07	0,05	-0,16	0,085
Kepler-173	-0,16	0,07	0,08	0,045	-0,21	0,056	0,02	0,05	0,15	0,085
Kepler-1412	-0,02	0,07	-0,07	0,045	-0,37	0,056	-0,14	0,05	-0,1	0,085
Kepler-1139	0,29	0,07	0,3	0,045	0,23	0,056	0,31	0,05	0,15	0,085
Kepler-1312	0,02	0,07	0,07	0,045	-0,16	0,056	-0,07	0,05	0,13	0,085
Kepler-130	-0,07	0,07	-0,11	0,045	-0,36	0,056	-0,11	0,05	-0,14	0,085
Kepler-299	0,15	0,07	-0,0	0,045	-0,1	0,056	0,02	0,05	-0,04	0,085
Kepler-1601	0,1	0,07	-0,02	0,045	-0,21	0,056	0,05	0,05	0,09	0,085
K2-38	0,22	0,07	0,22	0,045	0,22	0,056	0,28	0,05	0,16	0,085
Kepler-1258	-0,15	0,07	-0,4	0,045	-0,73	0,056	-0,31	0,05	-0,24	0,085
Kepler-887	0,18	0,07	0,13	0,045	-0,2	0,056	0,02	0,05	0,14	0,085
Kepler-1568	0,125	0,07	0,135	0,045	0,075	0,056	0,185	0,05	0,13	0,085
Kepler-348	-0,93	0,025	-0,03	0,015	-0,35	0,005	-0,16	0,005	0,05	0,0
Kepler-392	-0,09	0,07	-0,41	0,045	-0,72	0,056	-0,43	0,05	-0,6	0,085
Kepler-1576	0,21	0,07	0,2	0,045	0,06	0,056	0,17	0,05	0,27	0,085
Kepler-1117	0,19	0,07	0,19	0,045	0,09	0,056	0,14	0,05	0,03	0,085
Kepler-1199	-0,01	0,07	-0,41	0,045	-0,78	0,056	-0,45	0,05	-0,57	0,085
Kepler-10	-0,11	0,07	-0,19	0,045	-0,49	0,056	-0,19	0,05	-0,19	0,085
Kepler-336	0,33	0,07	0,23	0,045	0,18	0,056	0,2	0,05	0,17	0,085
Kepler-831	-0,14	0,07	-0,13	0,045	-0,27	0,056	-0,14	0,05	-0,1	0,085
Kepler-183	0,11	0,07	0,05	0,045	0,02	0,056	0,14	0,05	0,09	0,085

Continua

Tabela C.3 – Continuação

hostname	[V/H]	$e_{V/H}$	[Cr/H]	$e_{Cr/H}$	[Mn/H]	$e_{Mn/H}$	[Ni/H]	$e_{Ni/H}$	[Y/H]	$e_{Y/H}$
Kepler-625	0,15	0,07	0,15	0,045	0,09	0,056	0,19	0,05	0,11	0,085
Kepler-1213	-0,18	0,07	-0,1	0,045	-0,4	0,056	-0,15	0,05	-0,17	0,085
Kepler-271	-0,12	0,07	-0,275	0,045	-0,505	0,056	-0,26	0,05	-0,215	0,085
Kepler-1507	-0,03	0,07	-0,0	0,015	-0,17	0,015	-0,06	0,0	0,26	0,015
Kepler-1505	-0,22	0,07	-0,32	0,045	-0,56	0,056	-0,32	0,05	-0,43	0,085
Kepler-1130	0,105	0,07	0,085	0,045	0,0	0,056	0,105	0,05	0,085	0,085
Kepler-115	0,14	0,015	-0,03	0,005	-0,26	0,0	-0,06	0,005	0,09	0,025
Kepler-1542	0,11	0,07	-0,01	0,045	-0,19	0,056	0,04	0,05	-0,05	0,085
Kepler-192	0,2	0,07	0,22	0,045	0,18	0,056	0,26	0,05	0,1	0,085
Kepler-783	-0,13	0,07	-0,11	0,045	-0,24	0,056	-0,11	0,05	-0,08	0,085
Kepler-1560	0,2	0,07	0,2	0,045	0,13	0,056	0,17	0,05	0,17	0,085
Kepler-806	-0,16	0,07	-0,26	0,045	-0,57	0,056	-0,27	0,05	-0,23	0,085
Kepler-101	0,29	0,07	0,28	0,045	0,18	0,056	0,37	0,05	0,28	0,085
Kepler-1193	0,07	0,07	0,05	0,045	-0,03	0,056	0,08	0,05	0,05	0,085
Kepler-826	-0,06	0,07	-0,3	0,045	-0,66	0,056	-0,39	0,05	-0,36	0,085
Kepler-1607	-0,09	0,07	-0,04	0,045	-0,2	0,056	0,04	0,05	0,1	0,085
Kepler-524	0,02	0,07	-0,02	0,045	-0,14	0,056	-0,02	0,05	-0,04	0,085
Kepler-285	0,13	0,07	0,14	0,045	-0,04	0,056	0,08	0,05	0,05	0,085
Kepler-743	0,06	0,07	0,04	0,045	-0,14	0,056	-0,01	0,05	0,14	0,085
Kepler-136	0,14	0,07	0,08	0,045	-0,08	0,056	0,04	0,05	0,03	0,085
Kepler-1035	0,17	0,07	0,12	0,045	-0,02	0,056	0,16	0,05	0,17	0,085
Kepler-1185	0,09	0,07	0,15	0,045	-0,01	0,056	0,14	0,05	0,08	0,085
Kepler-384	-0,19	0,07	-0,38	0,045	-0,78	0,056	-0,34	0,05	-0,33	0,085
Kepler-1547	0,13	0,07	0,1	0,045	0,03	0,056	0,13	0,05	0,2	0,085
Kepler-1572	-0,29	0,07	-0,35	0,045	-0,76	0,056	-0,42	0,05	-0,35	0,085
Kepler-746	0,13	0,07	0,03	0,045	-0,04	0,056	0,04	0,05	0,02	0,085
Kepler-1300	-0,19	0,07	-0,17	0,045	-0,44	0,056	-0,15	0,05	-0,17	0,085
Kepler-1285	0,19	0,07	0,2	0,045	0,0	0,056	0,18	0,05	0,28	0,085
Kepler-534	-0,05	0,07	0,03	0,045	-0,2	0,056	0,02	0,05	0,14	0,085
Kepler-162	0,15	0,07	0,07	0,045	-0,09	0,056	0,07	0,05	0,14	0,085
Kepler-387	-0,08	0,07	-0,31	0,045	-0,55	0,056	-0,3	0,05	-0,48	0,085
Kepler-1055	-0,02	0,07	-0,01	0,045	-0,19	0,056	-0,12	0,05	0,09	0,085
Kepler-251	-0,22	0,07	-0,13	0,045	-0,32	0,056	-0,14	0,05	-0,11	0,085
Kepler-1027	-0,07	0,07	-0,06	0,045	-0,22	0,056	-0,09	0,05	0,04	0,085
Kepler-1224	0,04	0,07	0,12	0,045	0,14	0,056	0,17	0,05	0,07	0,085
Kepler-373	-0,07	0,07	0,07	0,045	-0,19	0,056	0,0	0,05	0,21	0,085
Kepler-1288	-0,1	0,07	0,02	0,045	-0,28	0,056	-0,11	0,05	0,09	0,085
Kepler-215	-0,23	0,07	-0,55	0,045	-0,86	0,056	-0,53	0,05	-0,59	0,085
Kepler-59	-0,31	0,07	-0,21	0,045	-0,53	0,056	-0,28	0,05	-0,28	0,085
Kepler-907	-0,11	0,07	-0,28	0,045	-0,72	0,056	-0,32	0,05	-0,31	0,085
Kepler-208	-0,21	0,07	-0,02	0,045	-0,11	0,056	0,02	0,05	-0,05	0,085
Kepler-105	-0,05	0,07	-0,1	0,045	-0,36	0,056	-0,15	0,05	-0,03	0,085
Kepler-1619	-0,04	0,07	-0,32	0,045	-0,7	0,056	-0,25	0,05	-0,28	0,085
Kepler-1445	-0,1	0,07	-0,105	0,045	-0,365	0,056	-0,125	0,05	-0,06	0,085
Kepler-206	0,08	0,14	-0,0	0,005	-0,14	0,045	0,03	0,005	-0,05	0,03
Kepler-1240	0,24	0,07	0,25	0,045	0,24	0,056	0,31	0,05	0,21	0,085
Kepler-84	-0,02	0,07	-0,09	0,045	-0,34	0,056	-0,1	0,05	-0,01	0,085
Kepler-1514	0,155	0,07	0,185	0,045	0,06	0,056	0,215	0,05	0,15	0,085
Kepler-908	0,44	0,015	0,3	0,005	0,15	0,05	0,23	0,005	0,24	0,01
Kepler-129	0,15	0,07	0,19	0,045	0,2	0,056	0,26	0,05	0,16	0,085
Kepler-374	0,16	0,07	0,13	0,045	0,0	0,056	0,19	0,05	0,16	0,085
Kepler-1408	-0,1	0,07	-0,03	0,045	-0,34	0,056	-0,09	0,05	-0,01	0,085
Kepler-404	-0,16	0,07	-0,1	0,045	-0,29	0,056	-0,17	0,05	0,1	0,085
Kepler-1617	-0,03	0,07	-0,12	0,045	-0,44	0,056	-0,14	0,05	-0,13	0,085
Kepler-1393	0,06	0,07	-0,21	0,045	-0,47	0,056	-0,31	0,05	-0,02	0,085
Kepler-1385	0,22	0,07	0,28	0,045	0,26	0,056	0,33	0,05	0,26	0,085
Kepler-647	-0,2	0,07	-0,31	0,045	-0,66	0,056	-0,32	0,05	-0,4	0,085

Continua

Tabela C.3 – Continuação

hostname	[V/H]	$e_{V/H}$	[Cr/H]	$e_{Cr/H}$	[Mn/H]	$e_{Mn/H}$	[Ni/H]	$e_{Ni/H}$	[Y/H]	$e_{Y/H}$
Kepler-301	0,15	0,07	0,12	0,045	0,01	0,056	0,14	0,05	0,15	0,085
Kepler-1598	0,02	0,07	0,04	0,045	-0,13	0,056	-0,02	0,05	0,19	0,085
Kepler-1440	0,11	0,07	0,14	0,045	0,05	0,056	0,16	0,05	0,09	0,085
Kepler-1338	0,12	0,07	0,15	0,045	0,12	0,056	0,21	0,05	0,17	0,085
Kepler-1012	0,13	0,07	0,1	0,045	0,06	0,056	0,13	0,05	0,1	0,085
Kepler-1417	-0,2	0,07	-0,29	0,045	-0,68	0,056	-0,25	0,05	0,21	0,085
Kepler-1264	-0,18	0,07	-0,15	0,045	-0,46	0,056	-0,24	0,05	-0,08	0,085
Kepler-1311	0,0	0,07	0,03	0,045	-0,15	0,056	0,0	0,05	0,01	0,085
Kepler-653	0,25	0,07	0,23	0,045	0,19	0,056	0,29	0,05	0,15	0,085
Kepler-1464	-0,01	0,07	0,03	0,045	-0,22	0,056	0,02	0,05	0,01	0,085
Kepler-997	0,09	0,07	0,08	0,045	-0,13	0,056	0,05	0,05	0,19	0,085
Kepler-1047	0,19	0,07	0,19	0,045	0,14	0,056	0,28	0,05	0,09	0,085
Kepler-1278	0,1	0,07	0,05	0,045	-0,16	0,056	0,08	0,05	0,13	0,085
Kepler-520	-0,14	0,07	-0,13	0,045	-0,39	0,056	-0,15	0,05	-0,05	0,085
Kepler-1590	-0,17	0,07	-0,31	0,045	-0,53	0,056	-0,31	0,05	-0,41	0,085
Kepler-399	-0,16	0,07	-0,145	0,045	-0,36	0,056	-0,2	0,05	-0,075	0,085
Kepler-334	-0,11	0,02	-0,02	0,015	-0,19	0,1	-0,03	0,03	0,0	0,055
Kepler-1156	-0,19	0,07	-0,25	0,045	-0,44	0,056	-0,24	0,05	-0,2	0,085
Kepler-1169	0,21	0,07	0,24	0,045	0,16	0,056	0,26	0,05	0,33	0,085
Kepler-132	-0,13	0,07	-0,24	0,045	-0,48	0,056	-0,24	0,05	-0,28	0,085
Kepler-1588	-0,04	0,07	-0,26	0,045	-0,6	0,056	-0,17	0,05	-0,26	0,085
Kepler-238	0,22	0,07	0,29	0,045	0,17	0,056	0,36	0,05	0,13	0,085
Kepler-1067	0,17	0,07	0,18	0,045	0,03	0,056	0,14	0,05	0,22	0,085
Kepler-1253	-0,01	0,07	-0,37	0,045	-0,81	0,056	-0,33	0,05	-0,36	0,085
Kepler-157	-0,03	0,07	-0,07	0,045	-0,25	0,056	-0,05	0,05	-0,16	0,085
Kepler-393	0,14	0,07	0,1	0,045	-0,03	0,056	0,01	0,05	0,07	0,085
Kepler-380	0,01	0,07	-0,14	0,045	-0,38	0,056	-0,16	0,05	-0,12	0,085
Kepler-775	-0,02	0,07	-0,11	0,045	-0,22	0,056	-0,09	0,05	-0,18	0,085
Kepler-1473	-0,085	0,07	-0,04	0,045	-0,23	0,056	-0,04	0,05	-0,04	0,085
Kepler-381	0,08	0,035	-0,08	0,01	-0,46	0,03	-0,16	0,0	-0,15	0,02
Kepler-1276	-0,07	0,07	-0,06	0,045	-0,36	0,056	-0,08	0,05	-0,03	0,085
Kepler-363	0,3	0,07	0,35	0,045	0,37	0,056	0,43	0,05	0,33	0,085
Kepler-603	0,27	0,07	0,37	0,045	0,24	0,056	0,35	0,05	0,35	0,085
Kepler-134	-0,12	0,07	-0,18	0,045	-0,43	0,056	-0,24	0,05	-0,11	0,085
Kepler-402	-0,27	0,07	-0,03	0,045	-0,33	0,056	-0,09	0,05	-0,05	0,085
Kepler-1365	0,02	0,07	0,06	0,045	-0,08	0,056	0,05	0,05	0,05	0,085
Kepler-312	0,3	0,07	0,22	0,045	0,11	0,056	0,21	0,05	0,1	0,085
Kepler-1084	-0,18	0,07	0,02	0,045	-0,29	0,056	-0,08	0,05	-0,02	0,085
Kepler-1395	0,2	0,07	0,07	0,045	-0,12	0,056	0,05	0,05	0,14	0,085
Kepler-1235	0,05	0,07	-0,03	0,045	-0,2	0,056	0,03	0,05	-0,05	0,085
Kepler-20	0,065	0,07	0,02	0,045	-0,115	0,056	0,025	0,05	0,08	0,085
Kepler-226	-0,02	0,015	0,08	0,0	-0,18	0,015	-0,02	0,005	-0,08	0,01
Kepler-1563	0,2	0,07	0,19	0,045	0,12	0,056	0,17	0,05	0,24	0,085
Kepler-1525	0,35	0,07	0,16	0,045	0,19	0,056	0,23	0,05	0,11	0,085
Kepler-107	0,16	0,07	0,25	0,045	0,22	0,056	0,35	0,05	0,33	0,085
Kepler-882	-0,37	0,07	-0,01	0,045	-0,17	0,056	-0,13	0,05	-0,04	0,085
Kepler-85	0,01	0,07	0,04	0,045	-0,1	0,056	0,01	0,05	0,07	0,085
Kepler-1425	0,03	0,07	-0,12	0,045	-0,47	0,056	-0,06	0,05	-0,09	0,085
Kepler-507	0,22	0,07	0,185	0,045	0,055	0,056	0,185	0,05	0,205	0,085
Kepler-605	0,0	0,1	-0,01	0,025	-0,12	0,005	-0,03	0,005	-0,04	0,015
Kepler-295	-0,02	0,07	-0,04	0,045	-0,16	0,056	-0,02	0,05	0,02	0,085
Kepler-97	-0,175	0,07	-0,2	0,045	-0,455	0,056	-0,235	0,05	-0,07	0,085

PUBLICAÇÕES TÉCNICO-CIENTÍFICAS EDITADAS PELO INPE

Teses e Dissertações (TDI)

Teses e Dissertações apresentadas nos Cursos de Pós-Graduação do INPE.

Manuais Técnicos (MAN)

São publicações de caráter técnico que incluem normas, procedimentos, instruções e orientações.

Notas Técnico-Científicas (NTC)

Incluem resultados preliminares de pesquisa, descrição de equipamentos, descrição e ou documentação de programas de computador, descrição de sistemas e experimentos, apresentação de testes, dados, atlas, e documentação de projetos de engenharia.

Relatórios de Pesquisa (RPQ)

Reportam resultados ou progressos de pesquisas tanto de natureza técnica quanto científica, cujo nível seja compatível com o de uma publicação em periódico nacional ou internacional.

Propostas e Relatórios de Projetos (PRP)

São propostas de projetos técnico-científicos e relatórios de acompanhamento de projetos, atividades e convênios.

Publicações Didáticas (PUD)

Incluem apostilas, notas de aula e manuais didáticos.

Publicações Seriadas

São os seriados técnico-científicos: boletins, periódicos, anuários e anais de eventos (simpósios e congressos). Contam destas publicações o Internacional Standard Serial Number (ISSN), que é um código único e definitivo para identificação de títulos de seriados.

Programas de Computador (PDC)

São a seqüência de instruções ou códigos, expressos em uma linguagem de programação compilada ou interpretada, a ser executada por um computador para alcançar um determinado objetivo. Aceitam-se tanto programas fonte quanto os executáveis.

Pré-publicações (PRE)

Todos os artigos publicados em periódicos, anais e como capítulos de livros.