



Universidade Federal do Rio de Janeiro
Centro de Ciências Matemáticas e da Natureza
Observatório do Valongo



Diagnóstico detalhado de linhas de absorção em estrelas gêmeas do Sol

Francielle Maria Antonio Silva

Rio de Janeiro
Dezembro de 2024

Diagnóstico detalhado de linhas de absorção em estrelas gêmeas do Sol

Francielle Maria Antonio Silva

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao Observatório do Valongo, Universidade Federal do Rio de Janeiro, como requisito necessário para a obtenção do título de Astrônomo.

Orientador: Gustavo F. Porto de Mello

Rio de Janeiro
Dezembro de 2024

CIP - Catalogação na Publicação

M635d Maria Antonio Silva, Francielle
 Diagnóstico Detalhado de Linhas de Absorção em
Estrelas Gêmeas do Sol. / Francielle Maria Antonio
Silva. -- Rio de Janeiro, 2024.
 133 f.

 Orientador: Gustavo F. Porto de Mello.
 Trabalho de conclusão de curso (graduação) -
Universidade Federal do Rio de Janeiro, Observatório
do Valongo, Bacharel em Astronomia, 2024.

 1. Gêmeas solares. 2. Espectroscopia . 3. Linhas
espectrais . I. F. Porto de Mello, Gustavo, orient.
II. Título.



PROJETO FINAL

RELATÓRIO DA COMISSÃO JULGADORA

ALUNA: Francielle Maria Antônio Silva (DRE 118117969)

TÍTULO DO TRABALHO: “DIAGNÓSTICO DETALHADO DE LINHAS DE ABSORÇÃO EM ESTRELAS GÊMEAS DO SOL”

DATA DA DEFESA: 17 de dezembro de 2024 às 13:00 h

MEMBROS DA COMISSÃO JULGADORA:

Documento assinado digitalmente
gov.br GUSTAVO FREDERICO PORTO DE MELLO
Data: 08/01/2025 11:32:59-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Gustavo F. Porto de Mello – Presidente/Orientador – OV/UFRJ

Documento assinado digitalmente
gov.br LETICIA DUTRA FERREIRA
Data: 08/01/2025 11:54:20-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dr^a. Leticia Dutra Ferreira – CAp/UERJ

Documento assinado digitalmente
gov.br ALINE RAMOS RIBEIRO
Data: 11/01/2025 12:45:42-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dr^a. Aline Novais – Universidade de Lund

Documento assinado digitalmente
gov.br LUAN GHEZZI FERREIRA PINHO
Data: 10/01/2025 13:02:51-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dr. Luan Ghezzi – OV/UFRJ

Documento assinado digitalmente
gov.br FRANCIELLE MARIA ANTONIO SILVA
Data: 11/01/2025 18:22:41-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

CANDIDATA:

Francielle Maria Antônio Silva

Rio de Janeiro, 17 de dezembro de 2024.

Prof. Carlos Roberto Rabaça
Coord. de Grad. do Curso de Astronomia

Dedico este trabalho ao meu avô Agenor Antônio, que sempre me perguntava se eu já havia feito amigos na faculdade e se eu conhecia as fases da Lua. Vô, fiz amizades que levarei para toda a vida, e o que mais gostaria era poder compartilhar, pela última vez, os ciclos da Lua com o senhor.

Agradecimentos

Primeiramente, agradeço imensamente à minha mãe, a pessoa mais essencial para que eu chegasse até aqui. Mãe, obrigada por sempre me incentivar, apoiar, acalmar e ser o meu porto seguro em todos os momentos da minha vida.

À minha família, especialmente aos meus primos, que me apresentaram Carl Sagan e foram os primeiros a me apoiar na escolha de seguir a astronomia. Ao meu pai, avó, tias e tios, que estiveram ao meu lado em todas as etapas, amo muito vocês. Agradeço também em memória ao meu avô Manoel e à minha avó Marina, que, embora não estejam mais aqui, continuam presentes em meu coração.

Agradeço à minha gatinha Mia e ao meu cachorrinho Sirius, que estiveram ao meu lado como companhia em diversos momentos e sempre foram uma fonte constante de amor, aconchego e descontração.

Ao meu companheiro, Alisson, que esteve ao meu lado em tantos momentos. Obrigada por sempre me ajudar e apoiar em tudo, desde a correção de um código em Python até os abraços nos momentos de ansiedade.

Agradeço à Cida, a primeira pessoa que me acolheu no Rio de Janeiro, e, nos primeiros momentos, me apresentou à sua família, tratando-me como uma filha. Jamais me esquecerei de todo carinho e acolhimento.

Aos meus amigos de longa data, Alyne e Pedro Henrique, por todas as histórias compartilhadas ao longo de uma década. Às amizades que fiz no BCMT, que levarei para sempre comigo, em especial à Carolina Bento e à Eduarda, que estiveram comigo desde o início dessa jornada. E às amizades que a astronomia me trouxe: Maria Clara, Ana Clara, Jezebel e Caroline Gonçalves. Sem dúvida, a melhor parte da graduação foi ter conhecido cada uma de vocês, que se tornaram minha verdadeira família no Rio de Janeiro, sempre presentes e me oferecendo apoio nos momentos mais importantes.

Ao meu orientador, Gustavo Frederico Porto de Mello, por sua orientação, paciência e apoio ao longo dessa jornada. Sua experiência e dedicação foram fundamentais para a realização deste trabalho.

Ao Observatório do Valongo, por me oferecer oportunidades valiosas de aprendizado e por todo o suporte técnico e científico ao longo do percurso. À Universidade Federal do Rio de Janeiro, por me proporcionar o conhecimento necessário, permitindo meu crescimento acadêmico e pessoal. E a todos os professores que contribuíram para minha formação, sou muito grata pelos conhecimentos compartilhados.

"Nosso planeta é um espécime solitário na grande e envolvente escuridão cósmica. Na nossa obscuridade, em toda essa vastidão, não há nenhum indício que ajuda possa vir de outro lugar para nos salvar de nós mesmos. A Terra é o único mundo conhecido até agora que sustenta vida. Não há lugar nenhum, pelo menos no futuro próximo, no qual nossa espécie possa migrar. Visitar, talvez, se estabelecer, ainda não. Goste ou não, por enquanto, a Terra é onde estamos estabelecidos. Foi dito que a astronomia é uma experiência que traz humildade e constrói o caráter. Talvez, não haja melhor demonstração das tolices e vaidades humanas que essa imagem distante do nosso pequeno mundo. Ela enfatiza nossa responsabilidade de tratarmos melhor uns aos outros, e de preservar e estimar o único lar que nós conhecemos... o pálido ponto azul."

Carl Sagan, O Pálido Ponto Azul (1996)

Resumo

Diagnóstico detalhado de linhas de absorção em estrelas gêmeas do Sol

Francielle Maria Antonio Silva

Orientador: Gustavo F. Porto de Mello

RESUMO DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO SUBMETIDO AO OBSERVATÓRIO DO VALONGO, UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO, COMO REQUISITO NECESSÁRIO PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE ASTRÔNOMO.

Gêmeas solares são estrelas que compartilham semelhanças significativas com o Sol em propriedades físicas como massa, temperatura, composição química, idade, luminosidade, gravidade e campos magnéticos. Essas estrelas têm grande relevância astrobiológica, pois podem abrigar planetas semelhantes à Terra e oferecer condições favoráveis ao desenvolvimento da vida. Além disso, a análise da evolução de gêmeas solares é essencial para compreender a evolução do Sol e avaliar sua representatividade em relação à população estelar local. Neste trabalho, realizamos uma seleção criteriosa de linhas espectrais em 22 candidatas a gêmeas solares, utilizando dados obtidos com o espectrógrafo ESO/FEROS (European Southern Observatory / Fiber-fed Extended Range Optical Spectrograph), que oferece alta resolução ($R = 47.000$) e excelente relação sinal/ruído ($S/R \geq 350$). A análise foi realizada com medições automáticas por meio do software IRAF, levando em consideração parâmetros como a largura equivalente, a largura à meia altura e a profundidade das linhas. Como resultado, foi possível refinar uma lista de linhas espectrais com alta confiabilidade, descartando aquelas suscetíveis a contaminações ou inconsistências instrumentais, o que contribuiu para maior precisão nos resultados. Além disso, identificamos espectros semelhantes ao do Sol, utilizando linhas de Fe I, o elemento com o maior número de linhas disponíveis, e conseguimos confirmar resultados anteriores sobre o status de algumas análogas solares e candidatas a gêmeas solares, como HD 71334, HD 88072, HD 98649, HD 138573, HD 146233, HD 164595 e BD+15 3364, sendo que pela primeira vez propomos as estrelas HD 8291 e HD 216436 como possíveis análogas solares. Esta lista de linhas espectrais é uma base para investigações futuras, com a aplicação de modelos atmosféricos e síntese espectral.

palavras chave: *espectroscopia, gêmeas solares, linhas espectrais, análise estatística*

Rio de Janeiro

Dezembro de 2024

Abstract

Detailed Diagnosis of Absorption Lines in Solar Twin Stars

Francielle Maria Antonio Silva

Advisor: Gustavo F. Porto de Mello

ABSTRACT SUBMITTED TO THE VALONGO OBSERVATORY, FEDERAL UNIVERSITY OF RIO DE JANEIRO,
IN FULFILLMENT OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF ASTRONOMER.

Solar twins are stars that share significant similarities with the Sun in physical properties such as mass, temperature, chemical composition, age, luminosity, gravity, and magnetic fields. These stars have great astrobiological relevance as they may host Earth-like planets and offer favorable conditions for the development of life. Moreover, analyzing the evolution of solar twins is essential to understanding the Sun's evolution and assessing its representativeness within the local stellar population. In this study, we conducted a careful selection of spectral lines in 22 candidates for solar twins, using data obtained with the ESO/FEROS spectrograph (European Southern Observatory / Fiber-fed Extended Range Optical Spectrograph), which provides high resolution ($R = 47,000$) and excellent signal-to-noise ratio ($S/N \geq 350$). The analysis was performed using automatic measurements with the IRAF software, taking into account parameters such as equivalent width, full width at half maximum, and line depth. As a result, we were able to refine a list of spectral lines with high reliability, discarding those susceptible to contamination or instrumental inconsistencies, which contributed to greater accuracy in the results. Additionally, we identified spectra similar to the Sun using Fe I lines, the element with the largest number of available lines, and confirmed previous findings about the status of some solar analogs and solar twin candidates, such as HD 71334, HD 88072, HD 98649, HD 138573, HD 146233, HD 164595, and BD+15 3364. For the first time, we propose the stars HD 8291 and HD 216436 as possible solar analogs. This list of spectral lines serves as a foundation for future investigations, with the application of atmospheric models and spectral synthesis.

keywords: *spectroscopy, solar twins, spectral lines, statistical analysis*

Rio de Janeiro

December 2024

Lista de Figuras

2.1	Definição geométrica da largura equivalente (LE)	25
2.2	Representação geométrica dos conceitos de profundidade e FWHM	26
2.3	Curva de crescimento para a linha K de Ca II. A largura equivalente (LE) varia com o aumento de N_a , e em diferentes pontos da curva. Os três regimes são representados. Na figura, W corresponde à largura equivalente. Figura adaptada de Aller (1963); Carroll & Ostlie (1996).	30
2.4	Exemplo do arquivo cursor para Ganimedes	32
2.5	Exemplo do arquivo de saída <i>splot.log</i> para Ganimedes	32
3.1	Teste de FWHM/ λ vs. LE para Ganimedes (medição automática)	36
3.2	Teste de FWHM/ λ vs. LE para Ganimedes (medição manual)	37
3.3	Teste de FWHM/ λ vs. LE para HD 6512 - Iteração 1	38
3.4	Teste de FWHM/ λ vs. LE para HD 6512 - Iteração 2	38
3.5	Teste de FWHM/ λ vs. LE para HD 6512 - Iteração 3	39
3.6	Teste de FWHM/ λ vs. LE para HD 6512 - Iteração 4	39
3.7	Teste de FWHM/ λ vs. LE para HD 6512 - Última iteração	40
3.8	Teste de FWHM/ λ vs. LE para HD 28471 - Iteração 1	40
3.9	Teste de FWHM/ λ vs. LE para HD 28471 - Iteração 2	41
3.10	Teste de FWHM/ λ vs. LE para HD 28471 - Iteração 3	41
3.11	Teste de FWHM/ λ vs. LE para HD 28471 - Iteração 4	42
3.12	Teste de FWHM/ λ vs. LE para HD 28471 - Última iteração	42
3.13	Teste de FWHM/ λ vs. LE para HD 8291 - fevereiro	43
3.14	Teste de FWHM/ λ vs. LE para HD 8291 - setembro	43
3.15	Teste de FWHM/ λ vs. LE para HD 12264	44
3.16	Teste de FWHM/ λ vs. LE para HD 32963	44
3.17	Teste de FWHM/ λ vs. LE para HD 66653	45
3.18	Teste de FWHM/ λ vs. LE para HD 8168	45
3.19	Teste de FWHM/ λ vs. LE para HD 71334	46
3.20	Teste de FWHM/ λ vs. LE para HD 88072	46
3.21	Teste de FWHM/ λ vs. LE para HD 98649 - agosto	47
3.22	Teste de FWHM/ λ vs. LE para HD 98649 - fevereiro	47
3.23	Teste de FWHM/ λ vs. LE para HD 117939	48
3.24	Teste de FWHM/ λ vs. LE para HD 118598	48
3.25	Teste de FWHM/ λ vs. LE para HD 138573	49
3.26	Teste de FWHM/ λ vs. LE para HD 140690	49
3.27	Teste de FWHM/ λ vs. LE para HD 146233 - agosto 01	50
3.28	Teste de FWHM/ λ vs. LE para HD 146233 - agosto 99	50
3.29	Teste de FWHM/ λ vs. LE para HD 150248	51

3.30	Teste de FWHM/ λ vs. LE para HD 159656	51
3.31	Teste de FWHM/ λ vs. LE para HD 164595	52
3.32	Teste de FWHM/ λ vs. LE para HD 207043	52
3.33	Teste de FWHM/ λ vs. LE para HD 216436	53
3.34	Teste de FWHM/ λ vs. LE para HD 221343	53
3.35	Teste de FWHM/ λ vs. LE para BD+153364	54
3.36	Teste de profundidade vs LE/ λ para Ganimedes.	55
3.37	Resíduo (diferença) entre a profundidade prevista e observada para todo o regime de LEs para Ganimedes.	56
3.38	Ajuste linear de profundidade vs. LE/ λ para Ganimedes, com destaque para linhas fracas (LE/ λ < 0,014)	57
3.39	Teste de profundidade vs LE/ λ para Ganimedes: Linhas com LE/ λ < 0,014.	58
3.40	Teste de profundidade vs LE/ λ para Ganimedes: Linhas com LE/ λ > 0,014.	58
3.41	Teste do resíduo da profundidade prevista menos a observada para Ganimedes	59
3.42	Teste do resíduo da profundidade prevista menos a observada para HD 6512	59
3.43	Teste do resíduo da profundidade prevista menos a observada para HD 8291 - fevereiro	59
3.44	Teste do resíduo da profundidade prevista menos a observada para HD 8291 - setembro	60
3.45	Teste do resíduo da profundidade prevista menos a observada para HD 12264	60
3.46	Teste do resíduo da profundidade prevista menos a observada para HD 28471	60
3.47	Teste do resíduo da profundidade prevista menos a observada para HD 32963	61
3.48	Teste do resíduo da profundidade prevista menos a observada para HD 66653	61
3.49	Teste do resíduo da profundidade prevista menos a observada para HD 68168	61
3.50	Teste do resíduo da profundidade prevista menos a observada para HD 71334	62
3.51	Teste do resíduo da profundidade prevista menos a observada para HD 88072	62
3.52	Teste do resíduo da profundidade prevista menos a observada para HD 98649 - agosto	62
3.53	Teste do resíduo da profundidade prevista menos a observada para HD 98649 - fevereiro	63
3.54	Teste do resíduo da profundidade prevista menos a observada para HD 117939 com quebra em 0.014	63
3.55	Teste do resíduo da profundidade prevista menos a observada para HD 117939 com quebra em 0.012	64
3.56	Teste do resíduo da profundidade prevista menos a observada para HD 118598	64

3.57	Teste do resíduo da profundidade prevista menos a observada para HD 138573	64
3.58	Teste do resíduo da profundidade prevista menos a observada para HD 140690	65
3.59	Teste do resíduo da profundidade prevista menos a observada para HD 146233 - agosto 01	65
3.60	Teste do resíduo da profundidade prevista menos a observada para HD 146233 - agosto 99	65
3.61	Teste do resíduo da profundidade prevista menos a observada para HD 150248	66
3.62	Teste do resíduo da profundidade prevista menos a observada para HD 159656	66
3.63	Teste do resíduo da profundidade prevista menos a observada para HD 164595	66
3.64	Teste do resíduo da profundidade prevista menos a observada para HD 207043	67
3.65	Teste do resíduo da profundidade prevista menos a observada para HD 216436	67
3.66	Teste do resíduo da profundidade prevista menos a observada para HD 221343	67
3.67	Teste do resíduo da profundidade prevista menos a observada para BD+153364	68
3.68	Análise das linhas de Fe I: LE para HD 6512	70
3.69	Análise das linhas de Fe I: FWHM para HD 6512	70
3.70	Análise das linhas de Fe I: Profundidade para HD 6512	71
3.71	Análise das linhas de Fe I: LE para HD 8291 - fevereiro	71
3.72	Análise das linhas de Fe I: FWHM para HD 8291 - fevereiro	72
3.73	Análise das linhas de Fe I: Profundidade para HD 8291 - fevereiro	72
3.74	Análise das linhas de Fe I: LE para HD 8291 - setembro	73
3.75	Análise das linhas de Fe I: FWHM para HD 8291 - setembro	73
3.76	Análise das linhas de Fe I: Profundidade para HD 8291 - setembro	74
3.77	Análise das linhas de Fe I: LE para HD 12264	74
3.78	Análise das linhas de Fe I: FWHM para HD 12264	75
3.79	Análise das linhas de Fe I: Profundidade para HD 12264	75
3.80	Análise das linhas de Fe I: LE para HD 28471	76
3.81	Análise das linhas de Fe I: FWHM para HD 28471	76
3.82	Análise das linhas de Fe I: Profundidade para HD 28471	77
3.83	Análise das linhas de Fe I: LE para HD 32963	77
3.84	Análise das linhas de Fe I: FWHM para HD 32963	78
3.85	Análise das linhas de Fe I: Profundidade para HD 32963	78
3.86	Análise das linhas de Fe I: LE para HD 66653	79
3.87	Análise das linhas de Fe I: FWHM para HD 66653	79
3.88	Análise das linhas de Fe I: Profundidade para HD 66653	80
3.89	Análise das linhas de Fe I: LE para HD 68168	80
3.90	Análise das linhas de Fe I: FWHM para HD 68168	81
3.91	Análise das linhas de Fe I: Profundidade para HD 68168	81
3.92	Análise das linhas de Fe I: LE para HD 71334	82
3.93	Análise das linhas de Fe I: FWHM para HD 71334	82

3.94	Análise das linhas de Fe I: Profundidade para HD 71334	83
3.95	Análise das linhas de Fe I: LE para HD 88072	83
3.96	Análise das linhas de Fe I: FWHM para HD 88072	84
3.97	Análise das linhas de Fe I: Profundidade para HD 88072	84
3.98	Análise das linhas de Fe: LE para HD 98649 - agosto	85
3.99	Análise das linhas de Fe I: FWHM para HD 98649 - agosto	85
3.100	Análise das linhas de Fe I: Profundidade para HD 98649 - agosto	86
3.101	Análise das Linhas de Ferro I: LE para HD 98649 - fevereiro	86
3.102	Análise das linhas de Fe I: FWHM para HD 98649 - fevereiro	87
3.103	Análise das linhas de Fe I: Profundidade para HD 98649 - fevereiro	87
3.104	Análise das linhas de Fe I: LE para HD 117939	88
3.105	Análise das linhas de Fe I: FWHM para HD 117939	88
3.106	Análise das linhas de Fe I: Profundidade para HD 117939	89
3.107	Análise das linhas de Fe I: LE para HD 118598	89
3.108	Análise das linhas de Fe I: FWHM para HD 118598	90
3.109	Análise das linhas de Fe I: Profundidade para HD 118598	90
3.110	Análise das linhas de Fe I: LE para HD 138573	91
3.111	Análise das linhas de Fe I: FWHM para HD 138573	91
3.112	Análise das linhas de Fe I: Profundidade para HD 138573	92
3.113	Análise das linhas de Fe I: LE para HD 140690	92
3.114	Análise das linhas de Fe I: FWHM para HD 140690	93
3.115	Análise das linhas de Fe I: Profundidade para HD 140690	93
3.116	Análise das linhas de Fe I: LE para HD 146233 - agosto 01	94
3.117	Análise das linhas de Fe I: FWHM para HD 146233 - agosto 01	94
3.118	Análise das linhas de Fe I: Profundidade para HD 146233 - agosto 01	95
3.119	Análise das linhas de Fe I: LE para HD 146233 - agosto 99	95
3.120	Análise das linhas de Fe I: FWHM para HD 146233 - agosto 99	96
3.121	Análise das linhas de Fe I: Profundidade para HD 146233 - agosto 99	96
3.122	Análise das linhas de Fe I: LE para HD 150248	97
3.123	Análise das linhas de Fe I: FWHM para HD 150248	97
3.124	Análise das linhas de Fe I: Profundidade para HD 150248	98
3.125	Análise das linhas de Fe I: LE para HD HD 159656	98
3.126	Análise das linhas de Fe I: FWHM para HD 159656	99
3.127	Análise das linhas de Fe I: Profundidade para HD 159656	99
3.128	Análise das linhas de Fe I: LE para HD 164595	100
3.129	Análise das linhas de Fe I: FWHM para HD 164595	100
3.130	Análise das linhas de Fe I: Profundidade para HD 164595	101
3.131	Análise das linhas de Fe I: LE para HD 207043	101
3.132	Análise das linhas de Fe I: FWHM para HD 207043	102
3.133	Análise das linhas de Fe I: Profundidade para HD 207043	102
3.134	Análise das linhas de Fe I: LE para HD 216436	103
3.135	Análise das linhas de Fe I: FWHM para HD 216436	103
3.136	Análise das linhas de Fe I: Profundidade para HD 216436	104
3.137	Análise das linhas de Fe I: LE para HD 221343	104
3.138	Análise das linhas de Fe I: FWHM para HD 221343	105
3.139	Análise das linhas de Fe I: Profundidade para HD 221343	105
3.140	Análise das linhas de Fe I: LE para BD+15 3364	106

3.141	Análise das linhas de Fe I: FWHM para BD+15 3364	106
3.142	Análise das linhas de Fe I: Profundidade para BD+15 3364	107
4.1	Histograma mostra a média de FWHM ($\times 10^{-5}$) em função da temperatura efetiva média (T_{eff}) para cada espectro. As barras de erro indicam o desvio padrão das medições.	110

Lista de Tabelas

2.1	Relação sinal/ruído dos espectros observados por Di Bartolo (2005), entre Agosto de 1999 e Setembro de 2001. A coluna HD refere-se ao identificador HD do objeto, enquanto a coluna S/R mostra o sinal ruído de cada espectro.	23
4.1	Resultados da média, desvio-padrão (SD), número de linhas (N) e erro da média para FWHM	110
4.2	Resultados dos gráficos de LE, FWHM e profundidade	119
A.1	Linhas espectrais eliminadas da amostra, com a identificação do elemento químico (Id), espécie de ionização (Chi) e a frequência de eliminação nos espectros.	127

Abreviações

FEROS	<i>Fiber-fed Extended Range Optical Spectrograph</i>
ESO	<i>European Southern Observatory</i>
DRS	<i>Data Reduction Software</i>
IRAF	<i>Reduction and Analysis Facility</i>
LE	<i>Equivalent Width</i> (Largura equivalente)
FWHM	<i>Full Width at Half Maximum</i> (Largura à meia altura)
Prof.	Profundidade da linha espectral
EHF	Estrutura hiperfina
λ	Comprimento de onda (lambda)
SD	Desvio padrão
R	Coefficiente de correlação

Sumário

1	Introdução	17
2	Medida das Linhas Espectrais	22
2.1	Observações e Reduções	22
2.2	Formação das Linhas Espectrais	24
2.3	Largura Equivalente	25
2.4	Mecanismos de Alargamento	26
2.5	Curva de Crescimento	29
2.6	Estrutura Hiperfina	30
2.7	Procedimentos de Medição	31
3	Diagnóstico das Linhas Espectrais	34
3.1	Diagnóstico 1: Relação entre FWHM/ λ e LE	34
3.2	Diagnóstico 2: Relação entre Profundidade e LE/ λ	54
3.2.1	Análise Estatística	68
3.3	Comparação Direta das Linhas do Fe I: LE, Profundidade e FWHM	69
4	Resultados e Discussões	108
4.1	Análise de FWHM/ λ	108
4.2	Buscando Espectros Semelhantes ao do Sol	111
5	Conclusões e Perspectivas	122
	Referências Bibliográficas	124
A	Linhas Eliminadas	126

Capítulo 1

Introdução

Uma das questões mais fascinantes na astrofísica estelar é a busca por estrelas que sejam semelhantes ao Sol. Cayrel De Strobel et al. (1981) já antecipavam a complexidade dessa busca, questionando se seria possível encontrar, em nossa Galáxia, estrelas com características praticamente idênticas às da nossa estrela. A analogia com a busca por seres humanos idênticos é pertinente: embora compartilhem características genéticas, cada indivíduo é único. Assim como a diversidade genética dos seres humanos é moldada por uma combinação de fatores, a singularidade de uma estrela é determinada por sua massa, composição química, idade, trajetória evolutiva e outras variáveis. Pequenas mudanças nesses parâmetros podem resultar em diferenças significativas em suas características.

Desde os trabalhos pioneiros de Cayrel de Strobel & Bentolila (1989); Friel et al. (1993), a distinção entre estrelas análogas e gêmeas solares tornou-se um aspecto fundamental nessa busca. Imagine as estrelas análogas como primas do Sol, que compartilham algumas características, como o tom de pele, a cor dos olhos e o formato do rosto, mas que possuem diferenças marcantes em altura, peso ou personalidade. Já as gêmeas solares são como gêmeas idênticas ou irmãos muito parecidos, compartilhando um conjunto de características praticamente equivalentes. Estrelas análogas solares são aquelas que apresentam parâmetros como temperatura efetiva, metalicidade, gravidade superficial e cores fotométricas semelhantes aos do Sol. Em contrapartida, gêmeas solares são estrelas que compartilham todos os parâmetros astrofísicos fundamentais, incluindo massa, temperatura, composição química, idade, luminosidade, gravidade, velocidade de microturbulência e campos magnéticos, dentro das margens de incerteza da análise (Porto de

Mello et al., 2014).

A busca por gêmeas solares vai além da simples identificação de estrelas idênticas ao Sol. Essas estrelas atuam como fósseis estelares, oferecendo pistas cruciais sobre a formação e evolução de estrelas e planetas. Ao estudá-las, podemos investigar a origem do nosso Sol, sua evolução ao longo do tempo e as transformações que ocorrerão no futuro. Imagine encontrar uma gêmea solar que tenha bilhões de anos a mais que o Sol; isso seria como ter uma máquina do tempo, proporcionando uma visão do que está por vir para o nosso Sistema Solar. Ao analisar essas estrelas mais antigas, obtemos informações valiosas sobre os possíveis caminhos que o nosso Sol poderá seguir, incluindo sua transição para uma gigante vermelha e as implicações para os planetas que o orbitam (Monroe et al., 2013; do Nascimento Jr. et al., 2013).

Além das revelações sobre a evolução estelar, as gêmeas solares também desempenham um papel significativo na calibração de instrumentos astronômicos. Embora a proximidade e o brilho intenso do Sol tornem difícil a determinação precisa de suas cores, as gêmeas solares, com parâmetros físicos bem caracterizados, oferecem um ponto de referência estável para essas calibrações (Porto de Mello et al., 2014).

A importância das gêmeas solares se estende ainda mais ao campo da astrobiologia, que busca responder algumas das questões mais fundamentais da humanidade: O que é a vida? Estamos sozinhos no universo? O estudo dessas estrelas nos proporciona uma compreensão mais profunda sobre onde localizar ambientes que possam ser favoráveis à vida. Os sistemas planetários que orbitam gêmeas solares são alvos promissores na busca por zonas habitáveis, regiões onde as condições permitem a presença de água líquida na superfície de um planeta, um elemento essencial para a vida tal como a conhecemos. Além disso, a análise da composição atmosférica de exoplanetas em torno dessas estrelas pode revelar bioassinaturas, que são moléculas indicativas de processos biológicos. Como as gêmeas solares compartilham características astrofísicas semelhantes às do Sol, elas oferecem uma oportunidade única para investigar sistemas planetários que se assemelham ao nosso, aumentando as chances de descobrir condições propícias à existência de vida. Entretanto, a astrobiologia abrange mais do que a simples busca por novos mundos habitáveis. O estudo desses ambientes é crucial para revelar as condições que possibilitaram a vida na Terra e para expandir nosso entendimento sobre os fatores que tornam um planeta habitável. Além disso, em um cenário em que as mudanças climáticas e outras ameaças ameaçam a habitabilidade do nosso planeta, compreender

esses locais pode se tornar fundamental para a sobrevivência da humanidade.

O trabalho de Hardorp (1978) marcou o início da busca por estrelas semelhantes ao Sol, servindo de base para muitas pesquisas subsequentes. Nesse estudo, e em investigações seguintes, o autor comparou espectros refletidos por satélites de Júpiter e do céu com espectros ultravioleta de resolução de 20 Å, Hardorp destacou essa faixa espectral como especialmente sensível a parâmetros atmosféricos, como temperatura, gravidade e metalicidade. A partir desse levantamento, ele classificou os objetos em três categorias: (1) indistinguíveis, (2) potencialmente iguais e (3) muito próximos ao solar.

Essa pesquisa inicial inspirou investigações mais aprofundadas, como a realizada por Cayrel De Strobel et al. (1981), que questionaram a eficácia dos levantamentos que utilizam espectros com baixa resolução para identificar estrelas gêmeas solares, especialmente após uma análise espectroscópica mais detalhada. A autora analisou em placas fotográficas os melhores objetos da lista de Hardorp e concluiu que nenhum deles poderia ser considerado gêmeo do Sol devido a diferenças significativas nos parâmetros. Estudos subsequentes (Cayrel de Strobel & Bentolila, 1989; Friel et al., 1993) com espectros de melhor qualidade, identificaram a estrela HD 44594 como a mais semelhante ao Sol, embora com maior metalicidade, e mostraram que as estrelas HD 186408 e HD 186427 possuem temperaturas e metalicidades próximas às do Sol, mas são mais evoluídas e menos ativas.

A continuidade dessa linha de investigação levou à descoberta da primeira gêmea solar confirmada, HD 146233 (18 do Escorpião), por Porto de Mello & da Silva (1997). Nesse estudo, os autores verificaram que essa estrela apresenta parâmetros atmosféricos, como temperatura efetiva, microturbulência, abundância de ferro, gravidade superficial e atividade magnética, muito próximos aos do Sol. Embora atualmente a 18 do Escorpião (18 Sco) ainda apresente algumas diferenças em idade cromosférica, idade sismológica e abundância de lítio, ela continua sendo considerada a gêmea solar mais próxima do Terra, localizada a aproximadamente 46 anos-luz.

A descoberta da 18 Sco como a primeira gêmea solar confirmou a importância de estudar estrelas com características semelhantes ao Sol. Em continuidade a essa pesquisa, Meléndez et al. (2012) identificaram a estrela HD 101364 como uma gêmea solar ainda mais similar ao Sol, devido à sua correspondência exata nos parâmetros atmosféricos e à sua abundância de lítio, que é igual à do Sol. Da mesma forma, Galarza et al. (2016) confirmaram a estrela HD 195034 como uma gêmea solar, cuja abundância

de lítio segue uma excelente correlação com a idade observada, conforme sugerido na literatura. A presença de lítio é importante porque indica as características da zona convectiva superficial da estrela, onde o lítio é rapidamente destruído a temperaturas baixas ($\sim 10^6$ K). Esse processo pode estar ligado à rotação da estrela e à profundidade dessa zona, que variam conforme a massa e a composição química da estrela. Portanto, analisar a abundância de lítio é essencial para identificar gêmeas solares e entender sua semelhança com o Sol.

Com o objetivo de ampliar a busca por análogas e gêmeas solares, Porto de Mello et al. (2014) realizaram um levantamento fotométrico e espectroscópico de estrelas até 50 parsecs do Sol. Esse estudo revelou diversas análogas solares desconhecidas e dez novas candidatas a gêmeas solares. Estes autores utilizaram um novo índice de semelhança fotométrica, desenvolvido com base em quatro cores fotométricas, que se mostrou altamente eficaz na seleção de estrelas com parâmetros atmosféricos semelhantes aos do Sol. As melhores candidatas foram submetidas a uma análise espectroscópica preliminar, que possibilitou a determinação de seus parâmetros atmosféricos, massas e idades, fortalecendo ainda mais o campo de estudo das gêmeas solares.

A partir dos resultados obtidos em 2014, consideramos essencial aprofundar o estudo das candidatas identificadas. A disponibilidade de dados de alta resolução espectral, juntamente com a análise realizada por Di Bartolo (2005) com base nesses espectros, estabelece uma base sólida para a realização de investigações mais detalhadas e precisas. Nesse contexto, o objetivo deste trabalho é realizar uma seleção mais rigorosa das linhas espectrais a partir dos dados de Di Bartolo (2005), aplicando de maneira mais completa a expectativa teórica da física de formação dessas linhas, aliada ao aprimoramento do conhecimento sobre o funcionamento dos espectrógrafos de alta dispersão. Esse processo visa produzir uma lista de linhas livres de contaminação por outras transições, com perfil fotométrico preciso e isenta de artefatos instrumentais originados durante a observação e a redução dos dados.

A nova lista de linhas poderá servir como base para estudos futuros, nos quais a síntese espectral será realizada com o auxílio de modelos atmosféricos mais avançados. Esses avanços serão fundamentais para aprofundar o entendimento sobre as gêmeas solares e fortalecer o campo da astrofísica estelar.

Esta monografia está organizada da seguinte forma: no Capítulo 2, apresentamos o processo de observação e redução dos espectros, a medição das linhas espectrais e a teoria

relacionada às linhas espectrais. No Capítulo 3, abordamos os diagnósticos realizados para garantir que apenas as linhas saudáveis da amostra fossem mantidas, além de uma comparação direta entre as estrelas e o Sol usando apenas as linhas de Fe I. Por fim, no Capítulo 4, apresentamos os resultados e as discussões, nos quais analisamos os gráficos e destacamos as estrelas com maior semelhança ao Sol.

Capítulo 2

Medida das Linhas Espectrais

2.1 Observações e Reduções

Neste trabalho, utilizamos os dados espectrais de alta resolução descritos por Di Bartolo (2005) com o espectrógrafo FEROS (*Fiber-fed Extended Range Optical Spectrograph*), instalado no telescópio de 1,52 m do ESO. Este espectrógrafo é amplamente reconhecido por sua elevada estabilidade e eficiência, alcançando uma resolução de $R = 48.000$ e uma alta relação sinal/ruído ($S/R \geq 350$). Foram observadas 22 estrelas, das quais três foram observadas de forma repetida em duas missões distintas (Tabela 2.1). Assim, o total de espectros avaliados soma 26, incluindo o Sol, representado pelo espectro refletido do satélite de Júpiter, Ganimedes. Todos os objetos foram observados em 2001, exceto HD 88084, obtido em dezembro de 1999, e um dos espectros de HD 146233, obtido em agosto de 1999. Esses dados foram empregados para comparar os espectros e investigar a estabilidade entre as missões.

No processo de redução dos espectros FEROS, Di Bartolo (2005) utilizou espectros que foram reduzidos automaticamente pelo aplicativo ESO-MIDAS (*European Southern Observatory Munich Image Data Analysis System*), através de um script denominado DRS (*Data Reduction Software*). Após essa fase inicial, a correção do desvio Doppler e a normalização do contínuo foram realizadas utilizando tarefas do aplicativo IRAF (*Image Reduction and Analysis Facility*). A normalização do contínuo é necessária para medir a área das linhas espectrais e obter as larguras equivalentes nas análises. Devido à ampla cobertura em comprimento de onda dos espectros FEROS, que variam de 3560 Å a 9200 Å, optou-se por dividi-los em 8 regiões menores que se adequassem melhor ao processo de normalização (a partir deste ponto, a palavra região será utilizada para

designar essas seções em pedaços menores do espectro de grande cobertura). A divisão levou em conta a presença de linhas espectrais de interesse, evitando áreas contaminadas por linhas telúricas e aquelas com perfis muito largos, que introduzem dificuldades particulares na normalização. Para lidar com as descontinuidades no contínuo resultantes da colagem das ordens echelle na redução online do FEROS, as regiões foram subdivididas em partes menores. Dessa forma, áreas problemáticas foram excluídas e normalizadas separadamente, descartando seções curtas que estavam comprometidas. Na tabela 2.1, estão listados os objetos analisados, juntamente com seus respectivos valores de sinal/ruído. Vale ressaltar que as estrelas que aparecem duas vezes na tabela referem-se àquelas observadas em missões distintas.

TABELA 2.1. Relação sinal/ruído dos espectros observados por Di Bartolo (2005), entre Agosto de 1999 e Setembro de 2001. A coluna HD refere-se ao identificador HD do objeto, enquanto a coluna S/R mostra o sinal ruído de cada espectro.

HD*	S/R
(Sol)	510
(BD+15 3364)	450
6512	550
8291 – FEV 01	340
8291 – SET 01	400
12264	470
28471	350
32963	450
66653	610
68168	470
71334	540
88072	440
98649 – FEV 01	380
98649 – AGO 01	330
117939	530
118598	490
138573	490
140690	180
146233 – AGO 99	490

Continuação da Tabela 2.1

HD*	S/R
146233 – AGO 01	370
150248	500
159656	470
164595	440
207043	510
216436	420
221343	420

*Os objetos indicados entre parênteses não possuem identificação HD: o Sol e a estrela BD+15 3364

2.2 Formação das Linhas Espectrais

No núcleo de estrelas de baixa massa, ocorrem algumas reações nucleares, sendo a dominante a cadeia próton-próton, onde núcleos de hidrogênio se combinam para formar hélio, liberando uma grande quantidade de energia térmica. Essa energia se propaga em direção à superfície da estrela, atravessando várias camadas internas. À medida que a radiação se move para fora, ela interage com os átomos e íons presentes na atmosfera estelar. Quando a luz passa por essa região, os elétrons nos átomos podem absorver fótons com energias específicas, que correspondem às diferenças entre seus níveis de energia. Esse processo resulta na remoção de fótons de certos comprimentos de onda do feixe contínuo de radiação, criando as chamadas linhas espectrais de absorção.

Os átomos excitados podem se desexcitar, retornando a níveis de energia mais baixos e emitindo fótons com energias específicas. No entanto, esses fótons emitidos não necessariamente seguem a mesma direção dos absorvidos e, em alguns casos, podem contribuir para a formação de linhas de emissão. Como os níveis de energia dos átomos dependem do número atômico e do estado de ionização, diferentes elementos e seus respectivos estados de ionização absorvem e emitem fótons em comprimentos de onda únicos. As linhas espectrais resultantes apresentam uma ampla variedade de formas e intensidades, cujos perfis são fundamentalmente influenciados pelas condições físicas da

atmosfera estelar, como temperatura, pressão e densidade. Além disso, as probabilidades intrínsecas de ocorrência das transições eletrônicas e as concentrações químicas dos elementos presentes também desempenham um papel importante.

2.3 Largura Equivalente

Na maioria das situações, os espectros estelares não possuem resolução suficiente para permitir uma análise minuciosa dos perfis das linhas espectrais. Por essa razão, os dados são frequentemente extraídos a partir das intensidades das linhas, que são calculadas por meio das larguras equivalentes (LE). Matematicamente podemos definir LE como:

$$LE = \frac{1}{F_c} \int_0^\infty (F_c - F_v) dv \quad (2.1)$$

Sendo F_c o fluxo do contínuo e F_v o fluxo na linha. No entanto, como estamos utilizando espectros normalizados, onde $F_c = 1$, a expressão da largura equivalente se simplifica para:

$$LE = \int_0^\infty (1 - F_v) dv \quad (2.2)$$

O valor de $1 - F_c$ representa a profundidade da linha espectral em um determinado ponto no gráfico. Ao integrar essa profundidade ao longo de todos os comprimentos de onda da linha, obtemos a área total da linha espectral. A interpretação geométrica desse conceito pode ser visualizada na Figura 2.1.

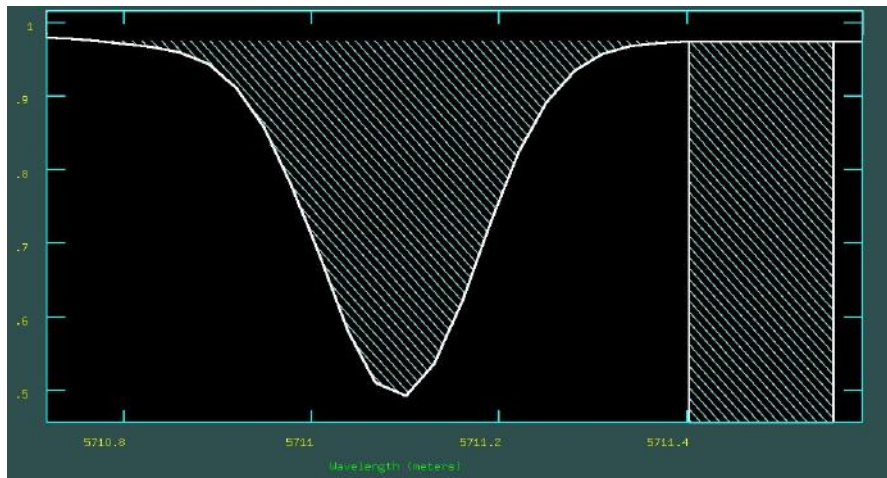


FIGURA 2.1. Representação de uma linha de Ganimedes, obtido a partir do software IRAF. O eixo x representa o comprimento de onda da luz, enquanto o eixo y representa o fluxo. À direita, está ilustrada a definição de largura equivalente (LE), onde a área do retângulo hachurado é equivalente à área sobre a curva da Gaussiana.

Considerando que a área sobre a linha de absorção pode ser representada por um retângulo perfeito, sua altura corresponderia à intensidade do contínuo (que é igual a 1, uma vez que o espectro está normalizado). A área desse retângulo seria exatamente igual à área da linha de absorção original, sendo essa área denominada como largura equivalente. Além disso, podemos observar outras duas grandezas na Figura 2.2: a largura a meia altura (FWHM) e a profundidade da linha de absorção. Esses parâmetros serão fundamentais nos capítulos seguintes.

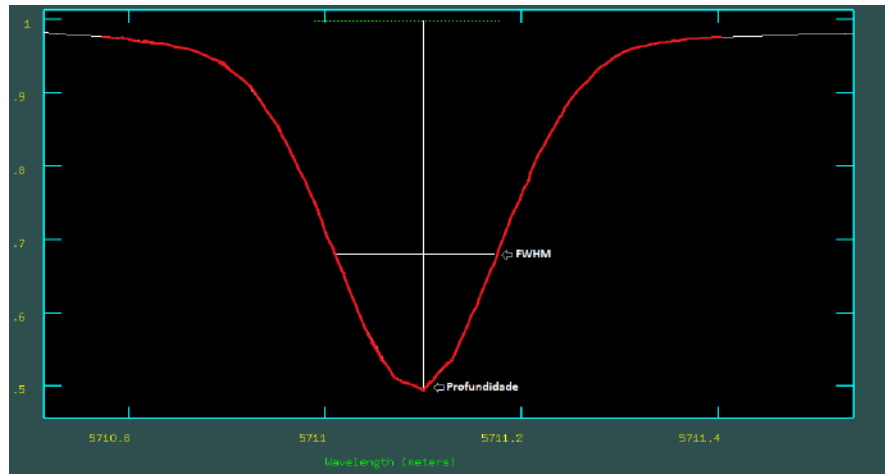


FIGURA 2.2. Representação dos conceitos de profundidade da linha e largura à meia altura (FWHM).

2.4 Mecanismos de Alargamento

O alargamento de linhas espectrais é um fenômeno em que o perfil de uma linha, que representa a variação de intensidade ou fluxo em função do comprimento de onda ou da frequência, surge alargado devido à presença de um coeficiente de absorção característico. Em vez de aparecerem como traços nítidos e bem definidos, essas linhas espectrais apresentam contornos mais amplos e atenuados. Esse alargamento ocorre devido a uma série de fatores físicos e pode ser entendido como resultado da interação das condições físicas da estrela com os átomos que compõem sua atmosfera. Os principais mecanismos que causam o alargamento das linhas espectrais são:

- **Alargamento Natural:** Esse fenômeno ocorre devido à interação entre átomos, moléculas ou íons com a radiação eletromagnética, durante as transições entre seus níveis de energia. O alargamento está relacionado ao Princípio da Incerteza de Heisenberg, que estabelece que é impossível determinar simultaneamente com precisão a energia e o tempo de uma transição de um sistema quântico. A relação

entre a incerteza na energia (ΔE) e o tempo (Δt) em que uma transição ocorre é dada pela fórmula:

$$\Delta E \cdot \Delta t \geq \frac{\hbar}{2} \quad (2.3)$$

Onde \hbar é a constante de Planck reduzida. Isso significa que, quanto mais curta for a duração da transição, maior será a incerteza na energia associada à transição. Como a transição não ocorre de maneira instantânea, a energia do fóton emitido ou absorvido não é exatamente definida, mas sim distribuída em torno de um valor central. Esse efeito resulta no alargamento da linha espectral, ou seja, a linha, ao invés de ter uma posição bem definida, apresenta uma largura devido à incerteza associada à sua energia.

- **Alargamento Doppler:** O alargamento ocorre quando os átomos ou íons na atmosfera estelar estão em movimento. Quando essas partículas se movem em direção ao observador, o comprimento de onda da radiação emitida ou absorvida é comprimido (desvio para o azul). Por outro lado, quando as partículas se afastam, o comprimento de onda se estende (desvio para o vermelho). Esse fenômeno, conhecido como efeito Doppler, é o mesmo fenômeno que ocorre com o som de uma sirene, que parece mais agudo quando se aproxima e mais grave quando se afasta.

Nas estrelas, as partículas não se movem todas na mesma velocidade nem na mesma direção, resultando em uma distribuição de velocidades. Esse movimento térmico das partículas causa o alargamento das linhas espectrais, sendo que quanto maior a velocidade das partículas, maior o alargamento observado. O alargamento Doppler é diretamente relacionado à velocidade térmica v_t das partículas, que depende da temperatura T e da massa m dos átomos, e é dado pela equação:

$$v_t = \sqrt{\frac{2kT}{m}} \quad (2.4)$$

onde k é a constante de Boltzmann. O alargamento Doppler ($\Delta\lambda_D/\lambda$) é proporcional a essa velocidade de agitação dos átomos, sendo expresso por:

$$\frac{\Delta\lambda_D}{\lambda} = \frac{v_t}{c} = \frac{1}{c} \sqrt{\frac{2kT}{m}} = 4,30 \times 10^{-7} \frac{T}{\mu}, \quad (2.5)$$

onde μ é o peso atômico em unidades de massa atômica e c é a velocidade da luz. Dessa forma, o alargamento Doppler é maior para elementos mais leves e menor para elementos mais pesados. Por exemplo, o silício (Si) terá um alargamento Doppler maior que o cério (Ce), dado que o Si tem um peso atômico menor. No entanto, o alargamento observado de uma linha espectral não é causado apenas pelo movimento térmico das partículas. Ele resulta da combinação do alargamento Doppler e do alargamento instrumental. O alargamento instrumental, que depende da resolução do instrumento, costuma ser maior que o alargamento Doppler. A razão entre esses alargamentos depende da temperatura efetiva da estrela e do peso atômico do elemento.

- **Alargamento Colisional:** Esse efeito é resultado das interações eletromagnéticas entre átomos e partículas próximas, como íons, elétrons e moléculas, as quais perturbam ou distorcem os níveis de energia dos átomos, causando uma modificação no comprimento de onda do fóton que será absorvido para causar a transição. Essas interações podem ser causadas por encontros discretos entre as partículas ou por um efeito estatístico proveniente de múltiplas colisões com várias partículas ao redor. A intensidade da perturbação resultante dessas interações depende da distância entre o átomo e a partícula perturbadora, seguindo uma lei de potência da forma:

$$\Delta E \propto R^{-n}, \quad (2.6)$$

onde R é a separação entre as partículas e n varia conforme o tipo de interação: $n = 2$ para o efeito Stark linear, $n = 3$ para ressonância e $n = 6$ para interações de van der Waals, entre outros. Nas atmosferas estelares, devido à alta temperatura e baixa pressão, as partículas se movem rapidamente, resultando em colisões frequentes. A aproximação de impacto é um modelo que descreve o alargamento das linhas espectrais causadas por essas colisões, assumindo que o tempo de duração de uma colisão é muito menor que o intervalo entre duas colisões sucessivas. Assim, as interações podem ser tratadas como encontros discretos, simplificando a análise e permitindo quantificar como as colisões rápidas afetam o alargamento das linhas espectrais.

2.5 Curva de Crescimento

A curva de crescimento é uma ferramenta crucial para analisar a intensidade das linhas espectrais de absorção, especialmente em estudos sobre as abundâncias químicas nas atmosferas estelares. Ela descreve a variação da largura equivalente de uma linha em função da abundância de um elemento, considerando diferentes regimes físicos (GHEZZI, 2008). A intensidade das linhas está ligada ao número de átomos capazes de realizar a transição que gera a linha. Embora esperemos que essa intensidade aumente proporcionalmente à abundância do elemento, a relação é mais complexa, resultando em três regimes principais: linear, de saturação e amortecido, como mostrado na Figura 2.3.

- **Regime Linear:** Quando o número de átomos capazes de realizar a transição aumenta, mas ainda é menor que a quantidade de fótons disponíveis para provocar a transição, a intensidade da linha de absorção cresce proporcionalmente ao número de átomos. Esse comportamento linear é diretamente proporcional: se dobrarmos o número de átomos, a intensidade da linha também dobra, já que mais átomos estão disponíveis para absorver os fótons. Assim, podemos expressar pela seguinte relação

$$LE \propto N \quad (2.7)$$

- **Regime de Saturação:** Quando o número de átomos disponíveis para realizar a transição supera a quantidade de fótons que podem provocá-la, a linha de absorção ainda se intensifica, mas a um ritmo mais lento. Isso acontece porque há poucos átomos com velocidades suficientemente altas para causar uma absorção significativa fora do centro da linha. Como resultado, a intensidade da linha atinge um limite, e a largura equivalente aumenta de maneira mais gradual, apresentando uma relação mais complexa em comparação ao comportamento linear observado em regimes anteriores. Essa relação pode ser expressa como:

$$LE \propto \sqrt{\ln(N)} \quad (2.8)$$

- **Regime Amortecido:** Quando o número de átomos se torna suficientemente elevado, a linha espectral desenvolve asas pronunciadas. Nessa fase, a absorção em regiões distantes do centro da linha se torna relevante, já que os pequenos efeitos de perturbação começam a fazer efeito devido ao grande número de átomos

disponíveis para a transição aumenta mais rapidamente do que na região saturada, embora ainda de forma mais lenta do que na região linear. A largura equivalente nesse regime é descrita pela relação:

$$LE \propto \sqrt{N} \quad (2.9)$$

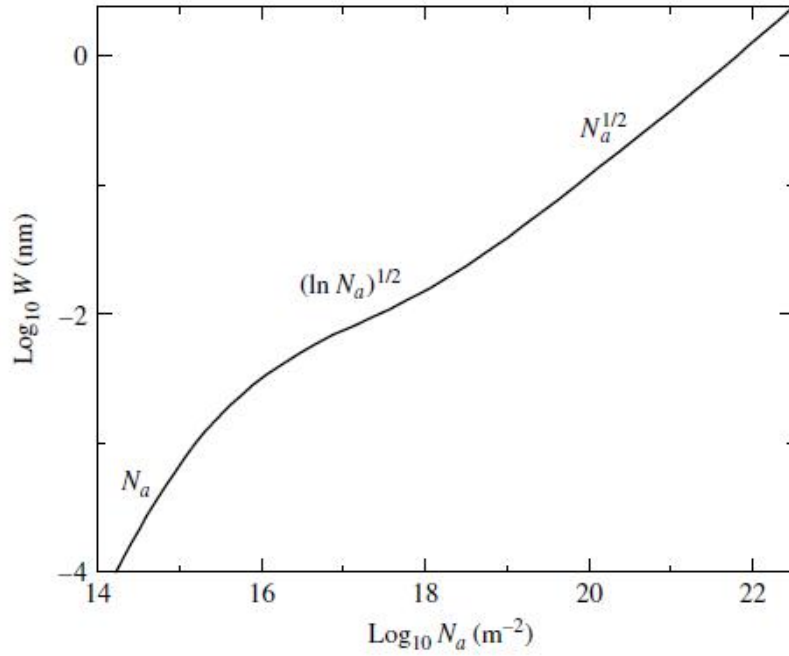


FIGURA 2.3. Curva de crescimento para a linha K de Ca II. A largura equivalente (LE) varia com o aumento de N_a , e em diferentes pontos da curva. Os três regimes são representados. Na figura, W corresponde à largura equivalente. Figura adaptada de Aller (1963); Carroll & Ostlie (1996).

2.6 Estrutura Hiperfina

A estrutura hiperfina (EHF) é um fenômeno sutil que acrescenta uma camada de complexidade à formação das linhas espectrais. Em átomos com número ímpar de bárions, a interação entre o spin nuclear não nulo e o spin eletrônico quebra a degenerescência dos subníveis eletrônicos, levando ao desdobramento das transições em múltiplas componentes. Essas diversas subtransições reduzem a opacidade no centro da linha espectral, o que pode resultar na inferência de uma abundância superestimada se a EHF não for considerada. Assim, para esses elementos, cada transição atômica se divide em subtransições que geram linhas espectrais com comprimentos de onda levemente deslocados em relação ao comprimento de onda (λ) da transição original. Essa nova configuração de linhas está associada a transições entre estados de spin eletrônicos.

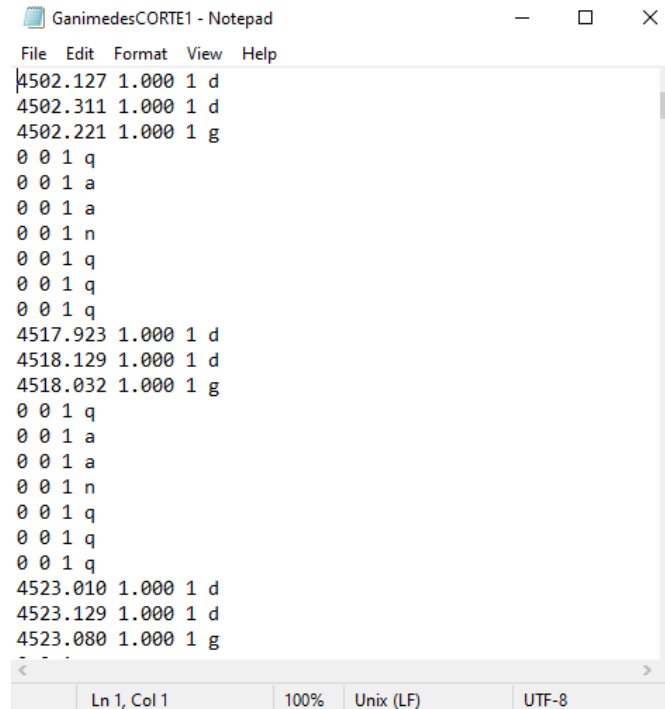
Para o nosso estudo, levamos em consideração a estrutura hiperfina nas linhas espectrais dos elementos Mg, Sc, V, Mn, Co e Cu. Em relação a outros elementos, como Zn, Sr, Y, Zr, La, Ce, Nd e Sm, Steffen (1985) observa que a EHF pode ser teoricamente significativa, mas, na prática, é desprezivelmente pequena e, portanto, pode ser ignorada. Além disso, as linhas espectrais desses elementos são suficientemente fracas no Sol, de modo que a abundância inferida não é afetada pela consideração da EHF.

2.7 Procedimentos de Medição

No processo de medição das linhas espectrais, utiliza-se o ajuste de funções gaussianas ou de Voigt aos perfis das linhas para calcular parâmetros, como a largura equivalente. Embora a medição manual tenha sido amplamente utilizada por décadas na espectroscopia, atualmente, rotinas numéricas interativas, como as oferecidas pelo software IRAF (*Image Reduction and Analysis Facility*), são preferidas devido à maior praticidade no processamento e análise dos dados espectrais de amostras muito grandes.

Neste trabalho, utilizamos o IRAF e a tarefa *bplot* para medir automaticamente a largura equivalente (LE) por meio de um arquivo cursor. Devido à limitação de tempo, optamos por otimizar o processo de medição com a construção desse cursor. O arquivo utilizado foi adaptado com base no trabalho de Di Bartolo (2005). As principais informações inseridas incluem o comprimento de onda dos limites da linha e seu centro (ou centros, no caso de ajustes duplos ou triplos), além do ajuste por gaussianas (Figura 2.4). A escolha por ajustes gaussianos foi feita porque o ajuste de funções de Voigt requer um maior número de parâmetros, tornando o processo mais complexo e incerto. Além disso, as linhas de interesse estão todas no regime linear ou saturado da curva de crescimento, e suas asas de amortecimento colisional não devem estar suficientemente desenvolvidas para justificar o investimento de tempo em um ajuste de Voigt.

Essa abordagem facilitou a seleção ordenada das regiões de interesse para a medição, mantendo tanto a precisão quanto a consistência do método de análise das linhas espectrais. As medições realizadas em cada linha resultaram em um arquivo de registro no formato *splot.log* (Figura 2.5), que armazena informações essenciais, como o centro da linha (*center*), a largura equivalente (*eqw*), a profundidade (*core*) e a largura à meia altura (*fwhm*), conforme definido anteriormente.

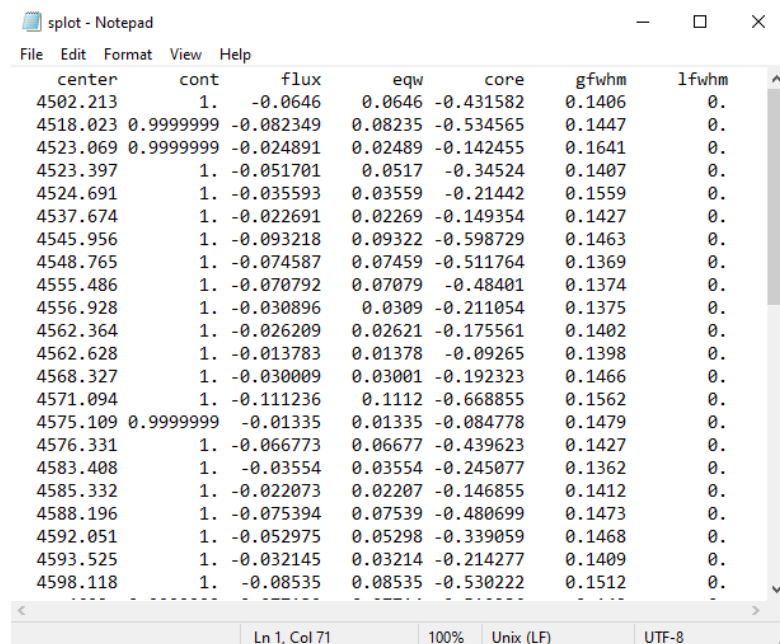


```

File Edit Format View Help
4502.127 1.000 1 d
4502.311 1.000 1 d
4502.221 1.000 1 g
0 0 1 q
0 0 1 a
0 0 1 a
0 0 1 n
0 0 1 q
0 0 1 q
0 0 1 q
4517.923 1.000 1 d
4518.129 1.000 1 d
4518.032 1.000 1 g
0 0 1 q
0 0 1 a
0 0 1 a
0 0 1 n
0 0 1 q
0 0 1 q
0 0 1 q
4523.010 1.000 1 d
4523.129 1.000 1 d
4523.080 1.000 1 g
Ln 1, Col 1 100% Unix (LF) UTF-8

```

FIGURA 2.4. Exemplo de arquivo cursor para Ganimedes



```

splot - Notepad
File Edit Format View Help
center      cont      flux      eqw      core      gfw      lfw
4502.213    1.        -0.0646   0.0646   -0.431582 0.1406   0.
4518.023    0.999999 -0.082349 0.08235  -0.534565 0.1447   0.
4523.069    0.999999 -0.024891 0.02489  -0.142455 0.1641   0.
4523.397    1.        -0.051701 0.0517   -0.34524 0.1407   0.
4524.691    1.        -0.035593 0.03559  -0.21442 0.1559   0.
4537.674    1.        -0.022691 0.02269  -0.149354 0.1427   0.
4545.956    1.        -0.093218 0.09322  -0.598729 0.1463   0.
4548.765    1.        -0.074587 0.07459  -0.511764 0.1369   0.
4555.486    1.        -0.070792 0.07079  -0.48401 0.1374   0.
4556.928    1.        -0.030896 0.0309   -0.211054 0.1375   0.
4562.364    1.        -0.026209 0.02621  -0.175561 0.1402   0.
4562.628    1.        -0.013783 0.01378  -0.09265 0.1398   0.
4568.327    1.        -0.030009 0.03001  -0.192323 0.1466   0.
4571.094    1.        -0.111236 0.1112   -0.668855 0.1562   0.
4575.109    0.999999 -0.01335  0.01335  -0.084778 0.1479   0.
4576.331    1.        -0.066773 0.06677  -0.439623 0.1427   0.
4583.408    1.        -0.03554  0.03554  -0.245077 0.1362   0.
4585.332    1.        -0.022073 0.02207  -0.146855 0.1412   0.
4588.196    1.        -0.075394 0.07539  -0.480699 0.1473   0.
4592.051    1.        -0.052975 0.05298  -0.339059 0.1468   0.
4593.525    1.        -0.032145 0.03214  -0.214277 0.1409   0.
4598.118    1.        -0.08535  0.08535  -0.530222 0.1512   0.
Ln 1, Col 71 100% Unix (LF) UTF-8

```

FIGURA 2.5. Exemplo do arquivo de saída *splot.log* para Ganimedes

O processo de análise foi realizado de forma individualizada para cada região de interesse em cada espectro, totalizando a análise de 26 espectros do FEROS, cada um com 8 regiões, algumas contendo mais de um corte, o que resultou em pelo menos 208 medições. Essas medições foram feitas sem qualquer comparação prévia com valores esperados, assegurando a independência do processo. As regiões analisadas, com cerca de 300 Å de extensão cada, foram escolhidas com cuidado para incluir linhas espectrais de interesse, evitando áreas contaminadas por linhas telúricas ou por distorções no contínuo que poderiam afetar a precisão da normalização. A seleção dessas regiões foi essencial para garantir a qualidade da análise, permitindo a obtenção de dados mais confiáveis. Após a conclusão das medições, realizamos uma análise estatística detalhada dos dados obtidos guiados pela teoria de formação de linhas espectrais em atmosferas estelares.

Capítulo 3

Diagnóstico das Linhas Espectrais

Depois de obter as medições automáticas das linhas espectrais pelo IRAF, realizamos uma análise estatística detalhada para garantir a precisão dos resultados. Inicialmente, examinamos parâmetros como a largura a meia altura (FWHM) e a profundidade das linhas, verificando se os valores estavam alinhados com as previsões dos modelos físicos. Além disso, aplicamos testes de significância estatística para eliminar linhas cujas medidas pudessem ser classificadas como "outliers", assegurando a confiabilidade e a consistência das medições obtidas. Os testes foram realizados primeiramente para as linhas de Ganimedes, que representam o Sol em nossa amostra. Essa abordagem nos permitiu estabelecer um padrão sólido, garantindo que as medições subsequentes das estrelas análogas e gêmeas solares fossem comparáveis e fundamentadas em dados confiáveis. Além disso, garantiu que as linhas das candidatas a gêmeas solares fossem analisadas diretamente em relação a medidas consistentes obtidas no Sol. Assim, todas as linhas que apresentaram um comportamento satisfatório em Ganimedes foram incorporadas à lista final de linhas a serem medidas nos demais espectros.

3.1 Diagnóstico 1: Relação entre FWHM/λ e LE

No primeiro diagnóstico, analisamos a relação entre a razão FWHM/λ (definida como largura reduzida) e a largura equivalente da linha. Este diagnóstico é considerado o mais sensível da análise, pois o FWHM responde de forma intensa às sutilezas do perfil da linha espectral. Essa sensibilidade se deve ao fato de que o FWHM pode ser fortemente influenciado por fatores como ruído fotométrico e erros no posicionamento do contínuo. Assim, essa capacidade de detectar variações sutis nas características

das linhas espectrais é fundamental para assegurar a precisão e a confiabilidade das medições realizadas. Para garantir a qualidade das linhas espectrais, aplicamos um rigoroso critério estatístico para identificar aquelas que apresentavam comportamentos inesperados. Construímos gráficos com limites de 2 e 3 sigma (σ), que correspondem a faixas de desvio padrão em torno da média dos dados.

- **2 σ :** Abrange aproximadamente 95% dos dados, indicando que valores fora desse limite estão a mais de 2 desvios padrão da média e podem sugerir pequenas anomalias.
- **3 σ :** Cobre cerca de 99,7% dos dados, significando que valores fora dessa faixa têm uma probabilidade muito baixa de ocorrência. Esses valores são classificados como outliers ou associados a defeitos de observação e/ou redução, como raios cósmicos, pixels quentes, anomalias nos arquivos de bias e flat-field, além de outros problemas instrumentais

Na parte superior desses gráficos, o processo consistiu em eliminar as linhas que ultrapassavam o intervalo de 3σ , por meio de iterações sucessivas. Após cada iteração, removíamos as linhas que excediam esses limites e repetíamos o procedimento até que não restasse nenhuma linha acima do limite superior de 3σ ou, caso houvesse, que estivesse bem próxima desse limite.

Na parte inferior, utilizamos o critério de 2σ , mantendo o mesmo procedimento iterativo. Neste caso, escolhemos um limite diferente, pois as linhas abaixo de 2σ estão associadas a linhas fracas, nas quais erros de posicionamento do contínuo tendem a resultar em FWHMs maiores do que o esperado. Como mencionado anteriormente, o FWHM é bastante sensível, e há poucos efeitos observacionais, além de defeitos notáveis no espectro, como raios cósmicos e pixels "quentes" (defeituosos), que podem causar uma redução significativa nos valores de FWHM. Assim, o limite de três sigmas mostrou-se excessivo, conforme confirmado na prática. Optamos por considerar as linhas abaixo de 2 sigmas como potenciais indicadoras de erros sistemáticos e descartá-las, garantindo a confiabilidade dos dados finais.

Como mencionado anteriormente, iniciamos os testes com Ganimedes. No decorrer da análise de FWHM/λ vs LE, observamos que algumas linhas ficaram fora do intervalo esperado de 2 e 3σ , o que motivou uma análise manual para identificar possíveis fontes de erro. Durante a análise manual dessas linhas, identificamos que uma delas, a 6199.5 FE1,

uma gaussiana dupla, não apresentava resultados consistentes. Dessa forma, decidimos excluir a linha 6199.5 FE1 de toda a análise e realizar a medição manual de sua linha dupla, a 6199.186 V1, em todos os espectros. Com base nessa alteração, replotamos o gráfico de Ganimedes.

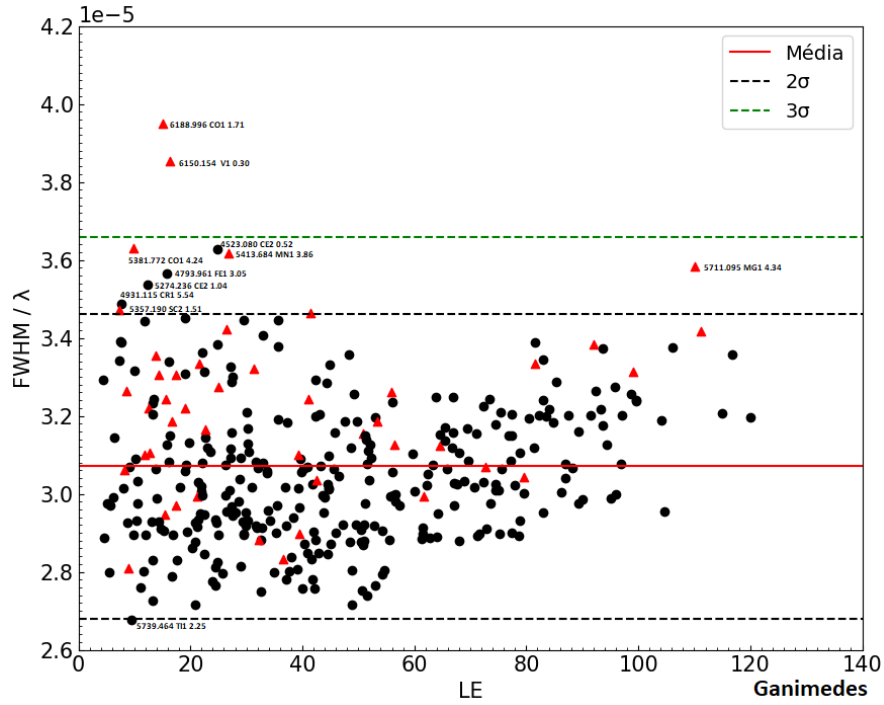
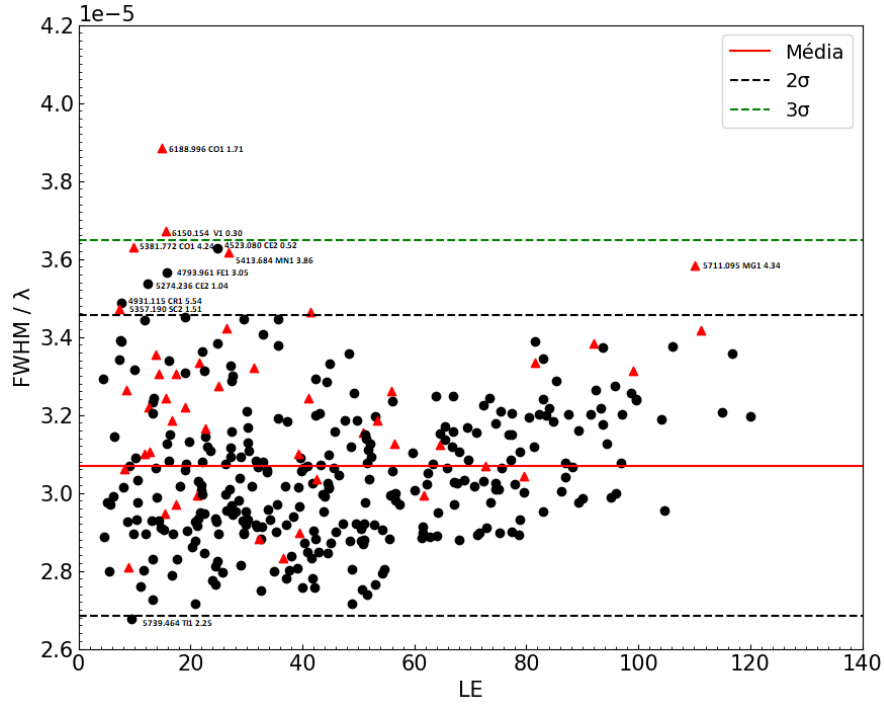


FIGURA 3.1. Teste de FWHM/λ vs. LE para Ganimedes (medição automática). Unidades: LE (\AA) e FWHM/λ (adimensional). As linhas com estrutura hiperfina estão representadas por triângulos vermelhos, enquanto as demais são indicadas por círculos pretos.

No gráfico 3.1 é possível identificar duas linhas com EHF que ultrapassam o limite de 3σ . Essas linhas foram medidas manualmente e plotadas em um novo gráfico para avaliar se elas se ajustariam melhor dentro dos limites esperados.

FIGURA 3.2. Teste de FWHM/λ vs. LE para Ganimedes (Medição manual)

Conforme mostrado no gráfico 3.2 apenas a linha 6150.154 V1 apresentou um comportamento mais adequado. É importante destacar que as linhas com estrutura hiperfina são especialmente difíceis de interpretar, pois exibem um alargamento natural (como explicado na Seção 2.4), o qual pode ter uma estrutura bastante elaborada, o que torna a análise mais complexa. Por isso, decidimos manter essas duas linhas em todos os espectros, garantindo a consistência da análise. Adicionalmente, destacamos que uma análise mais detalhada do comportamento das linhas de diversos elementos com EHF significativa será abordada em trabalhos futuros do grupo.

As figuras a seguir apresentam os resultados dos testes de FWHM/λ vs. LE para os 26 espectros analisados neste trabalho. Em cada espectro, foram realizadas diversas iterações, com a quantidade variando de acordo com o espectro e a presença de outliers. A identificação HD da estrela referente a cada gráfico está mostrada na parte inferior, à direita, abaixo da legenda. As Figuras 3.3 a 3.7 destacam os resultados das cinco iterações realizadas no espectro de HD 6512. Em seguida, as Figuras 3.8 a 3.12 ilustram as cinco iterações para o espectro de HD 28471. Por fim, as Figuras 3.13 a 3.35 mostram a última iteração realizada em cada um dos espectros restantes.

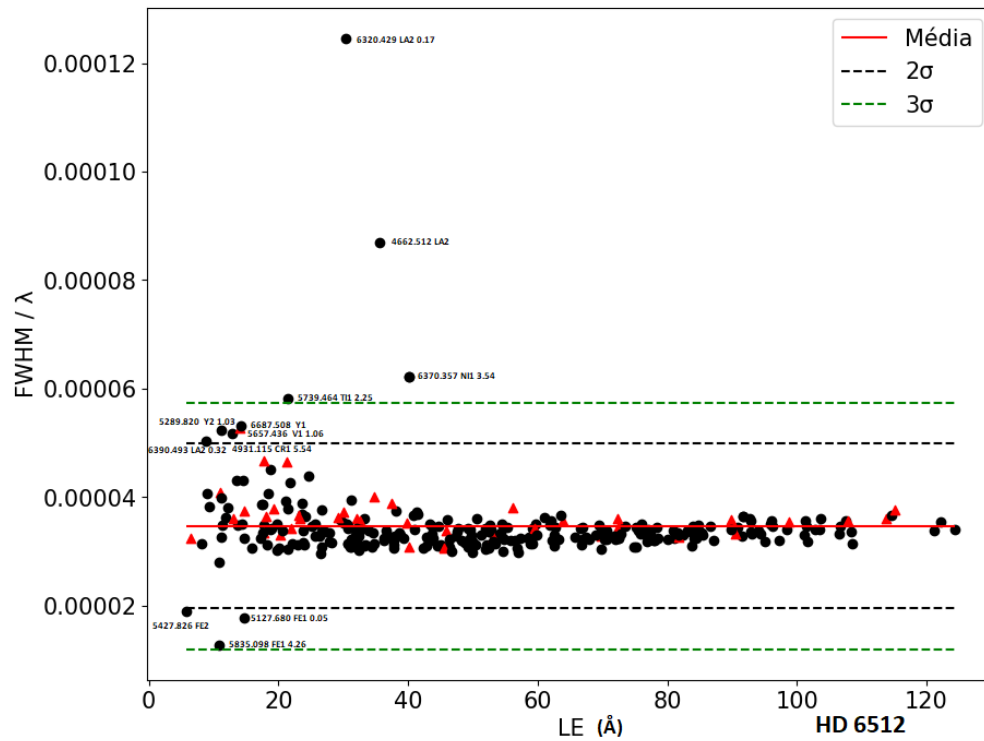


FIGURA 3.3. Teste de FWHM / λ vs. LE para HD 6512, consistindo na primeira iteração realizada.

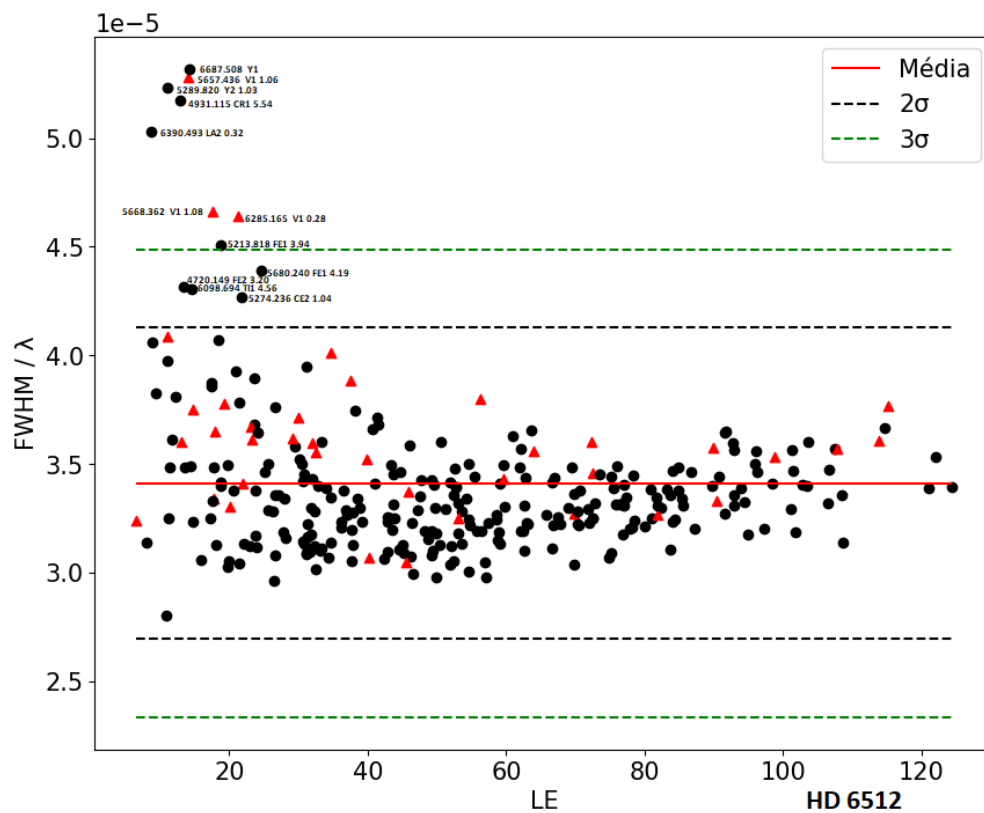
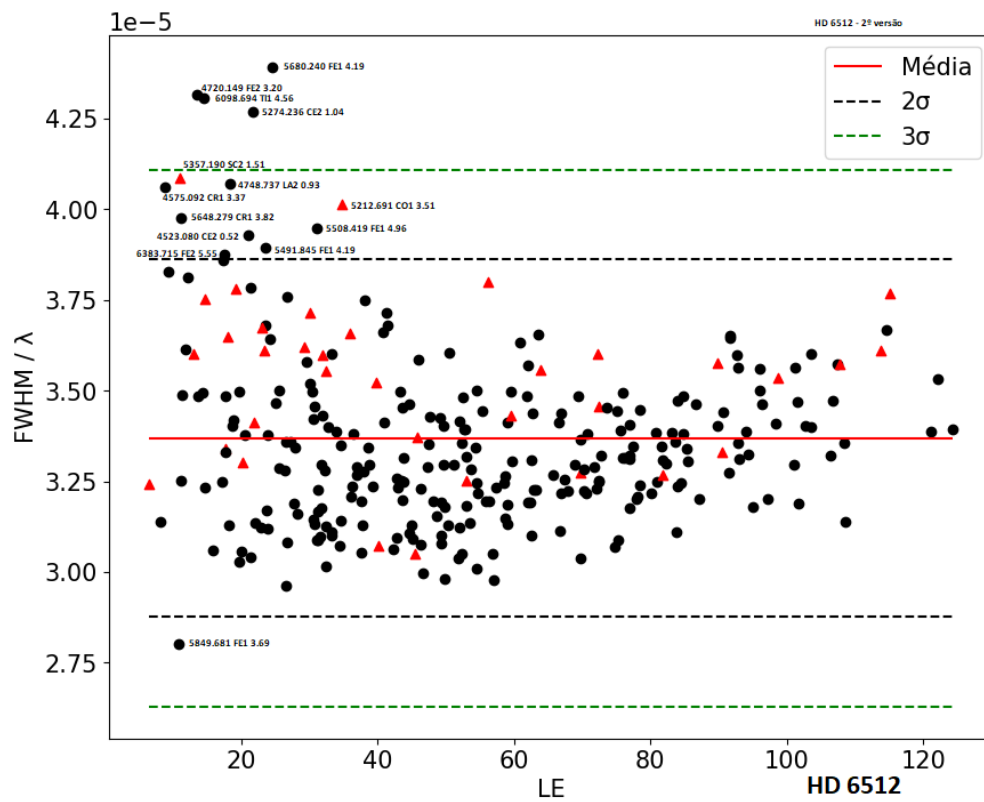
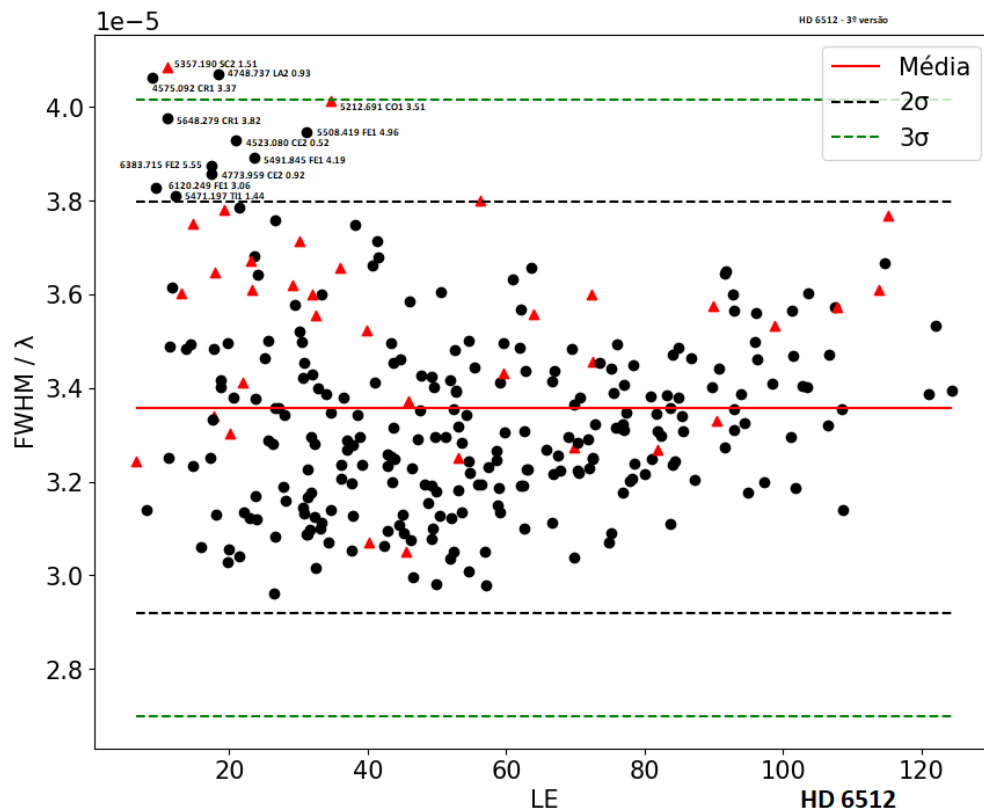


FIGURA 3.4. Teste de FWHM / λ vs. LE para HD 6512, consistindo na segunda iteração realizada.

FIGURA 3.5. Teste de $FWHM/\lambda$ vs. LE para HD 6512, consistindo na terceira iteração realizada.FIGURA 3.6. Teste de $FWHM/\lambda$ vs. LE para HD 6512, consistindo na quarta iteração realizada.

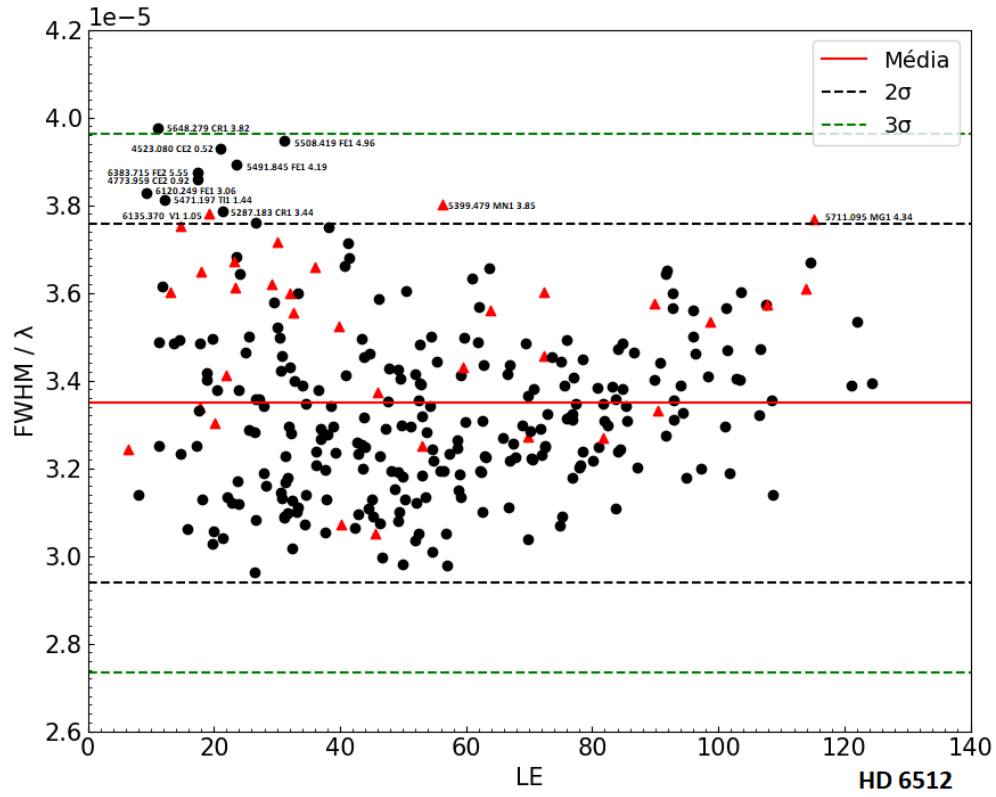


FIGURA 3.7. Teste de FWHM/λ vs. LE para HD 6512, consistindo na quinta e última iteração realizada.

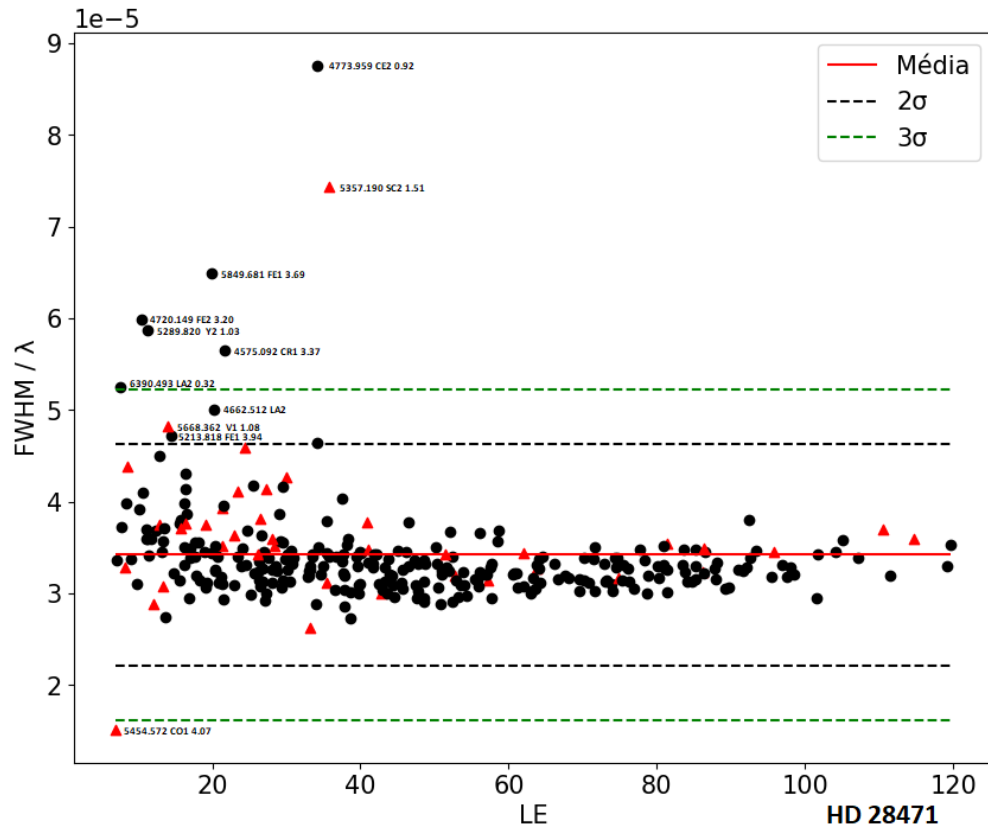
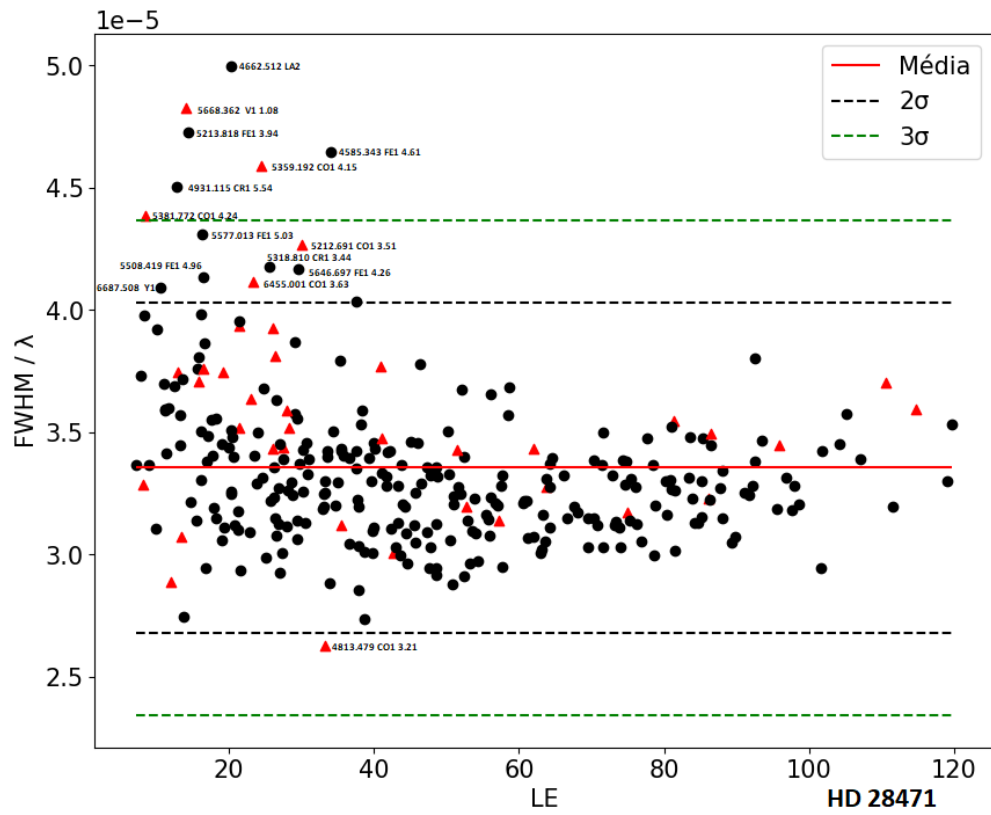
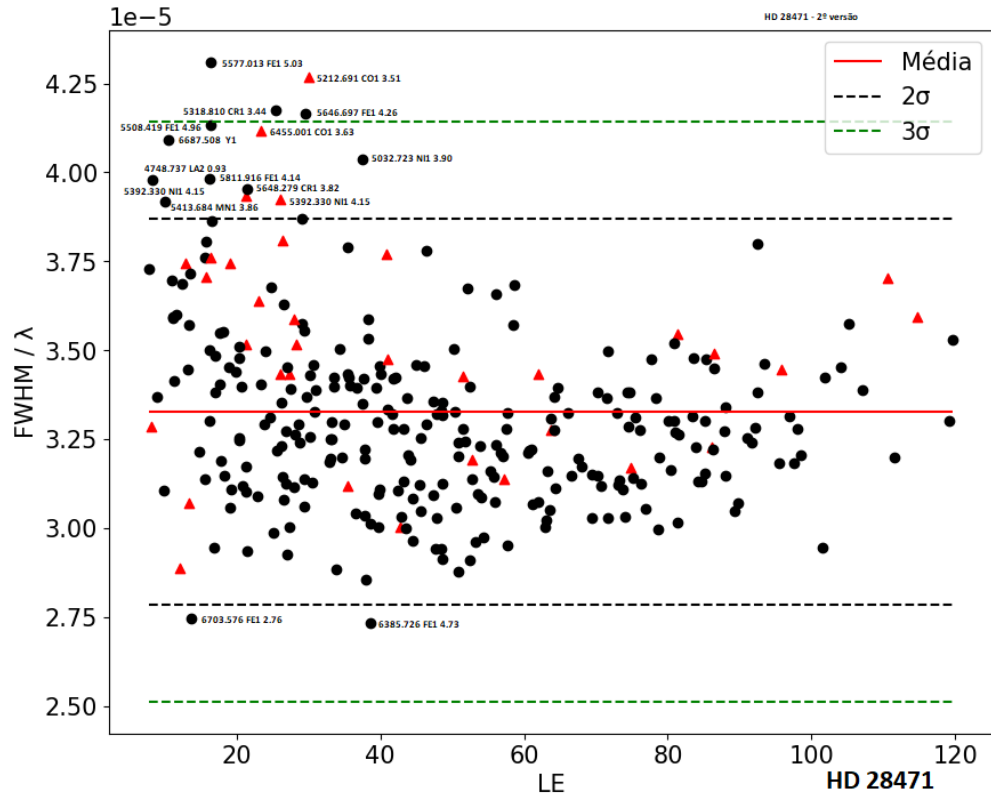
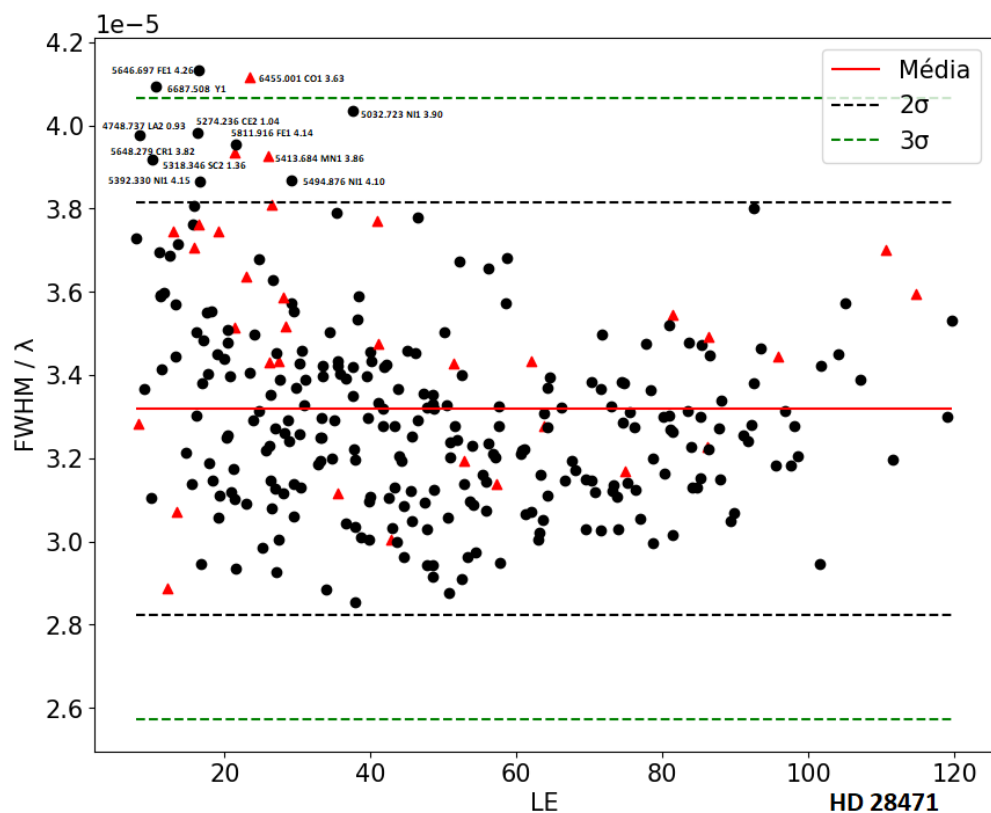
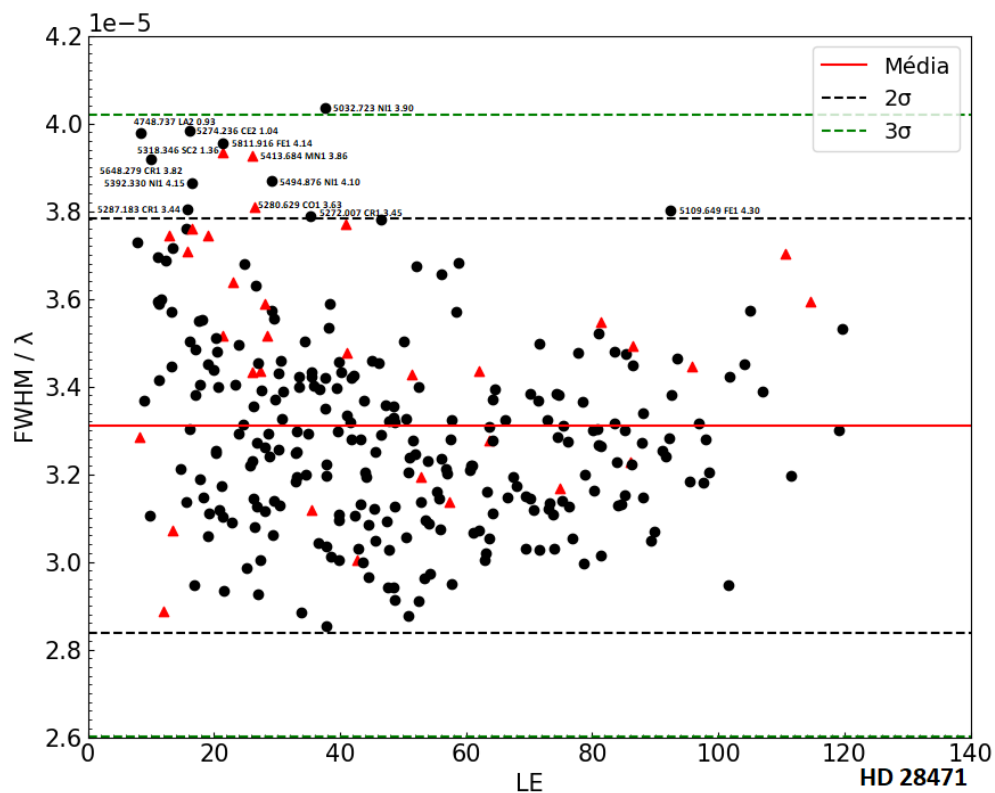
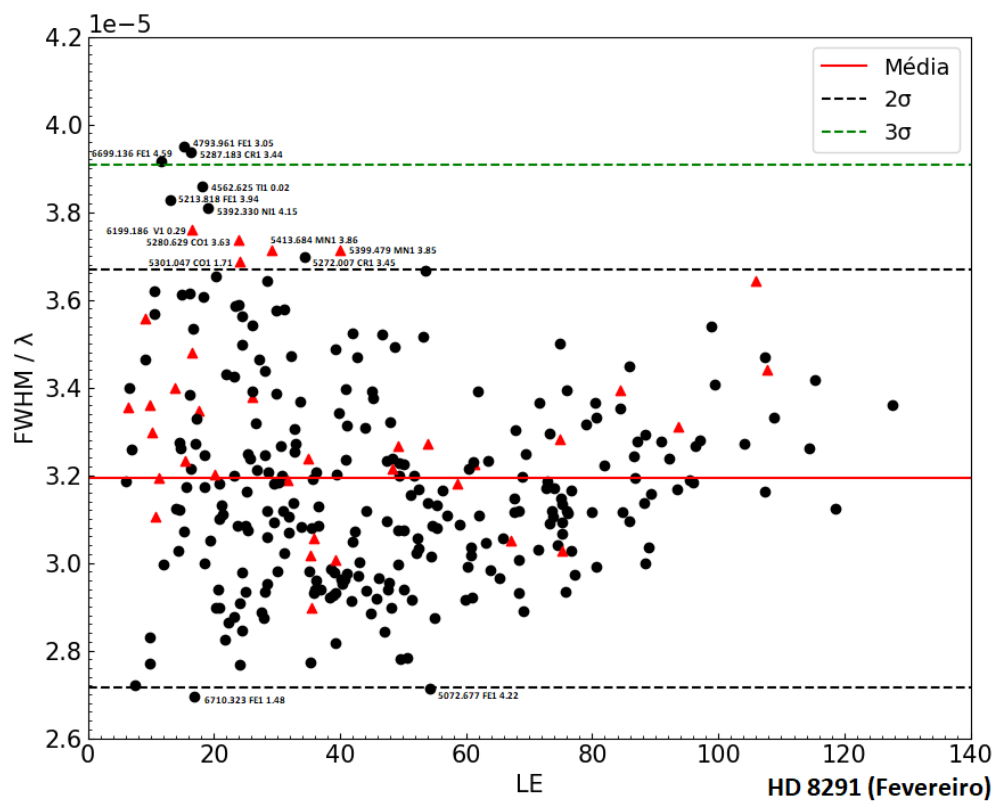
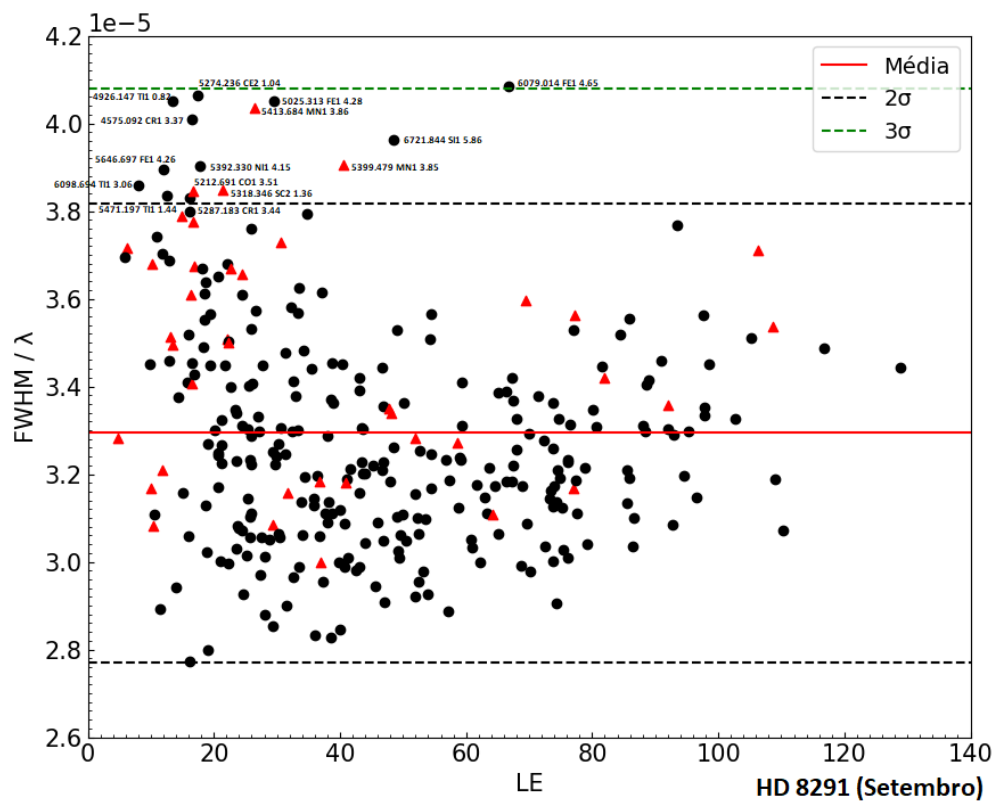
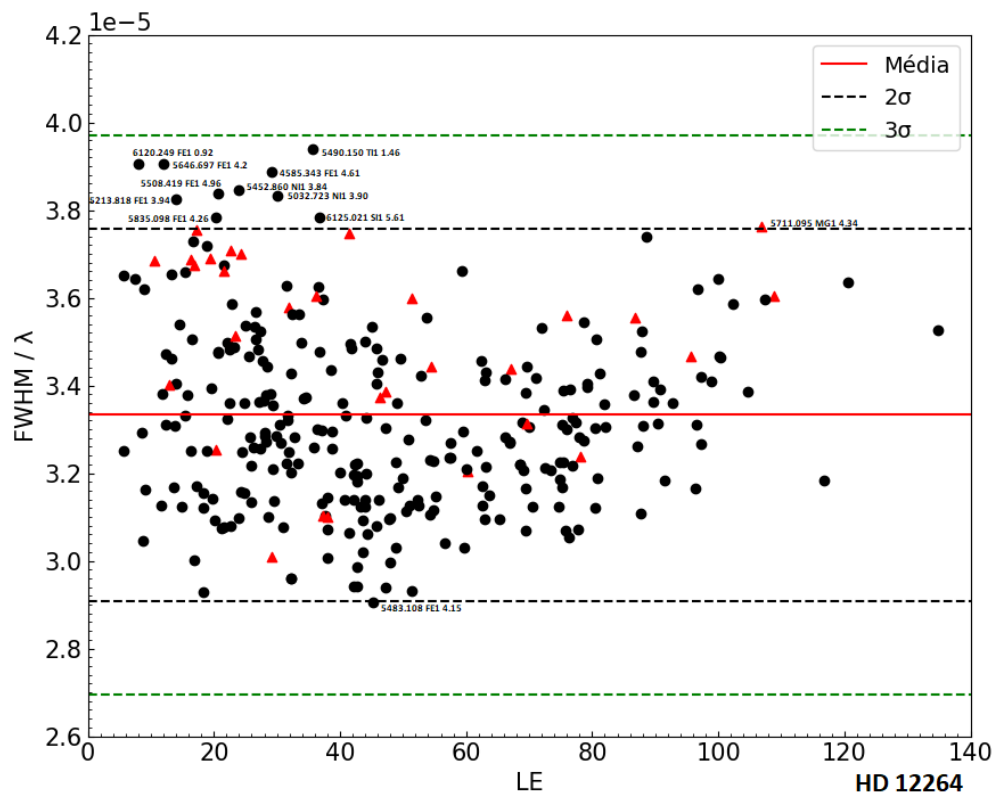
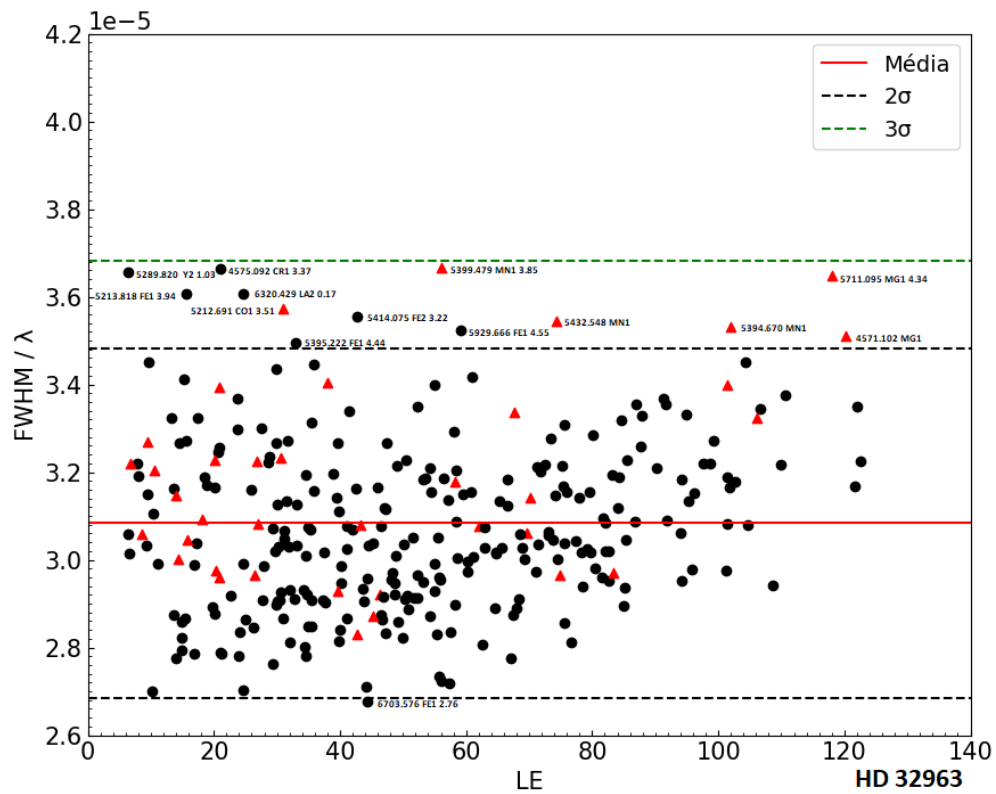


FIGURA 3.8. Teste de FWHM/λ vs. LE para HD 28471, consistindo na primeira iteração realizada.

FIGURA 3.9. Teste de $FWHM/\lambda$ vs. LE para HD 28471, consistindo na segunda iteração realizada.FIGURA 3.10. Teste de $FWHM/\lambda$ vs. LE para HD 28471, consistindo na terceira iteração realizada.

FIGURA 3.11. Teste de FWHM/λ vs. LE para HD 28471, consistindo na quarta iteração realizada.FIGURA 3.12. Teste de FWHM/λ vs. LE para HD 28471, consistindo na quinta e última iteração

FIGURA 3.13. Teste de $FWHM/\lambda$ vs. LE para HD 8291 - fevereiroFIGURA 3.14. Teste de $FWHM/\lambda$ vs. LE para HD 8291 - setembro

FIGURA 3.15. Teste de FWHM/λ vs. LE para HD 12264FIGURA 3.16. Teste de FWHM/λ vs. LE para HD 32963

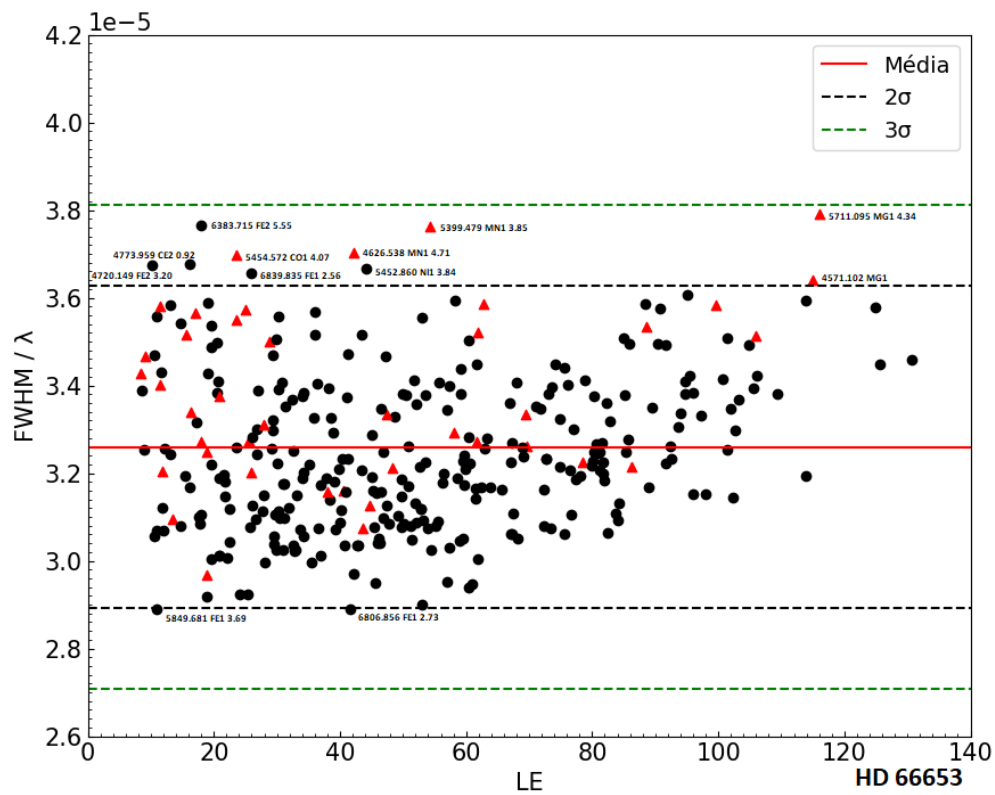


FIGURA 3.17. Teste de $FWHM/\lambda$ vs. LE para HD 66653

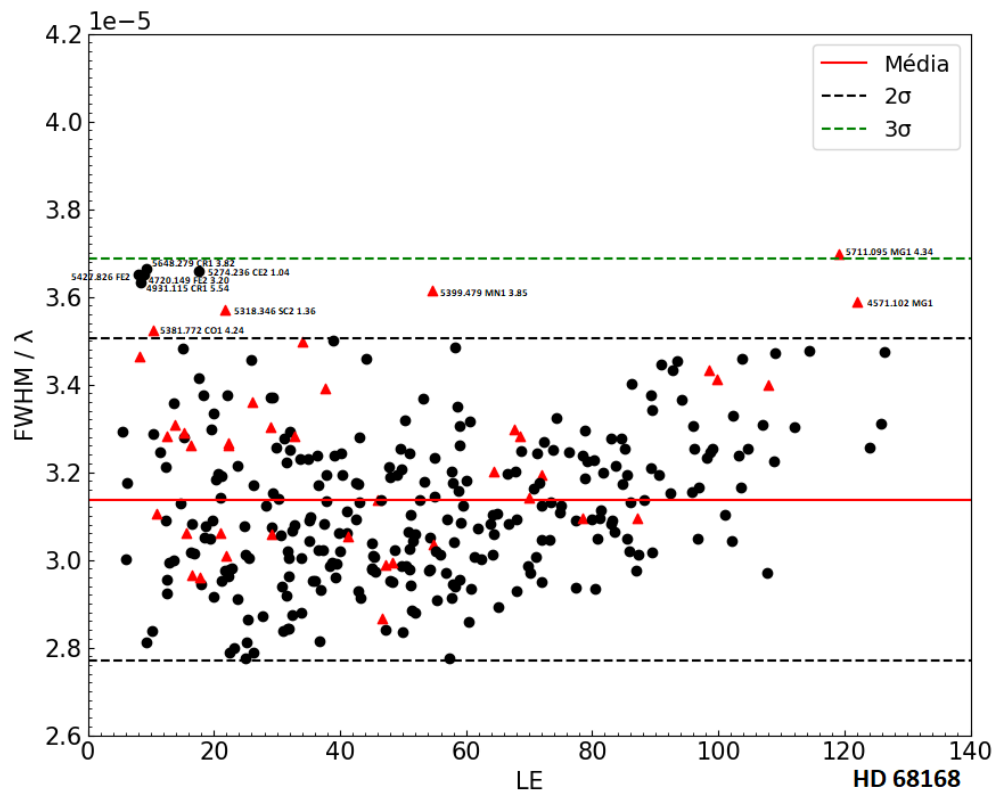
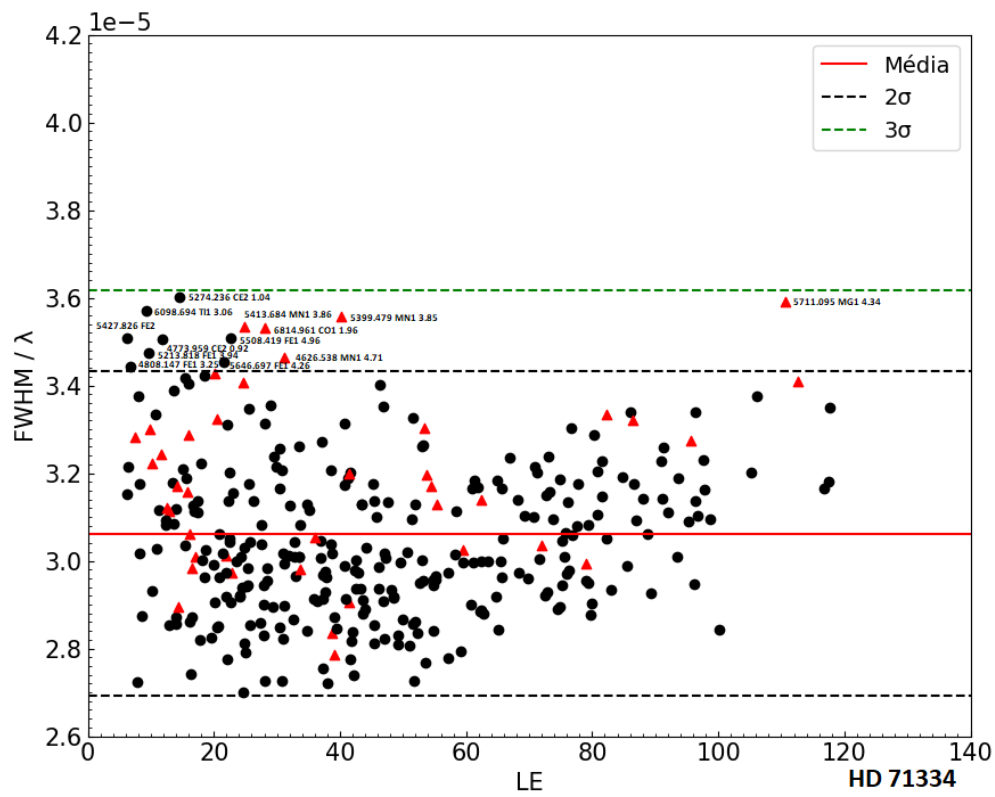
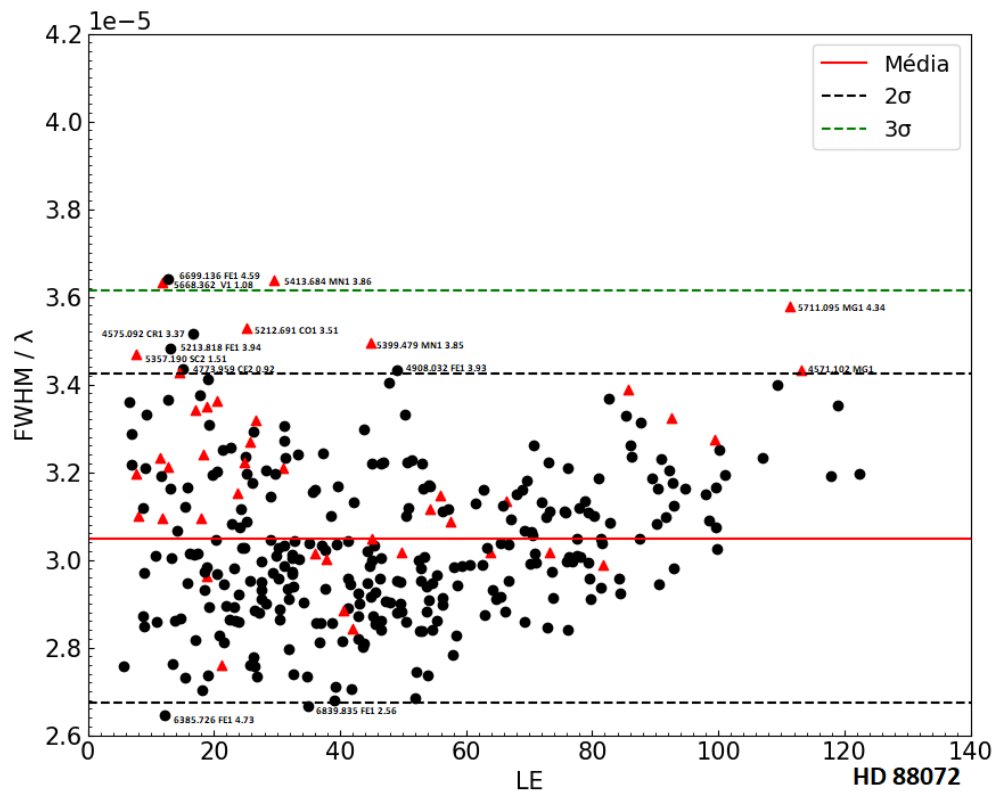
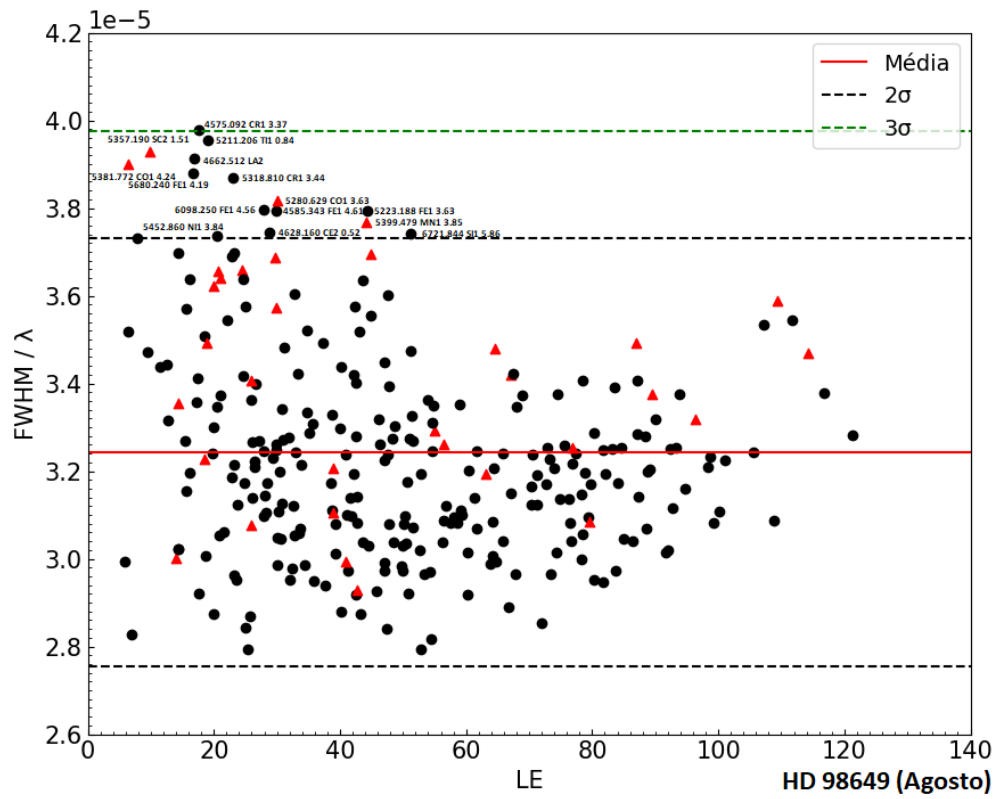
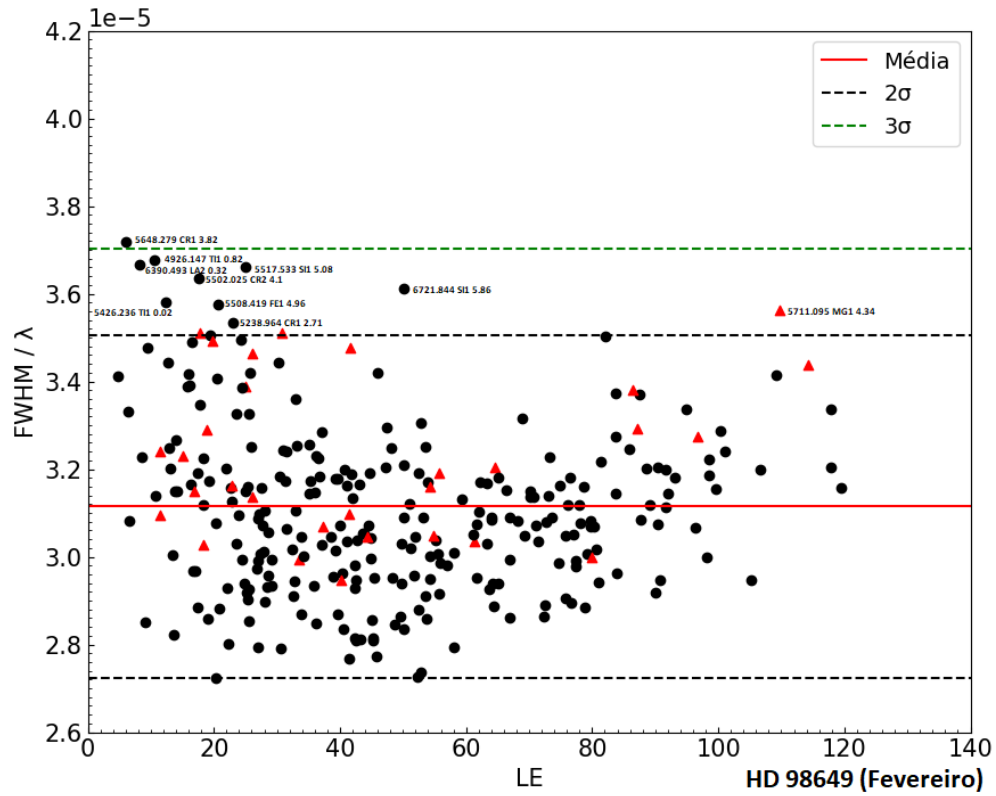
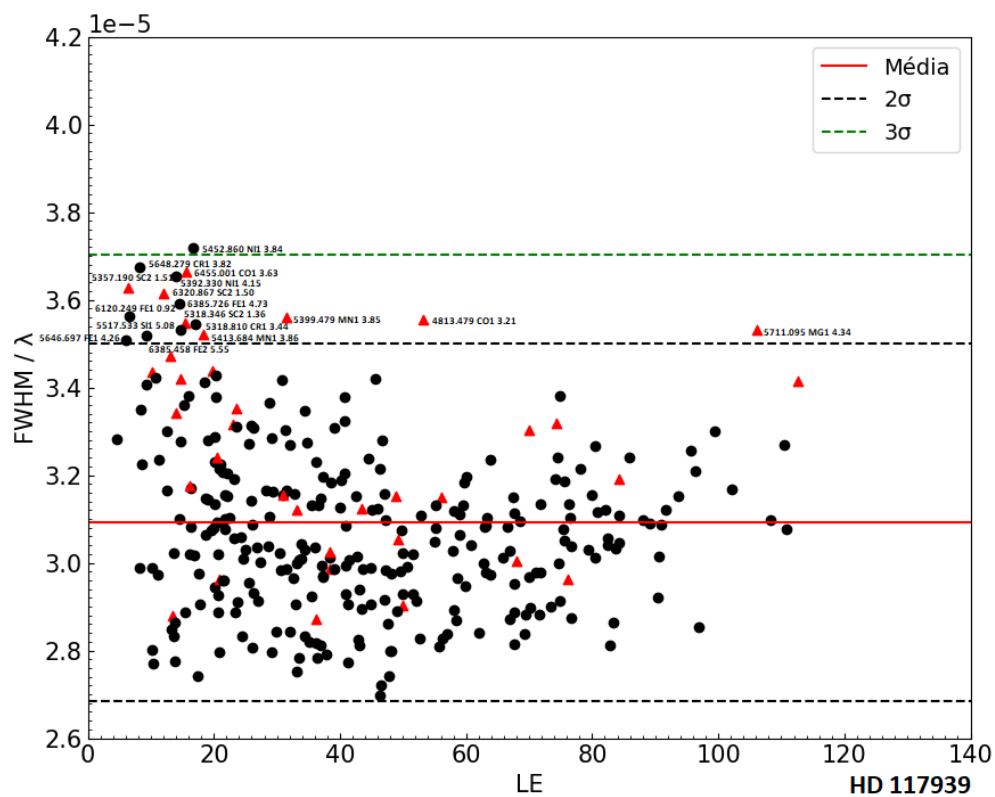
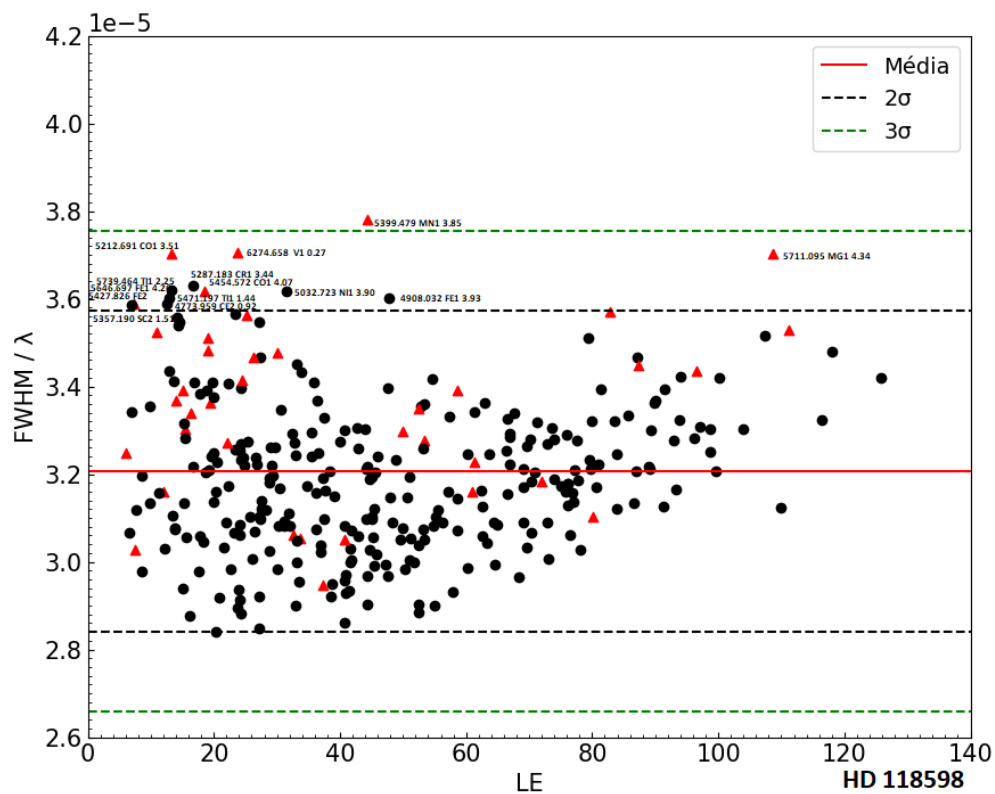
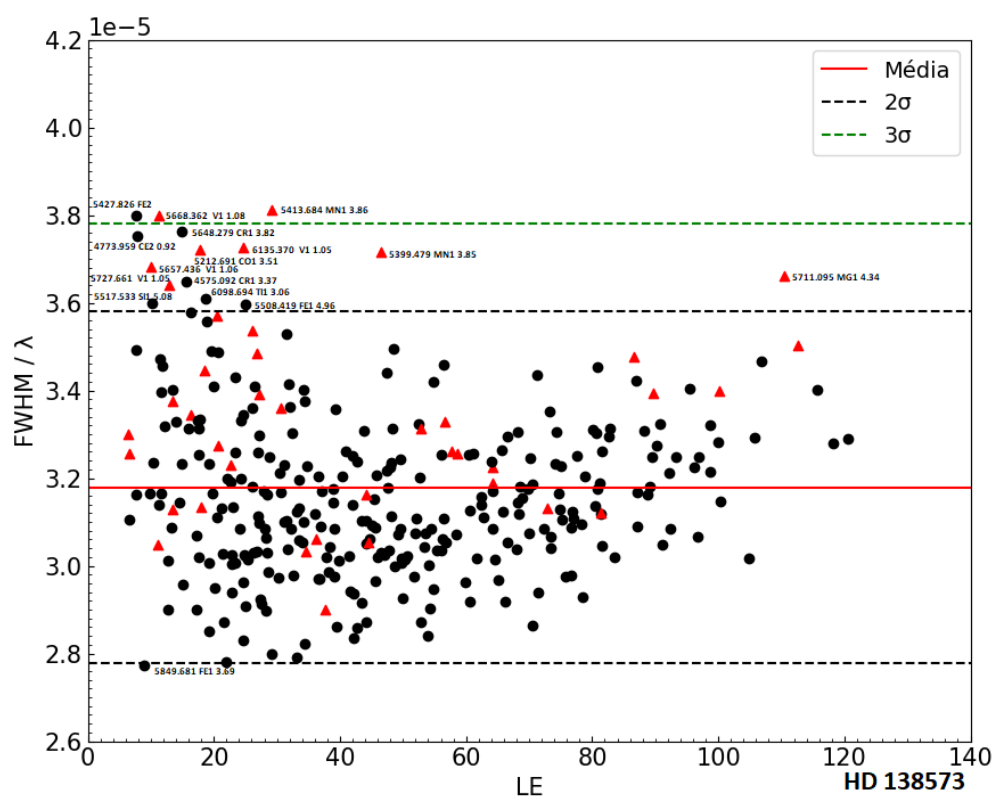
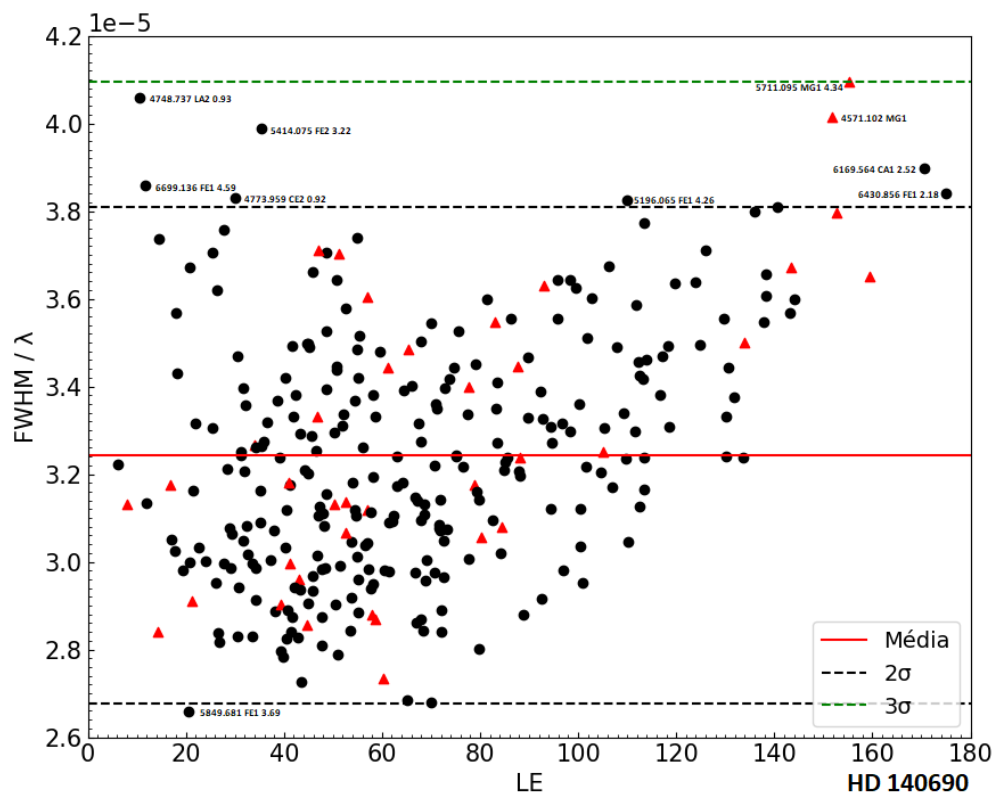


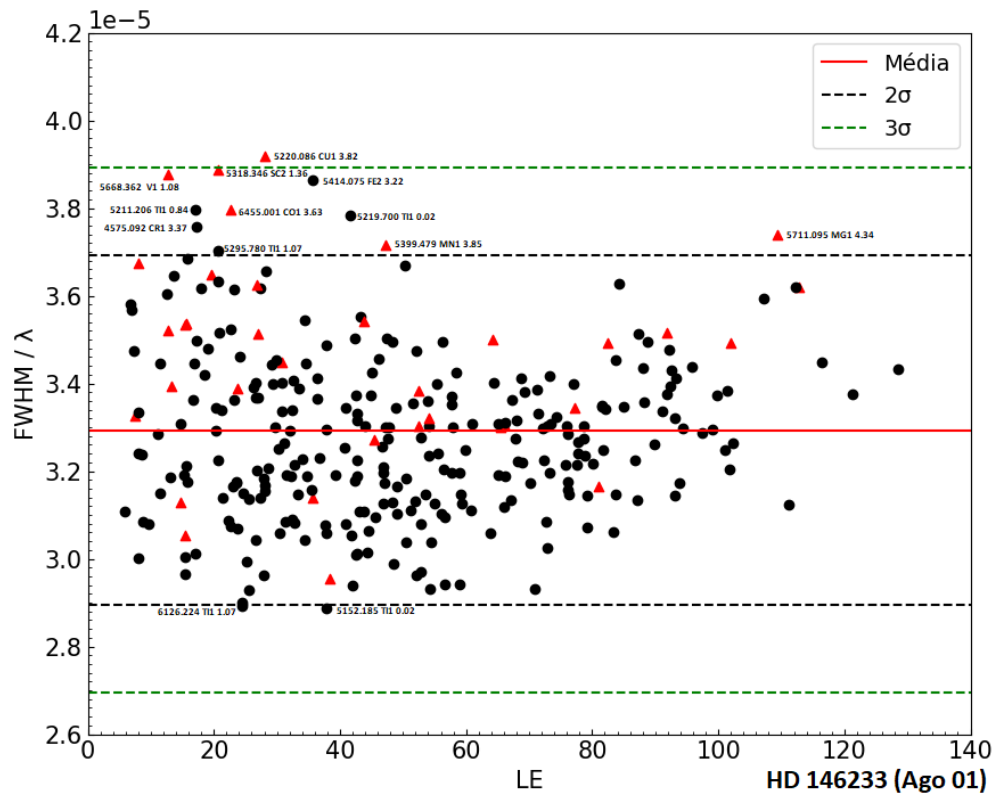
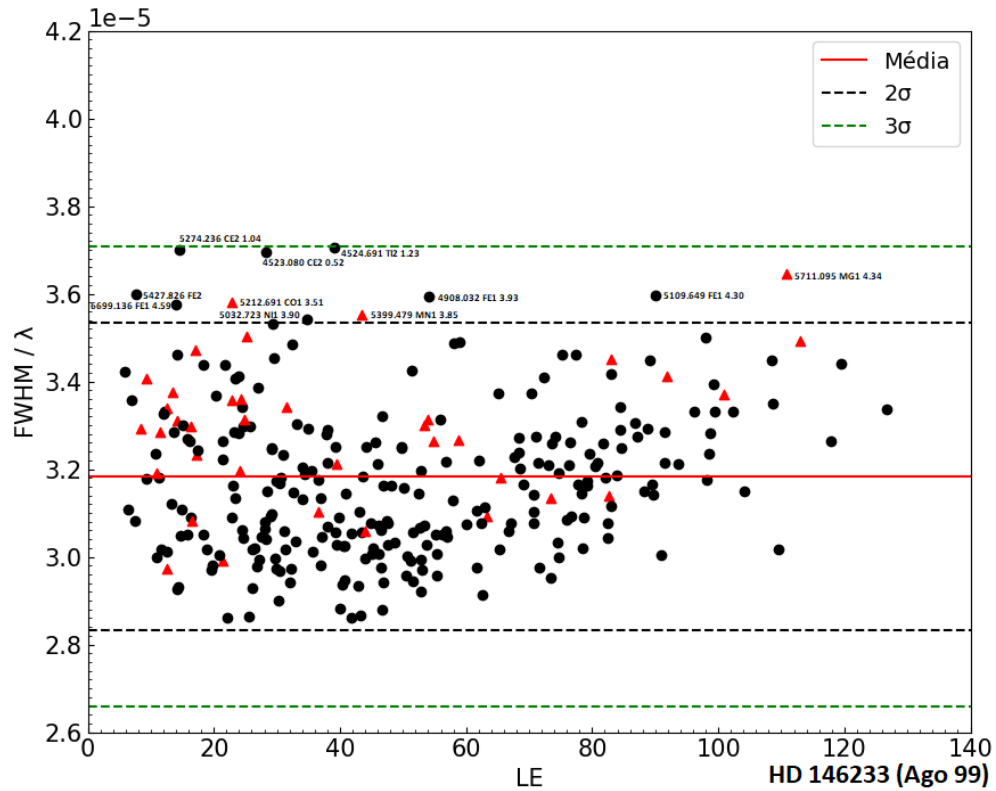
FIGURA 3.18. Teste de $FWHM/\lambda$ vs. LE para HD 68168

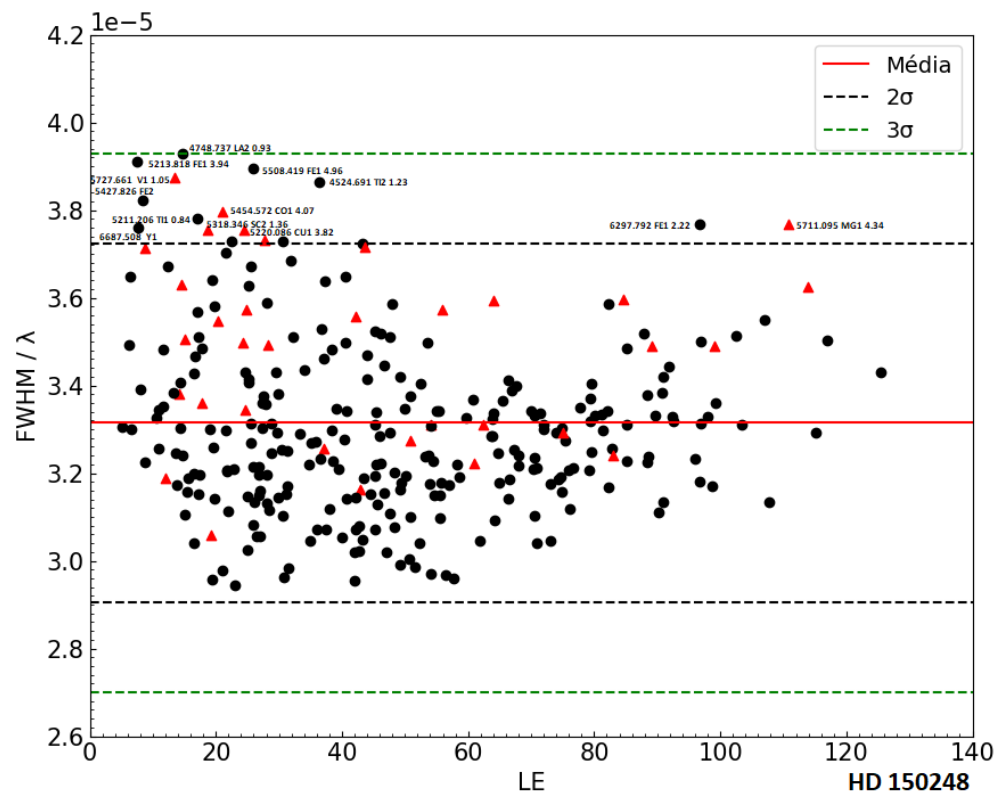
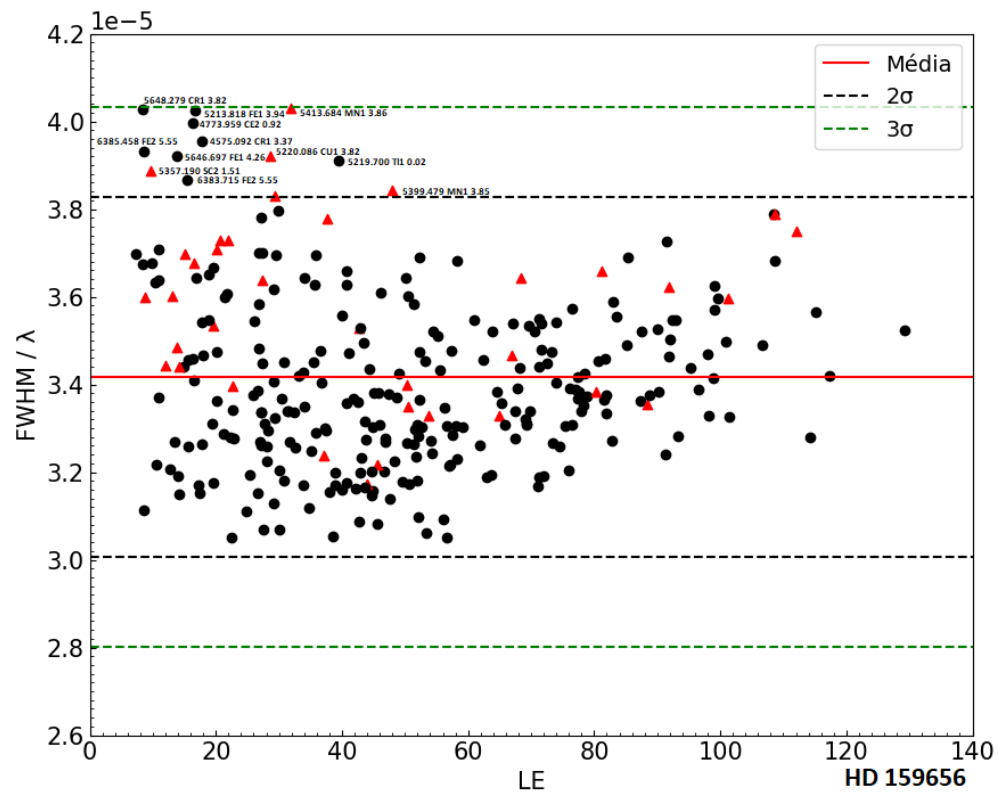
FIGURA 3.19. Teste de FWHM/λ vs. LE para HD 71334FIGURA 3.20. Teste de FWHM/λ vs. LE para HD 88072

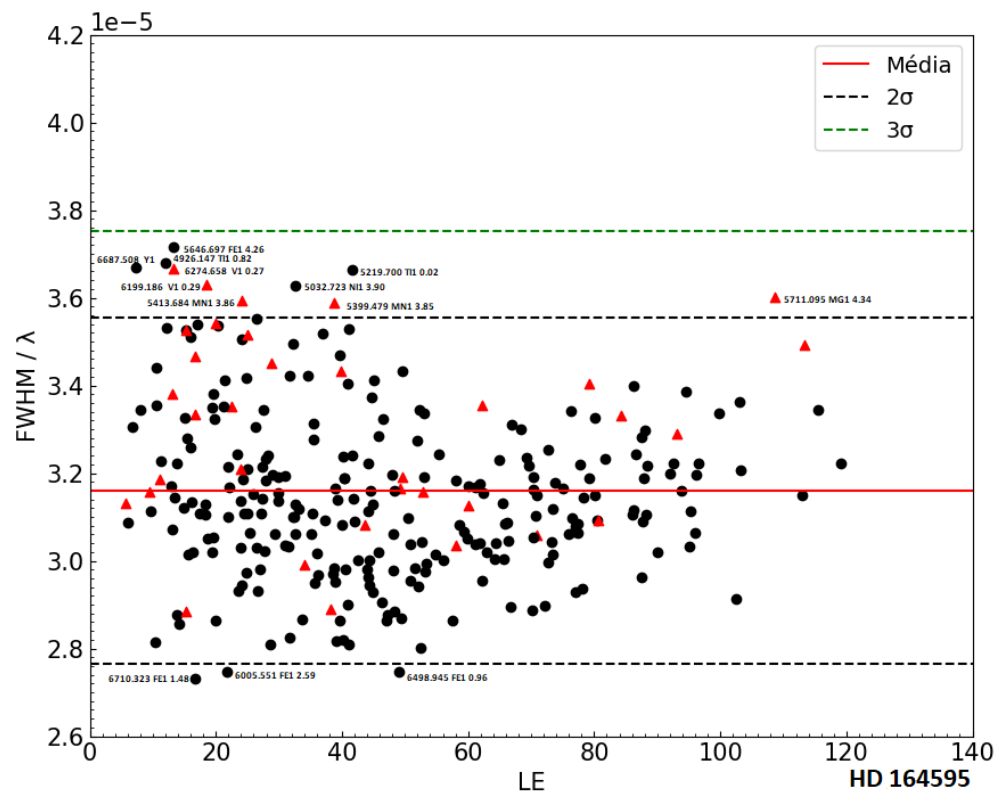
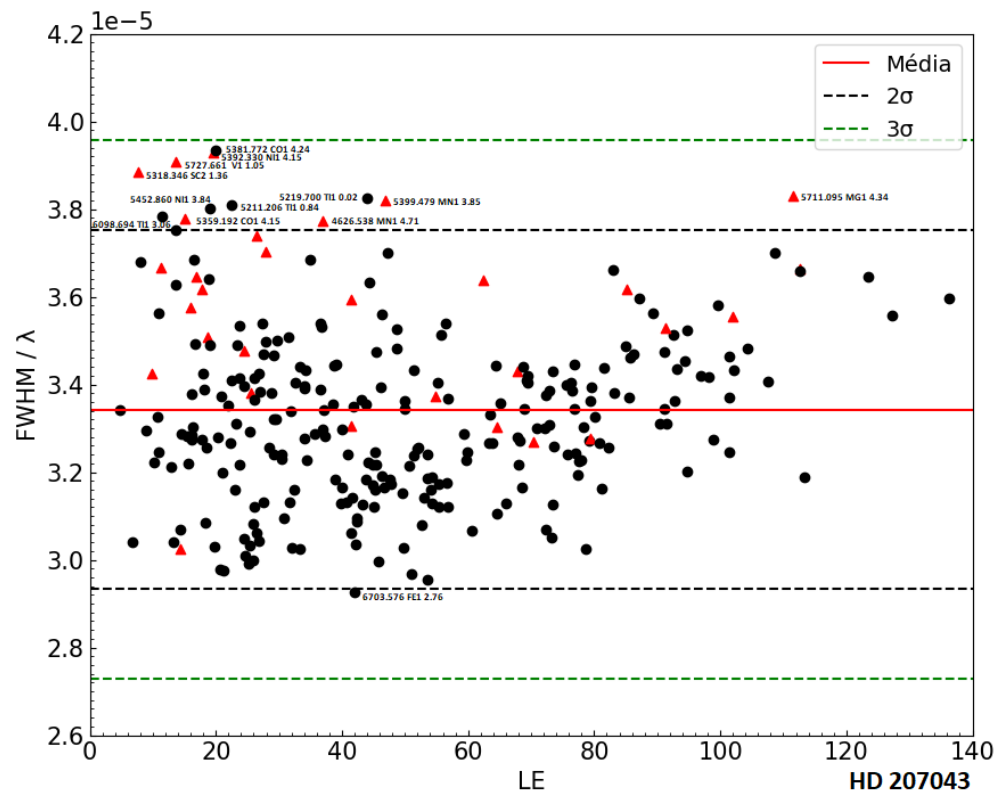
FIGURA 3.21. Teste de FWHM/λ vs. LE para HD 98649 - agostoFIGURA 3.22. Teste de FWHM/λ vs. LE para HD 98649 - fevereiro

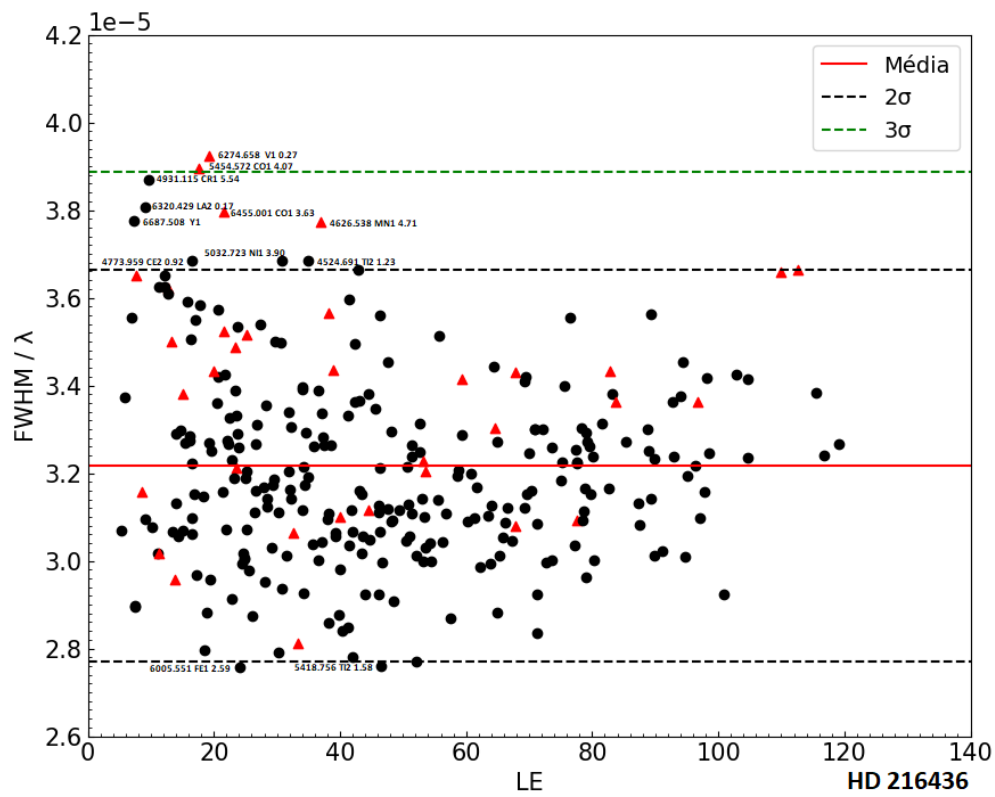
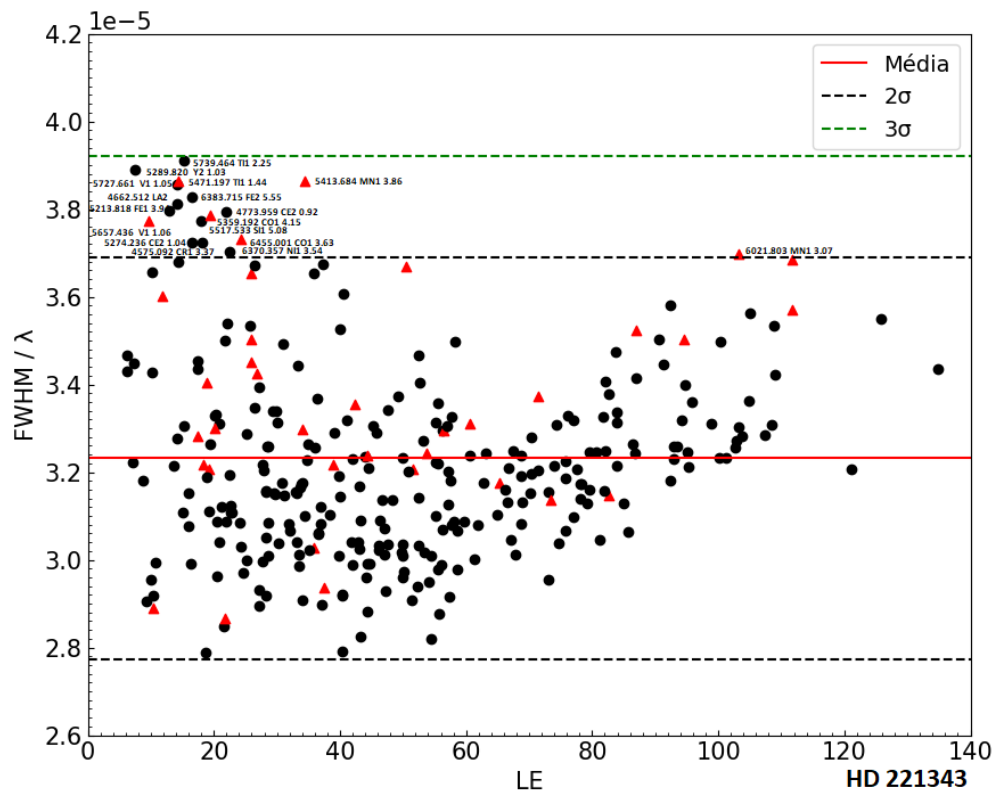
FIGURA 3.23. Teste de FWHM/λ vs. LE para HD 117939FIGURA 3.24. Teste de FWHM/λ vs. LE para HD 118598

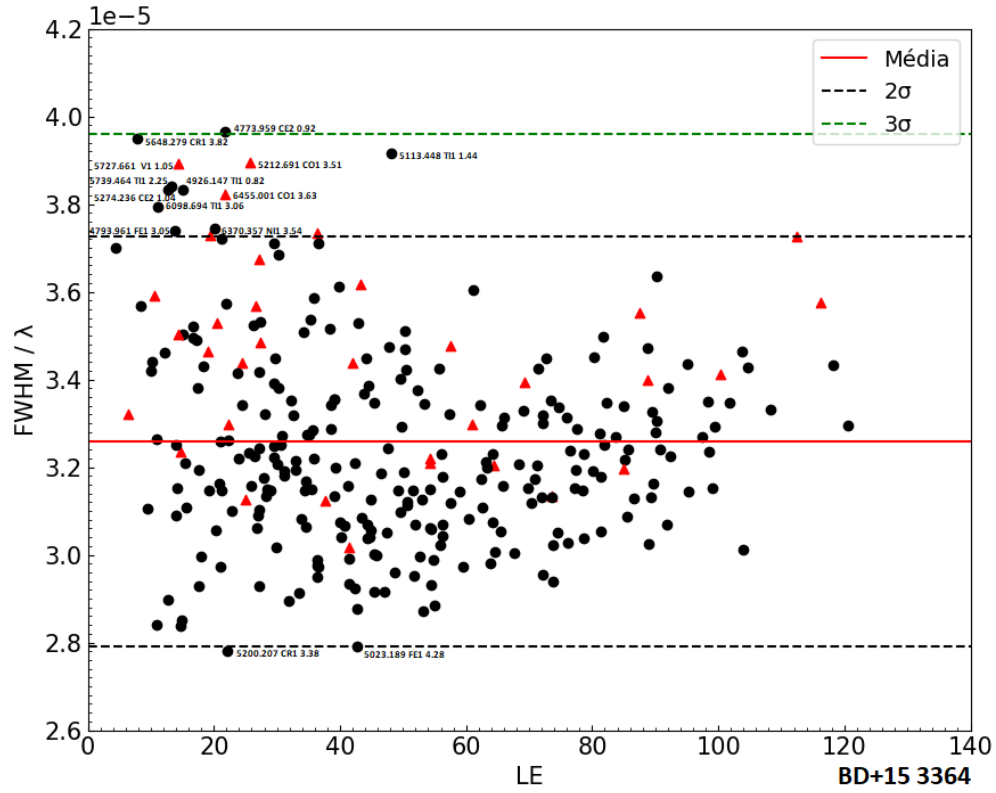
FIGURA 3.25. Teste de FWHM/λ vs. LE para HD 138573FIGURA 3.26. Teste de FWHM/λ vs. LE para HD 140690

FIGURA 3.27. Teste de FWHM/λ vs. LE para HD 146233 - agosto 01FIGURA 3.28. Teste de FWHM/λ vs. LE para HD 146233 - agosto 99

FIGURA 3.29. Teste de FWHM/λ vs. LE para HD 150248FIGURA 3.30. Teste de FWHM/λ vs. LE para HD 159656

FIGURA 3.31. Teste de FWHM/λ vs. LE para HD 164595FIGURA 3.32. Teste de FWHM/λ vs. LE para HD 207043

FIGURA 3.33. Teste de FWHM/λ vs. LE para HD 216436FIGURA 3.34. Teste de FWHM/λ vs. LE para HD 221343

FIGURA 3.35. Teste de FWHM/λ vs. LE para BD+153364

3.2 Diagnóstico 2: Relação entre Profundidade e LE/λ

Outro teste aplicado baseia-se no comportamento da relação entre a profundidade da linha espectral e a largura equivalente dividido pelo comprimento de onda (LE/λ). Esta relação é baseada na ideia de que, para linhas cuja largura a meia altura permanece constante, um aumento na largura equivalente implica diretamente em um aumento na profundidade da linha. Isso sugere a existência de uma relação linear entre a profundidade e LE/λ . Na prática, a profundidade aumenta linearmente com a relação LE/λ , pois $\text{LE} \propto \text{FWHM} \times \text{profundidade}$ e $\text{FWHM} \propto \lambda$. Portanto, a profundidade é proporcional a LE/λ , confirmando a relação linear esperada.

Para gerarmos os gráficos da profundidade, desconsideramos todas as linhas que foram rejeitadas no teste de FWHM (as quais estão listadas no apêndice 1). A análise inicial foi realizada utilizando um ajuste linear único, conforme mostrado no gráfico 3.36

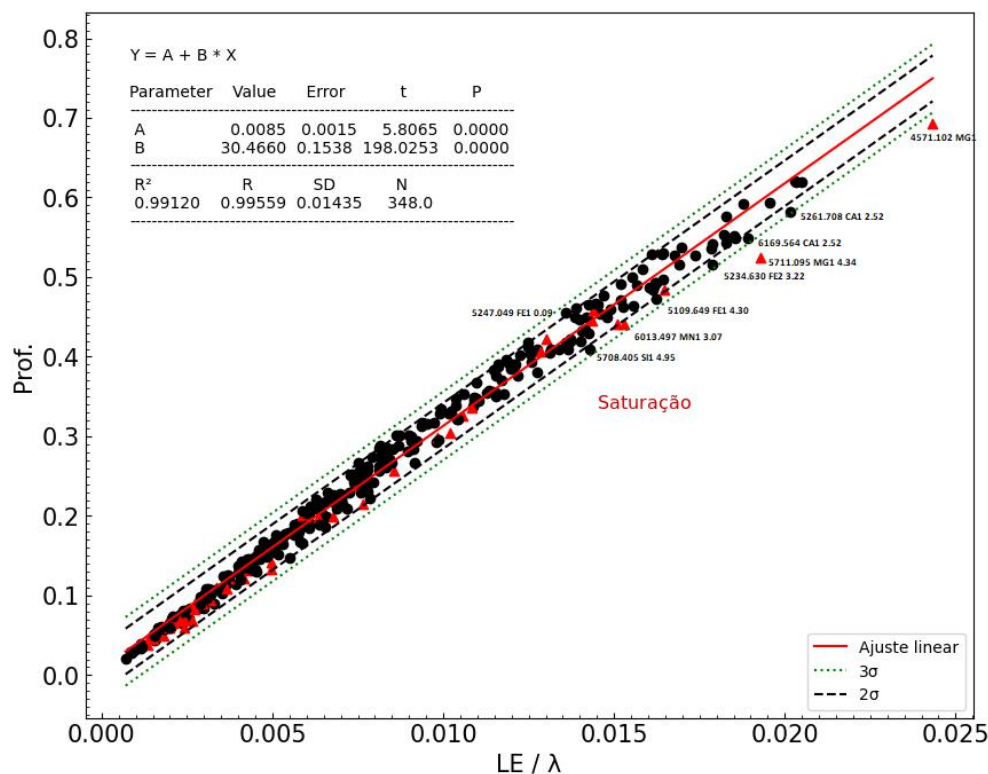


FIGURA 3.36. Teste de profundidade vs LE/λ para Ganimedes. O quadro lista os parâmetros estatísticos da regressão linear, os quais são: R^2 (coeficiente de determinação), R (coeficiente de correlação), SD (desvio padrão) N (número de linhas). A significância dos coeficientes é avaliada pelos valores t , que são calculados dividindo o coeficiente pelo erro padrão; valores absolutos elevados indicam significância. O valor P reflete a probabilidade do coeficiente ser zero, com valores baixos indicando significância estatística. Ambos os eixos são adimensionais. O termo "saturação", indicado em vermelho no gráfico, refere-se ao ponto em que as linhas espectrais alcançam um limite no crescimento de sua intensidade. Esse efeito começa para valores de LE/λ superiores a 0.014.

Contudo, observamos que um modelo com duas retas e um ponto de quebra seria mais adequado, já que uma inflexão é observada no gráfico, a qual fisicamente representa o início da saturação. Por essa razão, um modelo matemático mais apropriado seria um ajuste linear específico para a região linear e outro para a região saturada, ou seja, um ajuste linear duplo, refletindo dois regimes distintos. Para isso, plotamos um gráfico de resíduos, que representa a diferença entre os valores previstos e observados para a profundidade das linhas espectrais em função de LE/λ , permitindo identificar esse ponto de quebra.

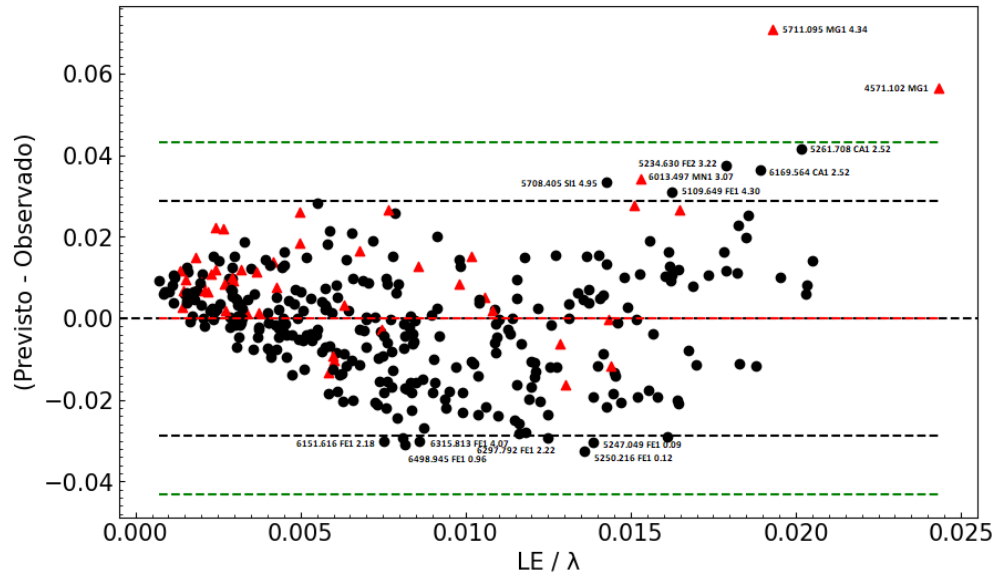


FIGURA 3.37. Resíduo (diferença) entre a profundidade prevista e observada para todo o regime de LEs para Ganimedes.

Assim, testamos qualitativamente a hipótese nula (H_0), de que o ponto de quebra seria constante para todos os espectros, fixado em 0,014. Esse teste tem como objetivo rejeitar a hipótese nula, ou seja, confirmar a presença de um efeito específico. Após análises independentes realizadas pela autora e Gustavo F. Porto de Mello, ambos concordaram sobre o ponto de quebra, com uma exceção clara: a estrela HD 140690, para a qual o ponto de quebra foi identificado em 0,018. Já para HD 117939, a estrela mais fria da amostra, identificamos que sua microturbulência, fator que regula o início da saturação na curva de crescimento, poderia ser menor, justificando um ponto de quebra em valores menores de LE. Contudo, como essa diferença está dentro da margem de erro, decidimos aplicar para este objeto dois pontos de quebra, em 0,014 e 0,012.

Além disso, o gráfico de ajuste linear de profundidade vs. LE/λ para Ganimedes, apresentado abaixo, destaca as linhas fracas ($LE/\lambda < 0,014$). Ao incluir ajustes lineares distintos, considerando inicialmente todas as linhas e depois apenas as linhas fracas, observamos que, ao restringir a análise a intervalos específicos de LE/λ , observamos que a regressão linear não é uma boa representação para as linhas mais intensas. Isso ocorre porque, ao considerar apenas as linhas fracas, a relação entre profundidade e LE/λ se mantém linear, mas essa linearidade não se aplica de forma adequada para as linhas mais fortes, cujos comportamentos são diferentes ao longo da faixa de valores de LE/λ .

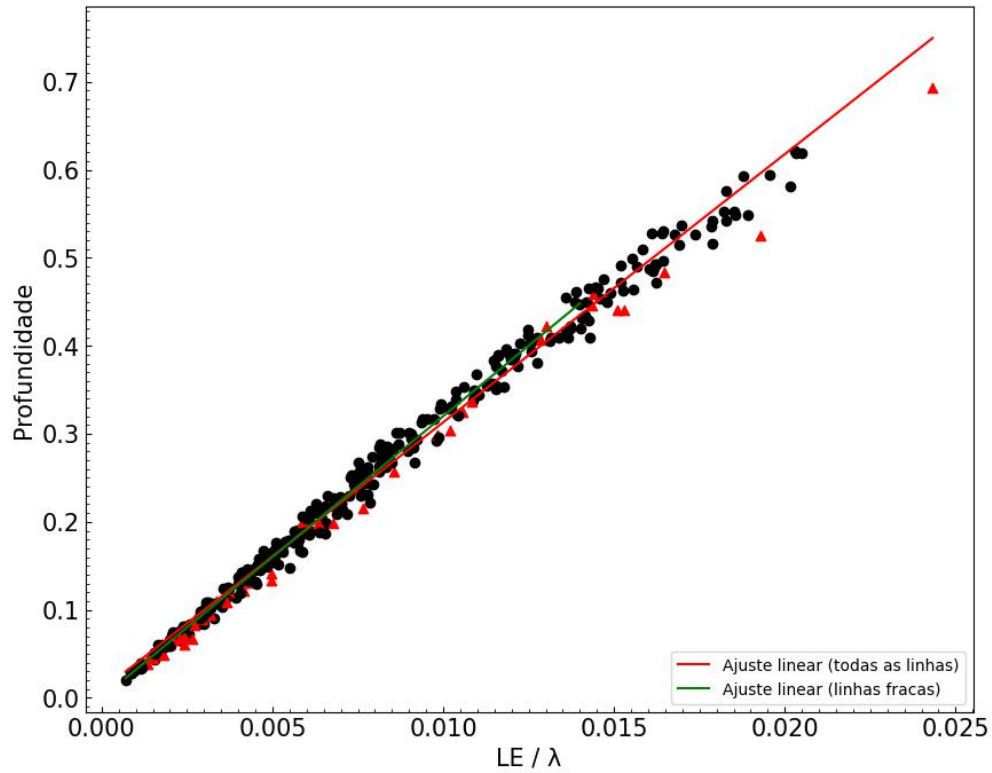


FIGURA 3.38. Ajuste linear de profundidade vs. LE/λ para Ganimedes, com destaque para linhas fracas ($LE/\lambda < 0,014$)

Apresentaremos o gráfico de profundidade versus LE/λ com pontos de quebra para Ganimedes, seguido pelos gráficos de resíduos com essas quebras, tanto para Ganimedes quanto para os outros espectros. O objetivo principal deste último gráfico é avaliar o desvio dos pontos medidos em relação à expectativa teórica, com base em uma regressão linear ajustada para dois intervalos específicos de LE/λ . Em ambos os gráficos, incluímos linhas representando o desvio padrão ($\pm 2\sigma$ e $\pm 3\sigma$), além de utilizar triângulos vermelhos para marcar as linhas com estrutura hiperfina e círculos pretos para as demais.

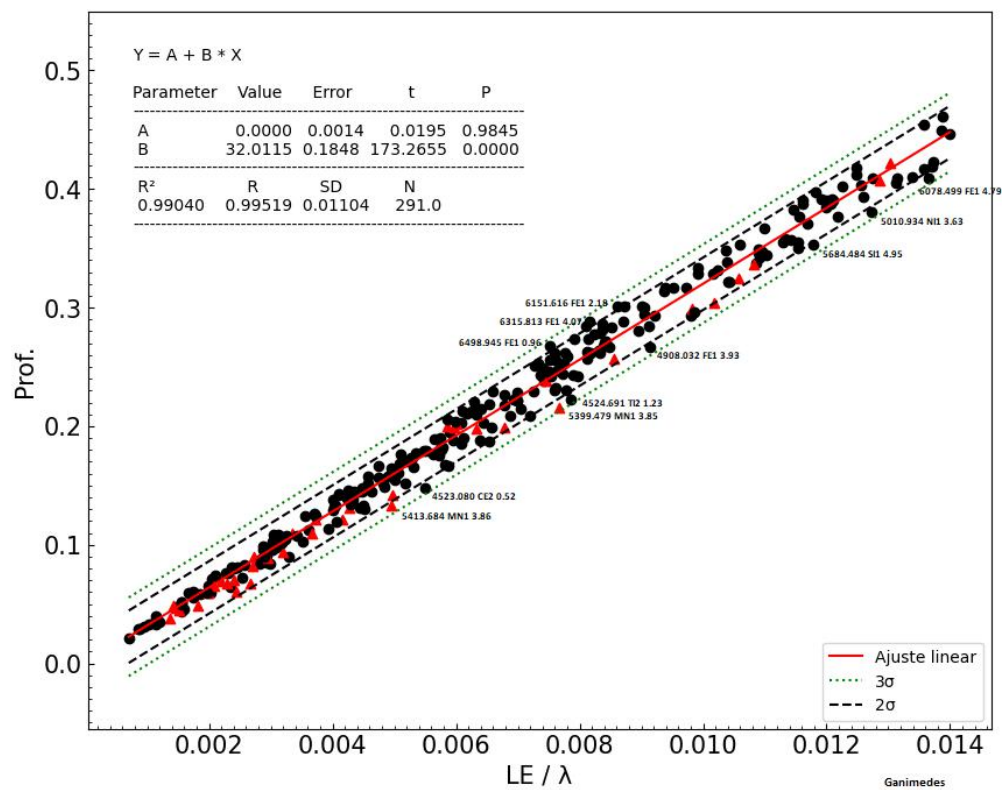


FIGURA 3.39. Teste de profundidade vs LE/λ para Ganymedes: Linhas com LE/λ < 0,014. O significado dos parâmetros da regressão linear são os mesmo da figura 3.36.

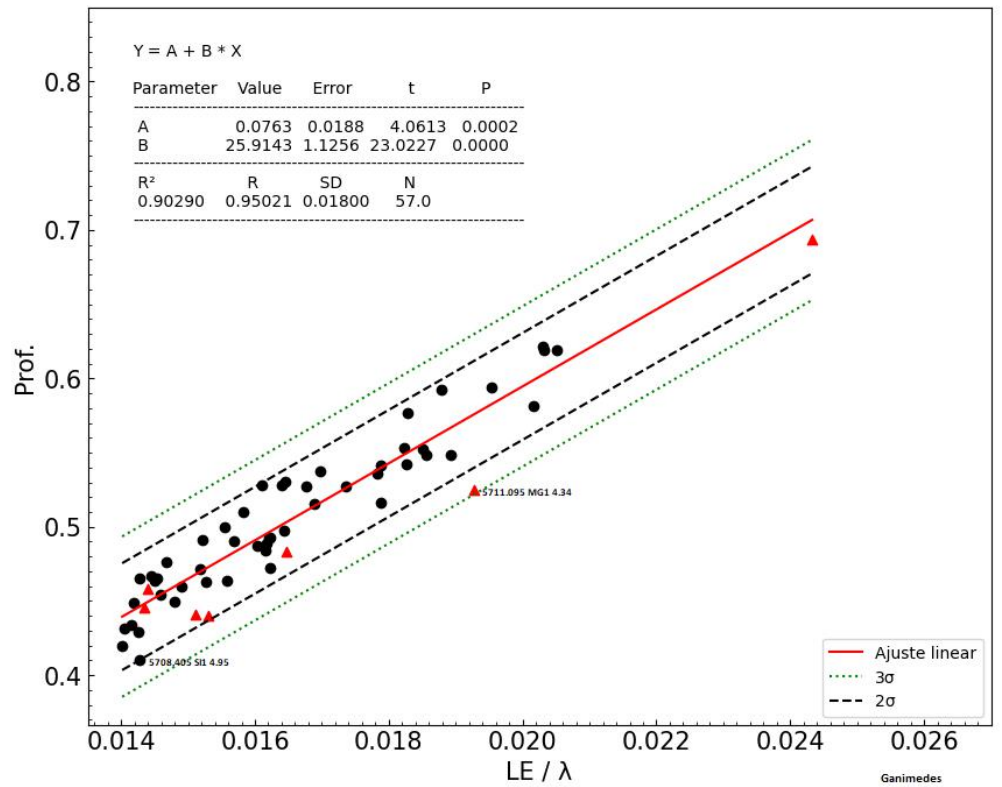


FIGURA 3.40. Teste de profundidade vs LE/λ para Ganymedes: Linhas com LE/λ > 0,014. O significado dos parâmetros da regressão linear são os mesmo da figura 3.36.

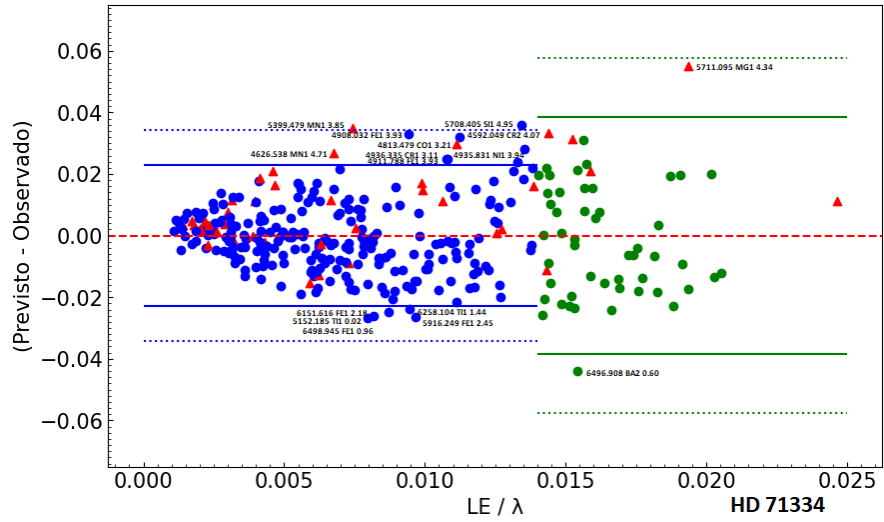


FIGURA 3.50. Teste do resíduo da profundidade prevista menos a observada para HD 71334

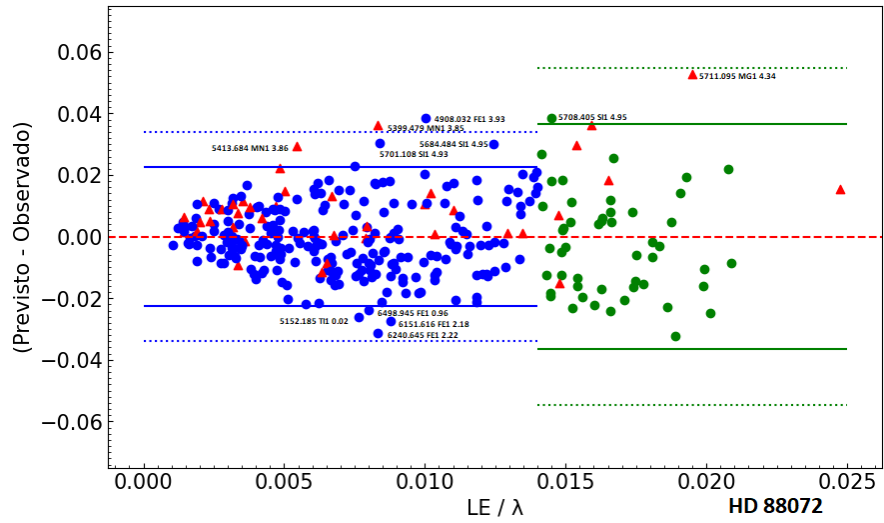


FIGURA 3.51. Teste do resíduo da profundidade prevista menos a observada para HD 88072

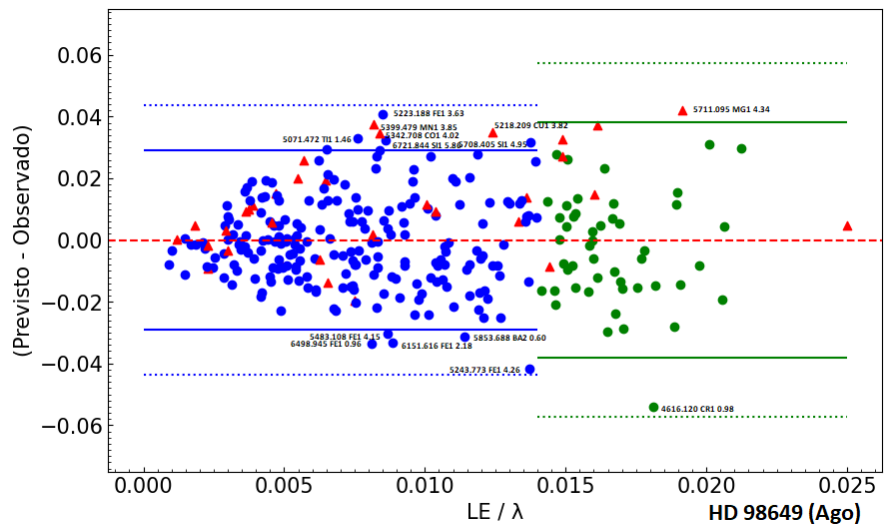
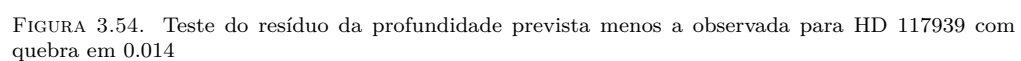


FIGURA 3.52. Teste do resíduo da profundidade prevista menos a observada para HD 98649 - agosto



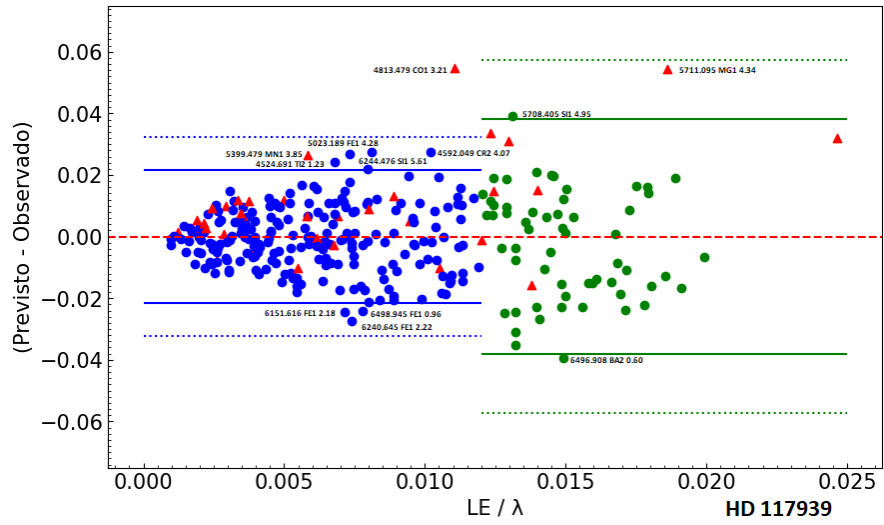


FIGURA 3.55. Teste do resíduo da profundidade prevista menos a observada para HD 117939 com quebra em 0.012

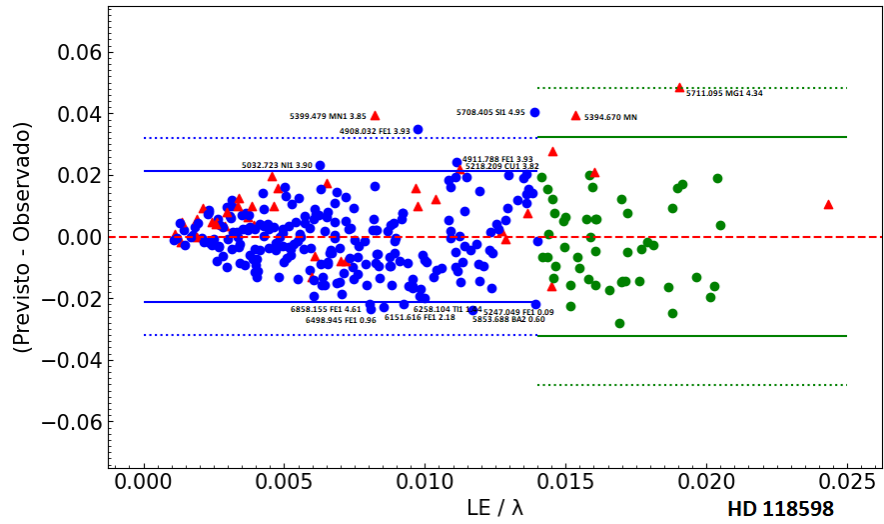


FIGURA 3.56. Teste do resíduo da profundidade prevista menos a observada para HD 118598

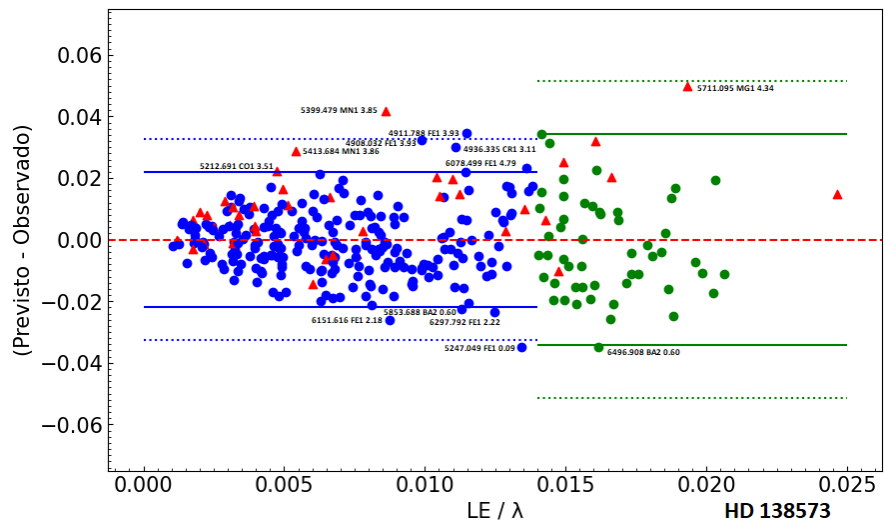


FIGURA 3.57. Teste do resíduo da profundidade prevista menos a observada para HD 138573

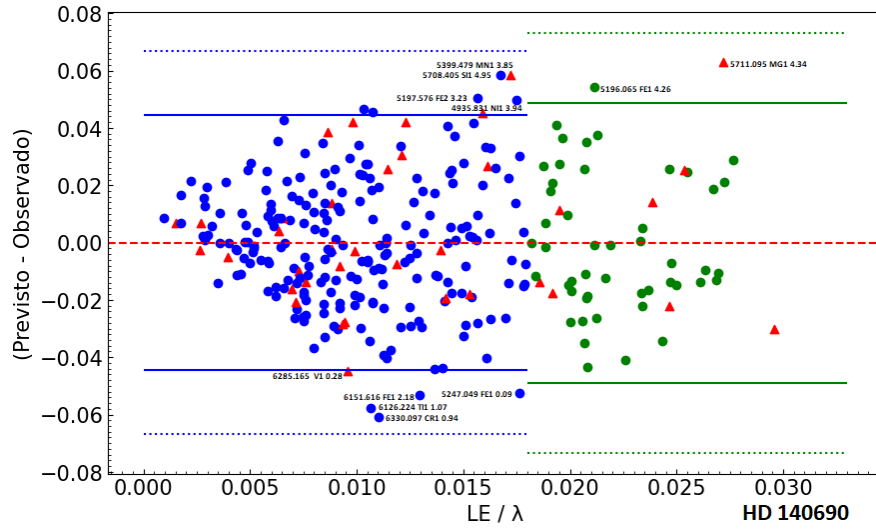


FIGURA 3.58. Teste do resíduo da profundidade prevista menos a observada para HD 140690

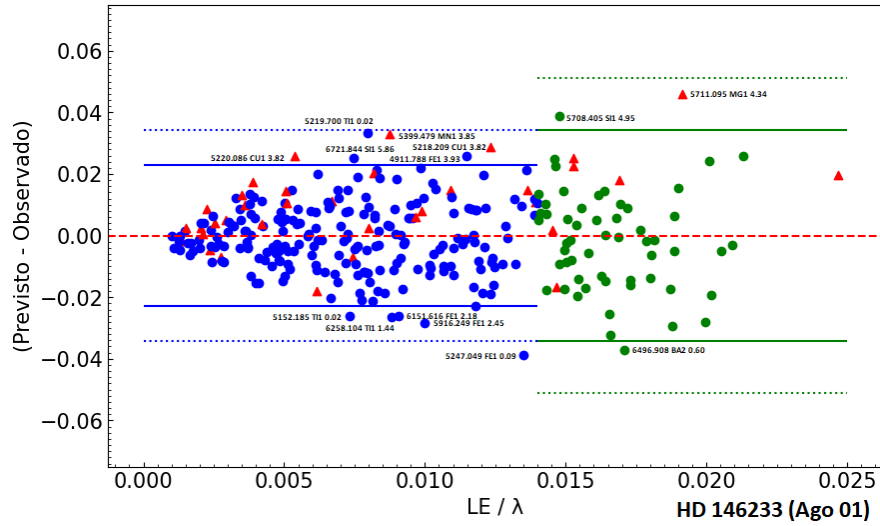


FIGURA 3.59. Teste do resíduo da profundidade prevista menos a observada para 146233 - agosto 01

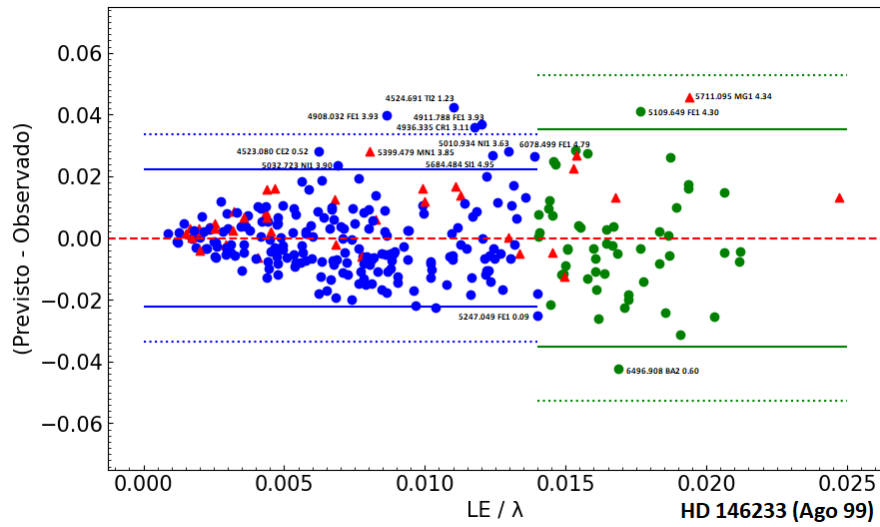


FIGURA 3.60. Teste do resíduo da profundidade prevista menos a observada para 146233 - agosto 99

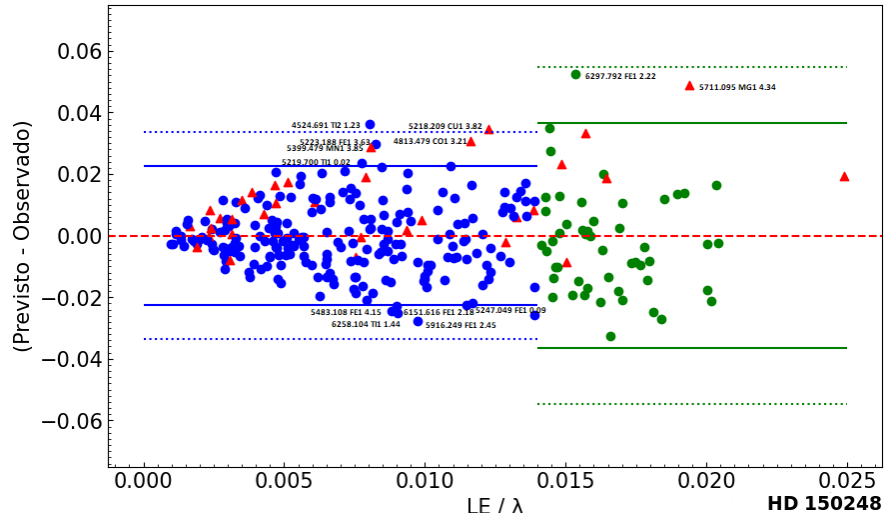


FIGURA 3.61. Teste do resíduo da profundidade prevista menos a observada para HD 150248

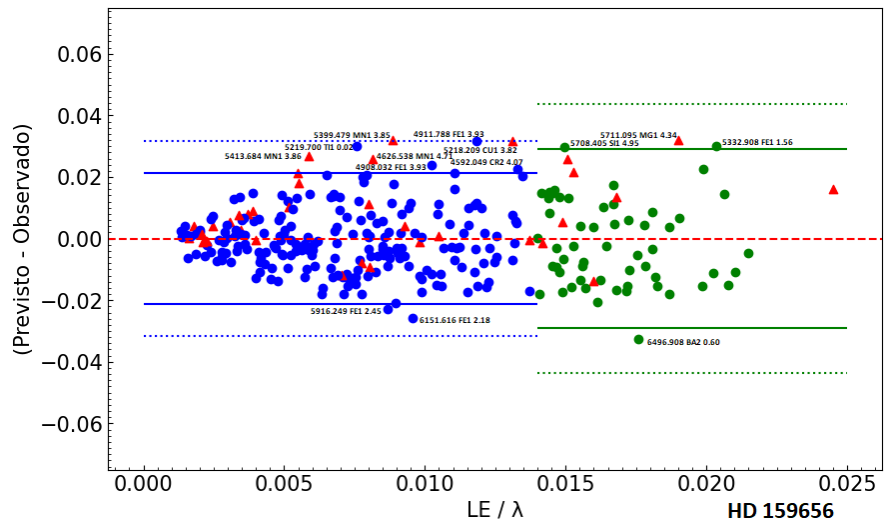


FIGURA 3.62. Teste do resíduo da profundidade prevista menos a observada para HD 159656

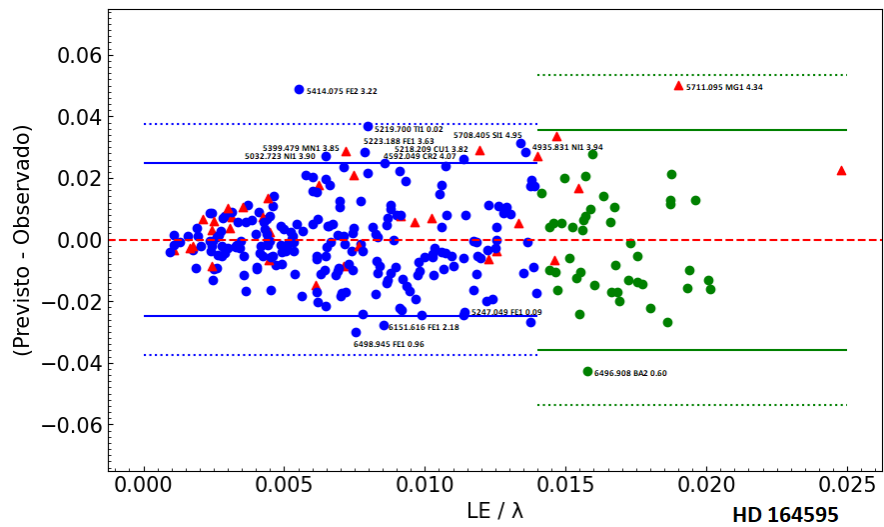


FIGURA 3.63. Teste do resíduo da profundidade prevista menos a observada para HD 164595

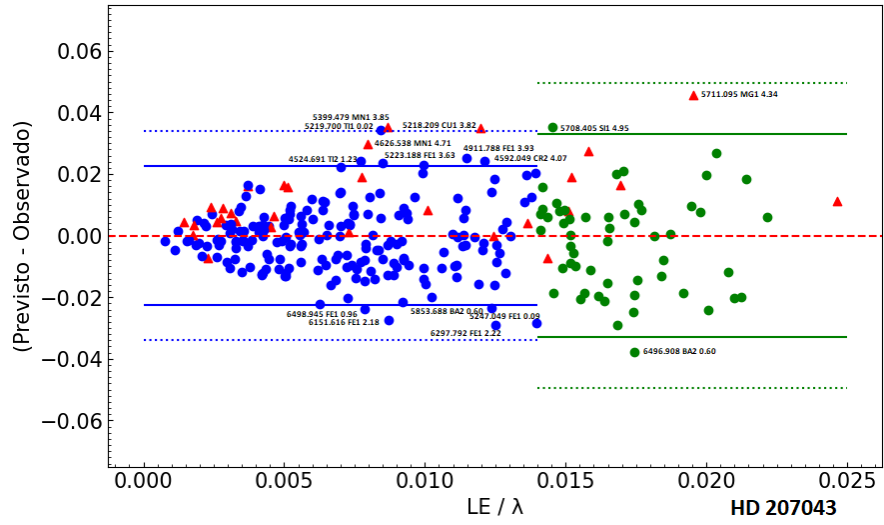


FIGURA 3.64. Teste do resíduo da profundidade prevista menos a observada para HD 207043

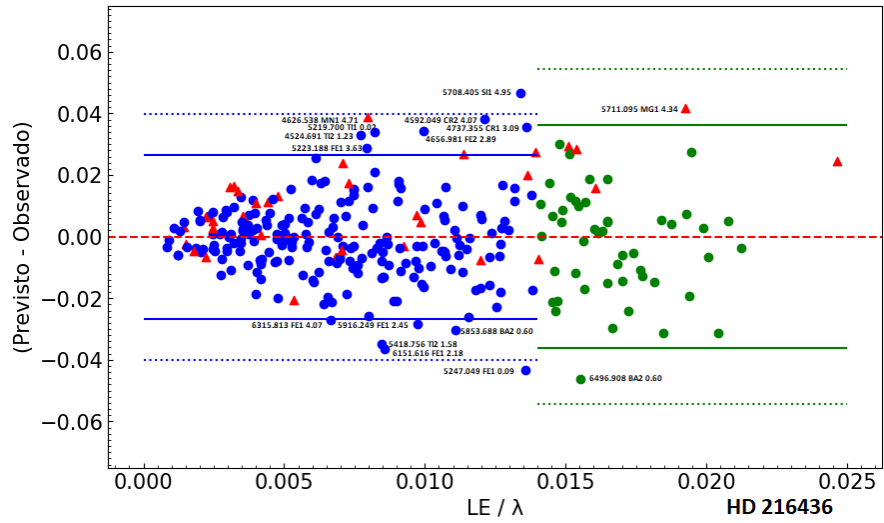


FIGURA 3.65. Teste do resíduo da profundidade prevista menos a observada para HD 216436

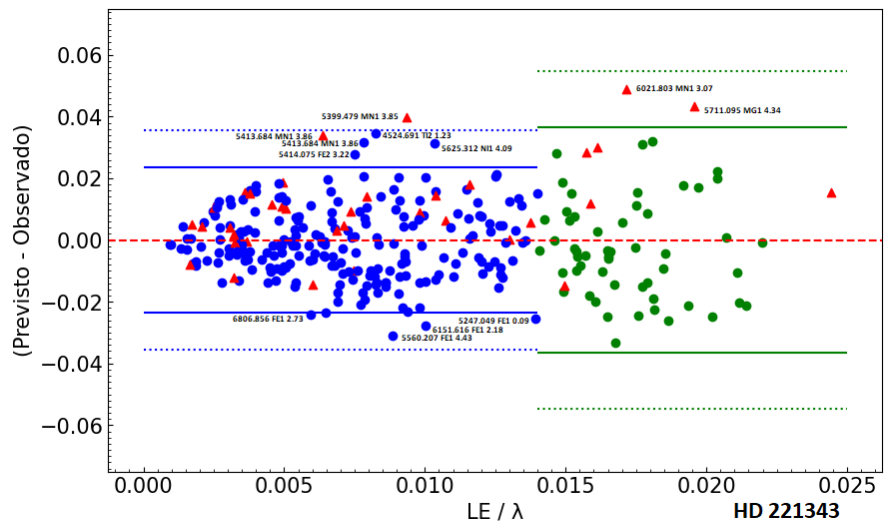


FIGURA 3.66. Teste do resíduo da profundidade prevista menos a observada para HD 221343

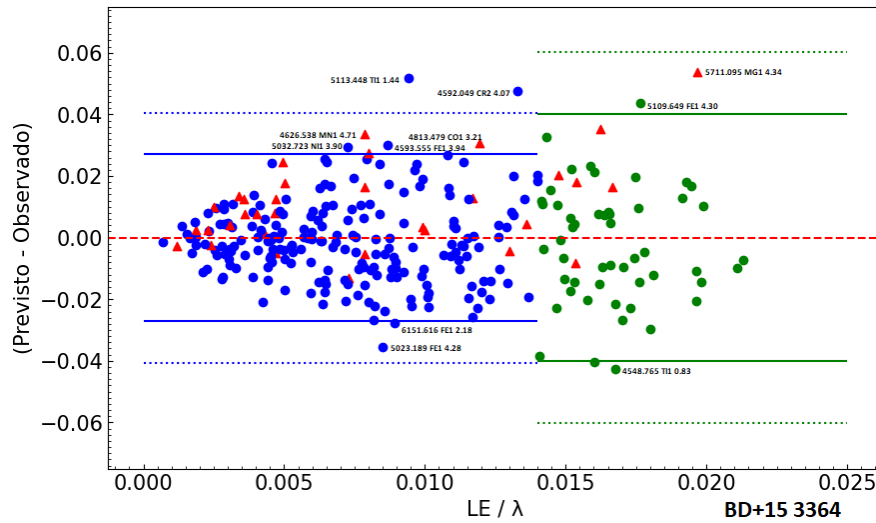


FIGURA 3.67. Teste do resíduo da profundidade prevista menos a observada para BD+153364

3.2.1 Análise Estatística

Em alguns gráficos estão representadas algumas medidas estatísticas. A seguir, detalharemos cada uma delas.

- Parâmetros da Reta (A, B, Error, t e P):** A equação da reta é expressada como $Y = A + B \cdot X$, onde A é o coeficiente linear, que indica o valor de Y quando X é igual a zero, e B é o coeficiente angular, que determina a inclinação da reta e a taxa de variação de Y em relação a X . Na coluna "Error", temos o erro padrão associado à estimativa desses coeficientes. O t-value para A é calculada dividindo A pelo seu erro padrão, onde um valor absoluto maior sugere que A é significativamente diferente de zero. O mesmo se aplica a B ; valores absolutos altos indicam que a inclinação da reta é estatisticamente significativa. Por fim, o valor P para A representa a probabilidade de observar uma estatística t tão extrema quanto a observada, sob a hipótese nula de que A é igual a zero. Um P pequeno sugere que A é estatisticamente significativo. De maneira parecida, o P pequeno para B indica que a inclinação da reta é significativamente diferente de zero.
- R^2 , R , SD , N :** O R^2 (Coeficiente de Determinação) indica o quão bem os valores estimados da variável dependente se ajustam aos dados reais. Um valor próximo de 1 indica que o modelo se ajusta bem. O R (Coeficiente de Correlação) quantifica a força e a direção da relação linear entre duas variáveis, variando de -1 a 1, onde 1 indica uma correlação positiva perfeita, -1 uma correlação negativa perfeita, e

0 indica nenhuma correlação. O SD (Desvio Padrão) é uma medida de dispersão que indica o quanto os valores se distribuem ao redor da média, e o N representa o tamanho da amostra, que, no nosso caso, corresponde ao número de linhas utilizadas.

Com base nos gráficos apresentados e aplicando o critério de 3σ para a remoção de linhas, optamos por excluir as seguintes linhas de Fe I: 5072.677 de HD 8291 (fevereiro), 6079.014 de HD 8291 (setembro) e 4908.032 de HD 146233 (agosto 99). No entanto, as linhas que ultrapassam 3σ , mas estão próximas do limite, foram mantidas. As linhas restantes de Fe I serão discutidas na próxima seção.

3.3 Comparação Direta das Linhas do Fe I: LE, Profundidade e FWHM

Para realizar esse diagnóstico, foram selecionadas todas as linhas de Fe I que passaram nos testes discutidos nas seções anteriores. O elemento foi escolhido por ser a espécie química mais representada, com o maior número de linhas disponíveis para análise. Qualquer grandeza medida que envolva um grande potencial de excitação do nível inferior da transição de estado deve ser sensível à temperatura efetiva, pois as populações dos níveis de excitação, segundo a equação de Boltzmann, dependem tanto dos potenciais de excitação quanto da temperatura do meio de formação.

Assim, com base nessas linhas de Fe I, foram construídos novos gráficos nos quais os dados dos espectros foram plotados na ordenada e os de Ganimedes na abscissa, permitindo uma comparação baseada em regressões lineares. Os gráficos abordam LE, profundidade e FWHM, com o objetivo de comparar a estrela analisada com o Sol. Nas figuras 3.68 a 3.142 apresentamos os gráficos de todos os espectros e, no próximo capítulo, realizaremos uma análise detalhada de cada um.

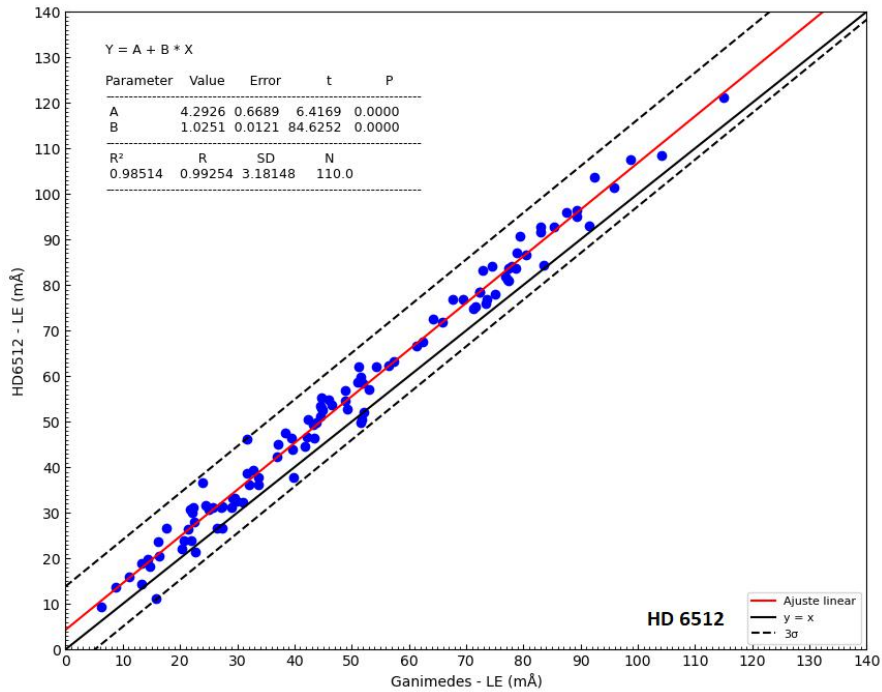


FIGURA 3.68. Análise das linhas de Fe I: LE para HD 6512. As definições dos parâmetros estatísticos são as mesmas da figura 3.36.

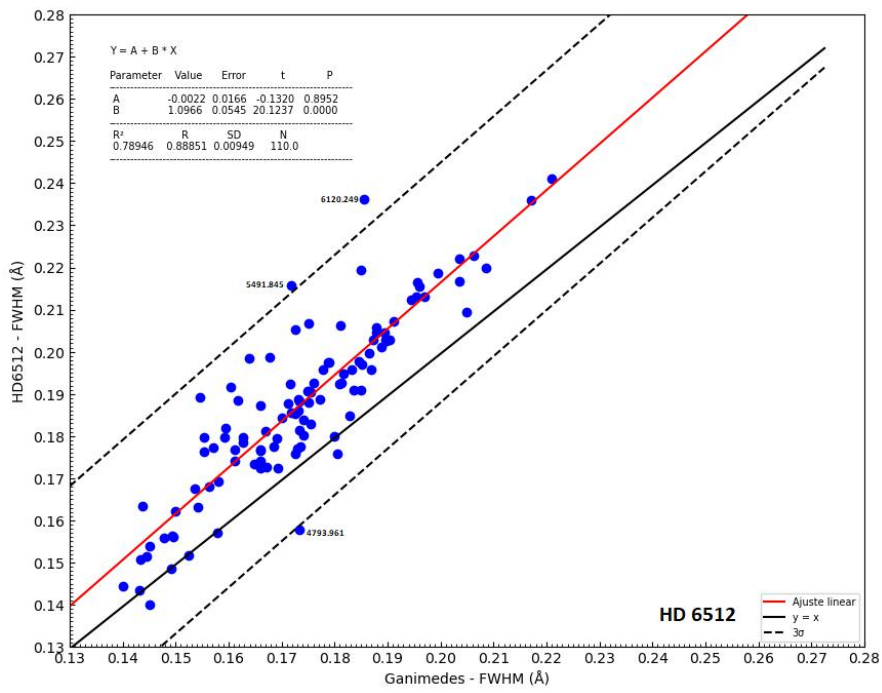


FIGURA 3.69. Análise das linhas de Fe I: FWHM para HD 6512. As definições dos parâmetros estatísticos são as mesmas da figura 3.36.

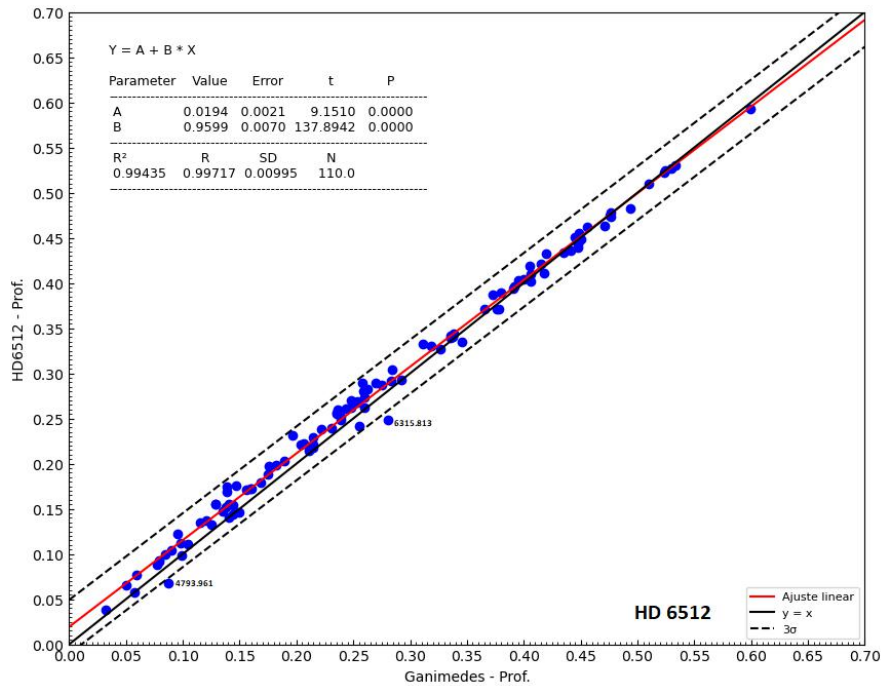


FIGURA 3.70. Análise das linhas de Fe I: Profundidade para HD 6512. As definições dos parâmetros estatísticos são as mesmas da figura 3.36.

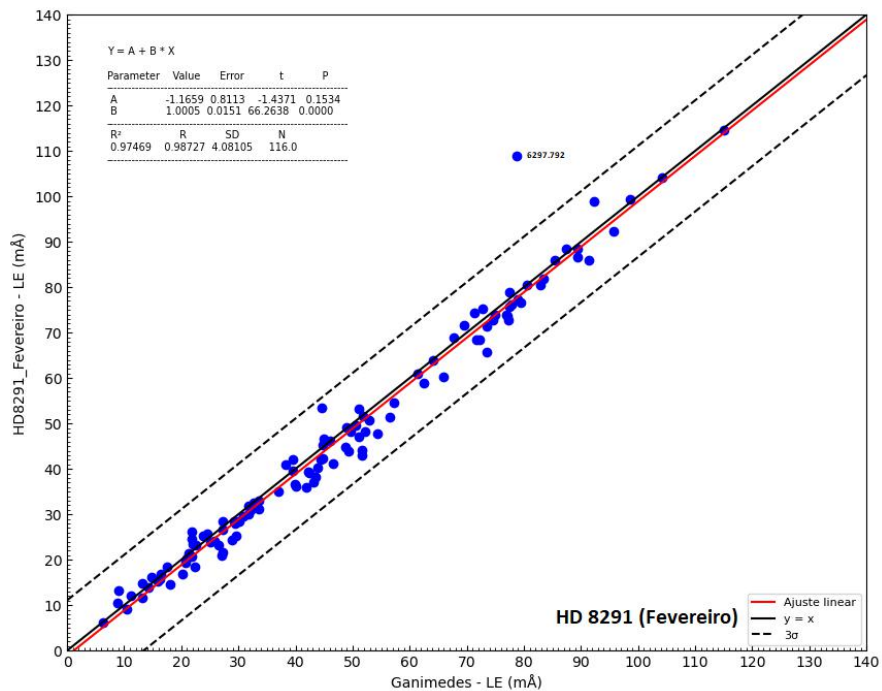


FIGURA 3.71. Análise das linhas de Fe I: LE para HD 8291 - fevereiro. As definições dos parâmetros estatísticos são as mesmas da figura 3.36.

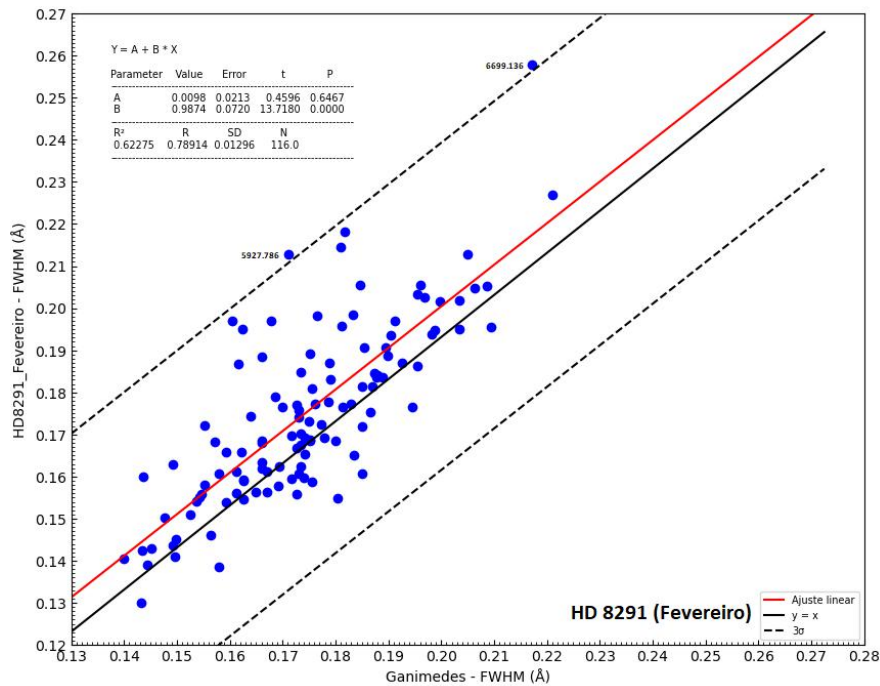


FIGURA 3.72. Análise das linhas de Fe I: FWHM para HD 8291 - fevereiro. As definições dos parâmetros estatísticos são as mesmas da figura 3.36.

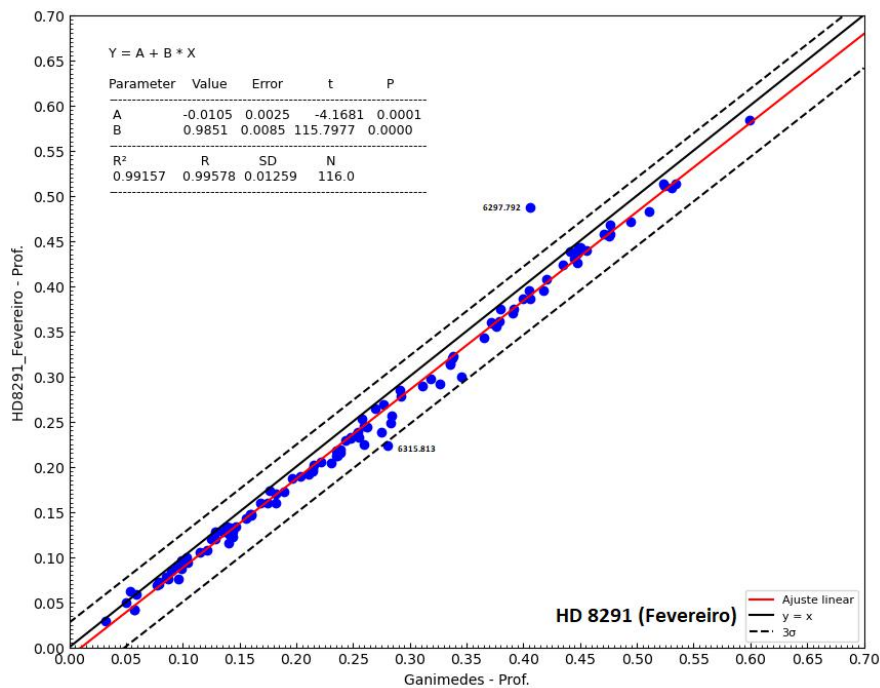


FIGURA 3.73. Análise das linhas de Fe I: Profundidade para HD 8291 - fevereiro. As definições dos parâmetros estatísticos são as mesmas da figura 3.36.

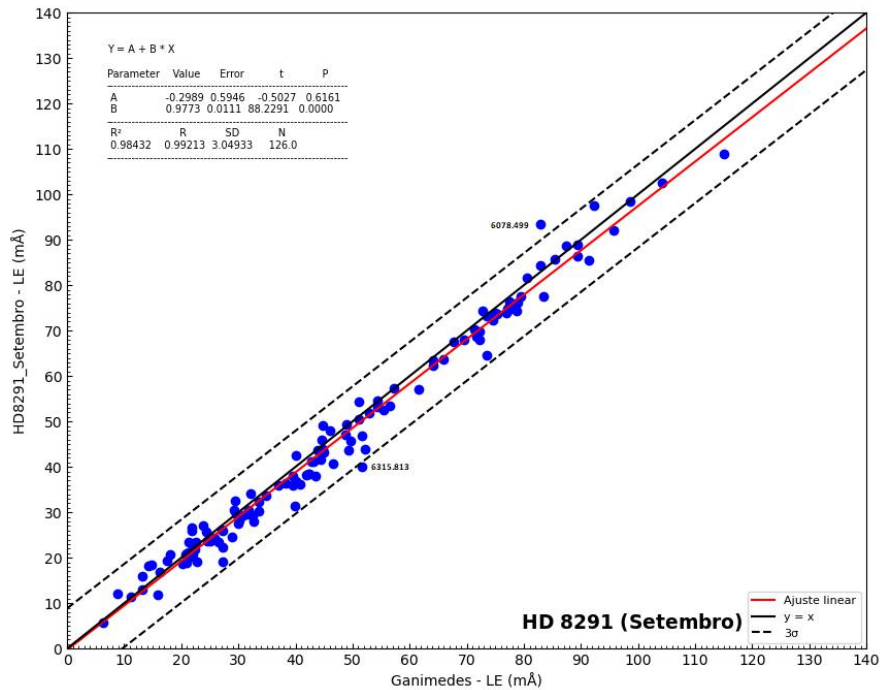


FIGURA 3.74. Análise das linhas de Fe I: LE para HD 8291 - setembro. As definições dos parâmetros estatísticos são as mesmas da figura 3.36.

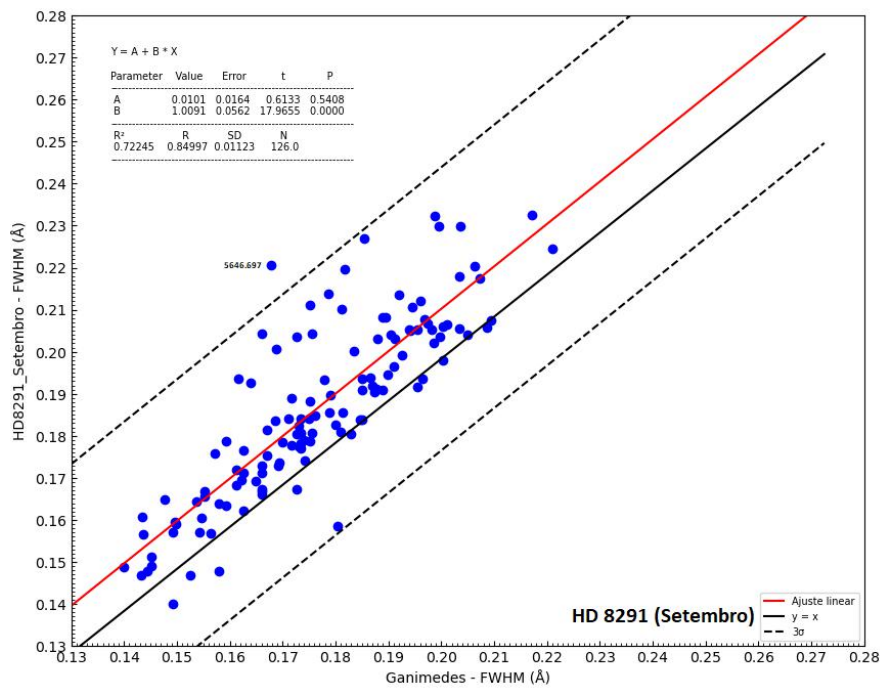


FIGURA 3.75. Análise das linhas de Fe I: FWHM para HD 8291 - setembro. As definições dos parâmetros estatísticos são as mesmas da figura 3.36.

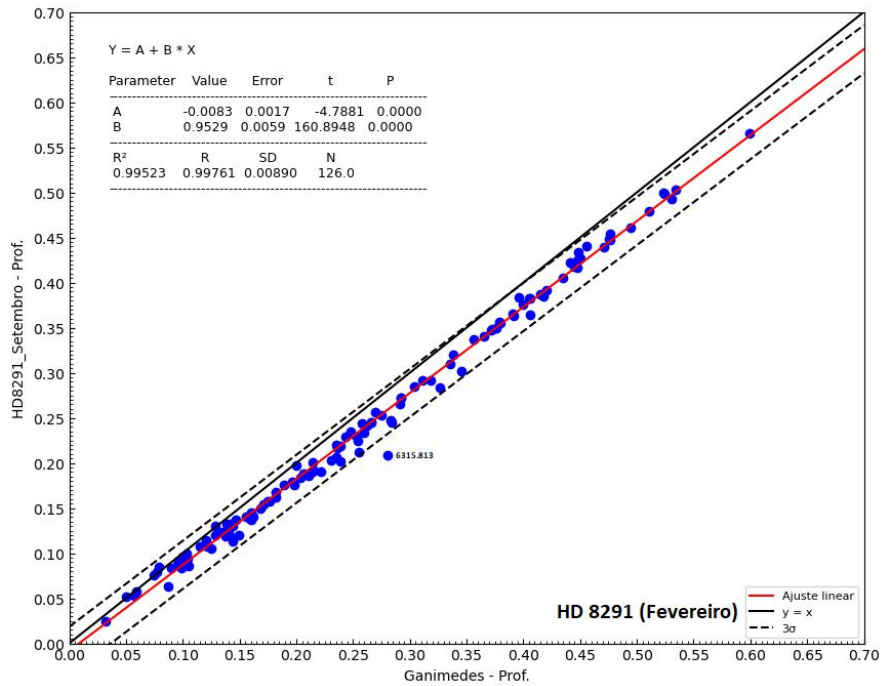


FIGURA 3.76. Análise das linhas de Fe I: Profundidade para HD 8291 - setembro. As definições dos parâmetros estatísticos são as mesmas da figura 3.36.

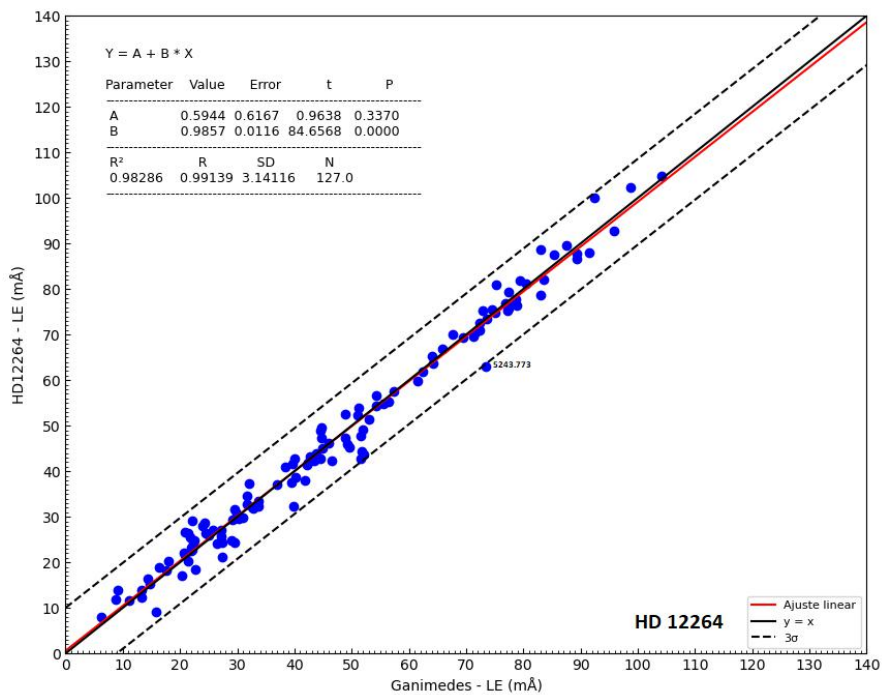


FIGURA 3.77. Análise das linhas de Fe I: LE para HD 12264. As definições dos parâmetros estatísticos são as mesmas da figura 3.36.

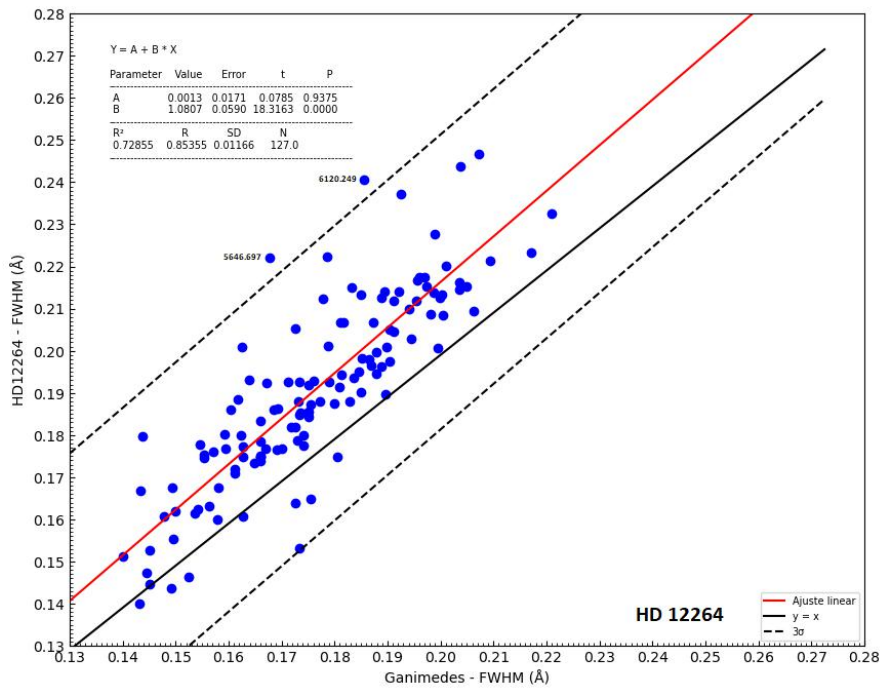


FIGURA 3.78. Análise das linhas de Fe I: FWHM para HD 12264. As definições dos parâmetros estatísticos são as mesmas da figura 3.36.

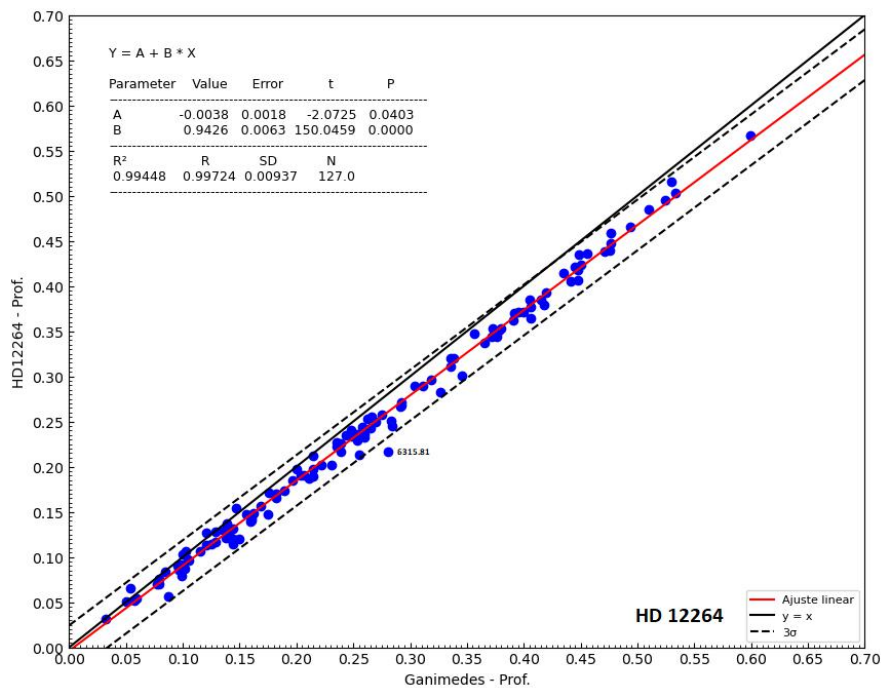


FIGURA 3.79. Análise das linhas de Fe I: Profundidade para HD 12264. As definições dos parâmetros estatísticos são as mesmas da figura 3.36.

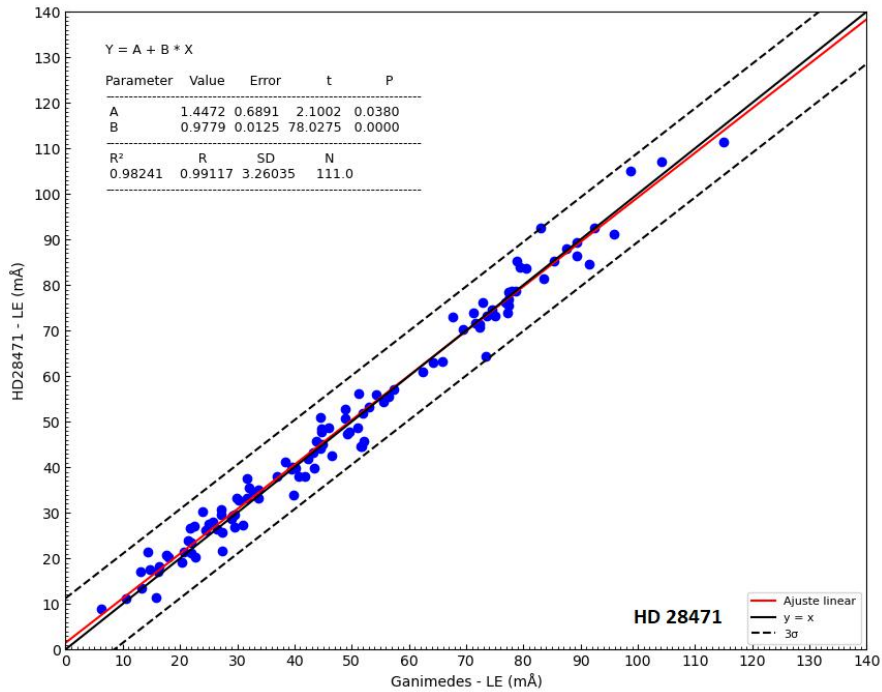


FIGURA 3.80. Análise das linhas de Fe I: LE para HD 28471. As definições dos parâmetros estatísticos são as mesmas da figura 3.36.

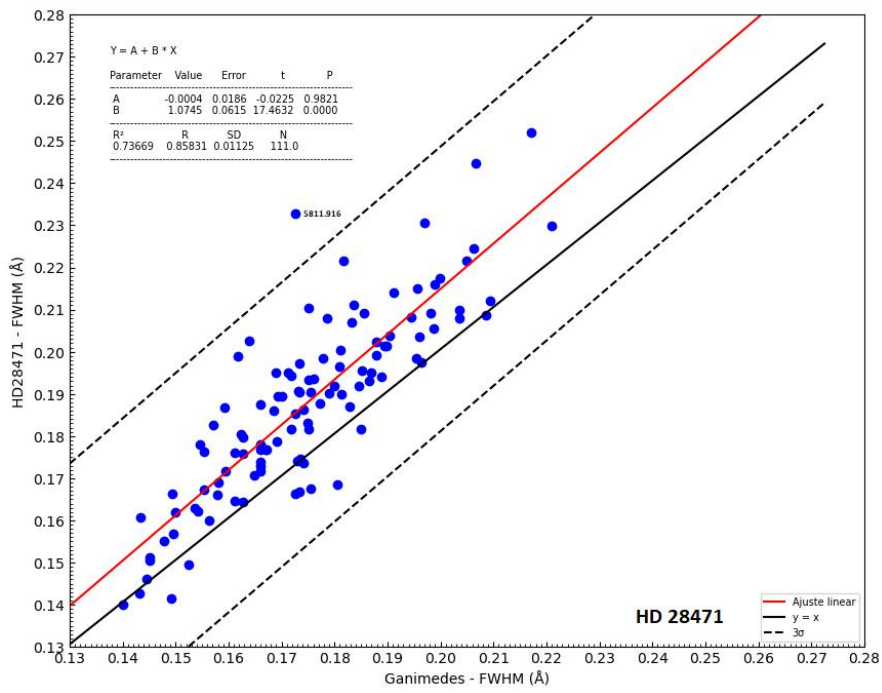


FIGURA 3.81. Análise das linhas de Fe I: FWHM para HD 28471. As definições dos parâmetros estatísticos são as mesmas da figura 3.36.

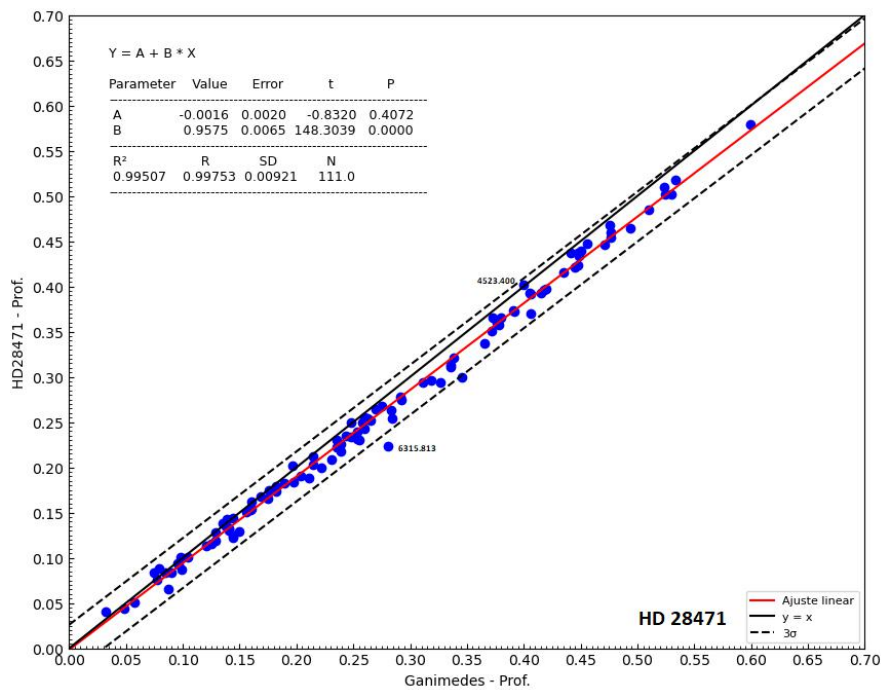


FIGURA 3.82. Análise das linhas de Fe I: Profundidade para HD 28471. As definições dos parâmetros estatísticos são as mesmas da figura 3.36.

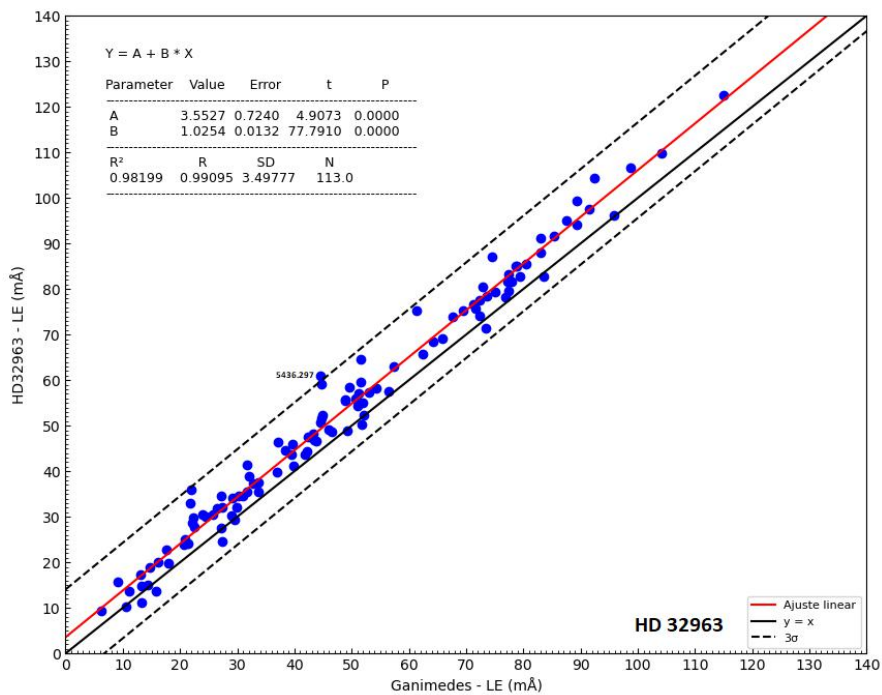


FIGURA 3.83. Análise das linhas de Fe I: LE para HD 32963. As definições dos parâmetros estatísticos são as mesmas da figura 3.36.

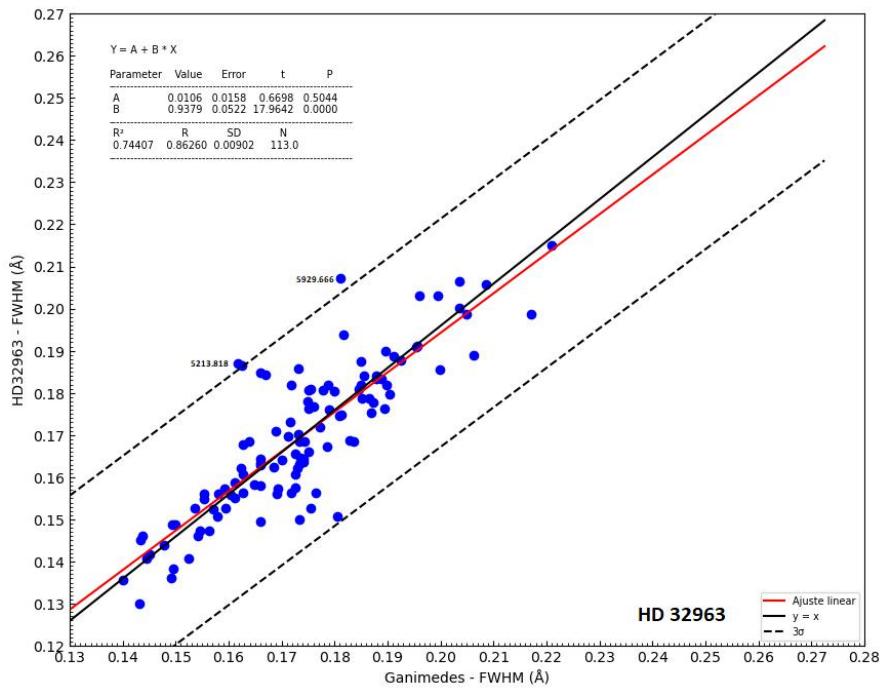


FIGURA 3.84. Análise das linhas de Fe I: FWHM para HD 32963. As definições dos parâmetros estatísticos são as mesmas da figura 3.36.

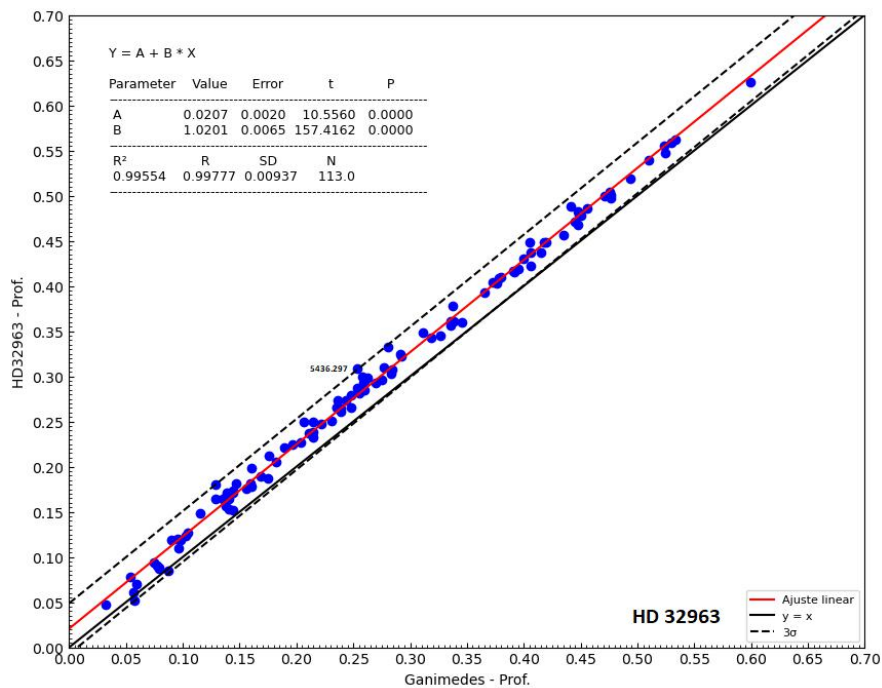


FIGURA 3.85. Análise das linhas de Fe I: Profundidade para HD 32963. As definições dos parâmetros estatísticos são as mesmas da figura 3.36.

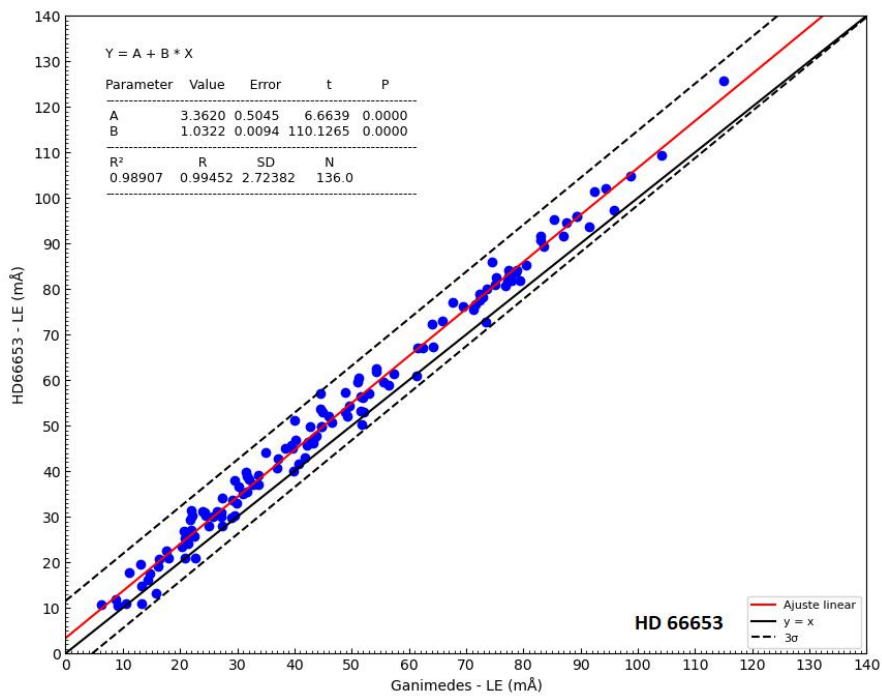


FIGURA 3.86. Análise das linhas de Fe I: LE para HD 66653. As definições dos parâmetros estatísticos são as mesmas da figura 3.36.

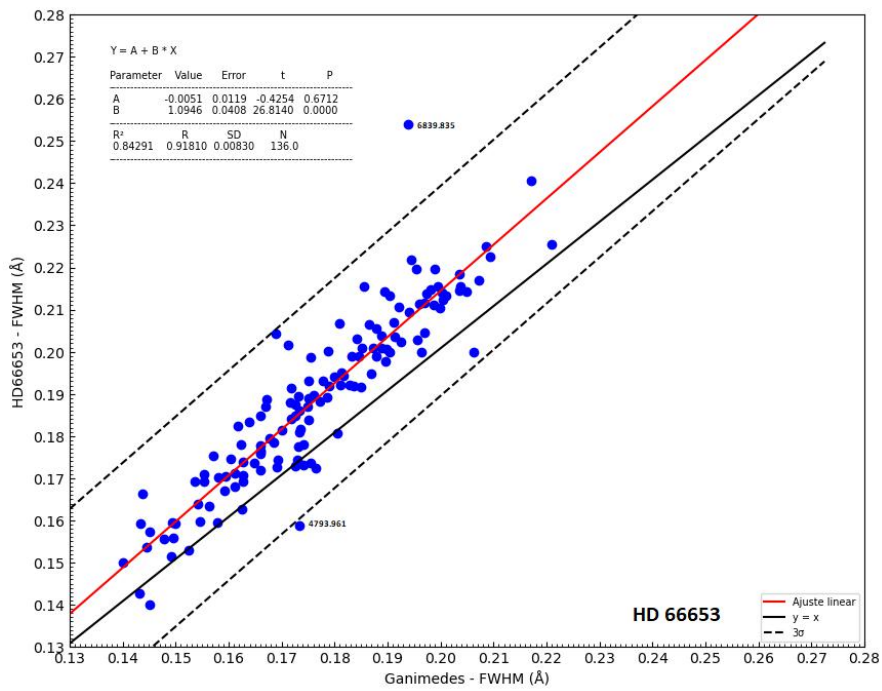


FIGURA 3.87. Análise das linhas de Fe I: FWHM para HD 66653. As definições dos parâmetros estatísticos são as mesmas da figura 3.36.

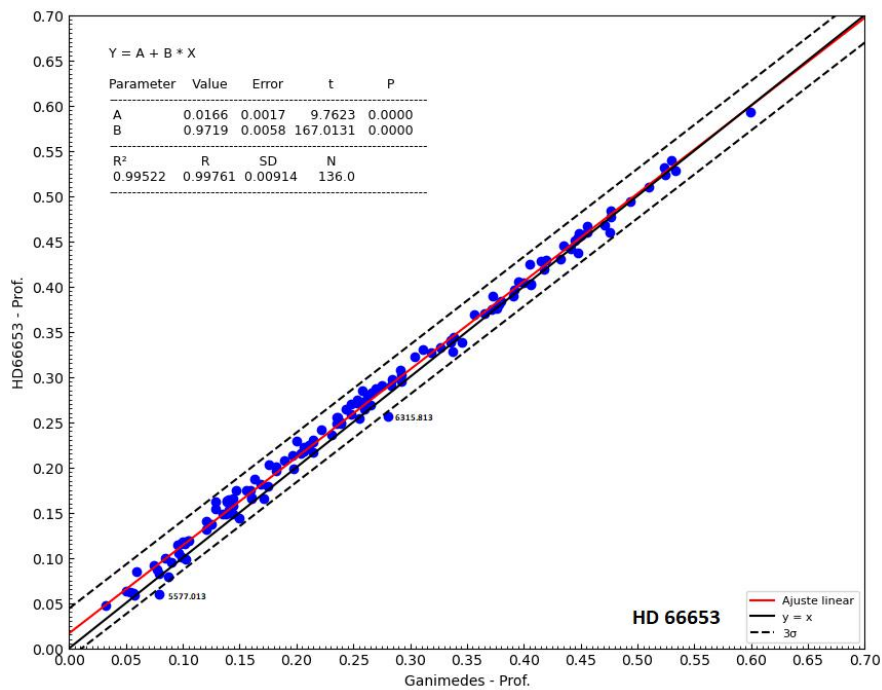


FIGURA 3.88. Análise das linhas de Fe I: Profundidade para HD 66653. As definições dos parâmetros estatísticos são as mesmas da figura 3.36.

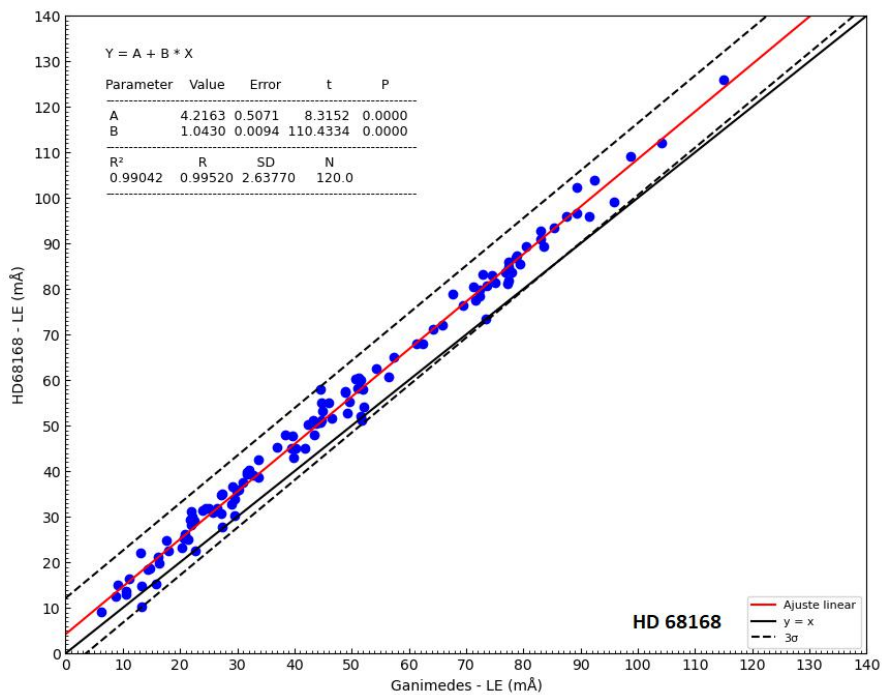


FIGURA 3.89. Análise das linhas de Fe I: LE para HD 68168. As definições dos parâmetros estatísticos são as mesmas da figura 3.36.

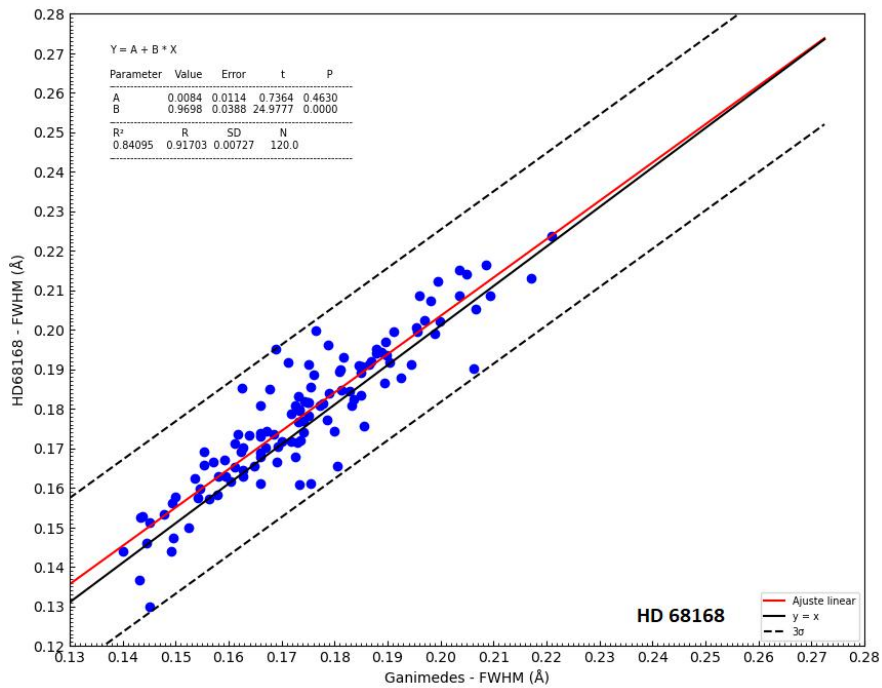


FIGURA 3.90. Análise das linhas de Fe I: FWHM para HD 68168. As definições dos parâmetros estatísticos são as mesmas da figura 3.36.

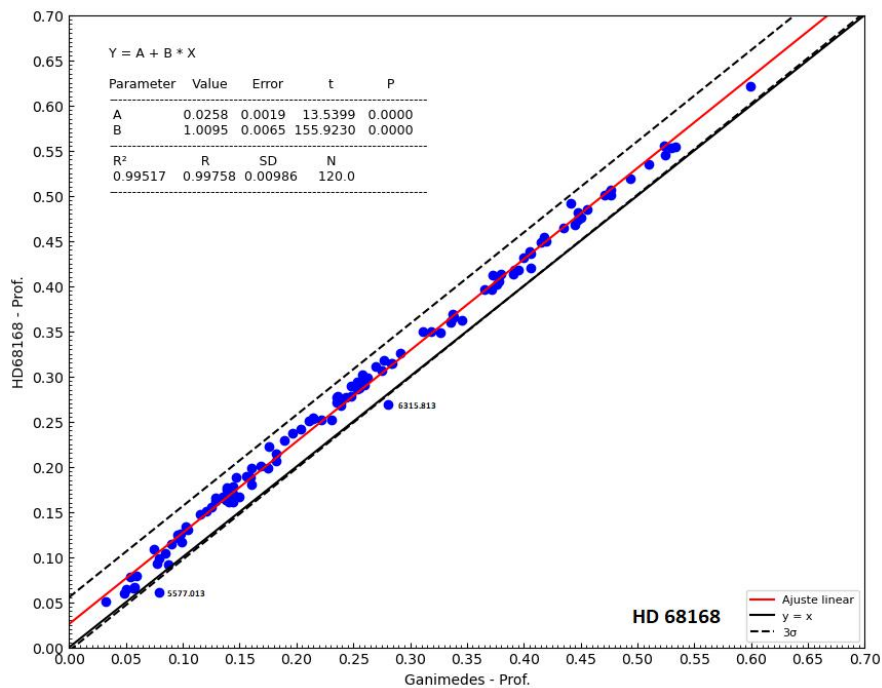


FIGURA 3.91. Análise das linhas de Fe I: Profundidade para HD 68168. As definições dos parâmetros estatísticos são as mesmas da figura 3.36.

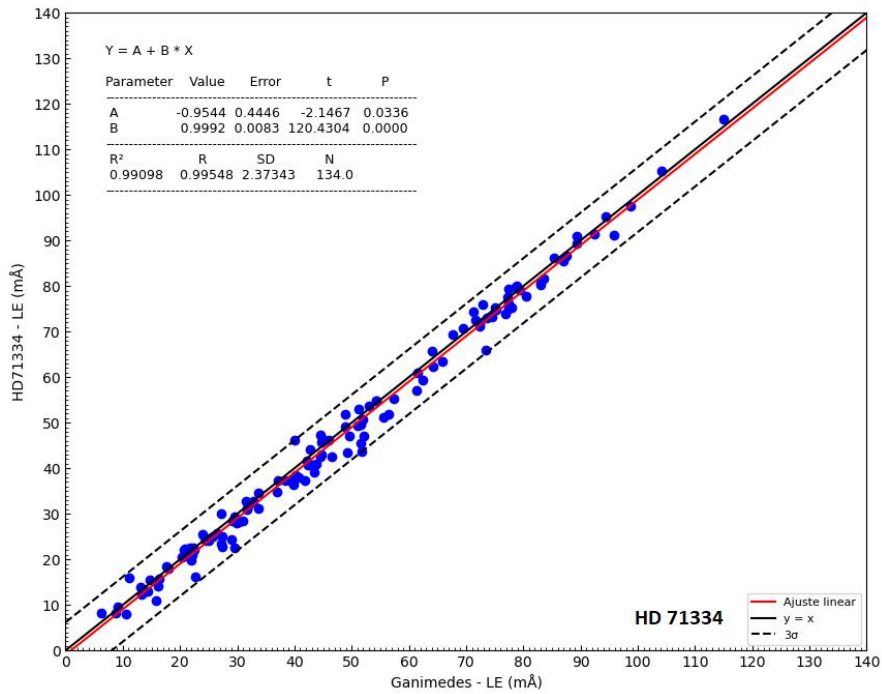


FIGURA 3.92. Análise das linhas de Fe I: LE para HD 71334. As definições dos parâmetros estatísticos são as mesmas da figura 3.36.

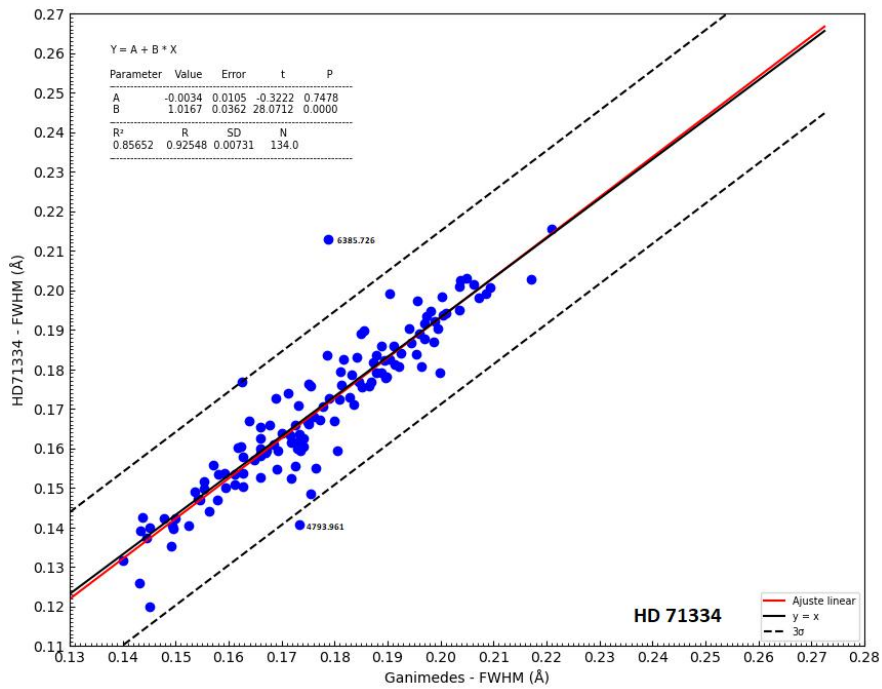


FIGURA 3.93. Análise das linhas de Fe I: FWHM para HD 71334. As definições dos parâmetros estatísticos são as mesmas da figura 3.36.

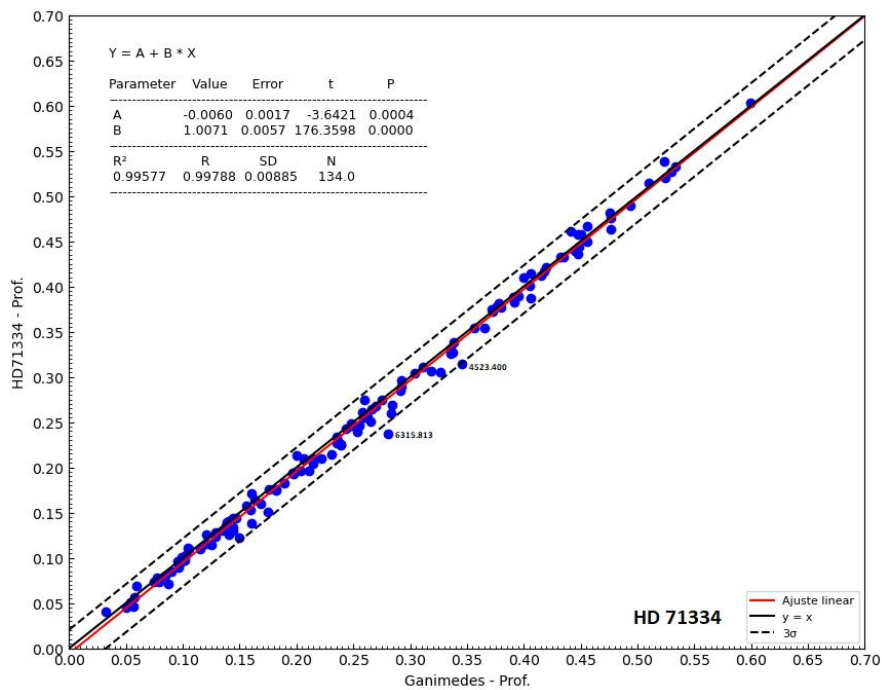


FIGURA 3.94. Análise das linhas de Fe I: Profundidade para HD 71334. As definições dos parâmetros estatísticos são as mesmas da figura 3.36.

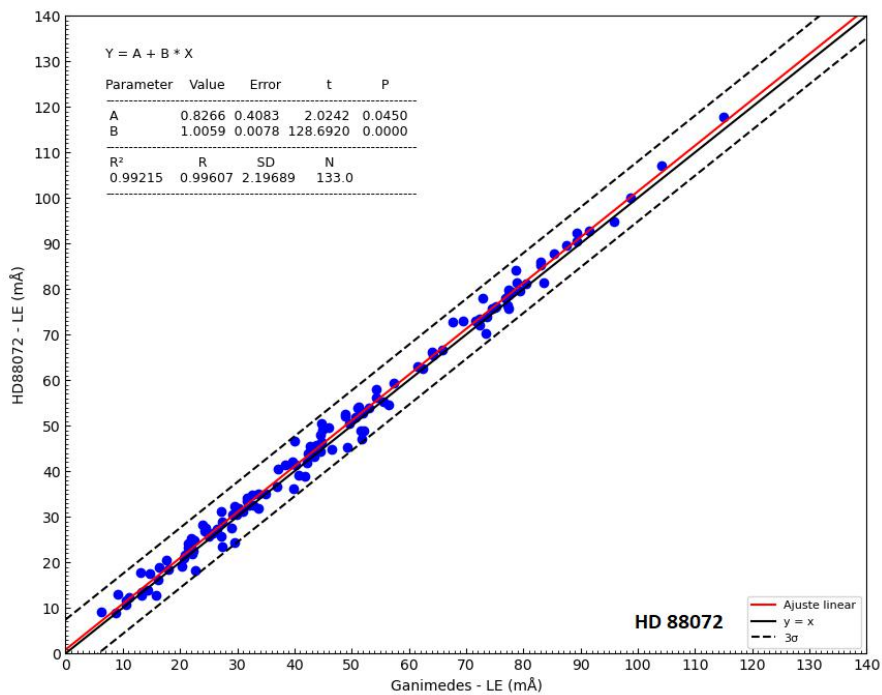


FIGURA 3.95. Análise das linhas de Fe I: LE para HD 88072. As definições dos parâmetros estatísticos são as mesmas da figura 3.36.

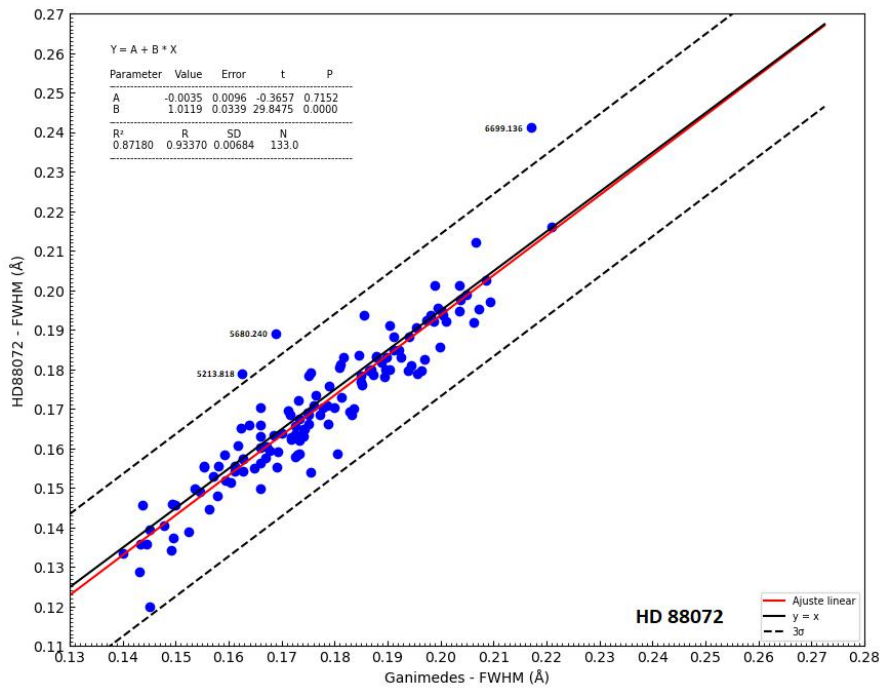


FIGURA 3.96. Análise das linhas de Fe I: FWHM para HD 88072. As definições dos parâmetros estatísticos são as mesmas da figura 3.36.

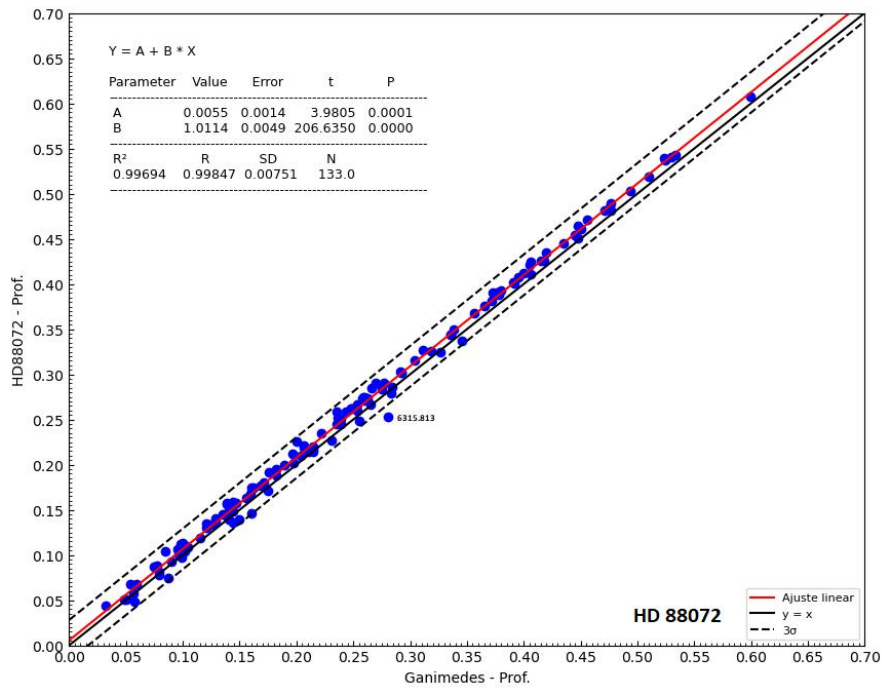


FIGURA 3.97. Análise das linhas de Fe I: Profundidade para HD 88072. As definições dos parâmetros estatísticos são as mesmas da figura 3.36.

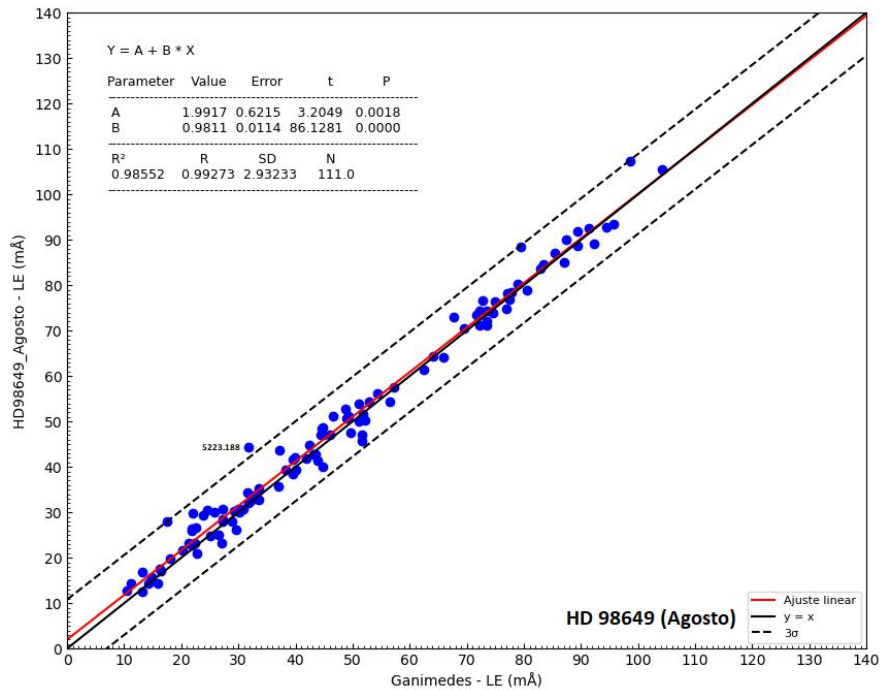


FIGURA 3.98. Análise das linhas de Fe: LE para HD 98649 - agosto. As definições dos parâmetros estatísticos são as mesmas da figura 3.36.

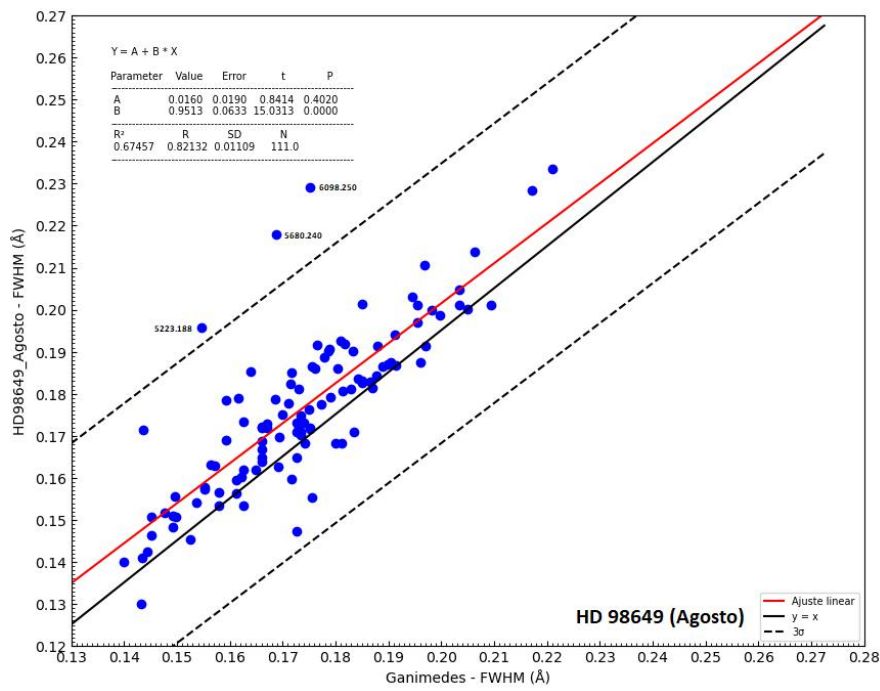


FIGURA 3.99. Análise das linhas de Fe I: FWHM para HD 98649 - agosto. As definições dos parâmetros estatísticos são as mesmas da figura 3.36.

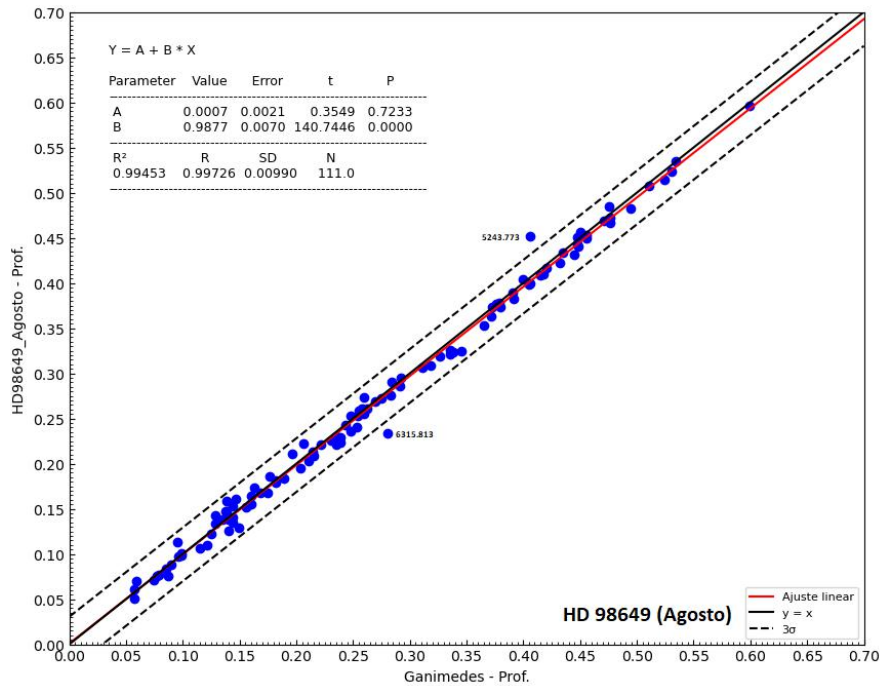


FIGURA 3.100. Análise das linhas de Fe I: Profundidade para HD 98649 - agosto. As definições dos parâmetros estatísticos são as mesmas da figura 3.36.

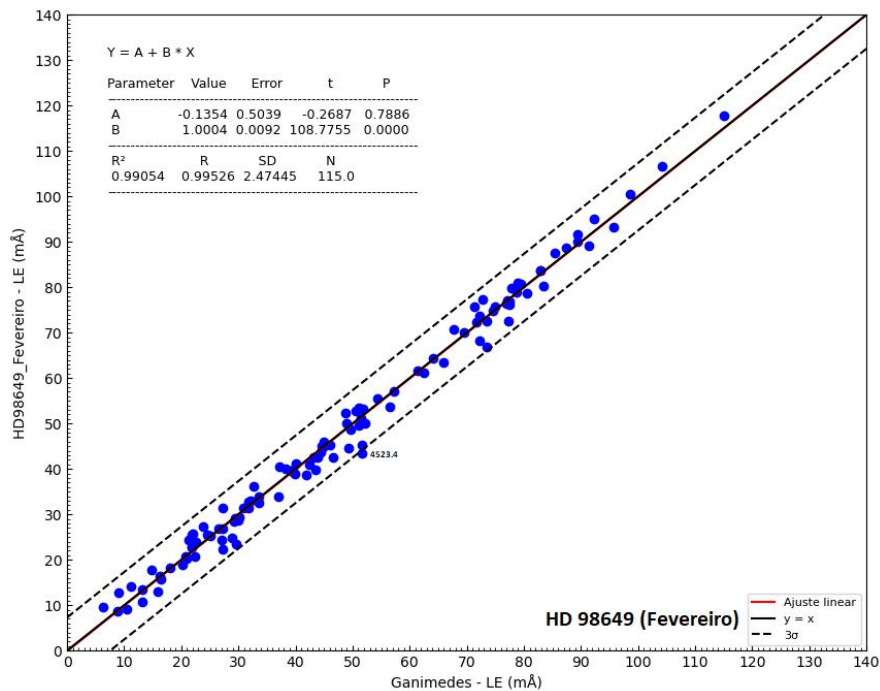


FIGURA 3.101. Análise das Linhas de Ferro I: LE para HD 98649 - fevereiro. As definições dos parâmetros estatísticos são as mesmas da figura 3.36.

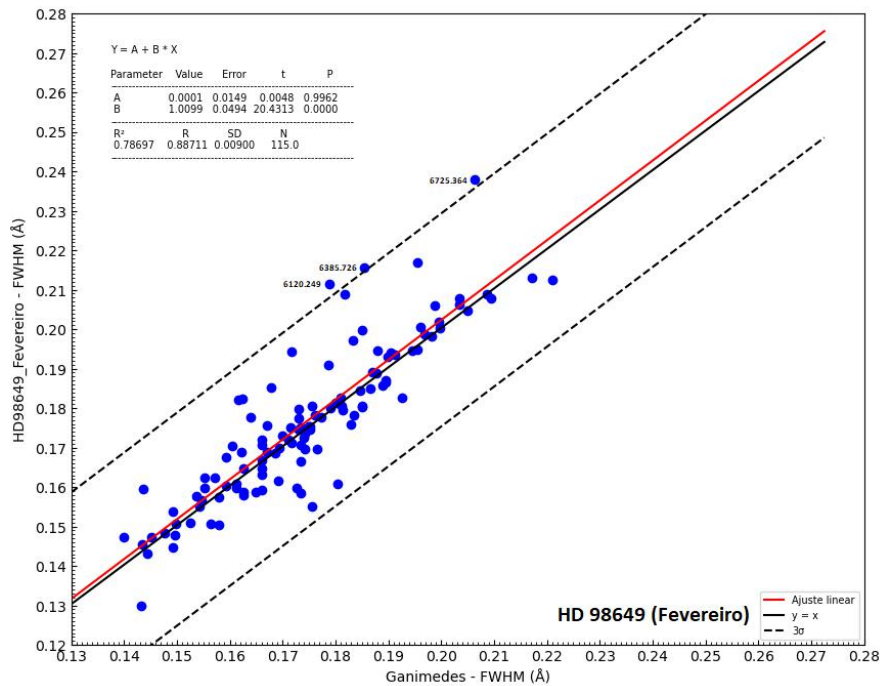


FIGURA 3.102. Análise das linhas de Fe I: FWHM para HD 98649 - fevereiro. As definições dos parâmetros estatísticos são as mesmas da figura 3.36.

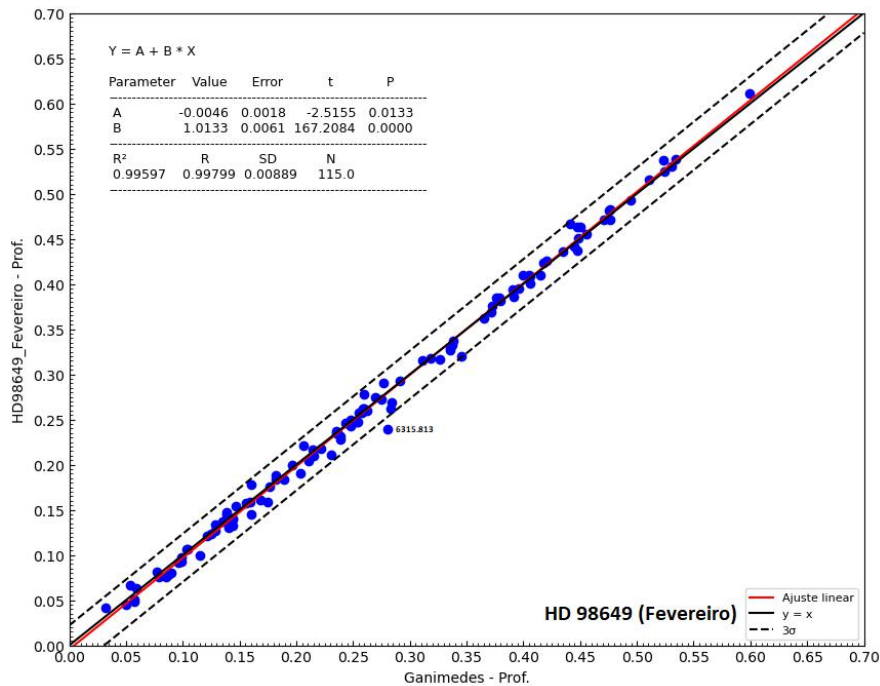


FIGURA 3.103. Análise das linhas de Fe I: Profundidade para HD 98649 - fevereiro. As definições dos parâmetros estatísticos são as mesmas da figura 3.36.

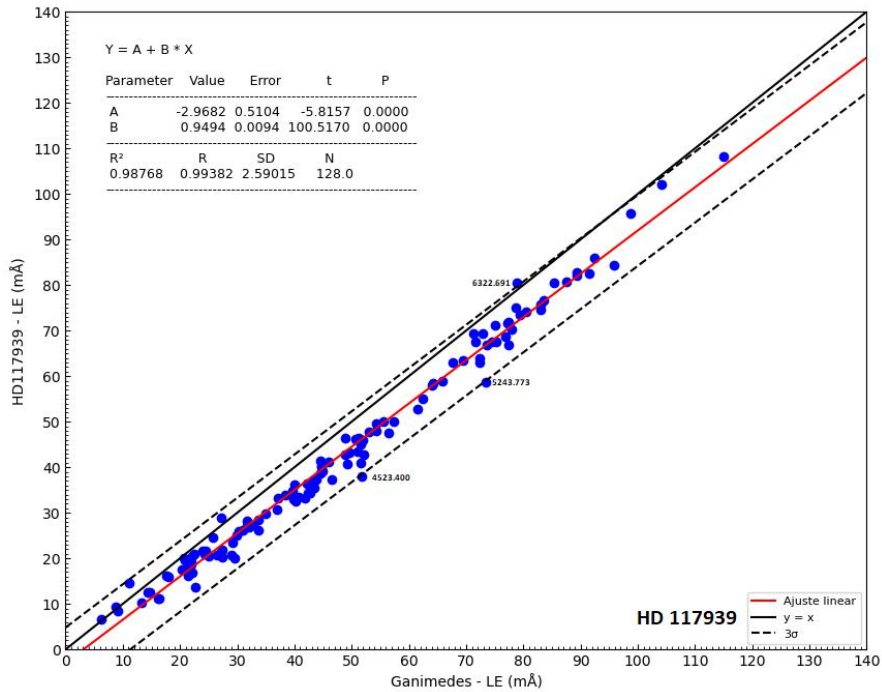


FIGURA 3.104. Análise das linhas de Fe I: LE para HD 117939. As definições dos parâmetros estatísticos são as mesmas da figura 3.36.

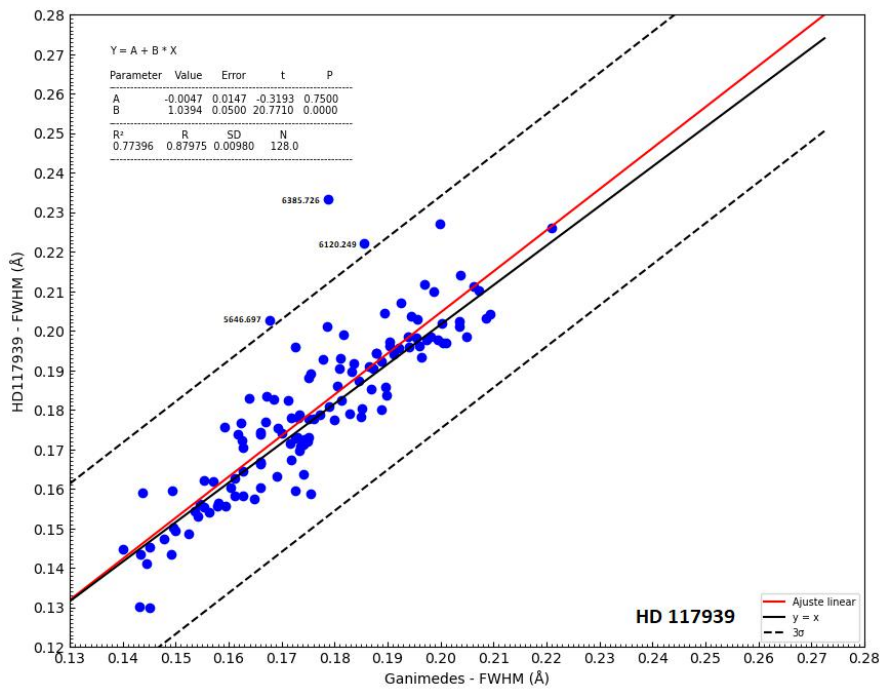


FIGURA 3.105. Análise das linhas de Fe I: FWHM para HD 117939. As definições dos parâmetros estatísticos são as mesmas da figura 3.36.

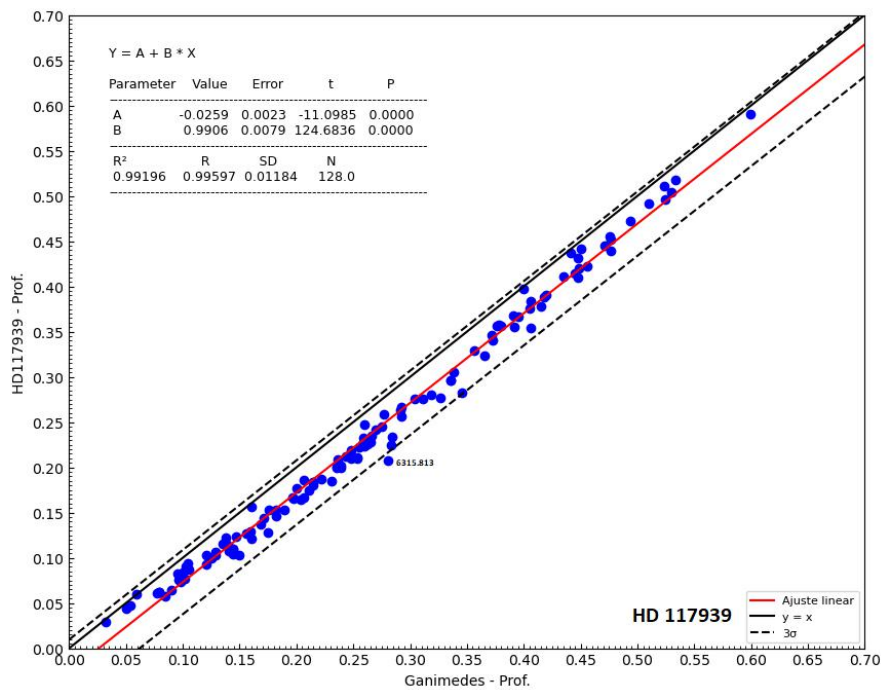


FIGURA 3.106. Análise das linhas de Fe I: Profundidade para HD 117939. As definições dos parâmetros estatísticos são as mesmas da figura 3.36.

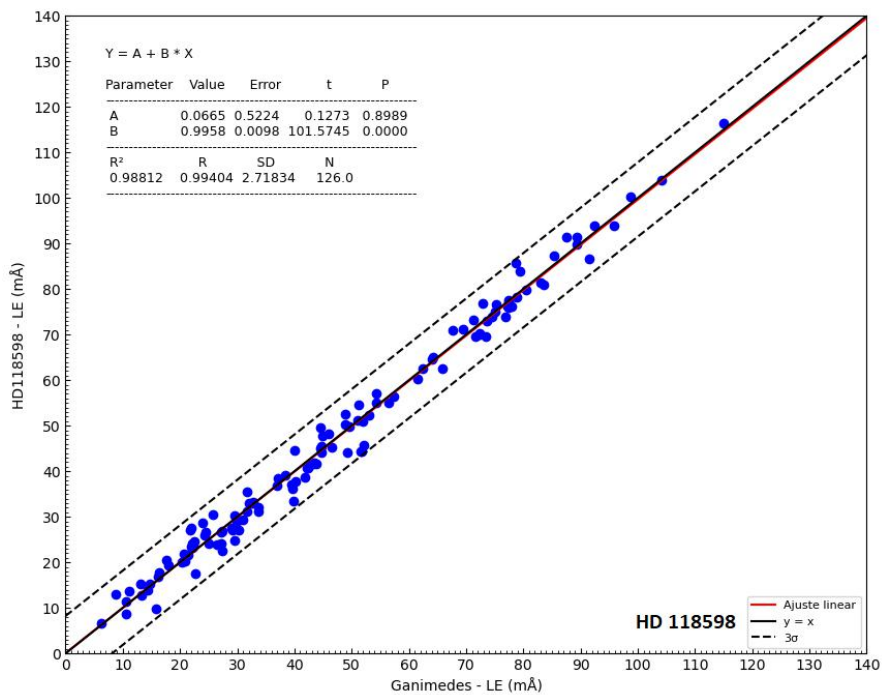


FIGURA 3.107. Análise das linhas de Fe I: LE para HD 118598. As definições dos parâmetros estatísticos são as mesmas da figura 3.36.

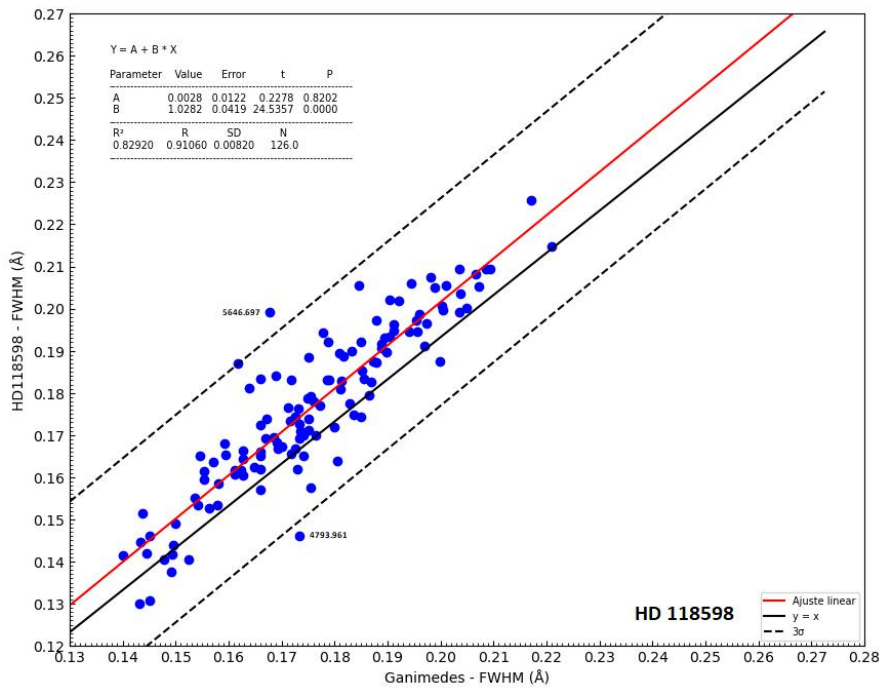


FIGURA 3.108. Análise das linhas de Fe I: FWHM para HD 118598. As definições dos parâmetros estatísticos são as mesmas da figura 3.36.

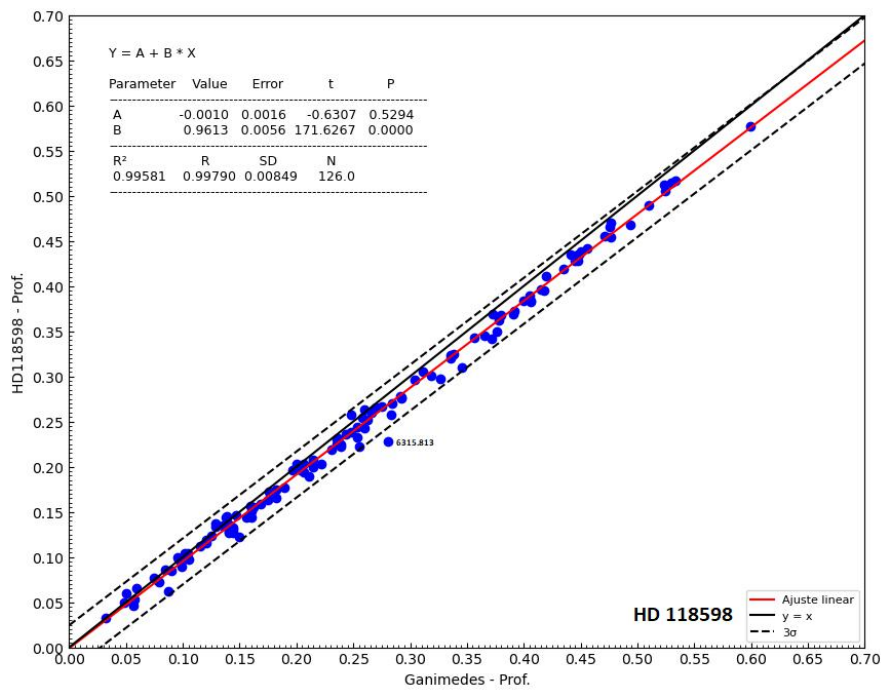


FIGURA 3.109. Análise das linhas de Fe I: Profundidade para HD 118598. As definições dos parâmetros estatísticos são as mesmas da figura 3.36.

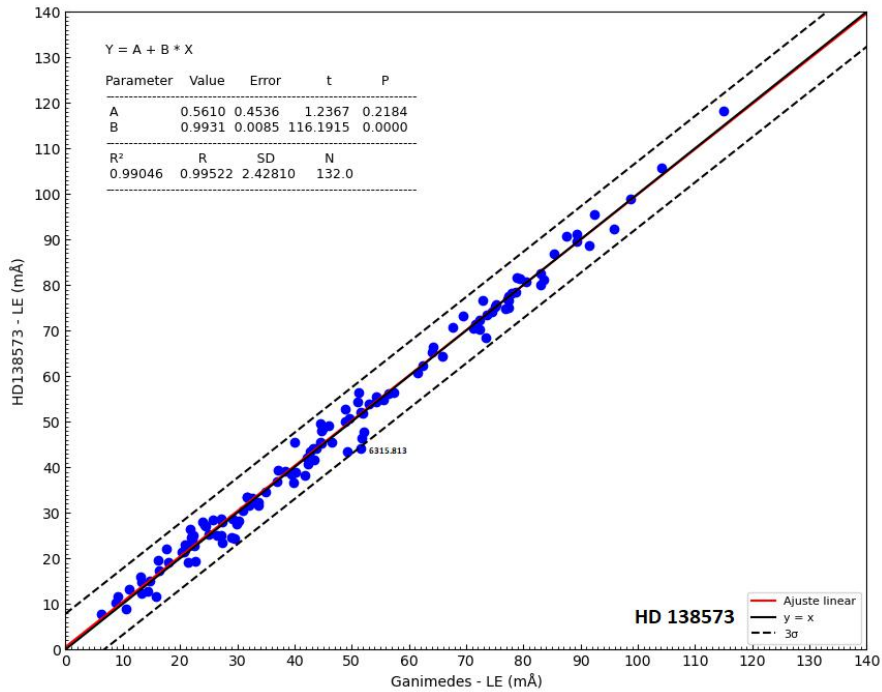


FIGURA 3.110. Análise das linhas de Fe I: LE para HD 138573. As definições dos parâmetros estatísticos são as mesmas da figura 3.36.

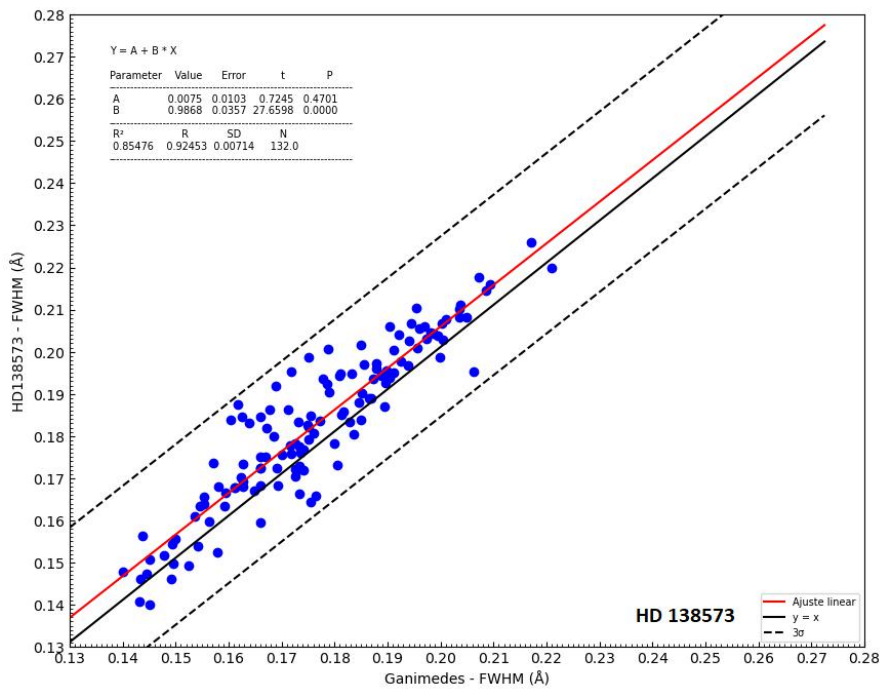


FIGURA 3.111. Análise das linhas de Fe I: FWHM para HD 138573. As definições dos parâmetros estatísticos são as mesmas da figura 3.36.

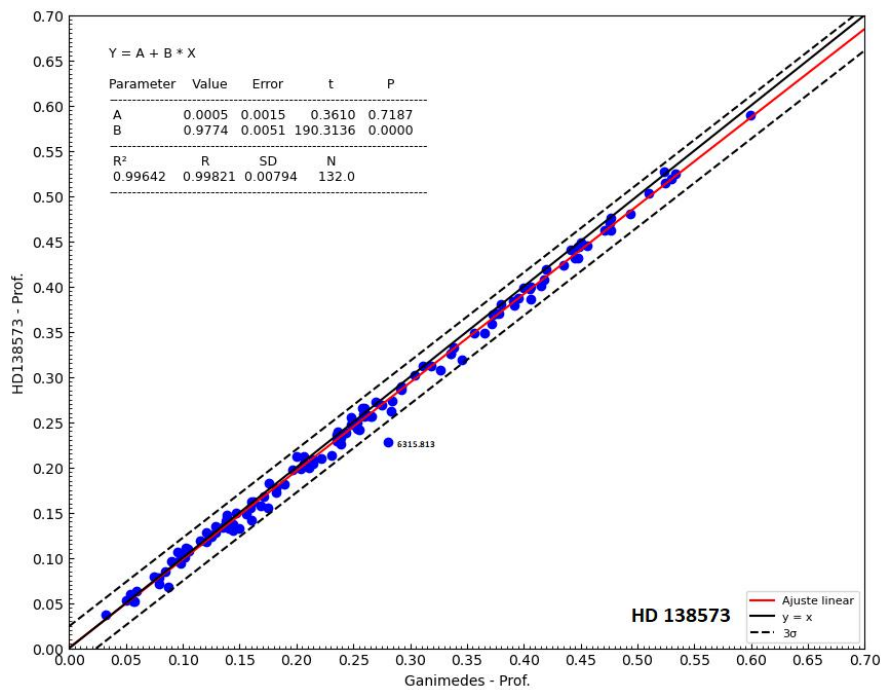


FIGURA 3.112. Análise das linhas de Fe I: Profundidade para HD 138573. As definições dos parâmetros estatísticos são as mesmas da figura 3.36.

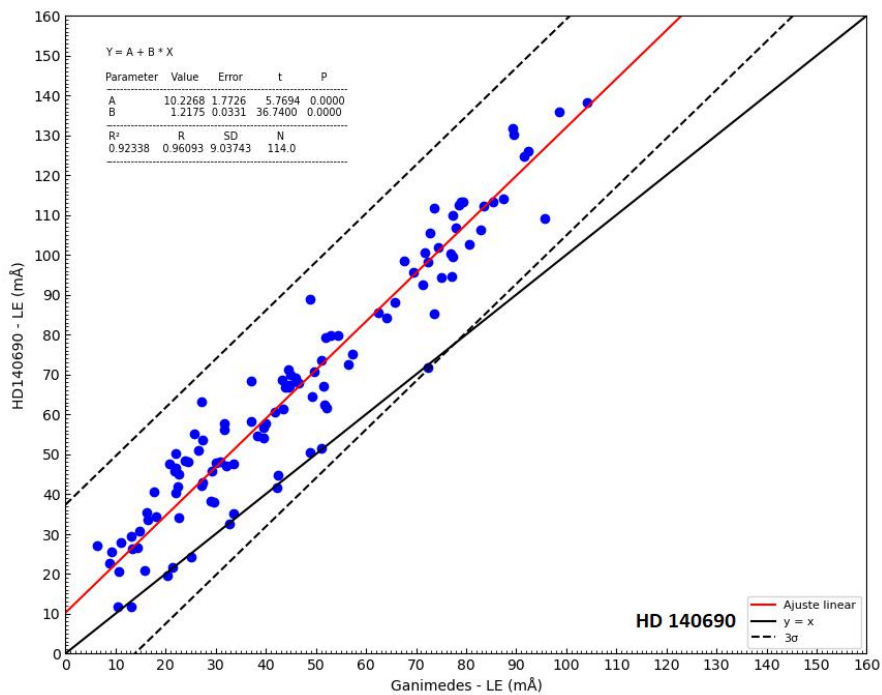


FIGURA 3.113. Análise das linhas de Fe I: LE para HD 140690. As definições dos parâmetros estatísticos são as mesmas da figura 3.36.

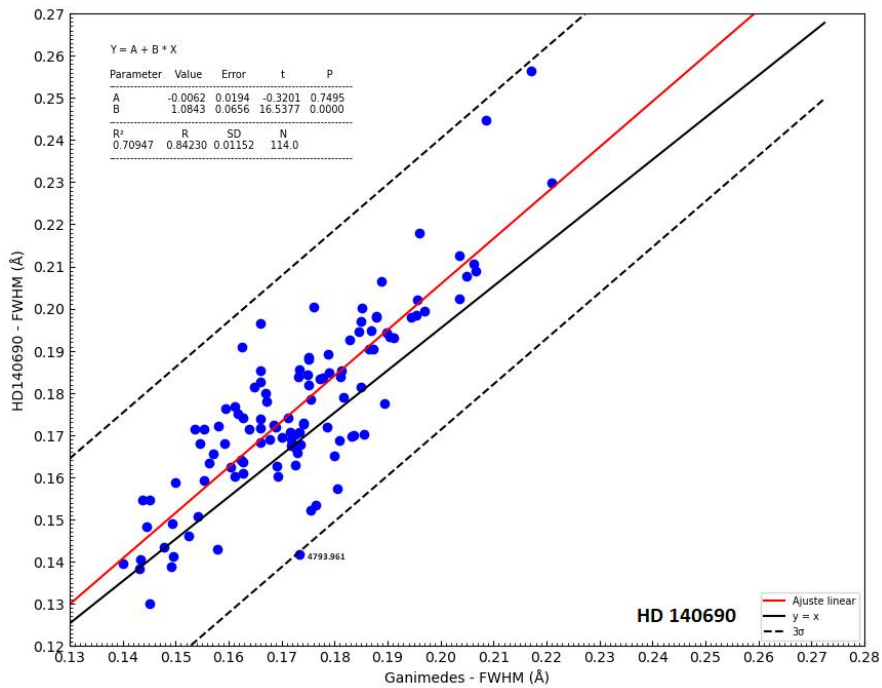


FIGURA 3.114. Análise das linhas de Fe I: FWHM para HD 140690. As definições dos parâmetros estatísticos são as mesmas da figura 3.36.

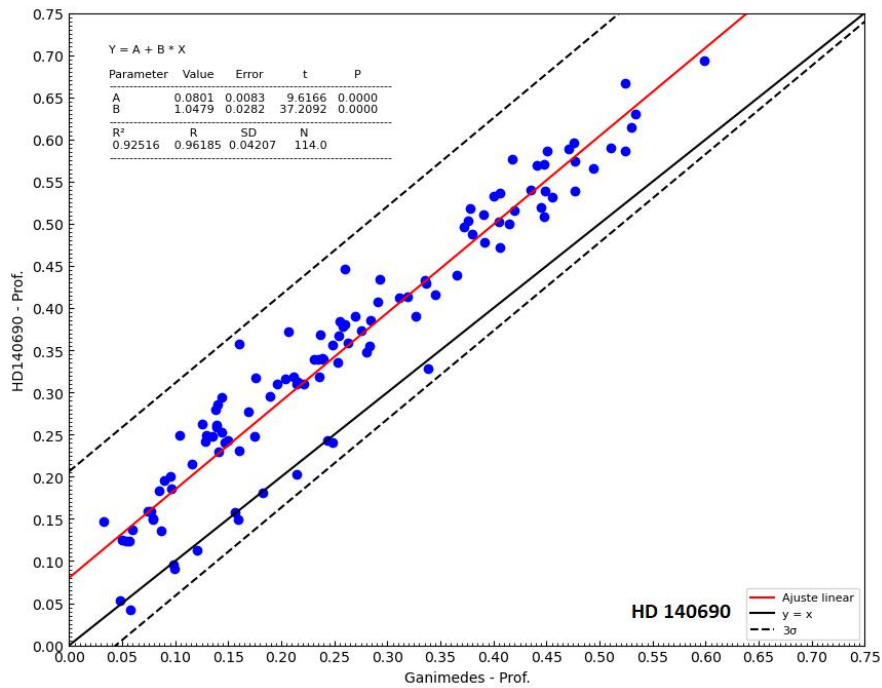


FIGURA 3.115. Análise das linhas de Fe I: Profundidade para HD 140690. As definições dos parâmetros estatísticos são as mesmas da figura 3.36.

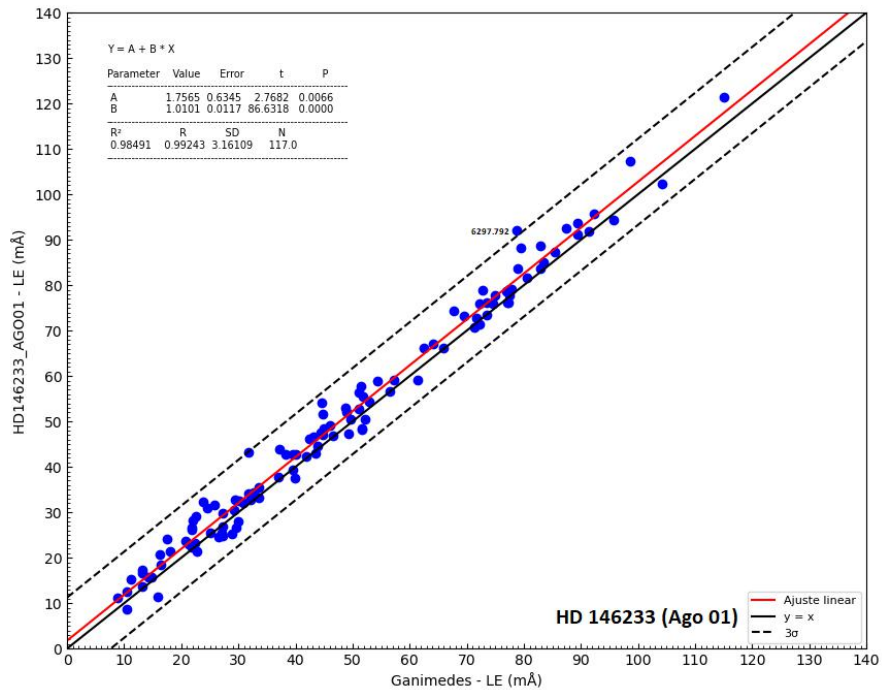


FIGURA 3.116. Análise das linhas de Fe I: LE para HD 146233 - agosto 01. As definições dos parâmetros estatísticos são as mesmas da figura 3.36.

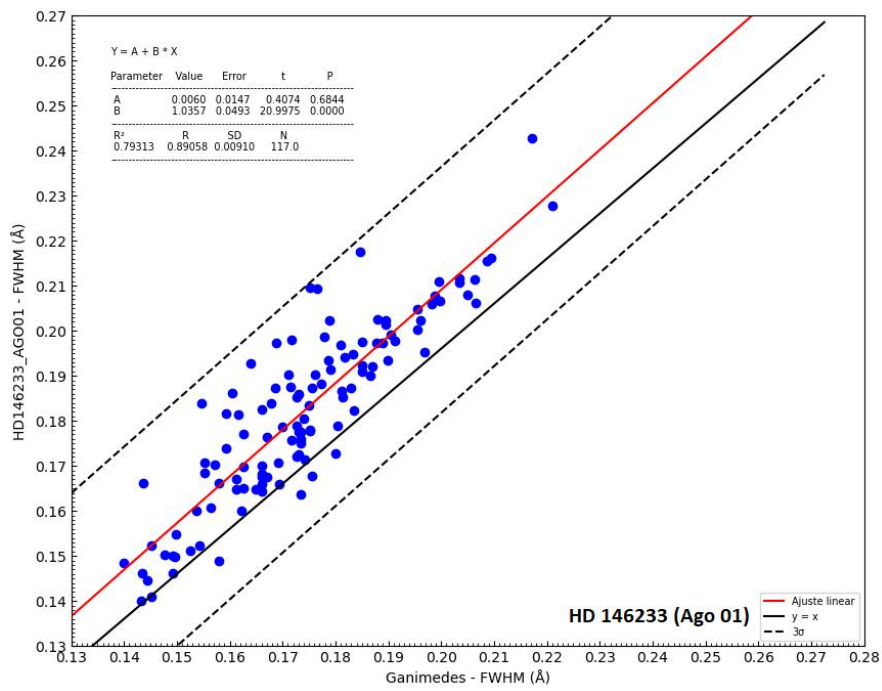


FIGURA 3.117. Análise das linhas de Fe I: FWHM para HD 146233 - agosto 01. As definições dos parâmetros estatísticos são as mesmas da figura 3.36.

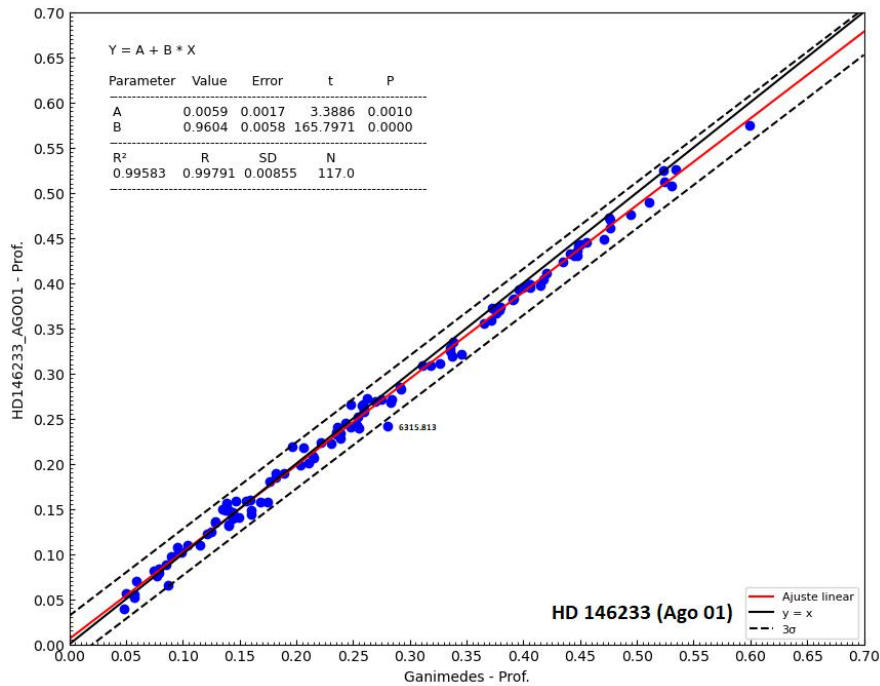


FIGURA 3.118. Análise das linhas de Fe I: Profundidade para HD 146233 - agosto 01. As definições dos parâmetros estatísticos são as mesmas da figura 3.36.

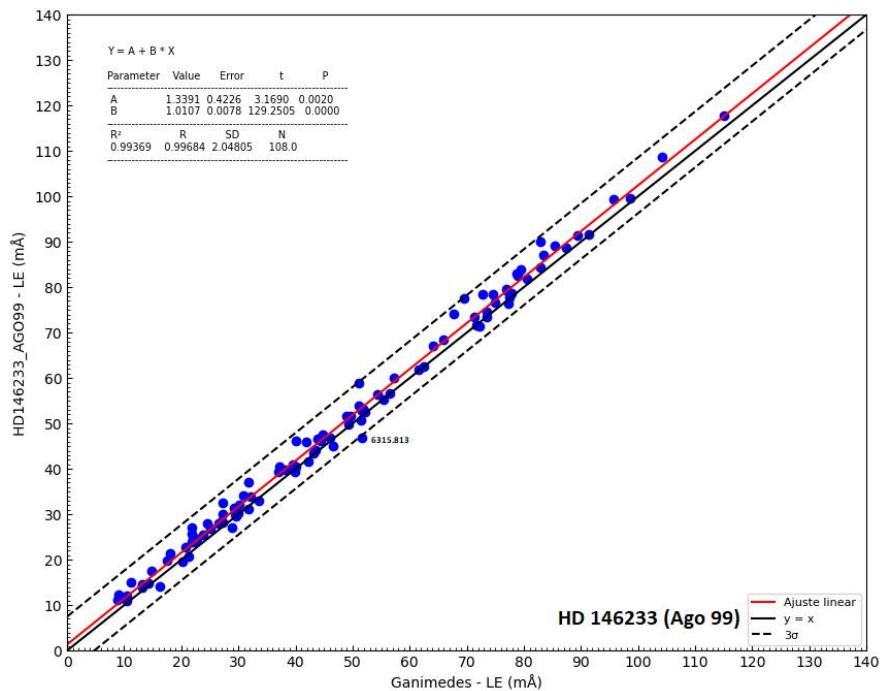


FIGURA 3.119. Análise das linhas de Fe I: LE para HD 146233 - agosto 99. As definições dos parâmetros estatísticos são as mesmas da figura 3.36.

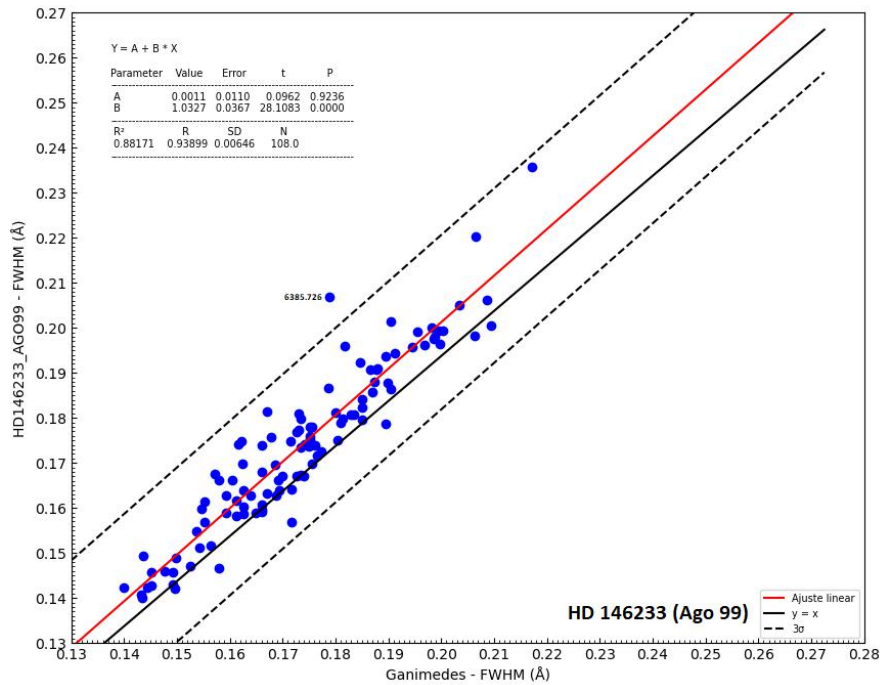


FIGURA 3.120. Análise das linhas de Fe I: FWHM para HD 146233 - agosto 99. As definições dos parâmetros estatísticos são as mesmas da figura 3.36.

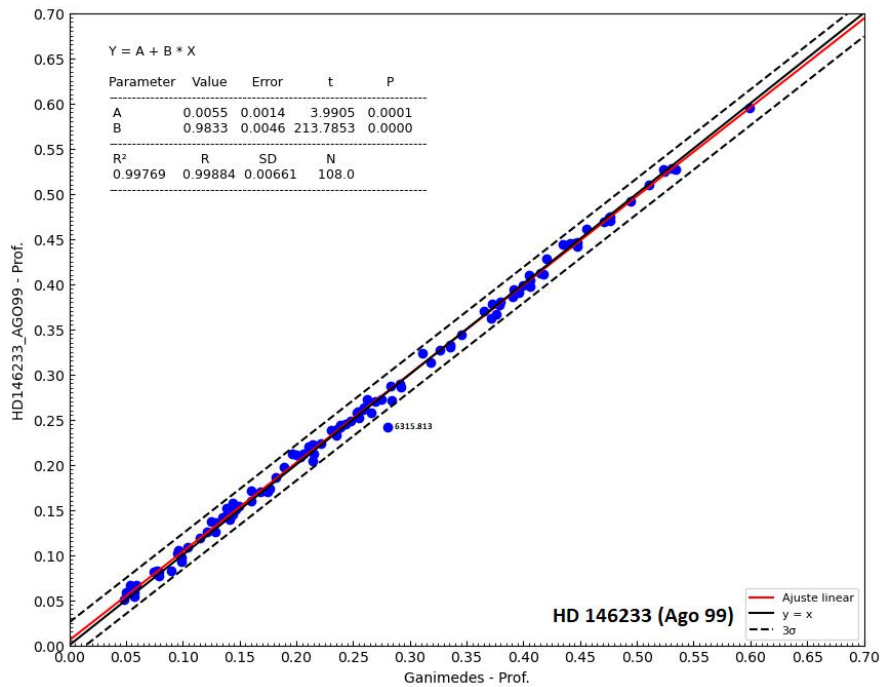


FIGURA 3.121. Análise das linhas de Fe I: Profundidade para HD 146233 - agosto 99. As definições dos parâmetros estatísticos são as mesmas da figura 3.36.

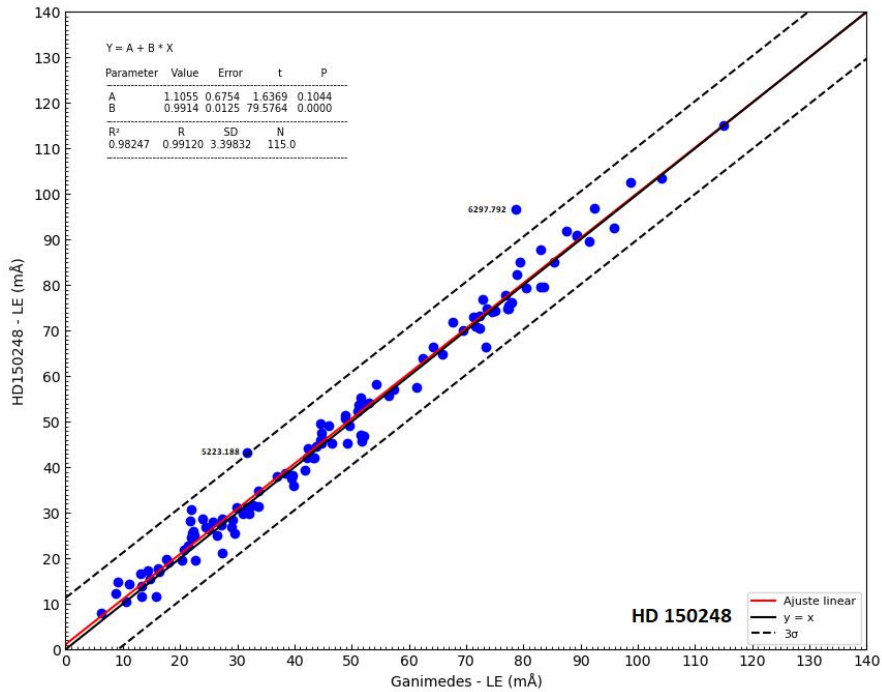


FIGURA 3.122. Análise das linhas de Fe I: LE para HD 150248. As definições dos parâmetros estatísticos são as mesmas da figura 3.36.

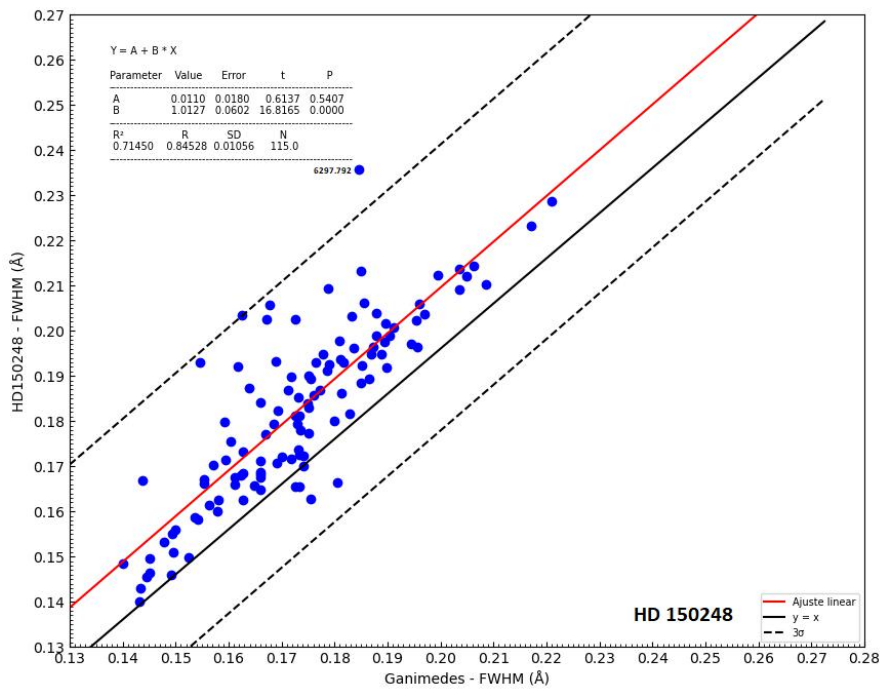


FIGURA 3.123. Análise das linhas de Fe I: FWHM para HD 150248. As definições dos parâmetros estatísticos são as mesmas da figura 3.36.

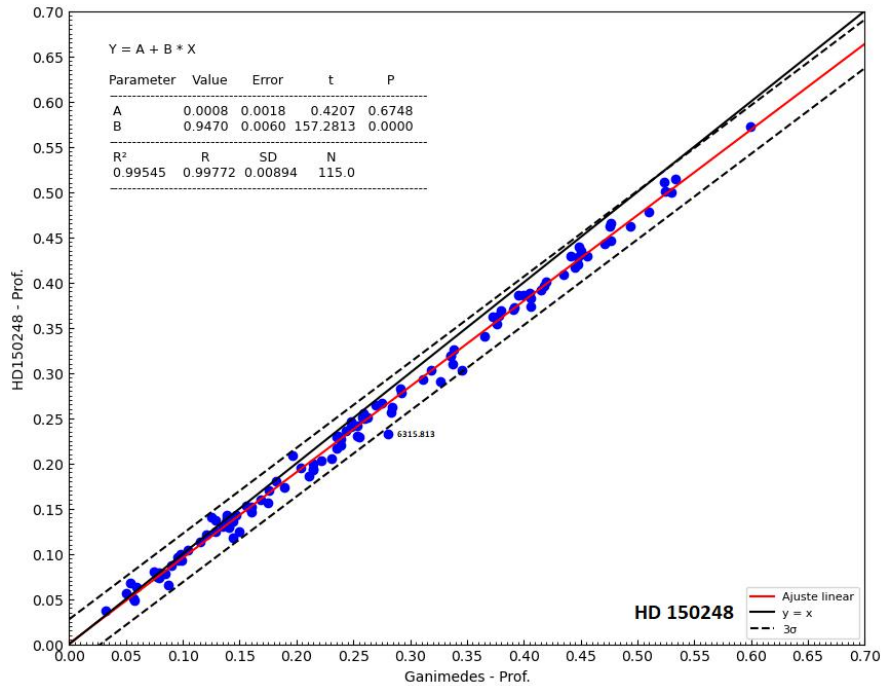


FIGURA 3.124. Análise das linhas de Fe I: Profundidade para HD 150248. As definições dos parâmetros estatísticos são as mesmas da figura 3.36.

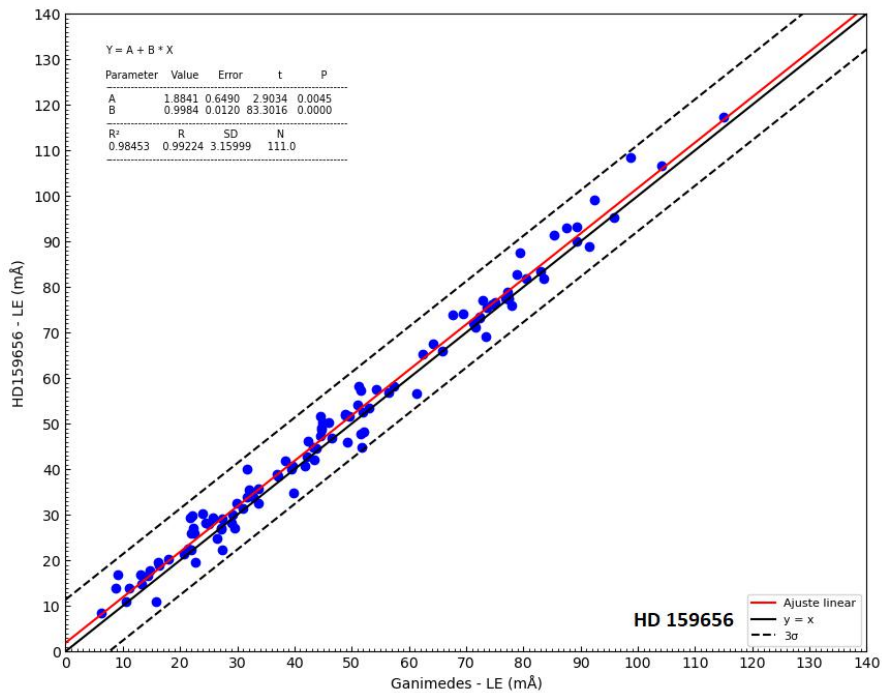


FIGURA 3.125. Análise das linhas de Fe I: LE para HD 159656. As definições dos parâmetros estatísticos são as mesmas da figura 3.36.

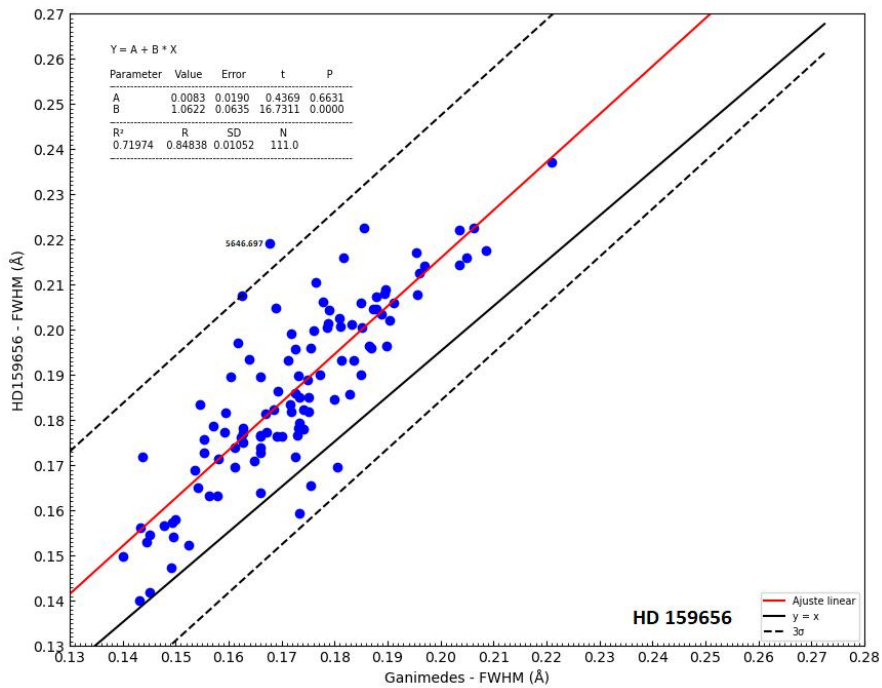


FIGURA 3.126. Análise das linhas de Fe I: FWHM para HD HD 159656. As definições dos parâmetros estatísticos são as mesmas da figura 3.36.

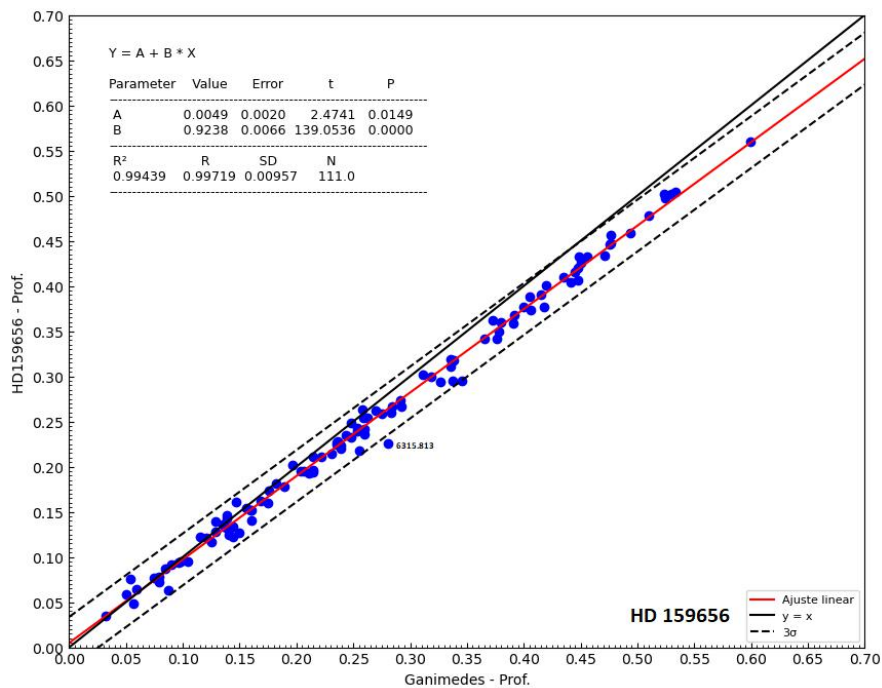


FIGURA 3.127. Análise das linhas de Fe I: Profundidade para HD 159656. As definições dos parâmetros estatísticos são as mesmas da figura 3.36.

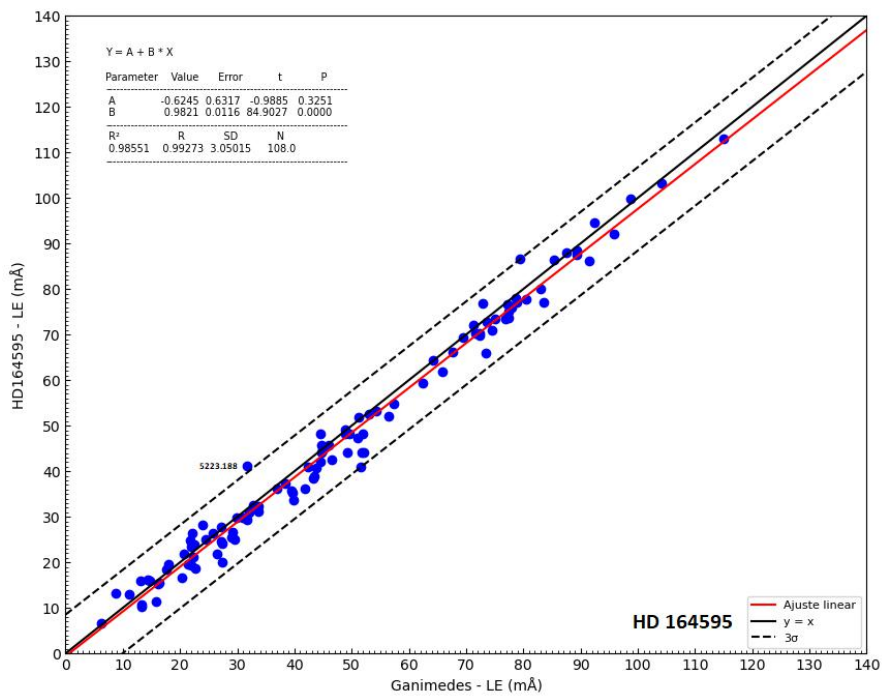


FIGURA 3.128. Análise das linhas de Fe I: LE para HD 164595. As definições dos parâmetros estatísticos são as mesmas da figura 3.36.

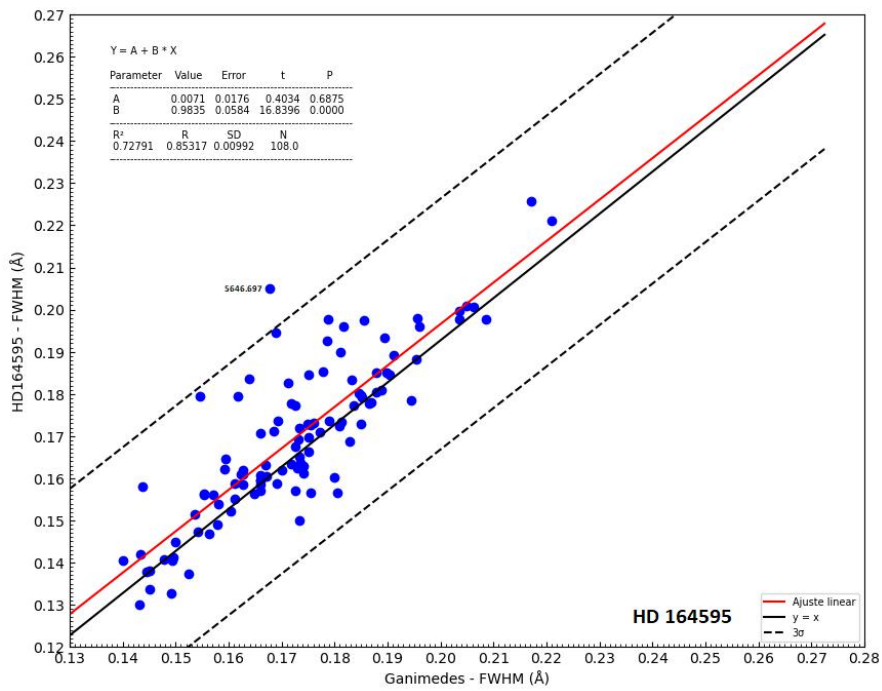


FIGURA 3.129. Análise das linhas de Fe I: FWHM para HD 164595. As definições dos parâmetros estatísticos são as mesmas da figura 3.36.

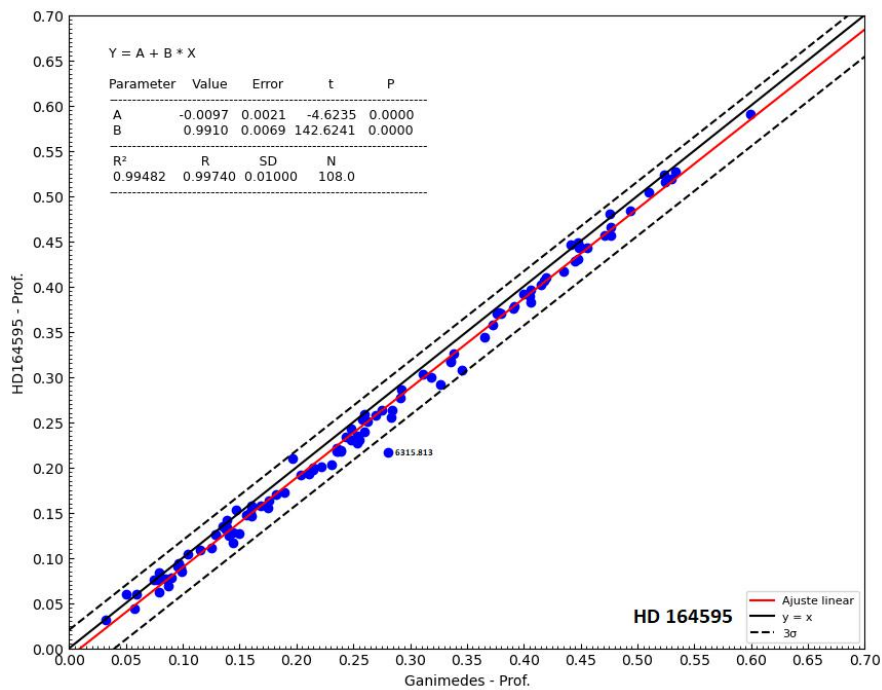


FIGURA 3.130. Análise das linhas de Fe I: Profundidade para HD 164595. As definições dos parâmetros estatísticos são as mesmas da figura 3.36.

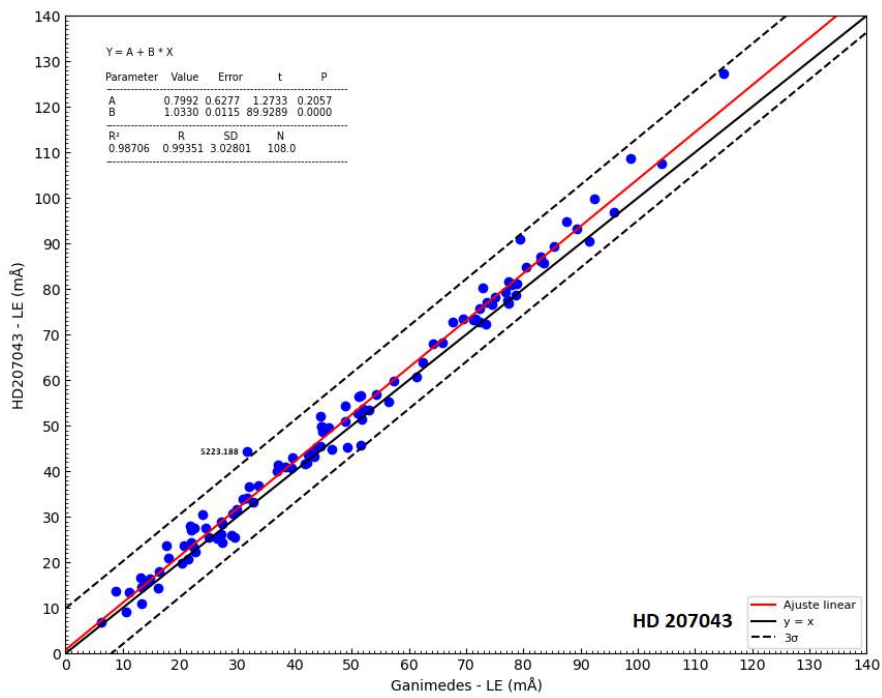


FIGURA 3.131. Análise das linhas de Fe I: LE para HD 207043. As definições dos parâmetros estatísticos são as mesmas da figura 3.36.

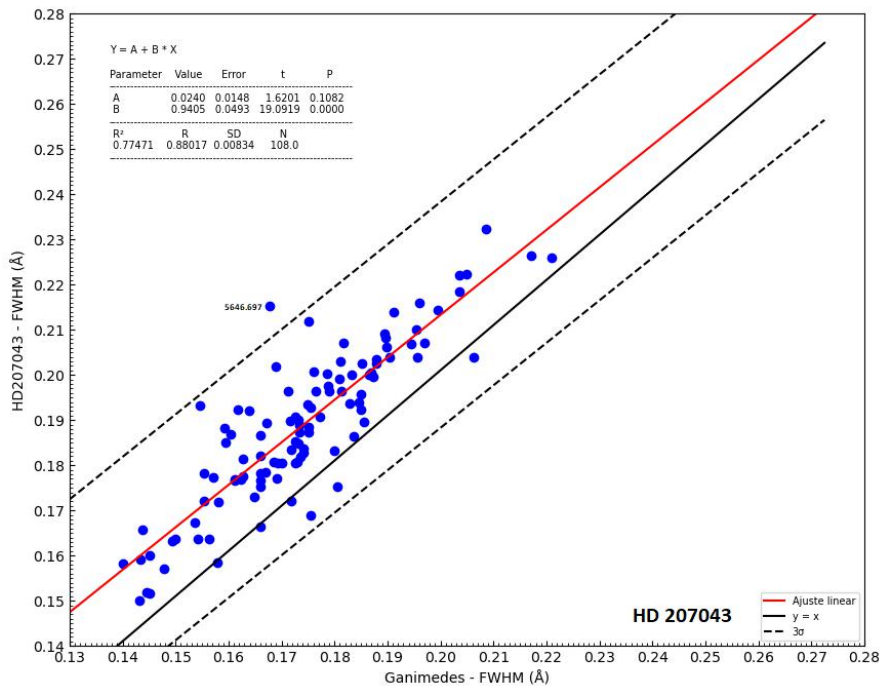


FIGURA 3.132. Análise das linhas de Fe I: FWHM para HD 207043. As definições dos parâmetros estatísticos são as mesmas da figura 3.36.

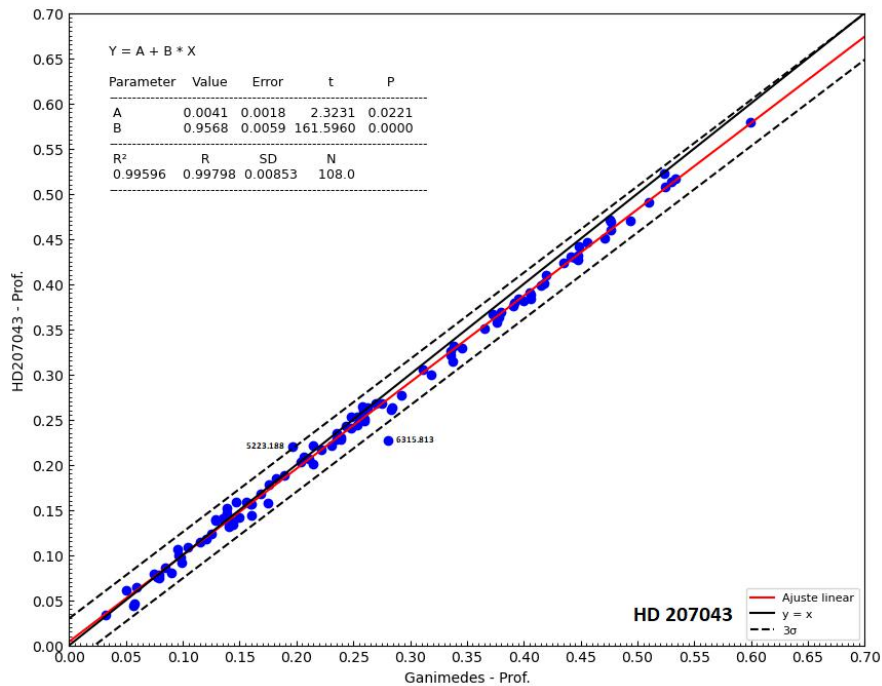


FIGURA 3.133. Análise das linhas de Fe I: Profundidade para HD 207043. As definições dos parâmetros estatísticos são as mesmas da figura 3.36.

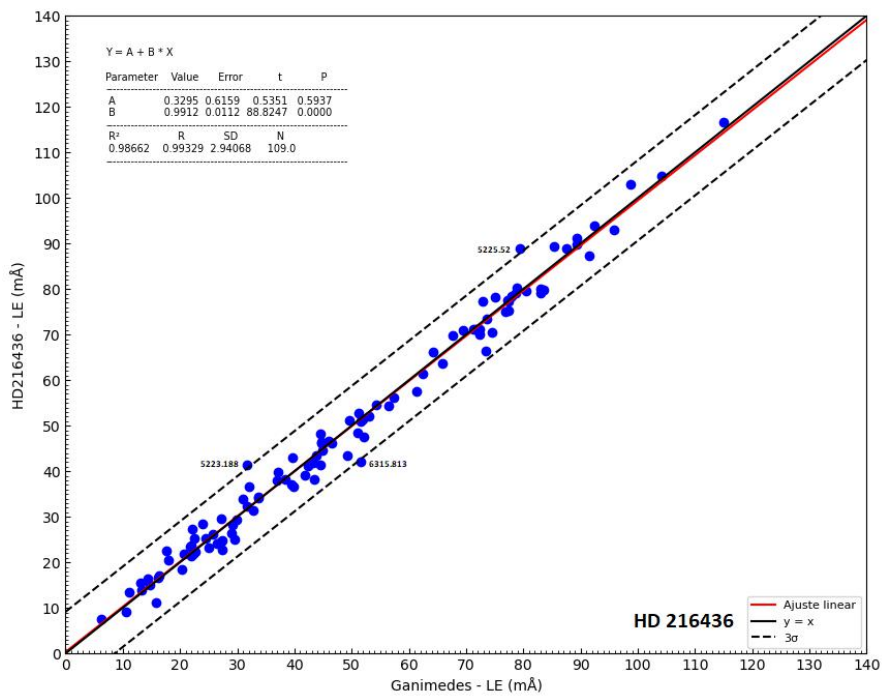


FIGURA 3.134. Análise das linhas de Fe I: LE para HD 216436. As definições dos parâmetros estatísticos são as mesmas da figura 3.36.

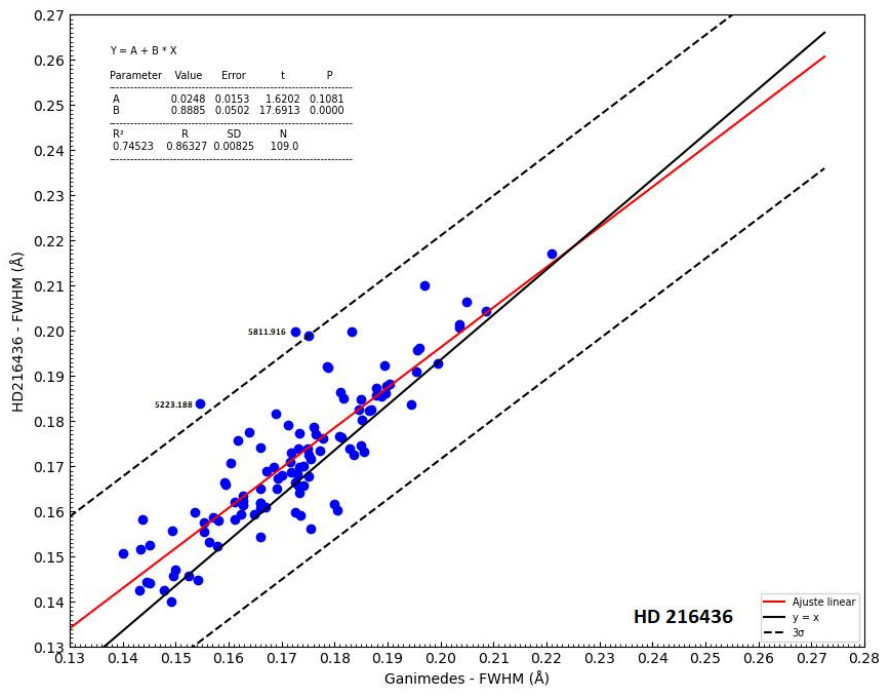


FIGURA 3.135. Análise das linhas de Fe I: FWHM para HD 216436. As definições dos parâmetros estatísticos são as mesmas da figura 3.36.

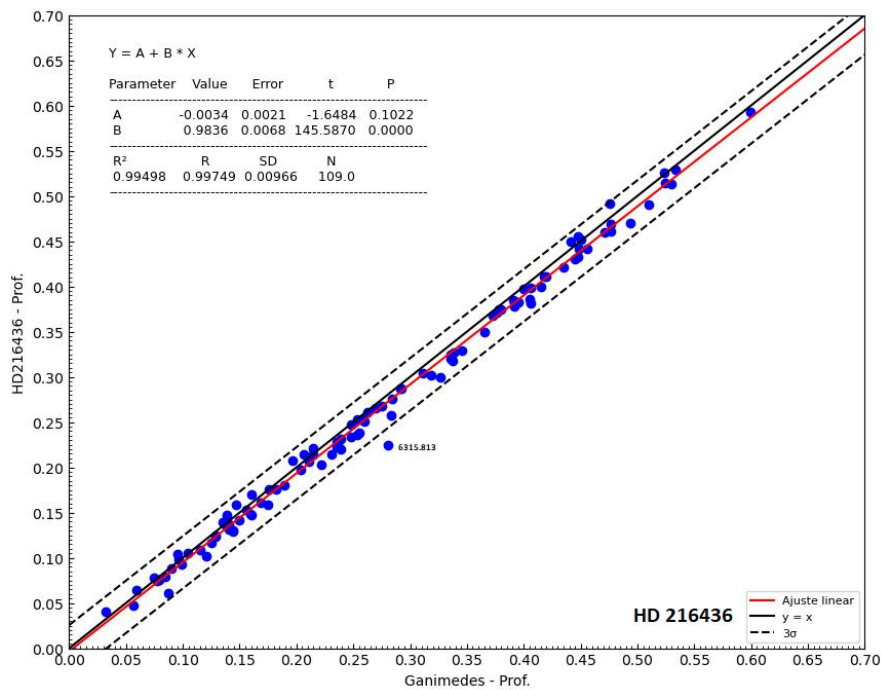


FIGURA 3.136. Análise das linhas de Fe I: Profundidade para HD 216436. As definições dos parâmetros estatísticos são as mesmas da figura 3.36.

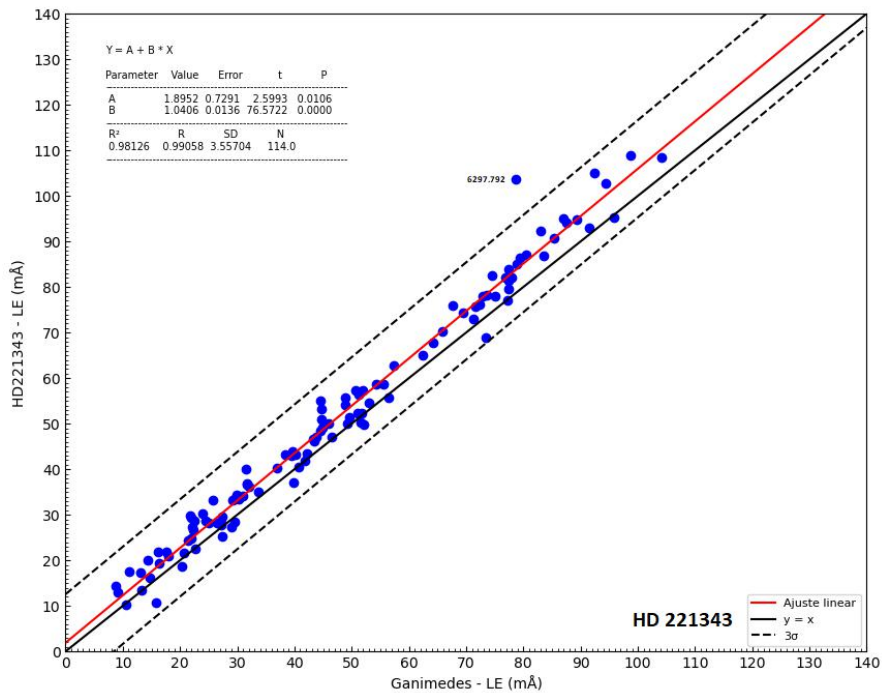


FIGURA 3.137. Análise das linhas de Fe I: LE para HD 221343. As definições dos parâmetros estatísticos são as mesmas da figura 3.36.

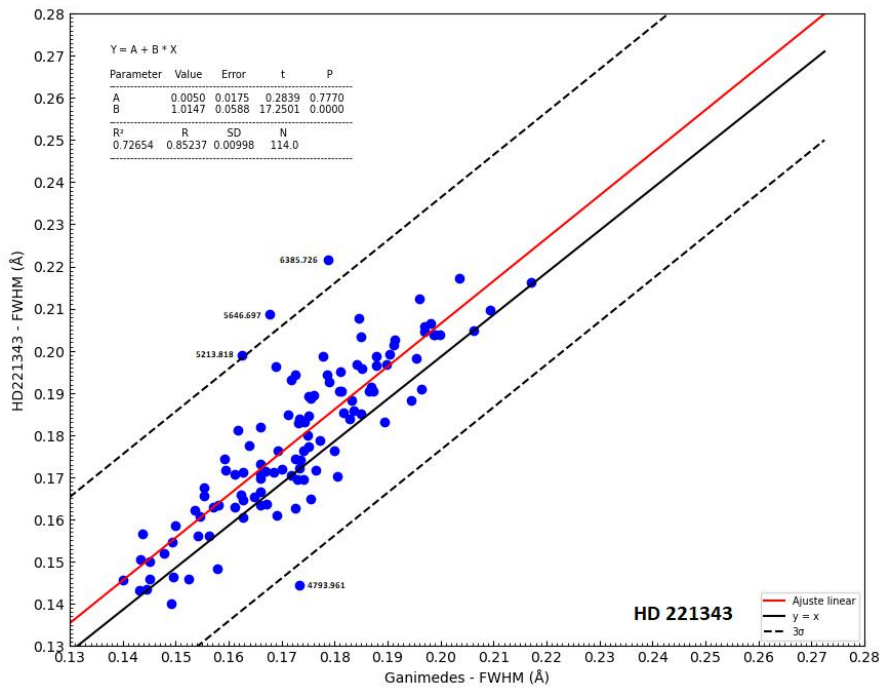


FIGURA 3.138. Análise das linhas de Fe I: FWHM para HD 221343. As definições dos parâmetros estatísticos são as mesmas da figura 3.36.

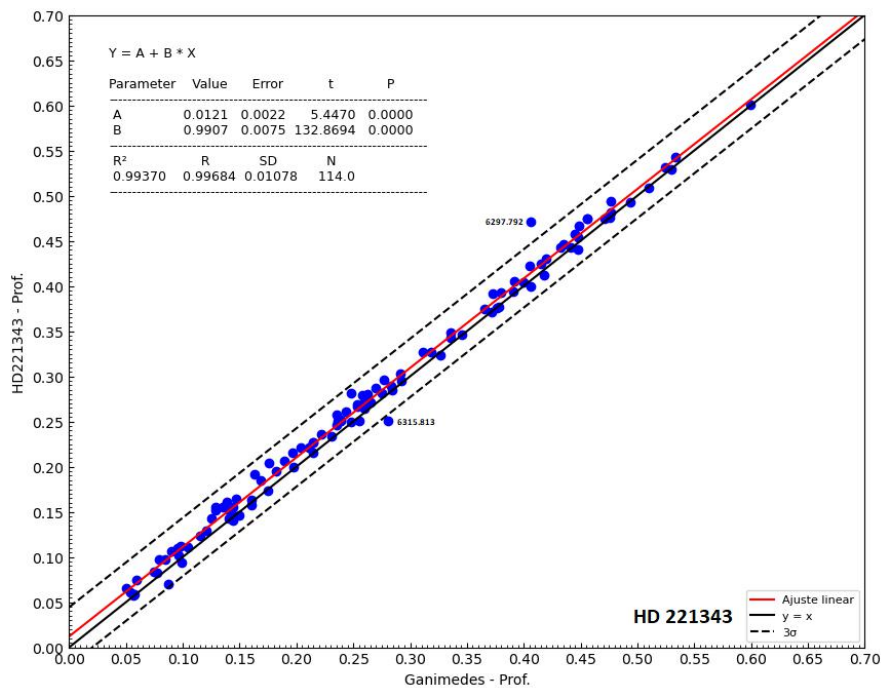


FIGURA 3.139. Análise das linhas de Fe I: Profundidade para HD 221343. As definições dos parâmetros estatísticos são as mesmas da figura 3.36.

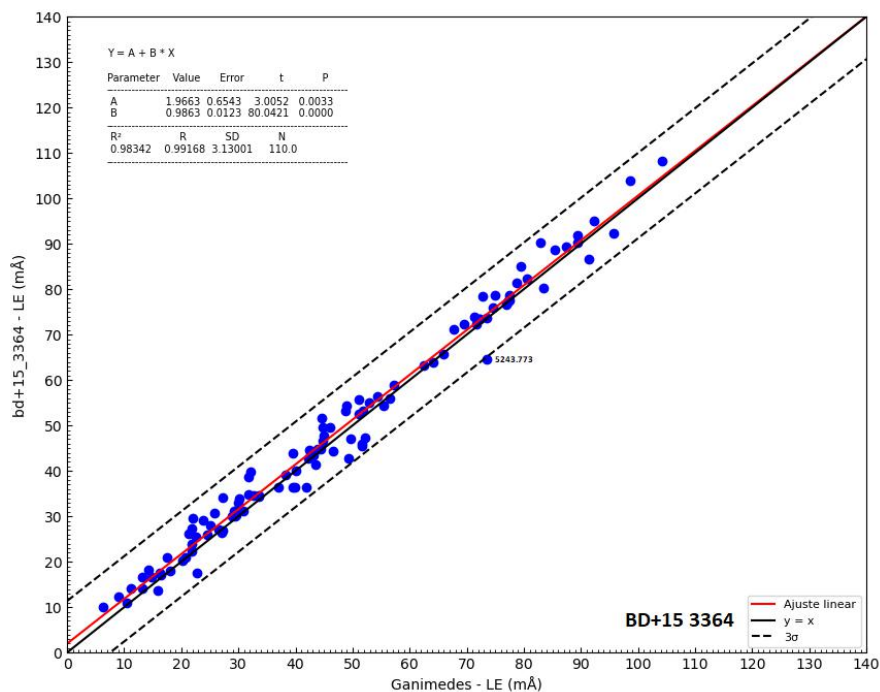


FIGURA 3.140. Análise das linhas de Fe I: LE para BD+15 3364. As definições dos parâmetros estatísticos são as mesmas da figura 3.36.

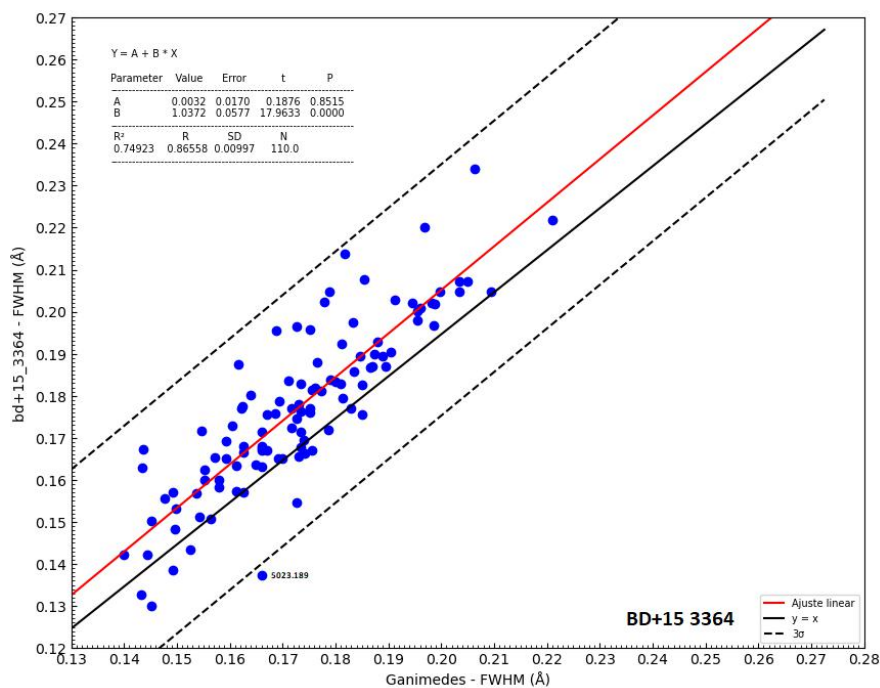


FIGURA 3.141. Análise das linhas de Fe I: FWHM para BD+15 3364. As definições dos parâmetros estatísticos são as mesmas da figura 3.36.

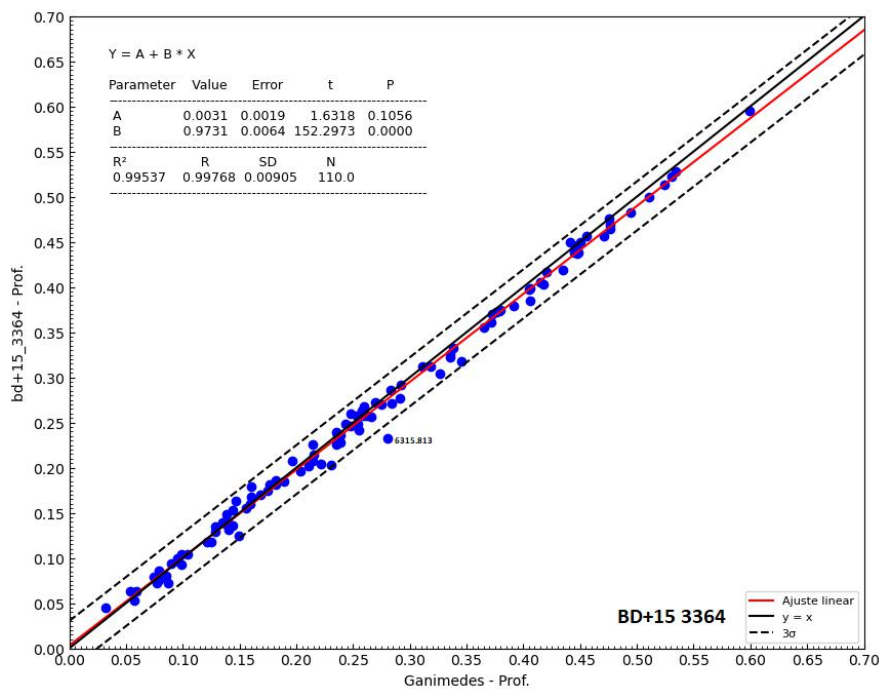


FIGURA 3.142. Análise das linhas de Fe I: Profundidade para BD+15 3364. As definições dos parâmetros estatísticos são as mesmas da figura 3.36.

Capítulo 4

Resultados e Discussões

4.1 Análise de FWHM/λ

No contexto da análise estatística, realizamos cálculos detalhados para cada espectro, incluindo Ganimedes, no gráfico que relaciona FWHM/λ com a largura equivalente (LE).

- **Média:** A média de FWHM/λ é obtida somando todos os valores de um conjunto e dividindo pelo número total de valores. Esse cálculo fornece uma medida do valor central dos dados, representando uma tendência geral do conjunto analisado. No caso dos espectros, a média de FWHM/λ para cada espectro indica uma referência sobre o comportamento das linhas espectrais analisadas.
- **Média do Desvio-Padrão (σ):** A média do desvio-padrão é obtida somando todos os desvios-padrão calculados para cada espectro e dividindo pelo número total de espectros. Esse valor representa o desvio-padrão médio entre os espectros, funcionando como uma referência da variação média nas medidas dos espectros analisados. No contexto das linhas espectrais, ele indica uma medida central de dispersão, ajudando a compreender o comportamento geral da variabilidade dos dados. Para os dados analisados, a média do desvio-padrão é igual a $\sigma = 0,211 \times 10^{-5}$.
- **Erro Padrão:** O desvio-padrão da média do desvio-padrão, ou erro padrão, indica a incerteza associada à média do desvio-padrão. Esse valor mede o quão dispersos estão os desvios-padrão individuais em relação ao desvio-padrão médio. Um erro padrão pequeno sugere que os desvios-padrão individuais estão concentrados

em torno da média, enquanto um valor maior indica maior variabilidade entre eles. Esse cálculo permite uma análise mais precisa da confiabilidade da média do desvio-padrão. Para os dados analisados, o erro padrão obtido é $0,0026 \times 10^{-5}$. Assim, pode-se concluir que o desvio padrão apresenta uma estabilidade significativa dentro da amostra.

- **Erro da Média:** O erro da média é uma medida estatística que indica a incerteza associada à média de um conjunto de dados. Ele é calculado dividindo o erro padrão (σ) dos dados pela raiz quadrada do número de linhas utilizadas (N):

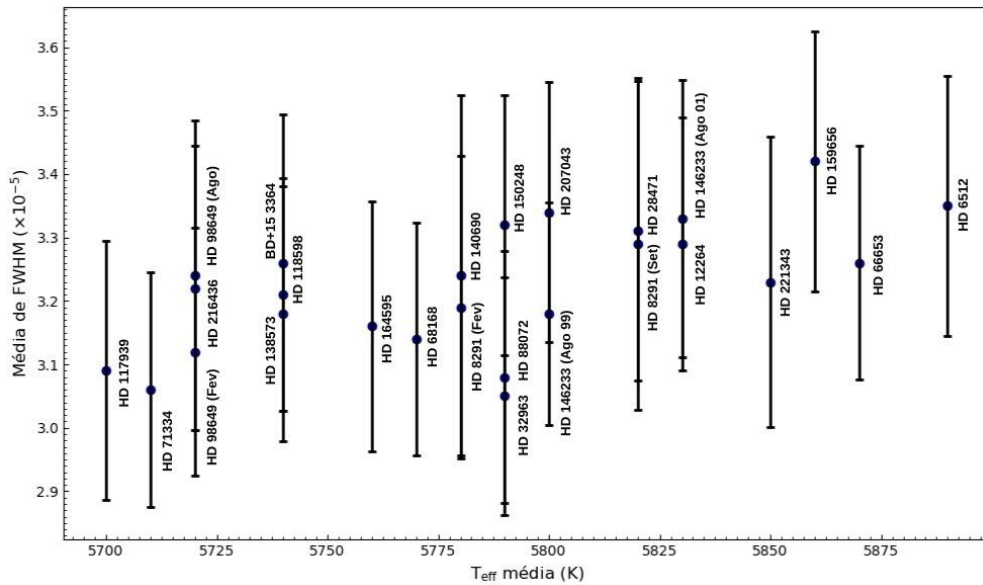
$$\text{Erro da média} = \frac{\sigma}{\sqrt{N}} \quad (4.1)$$

Esse valor representa a precisão com que a média da amostra estimada reflete a média real da população. Em outras palavras, quanto menor o erro da média, mais confiável é a média calculada, pois significa que há menos variação nas medições individuais em relação ao valor central.

A partir dessas informações, construímos uma tabela que resume os resultados da análise estatística para cada espectro. A Tabela 4.1 apresenta a média, o desvio padrão, o número de linhas (N) e o erro da média, calculado com base na média do desvio padrão. Além disso, utilizando os dados apresentados na Tabela 4.1, foi gerado o histograma mostrado na Figura 4.1, que representa a média do FWHM ($\times 10^{-5}$) em função da temperatura efetiva média (T_{eff}) para cada espectro. As barras de erro indicam o desvio padrão das medições, refletindo as incertezas associadas às médias calculadas. Esse histograma possibilita a visualização direta da dispersão dos valores de FWHM e da sua relação com T_{eff} , destacando a consistência dos dados e a dificuldade em alcançar maior precisão devido às variações entre espectros repetidos.

TABELA 4.1. Resultados da Média, desvio-padrão (SD), número de linhas (N) e erro da média no gráfico de FWHM

Espectro	Média ($\times 10^{-5}$)	SD ($\times 10^{-5}$)	N	Erro da Média de FWHM ($\times 10^{-5}$)
Ganimedes	3.07	0.196	348	0.011
HD6512	3.35	0.205	287	0.013
HD8291 (Fev)	3.19	0.238	296	0.012
HD8291 (Set)	3.29	0.262	308	0.012
HD12264	3.33	0.218	300	0.012
HD28471	3.31	0.236	291	0.012
HD32963	3.08	0.199	300	0.012
HD66653	3.26	0.184	327	0.012
HD68168	3.14	0.183	317	0.012
HD71334	3.06	0.185	329	0.012
HD88072	3.05	0.188	327	0.012
HD98649 (Ago)	3.24	0.244	288	0.012
HD98649 (Fev)	3.12	0.196	292	0.012
HD117939	3.09	0.204	307	0.012
HD118598	3.21	0.183	314	0.012
HD138573	3.18	0.201	324	0.012
HD140690	3.24	0.284	302	0.012
HD146233 (Ago01)	3.29	0.199	302	0.012
HD146233 (Ago99)	3.18	0.175	289	0.013
HD150248	3.32	0.205	296	0.012
HD159656	3.42	0.205	295	0.012
HD164595	3.16	0.197	284	0.013
HD207043	3.34	0.205	278	0.013
HD216436	3.22	0.224	292	0.012
HD221343	3.23	0.229	305	0.012
BD+15 3364	3.26	0.234	289	0.013

FIGURA 4.1. Histograma mostra a média de FWHM ($\times 10^{-5}$) em função da temperatura efetiva média (T_{eff}) para cada espectro. As barras de erro indicam o desvio padrão das medições.

Com base nesses resultados, observamos que o erro da média é baixo, variando de $0,02 \times 10^{-5}$ a $0,03 \times 10^{-5}$. A dispersão observada, representada pelo desvio padrão, é real e reflete tanto as diferentes larguras das linhas quanto fatores como erros de posicionamento do contínuo, artefatos de observação, redução de dados, a presença de EHF e o ruído fotométrico. As diferenças nos valores médios de FWHM/λ são notáveis e indicam resultados significativos, visto que esses valores são calculados com uma precisão de aproximadamente 0,01, e as variações observadas são consideravelmente maiores. Isso sugere diferenças reais no alargamento das linhas, que podem ser atribuídas tanto ao aumento do alargamento rotacional e da macroturbulência (fatores macroscópicos) quanto às propriedades térmicas atmosféricas na região de formação das linhas (fatores microscópicos) entre as estrelas.

Por outro lado, mesmo ao considerar estrelas repetidas, não conseguimos reproduzir os valores médios de FWHM/λ . As diferenças observadas entre essas estrelas são de aproximadamente $0,1 \times 10^{-5}$, o que é dez vezes maior do que o erro associado ao valor médio de FWHM/λ . Nesse contexto, apenas diferenças entre os espectros que superem estatisticamente $0,2 \times 10^{-5}$ podem ser consideradas significativas. Tomando o Sol como referência, apenas as estrelas HD 6512, HD 12264, HD 28471, HD 150248, HD 159656 e HD 207043 podem ter um alargamento médio das linhas de metais superior ao solar. Esse resultado é interessante em relação às candidatas a gêmeas solares propostas por Porto de Mello et al. (2014) já que HD 150248 é uma das melhores gêmeas por eles encontradas. Esse objeto, em nossa análise com poder de resolução e relação S/R superior, revela possuir a largura reduzida média observada das linhas de metais significativamente superior ao valor solar. Contudo, nesta análise, não conseguimos determinar se esses alargamentos são de natureza macroscópica ou microscópica. Observa-se ainda que o Sol, juntamente com as estrelas HD 71334 e HD 88072, se destaca como uma das estrelas da amostra com menor alargamento intrínseco das linhas.

4.2 Buscando Espectros Semelhantes ao do Sol

Nesta seção, buscaremos identificar espectros semelhantes ao do Sol por meio da análise de linhas de Ferro I, elemento com o maior número de linhas disponíveis. A sensibilidade dessas linhas à temperatura efetiva permite identificar variações nas condições físicas das estrelas observadas, facilitando uma comparação detalhada com o

espectro solar. Para isso, analisaremos os gráficos de LE, FWHM e profundidade de cada espectro (Seção 3.3).

Considerando as linhas de Fe I e outras características semelhantes às do Sol, a estrela pode ser classificada como uma candidata a gêmea solar. Além disso, ao compararmos as características puramente espectrais, ela pode ser considerada uma análoga solar. Dessa forma, as estrelas que atendem a todos os critérios analisados de semelhança com o espectro solar, tanto quantitativos quanto visuais, nos três diagramas e dentro de uma margem de erro de 1σ , serão classificadas como análogas solares e, portanto, candidatas gêmeas solares. Essa classificação poderá ser confirmada por meio de parâmetros evolutivos mais detalhados e outras abordagens em estudos futuros.

- **HD 6512:** Nos gráficos de LE e FWHM, observamos que o ajuste linear está acima da bissetriz, o que indica que as linhas de HD 6512 são mais fortes e mais largas do que as de Ganimedes. Essa diferença é significativa, pois ultrapassa $1,5\sigma$ em relação à bissetriz. No gráfico de profundidade, por outro lado, o ajuste linear vai se aproximando da bissetriz, sugerindo uma correspondência mais próxima entre as linhas de ambas as estrelas. A partir dessa análise, interpretamos que, para profundidades de linhas semelhantes às do Sol, um valor médio de FWHM superior ao solar resulta em larguras equivalentes mais fortes do que o Sol, o que é de fato observado. Portanto, HD 6512 não pode ser considerada uma análoga solar.
- **HD 8291 - Fevereiro:** No gráfico de LE, o ajuste linear coincide bem com a bissetriz, indicando boa concordância com Ganimedes. Já no gráfico de FWHM, o ajuste está ligeiramente acima da bissetriz, mas ainda dentro de 1σ sugerindo que as linhas de HD 8291 - Fevereiro são um pouco mais largas e fortes. No gráfico de profundidade, o ajuste está abaixo da bissetriz, com um desvio cerca de $1,5\sigma$, indicando profundidades menores. Esse desvio, no entanto, precisa ser validado ao cruzar os três diagramas, já que, para a mesma LE, uma maior FWHM implica em uma profundidade menor, o que é consistente com o observado. Assim, esse espectro pode ser considerado uma análoga solar marginal.
- **HD 8291 - Setembro:** Neste espectro, o gráfico de LE mostra o ajuste linear alinhado à bissetriz, evidenciando uma boa correspondência. Já em FWHM, o ajuste linear apresenta um pequeno deslocamento, situando-se um pouco acima

de 1σ . No gráfico de profundidade, a bissetriz encontra-se acima do ajuste linear, com um desvio de até $1,5\sigma$, indicando profundidades menores em comparação com Ganimedes. Esses desvios, tanto em FWHM quanto em profundidade analisados em conjunto com o espectro anterior, configuram HD 8291 como uma possível análoga solar marginal.

- **HD 12264:** O gráfico de LE mostra uma boa concordância, com o ajuste linear coincidindo com a bissetriz. No entanto, no gráfico de FWHM, o ajuste linear está acima da bissetriz, apresentando um desvio acima de $1,5\sigma$, o que indica que as linhas dessa estrela são mais largas em comparação com as do Sol. No gráfico de profundidade, a bissetriz se encontra bem acima do ajuste linear, com um desvio dentro de $1,5\sigma$, sugerindo profundidades menores, o que compensa as larguras maiores e justifica o bom acordo observado em LE. Esses desvios indicam que, embora o comportamento da LE seja semelhante ao do Sol, as diferenças em FWHM e profundidade afastam essa estrela do perfil de uma análoga solar.
- **HD 28471:** No gráfico de LE, há uma boa concordância, com o ajuste linear alinhado à bissetriz. No entanto, no gráfico de FWHM, o ajuste linear está acima da bissetriz com um desvio superior a 1σ , e no gráfico de profundidade, a bissetriz está posicionada acima do ajuste linear com um desvio aproximado dentro de 1σ , o que compensa as larguras maiores e justifica o bom acordo observado em LE. Esses desvios sugerem que, embora a estrela tenha uma boa correspondência em LE, ela apresenta diferenças consideráveis em relação a Ganimedes, o que impede que seja considerada uma análoga solar.
- **HD 32963:** No gráfico de LE, o ajuste linear encontra-se acima da bissetriz, com um desvio superior a $1,5\sigma$, indicando que as linhas dessa estrela são mais intensas do que as de Ganimedes. No gráfico de FWHM, o ajuste linear está alinhado à bissetriz, dentro de 1σ , indicando uma boa correspondência. No gráfico de profundidade, o ajuste linear também se posiciona acima da bissetriz, com um desvio superior a $1,5\sigma$, evidenciando profundidades maiores. Esses desvios, especialmente nos gráficos de LE e profundidade, se explicam mutuamente e sugerem que, apesar de algumas semelhanças com Ganimedes, a estrela não atende aos critérios necessários para ser classificada como uma análoga solar.

- **HD 66653:** No gráfico de LE e FWHM, o ajuste linear está acima da bissetriz, com um desvio superior a $1,5\sigma$, indicando que as linhas dessa estrela são mais fortes e mais largas do que as de Ganimedes. No gráfico de profundidade, o ajuste linear apresenta inicialmente um desvio de cerca de 1σ , mas posteriormente se alinha à bissetriz. Contudo, os desvios observados em LE e FWHM são coerentes entre si e indicam diferenças significativas em relação ao Sol, o que afasta esta estrela do perfil de uma análoga solar.
- **HD 68168:** No gráfico de LE e profundidade, o ajuste linear está acima da bissetriz, com um desvio superior a $1,5\sigma$. Já no gráfico de FWHM, o ajuste linear está em concordância com a bissetriz, dentro de aproximadamente 1σ , indicando uma boa correspondência entre as linhas dessa estrela e as de Ganimedes. Os resultados são coerentes, com a estrela apresentando FWHM médio comparável ao do Sol, mas LEs e profundidades maiores. Esses desvios em LE e profundidade sugerem que a estrela apresenta características distintas, afastando-a do perfil de uma análoga solar.
- **HD 71334:** Nos três gráficos, podemos observar que o ajuste linear segue a bissetriz com um desvio inferior a 1σ , indicando que a estrela HD 71334 possui intensidade de linhas semelhante à de Ganimedes. Dessa forma, podemos classificá-la como uma análoga solar. Observa-se ainda que essa estrela é uma das candidatas a gêmea solar de Porto de Mello et al. (2014).
- **HD 88072:** De maneira semelhante, nos gráficos de LE, FWHM e profundidade, o ajuste linear também está muito próximo da bissetriz, com desvios dentro de 1σ , sugerindo que essa estrela apresenta características semelhantes às de Ganimedes, sendo também considerada uma análoga solar. Além disso, vale destacar que essa estrela foi identificada como candidata a gêmea solar por Porto de Mello et al. (2014).
- **HD 98649 - Agosto:** Nos gráficos de LE e profundidade, o ajuste linear coincide perfeitamente com a bissetriz. No gráfico de FWHM, também há uma boa correspondência dentro do intervalo de 1σ . Esses resultados indicam que HD 98649 - Agosto possui características muito semelhantes às de Ganimedes, podendo ser classificada como uma análoga solar. Além disso, essa estrela é uma das candidatas a gêmea solar de Porto de Mello et al. (2014).

- **HD 98649 - Fevereiro:** Considerando que se trata do mesmo espectro em datas diferentes, os resultados mostram uma grande semelhança entre as medições, indicando que esta estrela pode ser considerada uma análoga solar.
- **HD 117939:** Nos gráficos de LE e profundidade, a bissetriz está acima do ajuste linear, com um desvio superior a $1,5\sigma$, indicando que as linhas de Ganimedes são mais intensas e profundas do que as de HD 117939. No gráfico de FWHM, o ajuste linear apresenta boa correspondência com a bissetriz, dentro de 1σ . Esses resultados, como já analisado em casos anteriores, são consistentes e autoexplicativos, não sendo suficiente para classificar HD 117939 como uma análoga solar. Observamos que esta estrela foi proposta como possível gêmea solar por Porto de Mello et al. (2014), mas os dados de maior resolução do FEROS sugerem que este talvez não seja o caso.
- **HD 118598:** No gráfico de LE, o ajuste linear apresenta uma excelente correspondência com a bissetriz. No gráfico de FWHM, o ajuste linear está levemente acima da bissetriz, com um desvio um pouco superior a 1σ . Já no gráfico de profundidade, a bissetriz está acima do ajuste linear, com um desvio superior a 1σ , indicando que as linhas dessa estrela são menos profundas em relação às de Ganimedes. Embora essa estrela também seja uma das candidatas a gêmea solar de Porto de Mello et al. (2014), os parâmetros de LE próximos aos do Sol, somados aos desvios em profundidade e FWHM, evidenciam diferenças que tornam improvável classificá-la como uma análoga solar nesta análise.
- **HD 138573:** O gráfico de LE mostra uma boa correspondência, com o ajuste linear alinhado à bissetriz. No gráfico de FWHM, o ajuste também apresenta bom acordo, com as larguras ligeiramente menores, mas ainda dentro de uma concordância de 1σ . Já no gráfico de profundidade, o ajuste linear inicialmente coincide com a bissetriz, mas, à medida que avançamos, a bissetriz começa a se posicionar acima do ajuste, com um desvio dentro de 1σ , sugerindo que as linhas dessa estrela podem ser um pouco menos profundas em comparação às de Ganimedes. Estes resultados são coerentes, e dentro de 1σ essa estrela pode ser considerada uma boa análoga. Além disso, observamos que essa estrela é uma das candidatas a gêmea solar de Porto de Mello et al. (2014).

- **HD 140690:** No gráfico de LE, a bissetriz está bem abaixo do ajuste linear, com um desvio superior a 3σ , indicando que as linhas de Ganimedes são mais intensas do que as dessa estrela. No gráfico de FWHM, o ajuste linear está acima de 1σ . No gráfico de profundidade, o ajuste linear está bem distante da bissetriz, com um desvio superior a 3σ , sugerindo que a profundidade das linhas dessa estrela é significativamente menor do que a de Ganimedes. Esses desvios expressivos nos três gráficos evidenciam que HD 140690 possui características distintas, afastando-a da classificação de análoga solar. Desse modo, nossos dados do espectro de Fe I refutam a sugestão de Porto de Mello et al. (2014) de que HD 140690 é uma boa análoga solar.
- **HD 146233 - Agosto 99:** Nos gráficos de LE e FWHM, o ajuste linear apresenta um leve deslocamento em relação à bissetriz, mas ainda dentro de 1σ , indicando uma boa correspondência geral com o perfil de Ganimedes, apesar das pequenas variações. No entanto, no gráfico de profundidade, o ajuste linear está perfeitamente alinhado com a bissetriz, também dentro de 1σ , evidenciando uma correspondência ainda mais precisa. Esses resultados sugerem que, apesar das pequenas diferenças em LE e FWHM, a estrela exibe características coerentes, com linhas ligeiramente mais largas e um pouco mais intensas que o Sol, mas dentro de 1σ , o que a torna uma análoga solar.
- **HD 146233 - Agosto 01:** Nos gráficos de LE e FWHM, o ajuste linear está levemente acima de 1σ , sugerindo que as linhas dessa estrela são ligeiramente mais largas do que as de Ganimedes. No gráfico de profundidade, o ajuste linear começa próximo da bissetriz, mas se desvia para cima, indicando valores um pouco menores que os solares, dentro de 1σ . Esses resultados são coerentes e, em conjunto com o espectro anterior, indicam que HD 146233, a conhecida gêmea solar 18 Scorpii, é confirmada como uma análoga solar por nosso método.
- **HD 150248:** No gráfico de LE, o ajuste linear está perfeitamente alinhado com a bissetriz, indicando uma boa correspondência com Ganimedes. No gráfico de FWHM, o ajuste linear apresenta um pequeno deslocamento, mas ainda dentro de 1σ , sugerindo uma boa concordância geral. No entanto, no gráfico de profundidade, o ajuste linear começa alinhado com a bissetriz, mas, à medida que a profundidade aumenta, a bissetriz se afasta do ajuste linear, com um desvio de até

$1,5\sigma$, sugerindo um desvio médio de 1σ . Esses resultados indicam que a estrela pode ser classificada como uma análoga solar marginal. Considerando esses dados, é possível concluir que essa estrela se alinha com as características de uma análoga marginal, além de também ser uma das candidatas a gêmea solar identificadas por Porto de Mello et al. (2014).

- **HD 159656:** No gráfico de LE, o ajuste linear está dentro de 1σ , indicando uma boa correspondência com o perfil de Ganimedes. No gráfico de FWHM, o ajuste linear se desvia para além de $1,5\sigma$. Por fim, no gráfico de profundidade, o ajuste linear começa alinhado com a bissetriz, mas à medida que a profundidade aumenta, a discrepância se torna mais evidente, com o ajuste desviando até um nível de 2σ . Esses resultados, como observamos em análises anteriores, são autoexplicativos e consistentes. Isso sugere uma diferença significativa entre as linhas dessa estrela e as de Ganimedes, afastando-a do perfil de uma análoga solar.
- **HD 164595:** Nos gráfico de LE e FWHM, o ajuste linear está dentro de 1σ , indicando uma boa correspondência com Ganimedes. No gráfico de profundidade, o ajuste apresenta um pequeno deslocamento, mas ainda permanece dentro de 1σ , sugerindo uma boa concordância geral. Dessa forma, essa estrela pode ser considerada uma boa candidata a análoga solar, com características bastante próximas às de Ganimedes. Vale ressaltar que essa estrela é uma das candidatas a gêmea solar identificadas por Porto de Mello et al. (2014).
- **HD 207043:** No gráfico de LE, o ajuste linear está fora de 1σ , indicando uma diferença considerável em relação ao perfil de Ganimedes. No gráfico de FWHM, o ajuste linear se encontra fora de $1,5\sigma$. Por fim, no gráfico de profundidade, o ajuste se afasta para baixo em relação à bissetriz, com um desvio superior a $1,5\sigma$, sugerindo uma discrepância nas profundidades das linhas dessa estrela em comparação com Ganimedes. Esses desvios em todos os três parâmetros afastam essa estrela do perfil de uma análoga solar.
- **HD 216436:** No gráfico de LE, o ajuste linear está perfeitamente alinhado com a bissetriz, indicando boa correspondência com Ganimedes. No gráfico de FWHM, a bissetriz começa abaixo do ajuste linear e depois fica acima, mas ambos permanecem dentro de 1σ , sugerindo uma leve discrepância, porém ainda dentro de uma boa concordância. No gráfico de profundidade, o ajuste linear está alinhado com

a bissetriz dentro de 1σ , indicando uma boa correspondência também nas profundidades. Com isso, podemos considerar HD 216436 uma boa candidata a análoga solar. Um ponto de interesse particular é que esta estrela não foi considerada nem uma análoga nem uma gêmea solar por Porto de Mello et al. (2014).

- **HD 221343:** No gráfico de LE, a bissetriz está abaixo do ajuste linear, com um desvio superior a 1σ , indicando que as linhas dessa estrela são mais fracas em comparação com as de Ganimedes. No gráfico de FWHM, observa-se uma situação similar, com a bissetriz abaixo do ajuste linear e um desvio superior a $1,5\sigma$. No gráfico de profundidade, por outro lado, o ajuste linear está alinhado com a bissetriz, mostrando uma boa correspondência dentro de 1σ . Esses resultados, como observado em análises anteriores, são logicamente coerentes e autoexplicativos. Embora haja discrepâncias em LE e FWHM, a estrela apresenta boa concordância na profundidade, o que a afasta parcialmente do perfil de uma análoga solar.
- **BD+153364:** No gráfico de LE, o ajuste linear está bem alinhado com a bissetriz, indicando uma boa correspondência com Ganimedes. No gráfico de FWHM, o ajuste linear se encontra dentro de 1σ , mostrando boa concordância geral. No gráfico de profundidade, o ajuste está um pouco abaixo da bissetriz, mas ainda dentro de 1σ . Esses resultados são coerentes e indicam que a estrela pode ser considerada uma análoga solar. Observamos que essa estrela é uma das candidatas a gêmea solar de Porto de Mello et al. (2014).

A tabela 4.2 apresenta os resultados dos ajustes lineares realizados para cada espectro em relação a Ganimedes, levando em conta os parâmetros de LE, FWHM e profundidade. Os valores de correlação (R) e os desvios padrão (SD) oferecem uma avaliação objetiva da similaridade entre os espectros analisados e Ganimedes, auxiliando na identificação de possíveis análogas solares.

TABELA 4.2. Resultados do Coeficiente de Correlação (R) e Desvio Padrão (SD) para os gráficos de LE, FWHM e profundidade.

Espectro	LE		FWHM		Profundidade	
	R	SD	R	SD	R	SD
HD6512	0.99254	3.18148	0.88851	0.00949	0.99717	0.00995
HD8291 (Fev)	0.98727	4.08105	0.78914	0.01296	0.99578	0.12590
HD8291 (Set)	0.99213	3.04933	0.84997	0.01123	0.99761	0.00890
HD12264	0.99139	3.14116	0.85355	0.01166	0.99724	0.00937
HD28471	0.99117	3.26035	0.85831	0.01125	0.99753	0.00921
HD32963	0.99095	3.49777	0.86260	0.00902	0.99777	0.00937
HD32963	0.99095	3.49777	0.86260	0.00902	0.99777	0.00937
HD66653	0.99452	2.72382	0.91910	0.00830	0.99761	0.00914
HD68168	0.99520	2.63770	0.91703	0.00727	0.99758	0.00986
HD71334	0.99548	2.37343	0.92548	0.00731	0.99788	0.00885
HD88072	0.99607	2.19689	0.93370	0.00684	0.99847	0.00751
HD98649 (Ago)	0.99273	2.93233	0.82132	0.01109	0.99726	0.00990
HD98649 (Fev)	0.99526	2.47445	0.88711	0.00900	0.99799	0.00889
HD117939	0.99382	2.59015	0.87975	0.00980	0.99597	0.01184
HD118598	0.99404	2.71834	0.91060	0.00820	0.99790	0.00849
HD138573	0.99522	2.42810	0.92453	0.00714	0.99821	0.00794
HD140690	0.96093	9.03743	0.84230	0.01152	0.96185	0.04207
HD146233 (Ago01)	0.99243	3.16109	0.89058	0.00910	0.99791	0.00855
HD146233 (Ago99)	0.99684	2.04805	0.93899	0.00646	0.99884	0.00661
HD150248	0.99120	3.39832	0.84528	0.01056	0.99772	0.00894
HD164595	0.99273	3.05015	0.85317	0.00992	0.99740	0.01000
HD207043	0.99351	3.02801	0.88017	0.00834	0.99798	0.00853
HD216436	0.99329	2.94068	0.86327	0.00825	0.99749	0.00966
HD221343	0.99058	3.55704	0.85237	0.00998	0.99684	0.01078
BD+153364	0.99168	3.13001	0.86558	0.00997	0.99768	0.00905

A seguir, apresentamos uma análise dos resultados obtidos a partir da tabela, considerando os parâmetros de LE, FWHM e profundidade. Esta análise é preliminar e qualitativa, sendo que uma avaliação estatística completa será realizada em trabalhos futuros.

- **Largura equivalente:** Os melhores coeficientes de correlação são observados em HD 88072 e HD 146233 (Ago99). A LE é um parâmetro bidimensional, que representa a uma área no espectro da qual a energia é retirada pela transição atômica, e, por isso, apresenta maior robustez, com menores dispersões nos dados. O menor valor de dispersão é encontrado para HD 88072, que, segundo o artigo de Porto de Mello et al. (2014), é considerada uma excelente análoga, embora não seja classificada como gêmea devido a um estado evolutivo mais avançado que o Sol. No entanto, seu espectro é extremamente semelhante ao do Sol. Por outro lado, valores baixos de dispersão para as regressões sobre LEs também são um indicativo

de semelhança com o espectro solar. Tais valores baixos são encontrados em HD 71334, HD 117939, HD 98649 (Fev), HD 138573 e HD 146233 (Ago99), sendo que este último espectro parece mais similar ao Sol do que o espectro observado em 2001.

- **Largura à meia altura:** Esse é um parâmetro mais sujeito a variações e menos difícil de vincular, e sua interpretação carrega menos peso. As melhores correlações foram observadas em HD 71334, HD 88072, HD 138573 e HD 146233 (Ago99), o que reforça a semelhança do espectro de HD 146233 (Ago99) com o do Sol, especialmente quando comparado ao espectro de 2001. Quando se considera o seu desvio padrão, que é um parâmetro com grande variação, os espectros que se destacam são HD 88072, HD 146233 (Ago99) e HD 138573.
- **Profundidade:** Nesse caso, a análise é mais complexa, pois todos os coeficientes de correlação são bastante elevados. A profundidade é um parâmetro robusto em sua determinação, e os espectros que se destacam por boa correlação são os de HD 88072, HD 138573 e HD 146233 (Ago99). O desvio padrão indica que as menores dispersões estão associadas aos maiores coeficientes de correlação, sendo o mais baixo observado em HD 146233 (Ago99). Além disso, os espectros HD 88072 e HD 138573 apresentam ótimas correspondências.

Através dessas análises, observamos que algumas estrelas da amostra atendem aos três critérios definidos, destacando-se como candidatas promissoras. No entanto, nosso método apresenta uma limitação clara, evidenciada pelos espectros repetidos, o que demonstra que nem sempre a repetição do mesmo objeto leva a resultados completamente coerentes. Um exemplo disso é o espectro de HD 146233, onde um dos espectros se parece muito mais com uma gêmea do que o outro. Além disso, a maioria das estrelas na amostra possui apenas um espectro, o que limita a consistência dos resultados. Portanto, todas essas conclusões devem ser consideradas preliminares, sendo necessária uma investigação mais profunda sobre a capacidade do FEROS de repetir resultados físicos, sugerindo que essa capacidade pode não ser tão eficaz quanto esperado.

Considerando todas as estrelas da amostra, identificamos HD 71334, HD 88072, HD 98649, HD 138573, HD 146233, HD 164595, HD 216436 e BD+153364 como prováveis análogas solares nesta análise, devido à semelhança de suas características espectrais com as do Sol. Além disso, as estrelas HD 150248 e HD 8291 foram consideradas

análogas marginais, sendo necessária uma avaliação mais detalhada para confirmar sua classificação como análogas solares.

Entre as estrelas identificadas como análogas, destacam-se HD 71334, HD 98649, HD 138573, HD 146233, HD 164595, BD+153364 e a análoga marginal HD 150248, todas previamente propostas como candidatas a gêmeas solares no trabalho de Porto de Mello et al. (2014). Nosso método baseia-se na análise espectral, com ênfase nas linhas de Fe I, que servem como critério para a classificação de análogas solares. Embora esse critério seja eficaz para reforçar a identificação de análogas solares, ele não é capaz de distinguir de forma definitiva as gêmeas solares. No entanto, pode contribuir para confirmar classificações anteriores, apoiando o status de gêmeas solares já estabelecido.

Capítulo 5

Conclusões e Perspectivas

Neste trabalho, realizamos uma análise detalhada das linhas de absorção em 26 espectros, com o objetivo de elaborar uma lista de linhas livres de contaminação e identificar as melhores candidatas a análogas solares. Para isso, utilizamos dados obtidos com o espectrógrafo FEROS de alta resolução, que permitiram uma análise precisa das linhas espectrais.

No Capítulo 3, realizamos uma análise estatística detalhada a partir das medições automáticas feitas pelo IRAF, com foco em parâmetros como largura equivalente, largura a meia altura e profundidade das linhas. Para garantir a precisão das linhas selecionadas, realizamos testes de significância no gráfico de FWHM/λ versus LE, eliminando aquelas que não atendiam aos critérios definidos, com base na teoria de formação de linhas espectrais e nas curvas de crescimento. Para a construção dos gráficos de profundidade, desconsideramos as linhas rejeitadas no teste anterior (Apêndice A) e aplicamos, às remanescentes, o critério de 3σ para a exclusão de outliers.

No Capítulo 4, a análise de FWHM/λ revelou que as diferenças observadas entre os espectros eram significativamente maiores que o erro médio, com variações superiores a 0,1. Apenas diferenças superiores a $0,2 \times 10^{-5}$ foram consideradas estatisticamente relevantes. Estrelas como HD 6512, HD 12264, HD 28471, HD 150248, HD 159656 e HD 207043 apresentaram um alargamento médio das linhas de metais superior ao do Sol, embora não tenha sido possível determinar a natureza desses alargamentos. Além disso, ao comparar as linhas de Fe I com os espectros de Ganimedes, identificamos as estrelas HD 71334, HD 88072, HD 98649, HD 138573, HD 146233, HD 164595, HD 216436 e BD+153364 como prováveis análogas solares, enquanto HD 150248 e HD 8291 foram classificadas como análogas marginais. Essas estrelas apresentam uma correspondência

significativa nas larguras, profundidades e intensidades das linhas de Fe I, indicando que seus perfis espectrais são muito semelhantes ao do Sol. Importante destacar que várias dessas estrelas já foram previamente propostas como candidatas a gêmeas solares no estudo de Porto de Mello et al. (2014), o que reforça a sua semelhança com o Sol.

Os resultados deste trabalho evidenciam que é possível identificar estrelas com características espectrais semelhantes às do Sol, algumas das quais podem ser classificadas como análogas solares. No entanto, as diferenças observadas indicam a necessidade de análises adicionais para uma compreensão mais precisa das semelhanças e discrepâncias entre essas estrelas e o Sol. A nova lista de linhas espectrais identificadas fornece uma base sólida para futuras pesquisas, abrindo caminho para o desenvolvimento de novas abordagens na análise dessas estrelas e aprimorando, assim, nosso entendimento sobre as gêmeas solares.

Os próximos passos envolvem, inicialmente, a análise detalhada do equilíbrio de excitação e ionização das linhas de Fe I e Fe II, utilizando as larguras equivalentes das linhas espectrais e modelos atmosféricos com o Sol como referência. Esse método possibilitará a determinação da temperatura efetiva de excitação, bem como informações sobre a gravidade superficial de ionização, a velocidade de microturbulência e as abundâncias de ferro. Outra direção natural de desenvolvimento é a análise das cores fotométricas das estrelas candidatas, aprimorando a determinação da temperatura efetiva fotométrica, com a integração das cores da missão Gaia (Gaia Collaboration et al., 2018) e das calibrações modernas de temperatura efetiva, como as de Casagrande et al. (2010). Esses avanços permitirão refinar as análises espectroscópicas e fotométricas, proporcionando uma compreensão mais precisa das características das estrelas e aproximando-as ainda mais do perfil das gêmeas solares.

Referências Bibliográficas

- Aller, L. H. 1963, *Astrophysics: The Atmospheres of the Sun and Stars* (Ronald Press)
- Carroll, B. W., & Ostlie, D. A. 1996, *An Introduction to Modern Astrophysics* (Addison-Wesley)
- Casagrande, L., Ramírez, I., Meléndez, J., Bessell, M., & Asplund, M. 2010, *Astronomy and Astrophysics*, 512, A54
- Cayrel de Strobel, G., & Bentolila, C. 1989, *Astronomy and Astrophysics*, 211, 324
- Cayrel De Strobel, G., Knowles, N., Hernandez, G., & Bentolila, C. 1981, *Astronomy and Astrophysics*, 94, 1
- Di Bartolo, L. 2005, *Dissertação de mestrado*, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Centro de Ciências Matemáticas e da Natureza, Observatório do Valongo
- do Nascimento Jr., J.-D., Takeda, Y., Meléndez, J., et al. 2013, *The Astrophysical Journal Letters*, 771, L31
- Friel, E., Cayrel de Strobel, G., Chmielewski, Y., et al. 1993, *Astronomy and Astrophysics*, 274, 825
- Gaia Collaboration, Brown, A. G. A., Vallenari, A., et al. 2018, *Astronomy & Astrophysics*, 616, A1
- Galarza, Y., Meléndez, J., Ramírez, I., et al. 2016, *Astronomy & Astrophysics*, 589, A17
- GHEZZI, L. 2008, *Formação de Linhas em Atmosferas Estelares*, Monografia para a Apresentação do Exame de Qualificação
- Hardorp, J. 1978, *Astronomy and Astrophysics*, 63, 383

- Meléndez, J., Bergemann, M., Cohen, J. G., et al. 2012, *Astronomy & Astrophysics*, 543, A29
- Monroe, T. R., Meléndez, J., Ramírez, I., et al. 2013, *The Astrophysical Journal Letters*, 774, L32
- Porto de Mello, G. F., & da Silva, L. 1997, *The Astrophysical Journal*, 482, L89
- Porto de Mello, G. F., da Silva, R., da Silva, L., & de Nader, R. V. 2014, *Astronomy & Astrophysics*, 563, 25

Apêndice A

Linhas Eliminadas

TABELA A.1. Linhas espectrais eliminadas da amostra, com a identificação do elemento químico (Id), espécie de ionização (Chi) e a frequência de eliminação nos espectros.

Lambda	Id	Chi	Frequência	Espectros
4662.512	La II	0.00	23	HD117939, HD118598, HD12264, HD138573, HD140690, HD146233 (agosto 01), HD146233 (agosto 99), HD150248, HD159656, HD164595, HD207043, HD216436, HD28471, HD32963, HD6512, HD66653, HD68186, HD71334, HD8291 (fevereiro), HD8291 (setembro), HD88072, HD98649 (fevereiro)
6320.429	La II	0.17	19	HD117939, HD118598, HD12264, HD138573, HD146233 (agosto 01), HD146233 (agosto 99), HD150248, HD159656, HD164595, HD207043, HD221343, HD6512, HD66653, HD71334, HD8291 (fevereiro), HD8291 (setembro), HD88072, HD98649 (agosto)
6390.493	La II	0.32	19	HD117939, HD118598, HD12264, HD138573, HD140690, HD146233 (agosto 01), HD146233 (agosto 99), HD150248, HD159656, HD164595, HD207043, HD221343, HD28471, HD32963, HD6512, HD66653, HD71334, HD8291 (setembro), HD88072
5289.820	Y II	1.03	18	HD117939, HD118598, HD138573, HD146233 (agosto 01), HD159656, HD164595, HD207043, HD216436, HD28471, HD6512, HD66653, HD71334, HD8291 (fevereiro), HD8291 (setembro), HD88072, HD98649 (agosto), HD98649 (fevereiro)

Lambda	Id	Chi	Frequência	Espectros
4931.115	Cr I	5.54	18	HD117939, HD118598, HD138573, HD146233 (agosto 01), HD146233 (agosto 99), HD150248, HD159656, HD164595, HD207043, HD221343, HD28471, HD6512, HD66653, HD71334, HD8291 (fevereiro), HD8291 (setembro), HD98649 (agosto)
6687.508	Y I	0.00	17	HD117939, HD118598, HD12264, HD138573, HD140690, HD159656, HD28471, HD6512, HD66653, HD68186, HD71334, HD8291 (fevereiro), HD8291 (setembro), HD88072, HD98649 (agosto), HD98649 (fevereiro), BD+153364
5274.236	Ce II	1.04	16	HD117939, HD118598, HD138573, HD140690, HD146233 (agosto 01), HD150248, HD159656, HD164595, HD207043, HD216436, HD6512, HD66653, HD8291 (fevereiro), HD88072, HD98649 (agosto), HD98649 (fevereiro)
4748.737	La II	0.93	15	HD117939, HD12264, HD146233 (agosto 99), HD164595, HD207043, HD216436, HD32963, HD6512, HD66653, HD68186, HD8291 (fevereiro), HD88072, HD98649 (agosto), HD98649 (fevereiro), BD+153364
5212.691	Co I	3.51	14	HD117939, HD12264, HD146233 (agosto 01), HD150248, HD159656, HD164595, HD207043, HD216436, HD28471, HD6512, HD68186, HD8291 (fevereiro), HD98649 (agosto), HD98649 (fevereiro)
5668.362	V I	1.08	13	HD117939, HD118598, HD12264, HD150248, HD159656, HD164595, HD207043, HD216436, HD28471, HD6512, HD8291 (setembro), HD98649 (agosto), HD98649 (fevereiro)
4720.149	Fe II	3.20	13	HD118598, HD12264, HD138573, HD146233 (agosto 99), HD159656, HD164595, HD207043, HD216436, HD28471, HD6512, HD8291 (setembro), HD98649 (fevereiro), BD+153364
5657.436	V I	1.06	12	HD12264, HD146233 (agosto 01), HD150248, HD159656, HD164595, HD6512, HD66653, HD71334, HD8291 (fevereiro), HD98649 (agosto), HD98649 (fevereiro), BD+153364

Lambda	Id	Chi	Frequência	Espectros
4575.092	Cr I	3.37	11	HD117939, HD12264, HD146233 (agosto 99), HD150248, HD164595, HD28471, HD6512, HD71334, HD8291 (fevereiro), HD98649 (fevereiro), BD+153364
5357.190	Sc II	1.51	11	HD12264, HD146233 (agosto 99), HD150248, HD164595, HD207043, HD221343, HD28471, HD6512, HD71334, HD98649 (fevereiro), BD+153364
5427.826	Fe II	0.00	10	HD12264, HD140690, HD159656, HD164595, HD207043, HD32963, HD6512, HD8291 (fevereiro), HD8291 (setembro)
6098.694	Ti I	3.06	9	HD118598, HD12264, HD146233 (agosto 01), HD6512, HD66653, HD8291 (fevereiro), HD98649 (agosto), HD98649 (fevereiro)
5213.818	Fe I	3.94	9	HD146233 (agosto 01), HD164595, HD207043, HD216436, HD28471, HD6512, HD8291 (setembro), HD98649 (agosto)
6370.357	Ni I	3.54	9	HD117939, HD12264, HD146233 (agosto 99), HD150248, HD164595, HD207043, HD216436, HD6512, HD71334
4773.959	Ce II	0.92	8	HD12264, HD146233 (agosto 01), HD150248, HD164595, HD28471, HD8291 (fevereiro), HD98649 (agosto), HD98649 (fevereiro), BD+153364
6732.068	Fe I	4.58	8	HD12264, HD138573, HD221343, HD32963, HD8291 (fevereiro), HD8291 (setembro), HD98649 (agosto), BD+153364
6274.658	V I	0.27	7	HD117939, HD12264, HD138573, HD221343, HD8291 (fevereiro), HD98649 (agosto), BD+153364
6703.576	Fe I	2.76	7	HD146233 (agosto 01), HD164595, HD216436, HD28471, HD68186, HD98649 (agosto), HD98649 (fevereiro)
5381.772	Co I	4.24	7	HD117939, HD12264, HD146233 (agosto 99), HD216436, HD221343, HD28471, HD98649 (fevereiro), BD+153364

Lambda	Id	Chi	Frequência	Espectros
5648.279	Cr I	3.82	6	HD118598, HD164595, HD207043, HD216436, HD8291 (fevereiro), HD8291 (setembro)
6285.165	V I	0.28	6	HD12264, HD6512, HD8291 (fevereiro), HD98649 (agosto), HD98649 (fevereiro), BD+153364
5849.681	Fe I	3.69	6	HD12264, HD164595, HD28471, HD6512, HD8291 (setembro)
4926.147	Ti I	0.82	6	HD12264, HD138573, HD146233 (agosto 99), HD150248, HD68186, BD+153364
6385.458	Fe II	5.55	5	HD146233 (agosto 99), HD8291 (fevereiro), HD8291 (setembro), HD88072, BD+153364
5680.240	Fe I	4.19	5	HD12264, HD6512, HD8291 (fevereiro), HD98649 (fevereiro), BD+153364
5318.346	Sc II	1.36	5	HD140690, HD216436, HD221343, HD8291 (fevereiro), BD+153364
5577.013	Fe I	5.03	5	HD221343, HD28471, HD8291 (setembro), HD98649 (agosto), BD+153364
5739.464	Ti I	2.25	5	HD32963, HD6512, HD66653, HD71334, BD+153364
5211.206	Ti I	0.84	5	HD159656, HD164595, HD216436, HD8291 (fevereiro), BD+153364
5727.661	V I	1.05	5	HD12264, HD146233 (agosto 01), HD98649 (agosto), HD98649 (fevereiro), BD+153364
5646.697	Fe I	4.26	5	HD216436, HD28471, HD32963, HD98649 (agosto), BD+153364
5471.197	Ti I	1.44	4	HD150248, HD216436, HD98649 (agosto), HD98649 (fevereiro)
5359.192	Co I	4.15	4	HD12264, HD28471, HD98649 (agosto), BD+153364
5454.572	Co I	4.07	4	HD28471, HD32963, HD8291 (fevereiro), HD98649 (fevereiro)
6120.249	Fe I	0.92	4	HD146233 (agosto 01), HD146233 (agosto 99), HD221343, HD98649 (agosto)
5413.684	Mn I	3.86	4	HD118598, HD146233 (agosto 01), HD32963, HD66653
5508.419	Fe I	4.96	4	HD117939, HD28471, HD66653, BD+153364
6699.136	Fe I	4.59	4	HD117939, HD159656, HD216436, BD+153364

Lambda	Id	Chi	Frequência	Espectros
6806.856	Fe I	2.73	3	HD12264, HD146233 (agosto 99), BD+153364
4813.479	Co I	3.21	3	HD28471, HD98649 (agosto), HD98649 (fevereiro)
6710.323	Fe I	1.48	3	HD146233 (agosto 01), HD159656, HD32963
6862.496	Fe I	4.56	3	HD117939, HD66653, HD71334
5220.086	Cu I	3.82	3	HD164595, HD207043, HD216436
6383.715	Fe II	5.55	3	HD98649 (agosto), HD98649 (fevereiro), BD+153364
6297.792	Fe I	2.22	2	HD159656, HD98649 (agosto)
5392.330	Ni I	4.15	2	HD32963, HD98649 (agosto)
6240.645	Fe I	2.22	2	HD66653, HD71334
4793.961	Fe I	3.05	2	HD117939, HD146233 (agosto 99)
6713.745	Fe I	4.79	2	HD164595, HD32963
6455.001	Co I	3.63	2	HD164595, HD28471
6082.708	Fe I	2.22	2	HD150248, HD68186
4524.691	Ti II	1.23	2	HD98649 (agosto), HD98649 (fevereiro)
6151.616	Fe I	2.18	2	HD146233 (agosto 99), HD98649 (fevereiro)
5318.810	Cr I	3.44	2	HD146233 (agosto 01), HD28471
4537.676	Fe I	3.27	2	HD32963, HD8291 (fevereiro)
6084.111	Fe II	3.20	2	HD146233 (agosto 99), HD164595
6498.945	Fe I	0.96	2	HD146233 (agosto 99), HD216436
6861.945	Fe I	2.42	1	HD88072
5032.723	Ni I	3.90	1	HD8291 (setembro)
5835.098	Fe I	4.26	1	HD6512
6416.928	Fe II	3.89	1	HD8291 (setembro)
6187.987	Fe I	3.94	1	HD8291 (setembro)
5426.236	Ti I	0.02	1	HD8291 (fevereiro)
6271.283	Fe I	3.33	1	HD98649 (fevereiro)
6327.604	Ni I	1.68	1	HD66653
6330.097	Cr I	0.94	1	HD66653
4523.080	Ce II	0.52	1	BD+153364
5127.680	Fe I	0.05	1	HD65120
4993.358	Fe II	2.81	1	HD98649 (fevereiro)
6385.726	Fe I	4.73	1	HD28471
5738.240	Fe I	4.22	1	HD32963
5628.354	Fe I	4.33	1	HD32963

Lambda	Id	Chi	Frequência	Espectros
5628.621	Cr I	3.42	1	HD32963
6320.867	Sc II	1.50	1	HD32963
5452.860	Ni I	3.84	1	HD32963
5473.168	Fe I	4.19	1	HD32963
5491.845	Fe I	4.19	1	HD12264
4585.343	Fe I	4.61	1	HD28471
6135.370	V I	1.05	1	HD221343
5502.025	Cr II	4.17	1	HD117939
5152.185	Ti I	0.02	1	HD117939
6643.638	Ni I	1.68	1	HD118598
6839.835	Fe I	2.56	1	HD118598
6725.364	Fe I	4.10	1	HD118598
5636.705	Fe I	3.64	1	BD+153364