Universidade de São Paulo
Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas
Departamento de Astronomia

Vitória Carvalho Monteiro de Oliveira

Um estudo de índices espectrais em modelos de população estelar simples

São Paulo
2025

Vitória Carvalho Monteiro de Oliveira

Um estudo de índices espectrais em modelos de população estelar simples

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Astronomia.

Vertente: Pesquisa Básica
Orientador(a): Prof.(ª) Dr.(ª) Paula Rodrigues Teixeira Coelho

São Paulo

2025

Dedico o meu trabalho aos meus pais, amigos e gatas que me ajudaram a não desistir do meu sonho

Agradecimentos

Aos meus pais Marineusa e José que sempre apoiaram nas minhas escolhas;

Às minhas gatas Branca e Saruê que não sabem o quanto existência delas me ajudam a não desistir;

À orientadora Paula, sem ela o trabalho seria concluído;

Aos meus amigos Biô, Cecillya e Morgan que deixam meus dias menos difíceis;

À minha psicologa Camila e meu psiquiatra Tales que me ajudaram ser diagnosticada como autista e ter um pouco de saúde;

Aos funcionários que trabalham todos os dias no IAG e permitem que eu e outros alunos possam se formar;

Esta tese/dissertação foi escrita em LaTeX com a classe IAGTESE, para teses e dissertações do IAG.

"*Os sonhos das pessoas não têm fim*"

Marshall D. Teach

Resumo

O estudo de modelos de síntese de populações estelares em modelos de populações estelares simples (SSP) nos revela propriedades importantes das populações estelares por meio de suas distribuições de energia espectral. O trabalho de Coelho et al. (2020) estabelece as vantagens e desvantagens de modelos de SSP semi-empíricos (baseados em bibliotecas estelares empíricas) e totalmente teóricos (baseados em bibliotecas estelares sintéticas). As duas classes de modelos divergem entre si, e ainda é necessário realizar um estudo sobre a escolha do modelo a ser utilizado a depender do objetivo científico. O propósito do trabalho foi reproduzir parte dos resultados do artigo-base para uma amostra de índices espectrais e investigar o comportamento destes, individualmente, em função de parâmetros de idade e metalicidade. Reproduzimos os resultados para os índices espectrais ($H10_{3798}$, $H8_{3889}$, $H9_{3835}$, $H\delta A$, $H\delta F$, $H\gamma A$, $H\gamma F$, CN_1, CN_2, Ca4227, G4300, Fe4383, Ca4455, Fe4531, Fe4668, $H\beta$, Fe5015, Mg_1, Mg_2, Mg-b, Fe5270, Fe5335, Fe5406, Fe5709, Fe5782, Na-D, TiO_1 e TiO_2), verificando as diferenças desses entre os modelos e identificando quais regiões do espaço de parâmetros apresentam maiores divergências ou compatibilidades. As incompatibilidades em geral tendem a aumentar em menores metalicidades e em idades menores que log(age) = 8.5 e maiores que 9.25. Também fizemos uma comparação com os erros observacionais mostrando uma maior sensibilidade para efeitos de cobertura para metalicidades $Z \leq 0.008$ e idades log(age) > 7.0 e efeito sintético sem apresentar algum padrão.

Abstract

The study of stellar population synthesis models in simple stellar population (SSP) models reveals important properti0es of stellar populations through their spectral energy distributions. The work of Coelho et al. (2020) establishes the advantages and disadvantages of semi-empirical SSP models (based on empirical stellar libraries) and fully theoretical ones (based on synthetic stellar libraries). These two classes of models diverge from each other, and studies on which model to use, according to the scientific objective, are still necessary. This work aims to reproduce results from Coelho et al. (2020) for a sample of spectral indices and to investigate their behavior as a function of age and metallicity parameters. We verified the results for the spectral indices ($H10_{3798}$, $H8_{3889}$, $H9_{3835}$, $H\delta A$, $H\delta F$, $H\gamma A$, $H\gamma F$, CN_1, CN_2, Ca4227, G4300, Fe4383, Ca4455, Fe4531, Fe4668, $H\beta$, Fe5015, Mg_1, Mg_2, Mg-b, Fe5270, Fe5335, Fe5406, Fe5709, Fe5782, Na-D, TiO_1 and TiO_2), highlighting the distinction between the models and identifying which regions of the parameter space diverge or are compatible. In general, the contrast between models tend to increase at lower metallicities and for ages less than log(age) = 8.5 and greater than 9.25. We performed a comparison with observational errors, where it was shown a greater sensitivity to coverage effects for metallicities $Z \leq 0.008$ and ages log(age) > 7.0, and a synthetic effect without any specific pattern arising.

Lista de Figuras

1.1 Exemplo de medida de índices espectrais. 20

1.2 Gráficos das distribuições de diferenças dos índices Coelho et al. (2020). . . 22

3.1 Reprodução das diferenças do índice espectral 25

3.2 Evolução temporal de cada elemento ou linha para os diferentes modelos $Ca4227$, $Ca4455$, CN_1 e CN_2 e Fe4383. 26

3.3 Evolução temporal de cada elemento ou linha para os diferentes modelos Fe4531, Fe4668, Fe5015, Fe5270 e Fe5335. 27

3.4 Evolução temporal de cada elemento ou linha para os diferentes modelos Fe5406, Fe5709, Fe5782, G4300 e $H\beta$. 28

3.5 Evolução temporal de cada elemento ou linha para os diferentes modelos $H10_{3798}$, $H8_{3889}$, $H9_{3835}$, $H\delta A$ e Mg_b. 29

3.6 Evolução temporal de cada elemento ou linha para os diferentes modelos $H\delta F$, $H\gamma A$, $H\gamma F$, Mg_1 e Mg_2 30

3.7 Evolução temporal de cada elemento ou linha para os diferentes modelos $Na-D$, TiO_1 e TiO_2 33

3.8 Distribuição dos erros obervacionais.) 34

3.9 Relação idade-metalicidade para casos onde $\Delta\text{idx}_{\text{Cobertura}}$ produz valores superiores aos erros observacionais. 35

3.10 Relação idade-metalicidade para casos onde $\Delta\text{idx}_{\text{Sintético}}$ produz valores superiores aos erros observacionais. 36

Lista de Tabelas

2.1 Índices espectrais utilizados 23

3.1 Mediana dos erros observacionais de aglomerados extragaláticos, da Galáxia e galáxias. 30

3.2 Comparação de $\Delta\text{idx}_{\text{Cobertura}}$ e $\Delta\text{idx}_{\text{Sintético}}$ com os erros observacionais . . 31

Sumário

1. Introdução 19

1.1 Modelo de Populações Estelares 19

2. Base de dados 23

2.1 Índices Espectrais 23

2.2 Erros Observacionais 24

3. Análise 25

3.1 Reprodução dos resultados da literatura 25

3.2 Comparação Entre Modelos 26

3.3 Erros Observacionais Típicos 29

4. Conclusões 37

Referências 39

Capítulo 1

Introdução

1.1 Modelo de Populações Estelares

Modelos de síntese de populações estelares são importantes para descrever as propriedades de populações estelares não resolvidas a partir de suas distribuições de energia espectral (SED). Estudar essas SEDs pode revelar características interessantes, como histórico de formação estelar (SFH), metalicidade estelar e padrão de abundâncias químicas, função de massa inicial (IMF), massa total de estrelas, e o estado e a quantidade de poeira e gás Conroy (2013).

O foco deste trabalho é estudar modelos de populações estelares simples (SSP), grupos de estrelas que têm em comum sua época de nascimento, região e composição química de sua nuvem geradora. O estudo das SSP pode revelar propriedades muito importantes para entender a história de formação de galáxias e seu meio ambiente.

Entre as previsões dos modelos de SSP, há índices espectrais, sendo que os mais utilizados podem ser calculados conforme Faber et al. (1985): usando o intervalo espectral de uma banda passante e duas regiões de contínuos (uma de cada lado da banda). A medida da intensidade do índice é feita então pela escolha de dois pontos médios do contínuo, traçando uma reta que passa por esses pontos e, a partir desses limites, mede-se a largura equivalente em Å. O processo está ilustrado na Figura 1.1, extraída de Coelho (2000).

O artigo base para o trabalho foi o estudo Coelho et al. (2020), que trabalha com 3 famílias de modelos SSP, que foram calculados com isócronas de Bressan et al. (2012) com variações em metallicidade Z e função de massa inicial IMF de Chabrier (2003). Os modelos foram calculados com o código *GALAXEV* Bruzual e Charlot (2003). Os modelos diferem quanto à biblioteca estelar utilizada, podendo ser do tipo semi-empírico (com-

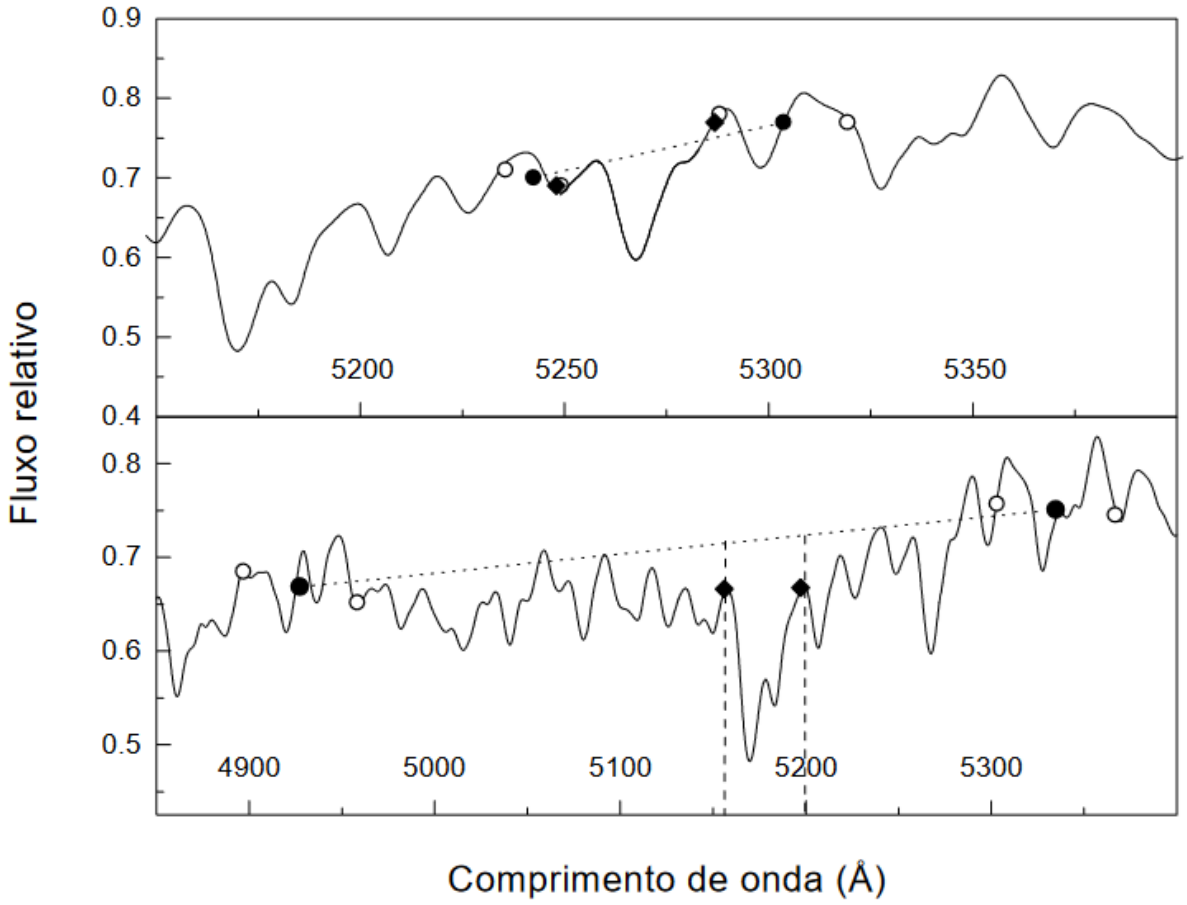

Figura 1.1: Exemplo de medida de índices espectrais Fe5270 e Mg_2 para a estrela NGC6528 I 27, como feito no trabalho Coelho (2000). O contínuo é limitado pelos pontos brancos vazios, com os pontos pretos preenchidos definindo sua média e a linha pontilhada indicando o contínuo local. A banda passante é indicada pelos diamantes. Acima, a linha mais grossa indica a região para calcular a largura equivalente e, abaixo, as linhas tracejadas definem a região do cálculo da magnitude da banda.

pletamente dependente de bibliotecas empíricas) ou totalmente teórico (modelos baseados exclusivamente em bibliotecas estelares teóricas).

- $\text{SSP}_{\text{MILES}}$: É um modelo semi-empírico que usa a biblioteca estelar empírica *MILES* (Sánchez-Blázquez et al. 2006, Cenarro et al. 2006) de espectros de mais de 1000 estrelas, cobrindo a faixa de comprimento de onda 3540–7410$\mathring{A}$, com resolução de $FWHM \sim 2.5$ $\mathring{A}$.

- $\text{SSP}_{\text{SynCoMiL}}$: Um modelo totalmente teórico que a partir da biblioteca sintética *SynCoMiL* Coelho et al. (2020) que se baseia em *MILES*, seguindo suas regiões de comprimento de onda, cobertura do diagrama H-R (representação de todos os tipos de

estrelas em todas as faixas do diagrama) e resolução espectral, para imitar sua cobertura.

- $\text{SSP}_{\text{Coelho14ext}}$: Modelo totalmente teórico gerado pela biblioteca sintética C14 Coelho (2014) compreende os parâmetros $3000 \leq T_{\text{eff}} \leq 25000K$, $-0.5 \leq log\ g \leq 5.5$, e $0.0017 \leq Z \leq 0.049$ para 12 misturas químicas em composições de escala solar e elementos α, buscando atingir espaços de parâmetros não cobertos por trabalhos anteriores.

A partir dos modelos de SSP produzidos por essas bibliotecas, observam-se dois efeitos. A Figura 1.2, extraída de Coelho et al. (2020), mostra as distribuições desses dois efeitos (reproduzidos no trabalho) e também a do efeito aleatório, que não foi utilizado. Os dois efeitos considerados são:

- Efeito de Cobertura: Comparação dos modelos $\text{SSP}_{\text{Coelho14ext}}$ e $\text{SSP}_{\text{SynCoMiL}}$. Que isola as consequências do uso de um diagrama H-R limitado contra um completo
- Efeito sintético: Compara os modelos $\text{SSP}_{\text{MILES}}$ e $\text{SSP}_{\text{SynCoMiL}}$. Mostram os efeitos do uso de um espectro teórico em relação a um empírico, fixando a cobertura do diagrama H-R.

Queremos comparar os índices espectrais de modelos diferentes; assim, foram definidos dois Δs, um que representa o efeito sintético dado pela Equação 1.1 e o efeito de cobertura descrito na Equação 1.2.

$$\Delta\text{idx}_{\text{Sintético}} = I_{SSP_{\text{MILES}}} - I_{SSP_{\text{SynCoMiL}}} \tag{1.1}$$

$$\Delta\text{idx}_{\text{Cobertura}} = I_{SSP_{\text{Coelho14ext}}} - I_{SSP_{\text{SynCoMiL}}} \tag{1.2}$$

Também estamos investigando o comportamento dos índices em função de parâmetros de idade e metalicidade.

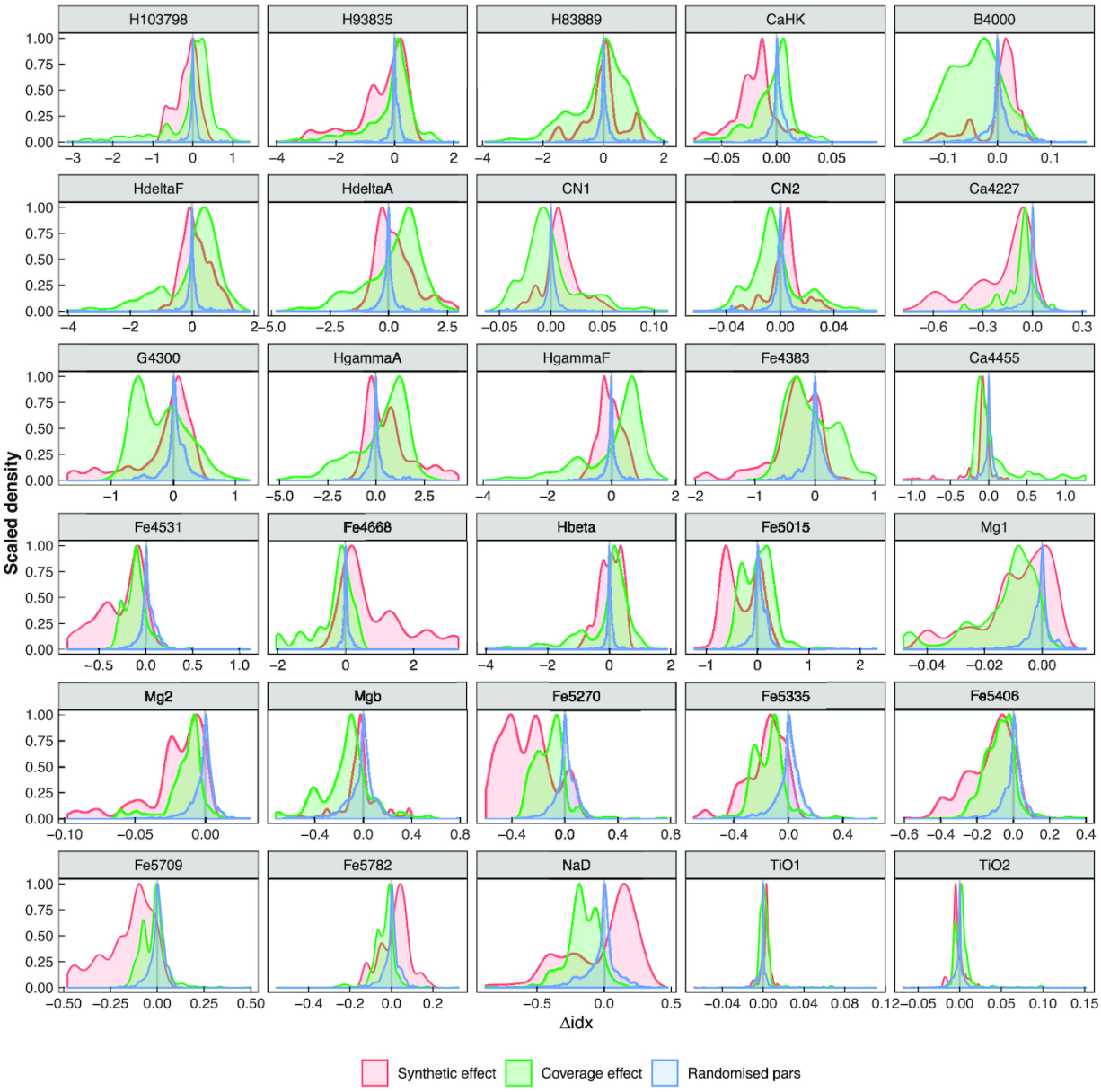

Figura 1.2: Gráficos de densidade das distribuições de diferenças dos índices Coelho et al. (2020). As curvas em rosa e verde representam os efeitos sintético e de cobertura, respectivamente.

Capítulo 2

Base de dados

2.1 *Índices Espectrais*

A Tabela 2.1 mostra 28 índices dos 30 apresentados em Coelho et al. (2020) que foram utilizados para o estudo desse trabalho.

Tabela 2.1 - Índices espectrais utilizados com as respectivas bandas passantes em que os índices foram estimados e unidades de medida obtidos em Marcillac et al. (2006), Worthey e Ottaviani (2009) e Trager et al. (1998).

Índices	*Index Bandpass*	Unidade
$H10_{3798}$	4083.50-4122.25	Å
$H8_{3889}$	3825-3845	Å
$H9_{3835}$	3870-3900	Å
$H\delta A$	4083.50–4122.25	Å
$H\delta F$	4091.00–4112.25	Å
$H\gamma A$	4319.75–4363.50	Å
$H\gamma F$	4331.25–4352.25	Å
CN_1	4142.125–4177.125	mag
CN_2	4142.125–4177.125	mag
Ca4227	4222.250–4234.750	Å
G4300	4281.375–4316.375	Å
Fe4383	4369.125–4420.375	Å
Ca4455	4452.125–4474.625	Å
Fe4531	4514.250–4559.250	Å
Fe4668	4634.000–4720.250	Å
$H\beta$	4847.875–4876.625	Å
Fe5015	4977.750–5054.000	Å
Mg_1	5069.125–5134.125	mag
Mg_2	5154.125–5196.625	mag
Mg-b	5160.125–5192.625	Å

Continua na próxima página...

Tabela 2.1 - Continuação

Índices	*Index Bandpass*	Unidades
Fe5270	5245.650–5285.650	Å
Fe5335	5312.125–5352.125	Å
Fe5406	5387.500–5415.000	Å
Fe5709	5696.625–5720.375	Å
Fe5782	5776.625–5796.625	Å
Na-D	5876.875–5909.375	Å
TiO_1	5936.625–5994.125	mag
TiO_2	6189.625–6272.125	mag

2.2 *Erros Observacionais*

Visto que o objetivo do trabalho é entender melhor as diferenças entre modelos totalmente teóricos e modelos semi-empíricos, tem-se como motivação compreender se a diferença é significativa em relação aos erros observacionais encontrados em aglomerados extragalácticos e galáxias.

Em Trager et al. (1998) (em frente referido como Trager) são apresentadas as intensidades de índices espectrais no sistema Lick/IDS de 381 galáxias e 38 aglomerados globulares na região de 4000–6400 Å. As galáxias foram observadas no Observatório Lick entre 1972 a 1984 utilizando o espectrogáfo *Cassegrain Image Dissector Scanner*.

O artigo Puzia et al. (2004) (será citado posteriormente como Puzia) tem como objetivo produzir um conjunto de dados um espectroscópicos de alta qualidade e bem calibrados para uma grande amostra de aglomerados globulares extragalácticos, assim podendo fazer a análise de suas idades e metalicidades. Foram obtidos 362 espectros de 7 galáxias candidatas usando o instrumento FORS2 no VLT do ESO.

Enquanto em Sharina et al. (2006) (denominado futuramente como Sharina). Apresenta medições de idades, metalicidades e razões $[\alpha/Fe]$ para 16 aglomerados globulares (GCs) em NGC 147, 185 e 205 e das regiões centrais da luz galáctica difusa em NGC 185 e 205. Os resultados são baseados em espectros obtidos com o espectrógrafo SCORPIO no telescópio de 6m da Academia Russa de Ciências.

Capítulo 3

Análise

3.1 *Reprodução dos resultados da literatura*

A Figura 3.1 procura reproduzir as conclusões apresentadas na Figura 1.2 proposta para o projeto. Os resultados são compatíveis com Coelho et al. (2020).

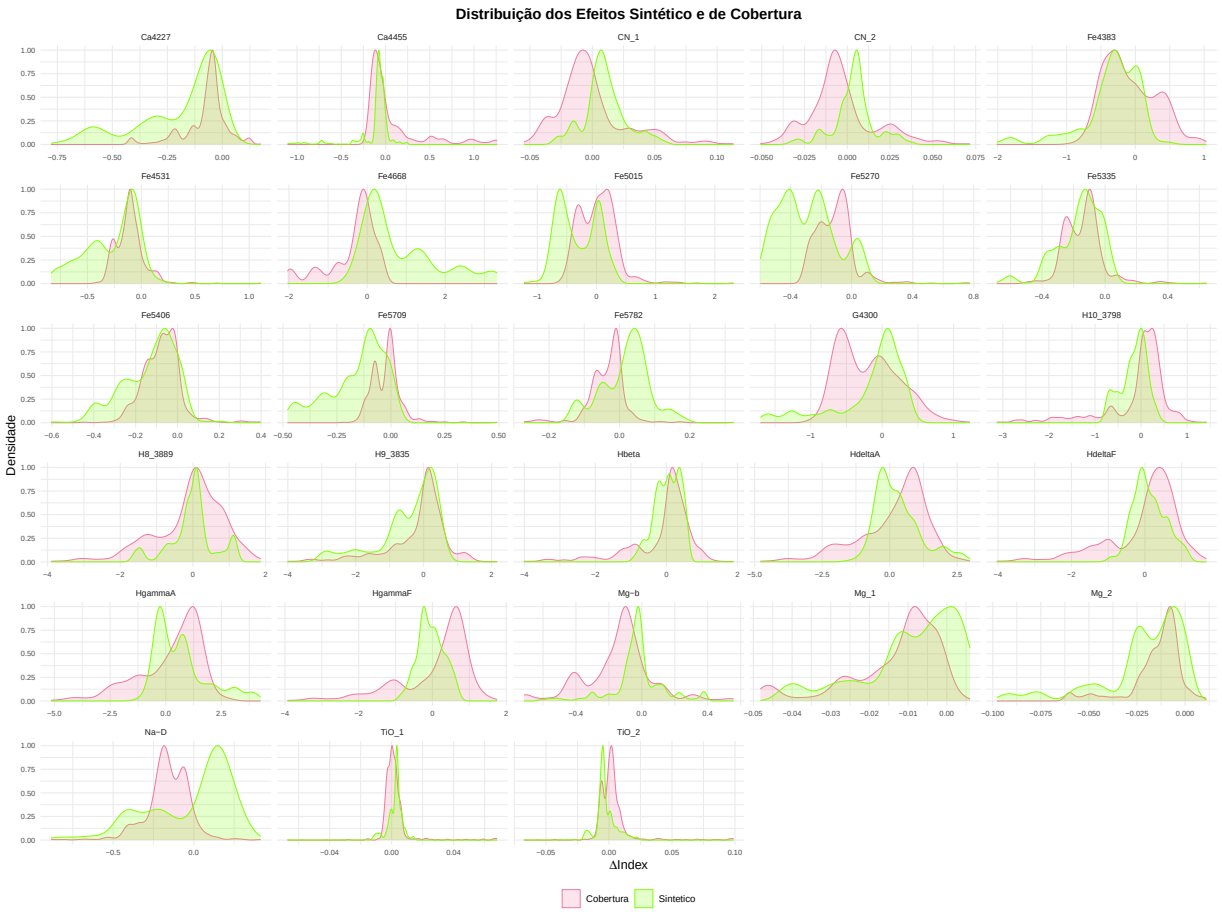

Figura 3.1: Reprodução das diferenças do índice espectral avaliadas em Coelho et al. (2020). De densidade pela diferença entre os modelos. A cor rosa representa o efeito de cobertura e a cor verde o efeito sintético.

3.2 Comparação Entre Modelos

As Figuras 3.2, 3.3, 3.4, 3.5, 3.6 e 3.7 mostram a evolução temporal dos índices listados na Tabela 2.1 conforme aplicados em cada modelo. O ponto de partida foi definido a partir de 10 milhões de anos (log(age) = 7.0) de simulação, a menor idade coberta pelas isócronas usadas nos modelos.

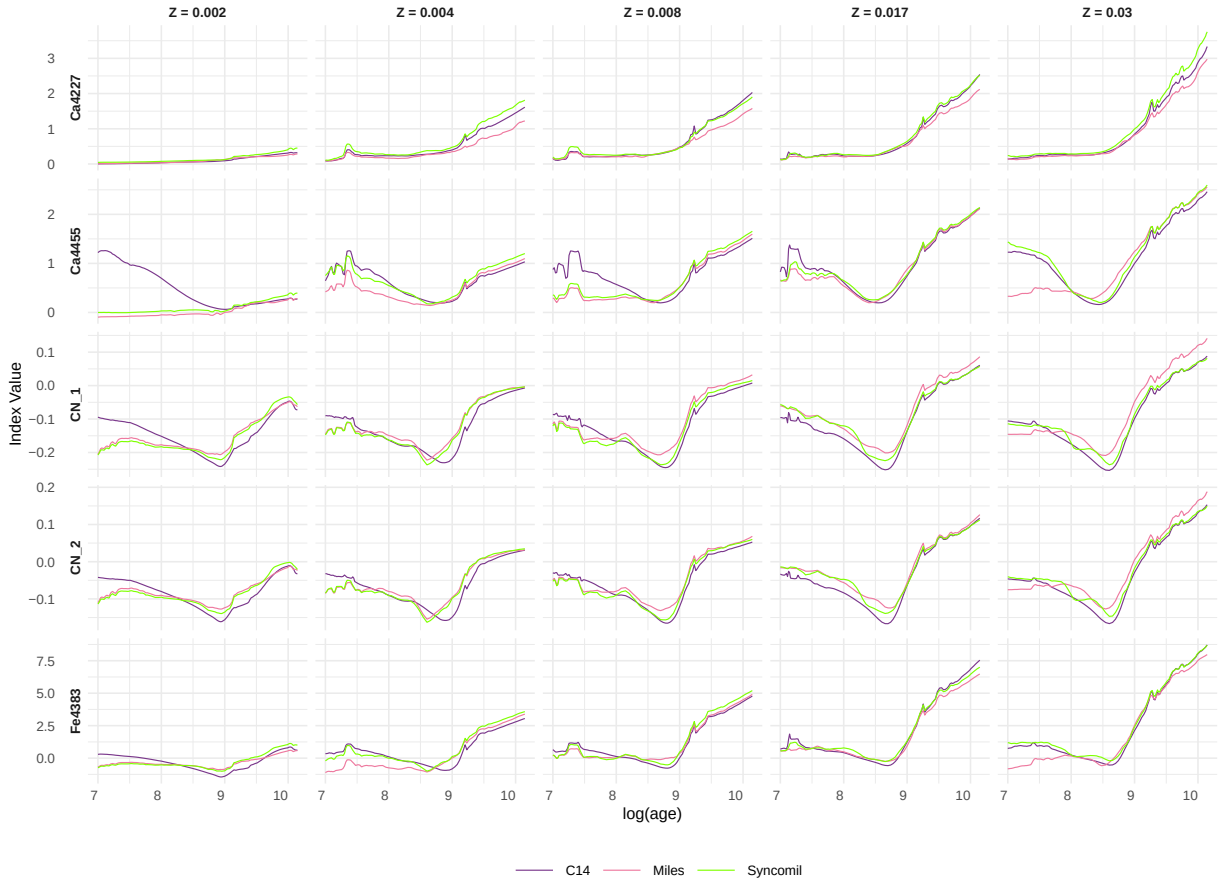

Figura 3.2: Evolução temporal de cada elemento ou linha para os diferentes modelos, onde o eixo horizontal representa a idade logarítmica em anos e o eixo vertical representa o índice espectral para $Ca4227$, $Ca4455$, CN_1,CN_2 e Fe4383.

A análise qualitativa dos resultados, baseada na avaliação visual das Figuras para cada índice, é apresentada a seguir:

- Ca4227: A divergência aumenta conforma metalicidades a divergência aumenta em log(age) = 9.
- Ca4455: A divergência é maior para valores menores que log(age) = 8.5 nas menores metalicidades e log(age) = 8 nas maiores metalicidades.

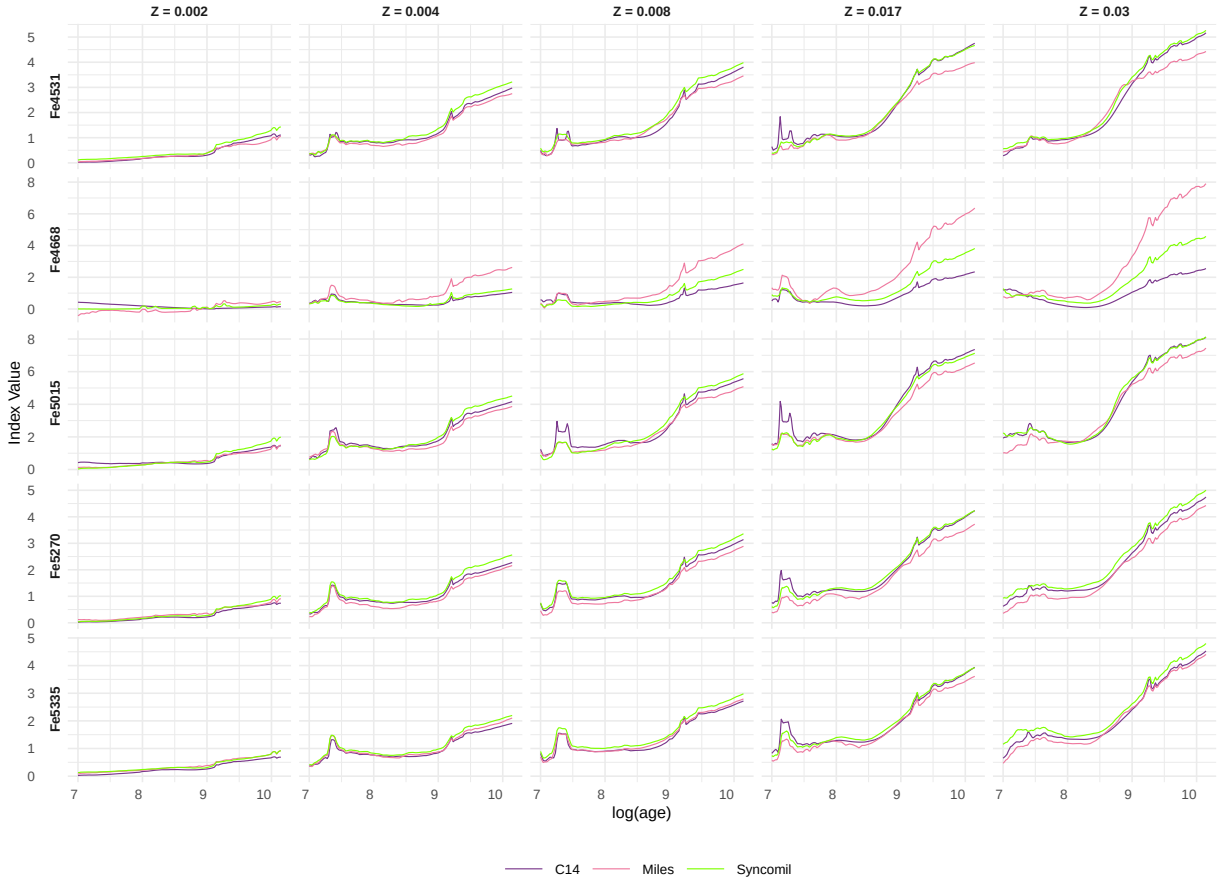

Figura 3.3: Evolução temporal de cada elemento ou linha para os diferentes modelos, onde o eixo horizontal representa a idade logarítmica em anos e o eixo vertical representa o índice espectral para Fe4531, Fe4668, Fe5015, Fe5270 e Fe5335.

- CN_1 e CN_2: Quando as idades log(age) são maiores que 9.25 os modelos têm menor concordância conforme a metalicidade aumenta, enquanto as idades menores que esse valor não seguem um padrão na forma em que discordam entre si.
- Fe4383: A divergência diminui quanto maior a metalicidade.
- Fe4531: A divergência aumenta quanto maior a metalicidade e para valores maiores que log(age) = 9.25.
- Fe4668: Os valores concordam em Z= 0.002, mas a divergência aumenta conforme com a metalicidade para log(age) a partir de 8.5.
- Fe5015: A divergência é maior para as maiores metalicidades para valores de log(age) = 9.

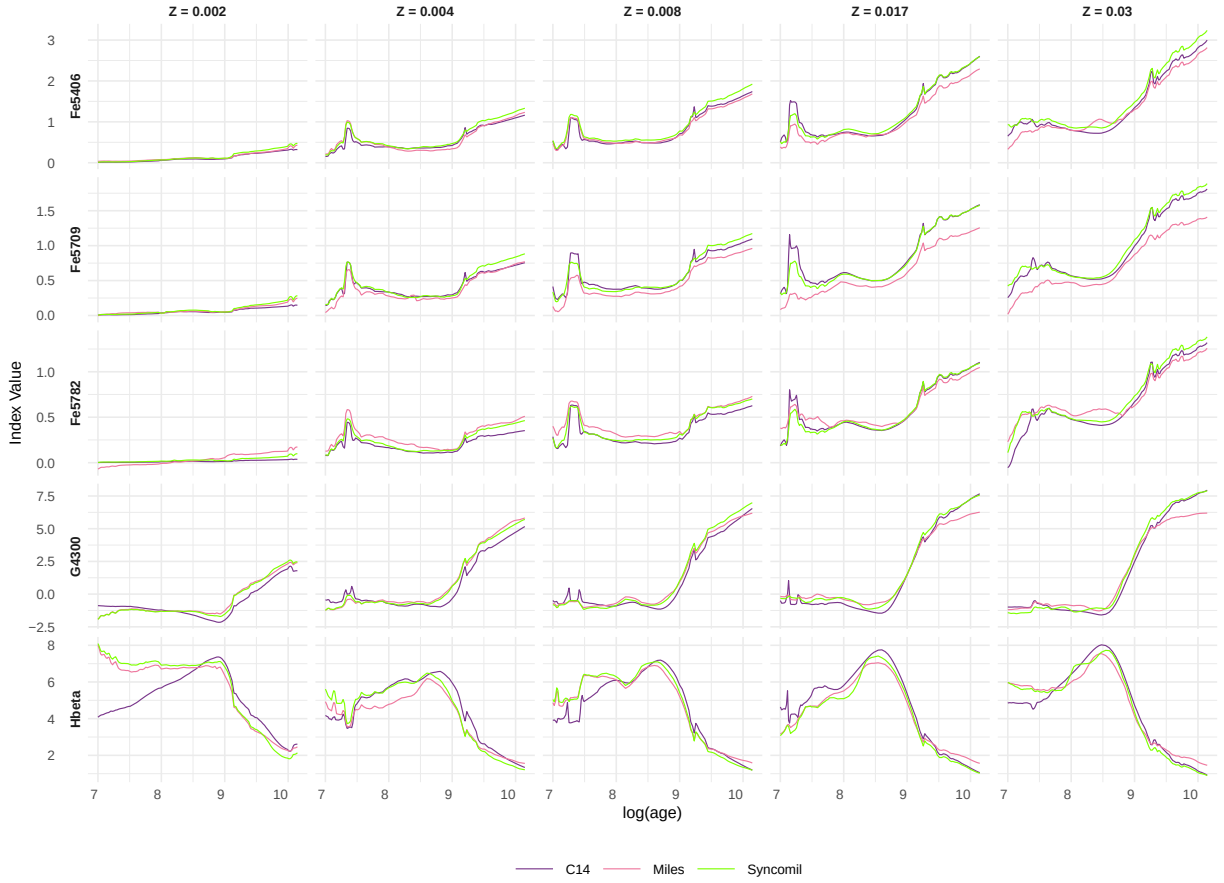

Figura 3.4: Evolução temporal de cada elemento ou linha para os diferentes modelos, onde o eixo horizontal representa a idade logarítmica em anos e o eixo vertical representa o índice espectral para Fe5406, Fe5709, Fe5782, G4300 e $H\beta$.

- Fe5270, Fe5335, Fe5406, Fe5709 e Fe5782: A divergência aumenta como um todo conforme aumenta a metalicidade.
- G4300: A medida que a metalicidade aumenta os modelos tendem a uma maior convergência, contudo em $log(age) = 9.25$ a SSP_{MILES} começa a se distanciar dos outros modelos e para as valores menores que $log(age) = 8.5$ os modelos se divergem.
- $H10_{3798}$, $H8_{3889}$, $H9_{3835}$, $H\beta$, $H\delta A$, $H\delta F$, $H\gamma A$ e $H\gamma F$: Independente da metalicidade as divergências entre os modelos estão nos valores abaixo de $log(age) = 8.5$ e acima de $log(age) = 9.25$.
- Mg-b: Há pouca discordância entre os modelos, ela sendo maior entre as maiores metalicidades.

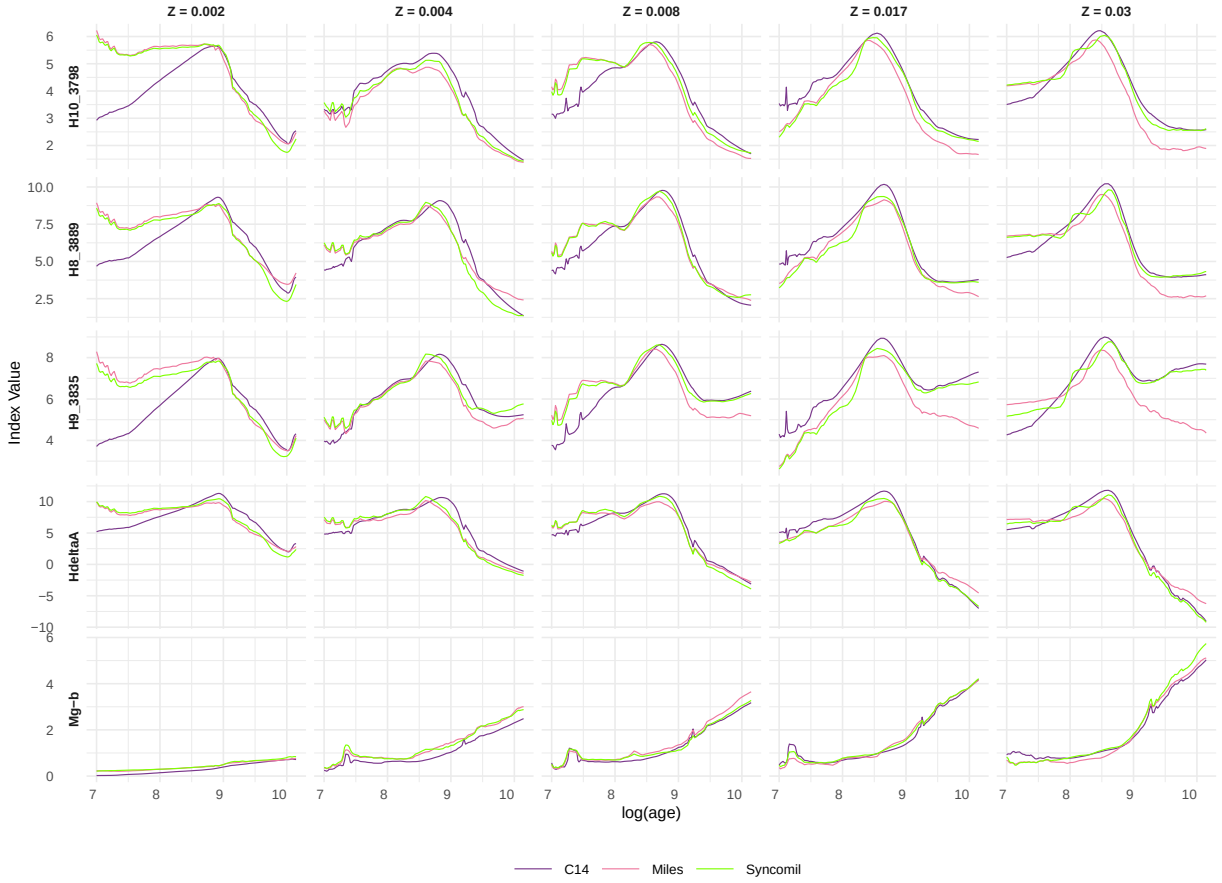

Figura 3.5: Evolução temporal de cada elemento ou linha para os diferentes modelos, onde o eixo horizontal representa a idade logarítmica em anos e o eixo vertical representa o índice espectral para $H10_{3798}$, $H8_{3889}$, $H9_{3835}$, $H\delta A$ e Mg_b.

- Mg_1 e Mg_2: A diferença entre os modelos aumenta conforme a metalicidade aumenta.
- Na-D: Há maior divergência quanto maior a metalicidade, não tendo padrão de idade.
- TiO_1 e TiO_2: A incompatibilidade entre os modelos é maior para maiores metalicidade sendo mais visível em valore menores que log(age) = 7.5.

3.3 *Erros Observacionais Típicos*

A Figura 3.8 mostra a distribuição erros observacionais para 3 diferentes referências Trager, Sharina e Puzia. Podemos observar que Sharina e Puzia tendem a concordar melhor em relação a Trager. Apresentando um grau maior de discordância nos índices Ca4227, Ca4455, CN_1, CN_2, Fe5015, G4300.

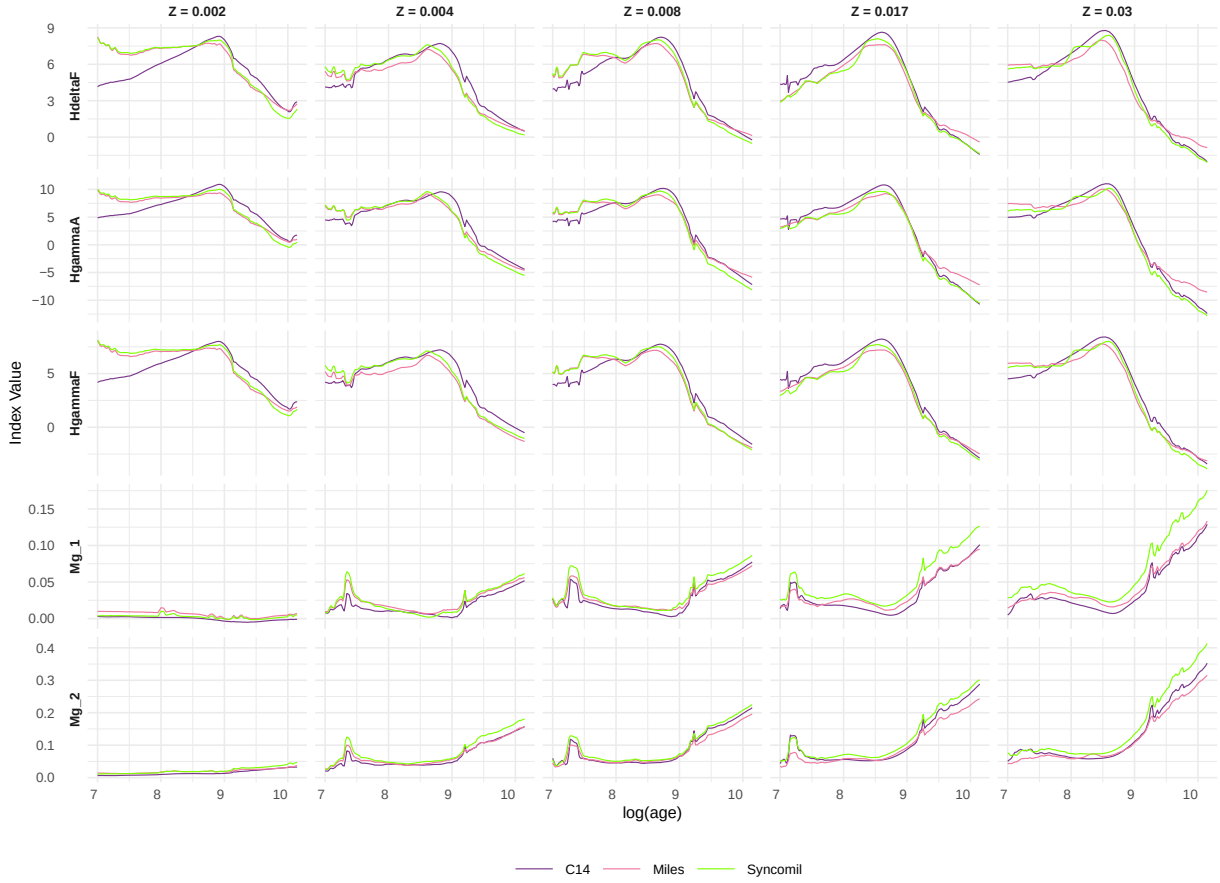

Figura 3.6: Evolução temporal de cada elemento ou linha para os diferentes modelos, onde o eixo horizontal representa a idade logarítmica em anos e o eixo vertical representa o índice espectral para $H\delta F$, $H\gamma A$, $H\gamma F$, Mg_1 e Mg_2.

A Tabela 3.1 apresenta as medianas dos erros observacionais encontrados em Trager, Puzia e Sharina.

Tabela 3.1 - Mediana dos erros observacionais de Trager (aglomerados globulares extragaláticos, da Galáxia e galáxias), Puzia (aglomerados extragaláticos) e Sharina (aglomerados globulares extragaláticos)

Índice	Mediana Trager	Mediana Puzia	Mediana Sharina
e_C24668	0.9443	–	–
e_CN_1	0.02705	0.0025	–
e_CN_2	0.0311	0.00375	–
e_Ca4227	0.44015	0.12615	0.05
e_Ca4455	0.3725	0.18385	0.08
e_Fe4383	0.91175	0.1787	0.075

Continua na próxima página...

Tabela 3.1 - Continuação

Índice	Mediana Trager	Mediana Puzia	Mediana Sharina
e_Fe4531	0.62185	0.2002	0.08
e_Fe4668	–	0.2357	0.11
e_Fe5015	0.8094	0.2603	0.12
e_Fe5270	0.3474	0.2939	0.14
e_Fe5335	0.4259	0.2968	0.14
e_Fe5406	0.3169	0.29895	0.14
e_Fe5709	0.26885	0.3051	–
e_Fe5782	0.2914	0.3029	–
e_G4300	0.498	0.1447	0.07
$e_H\beta$	0.3117	0.23985	0.11
$e_H\delta A$	–	0.315	–
$e_H\delta F$	–	0.3255	–
$e_H\gamma A$	–	0.3229	0.26
$e_H\gamma F$	–	0.3279	0.25
e_Mg_1	0.0094	0.00685	0.003
e_Mg_2	0.0112	0.0072	0.003
e_Mg-b	0.3705	0.29185	0.14
e_NA-D	0.3629	0.3818	–
e_TiO_1	0.0107	0.0105	–
e_TiO_2	0.0082	–	–

Tabela 3.2 - Comparação de $\Delta\text{idx}_{\text{Cobertura}}$ e $\Delta\text{idx}_{\text{Sintético}}$, mostrando se são maiores que os erros observacionais presentes em Trager, Puzia e Sharina

Índice	Cobertura-Trager	Cobertura-Puzia	Cobertura-Sharina	Sintético-Trager	Sintético-Puzia	Sintético-Sharina
CN_1	NÃO	SIM	–	NÃO	SIM	–
CN_2	NÃO	SIM	–	NÃO	SIM	–
Ca4227	NÃO	NÃO	SIM	NÃO	NÃO	SIM
Ca4455	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO
Fe4383	NÃO	NÃO	SIM	NÃO	SIM	SIM
Fe4531	NÃO	NÃO	SIM	NÃO	NÃO	SIM
Fe4668	–	NÃO	SIM	–	SIM	SIM
Fe5015	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	SIM	SIM
Fe5270	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	SIM
Fe5335	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO
Fe5406	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO
Fe5709	NÃO	NÃO	–	NÃO	NÃO	–
Fe5782	NÃO	NÃO	–	NÃO	NÃO	–
G4300	NÃO	SIM	SIM	NÃO	NÃO	NÃO
$H\beta$	NÃO	NÃO	SIM	NÃO	NÃO	NÃO

Continua na próxima página...

Tabela 3.2 - Continuação

Índice	Cobertura-Trager	Cobertura-Puzia	Cobertura-Sharina	Sintético-Trager	Sintético-Puzia	Sintético-Sharina
$H\delta A$	–	SIM	–	–	NÃO	–
$H\delta F$	–	NÃO	–	–	NÃO	–
$H\gamma A$	–	SIM	SIM	–	SIM	SIM
$H\gamma F$	–	SIM	SIM	–	NÃO	NÃO
Mg-b	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO
Mg_1	NÃO	SIM	SIM	NÃO	NÃO	SIM
Mg_2	NÃO	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM
TiO_1	NÃO	NÃO	–	NÃO	NÃO	–
TiO_2	NÃO	–	–	NÃO	–	–

Com o objetivo de identificar em quais regiões do espaço de parâmetros de idades e metalicidades as discrepâncias entre os efeitos de cobertura e sintético são significativas realizou-se a seguinte análise:

Primeiramente, para cada índice, calculou-se a mediana total combinando todas as idades e metalicidades. Em seguida, comparou-se para quais índices essas medianas apresentam valores maiores que as medianas de referência da Tabela 3.1, construindo a Tabela 3.2.

Os índices que tem $\Delta\text{idx}_{\text{Sintético}}$ maior que os erros observacionais são:

- Trager: Nenhum índice.
- Puzia: CN_1, CN_2, G4300, $H\delta A$, $H\gamma A$, $H\gamma F$, Mg_1 Mg_2.
- Sharina: Ca4227, Fe4383, Fe4531, Fe4668, G4300, $H\beta$, $H\gamma A$, $H\gamma F$, Mg_1, Mg_2.

E os índices com valores de $\Delta\text{idx}_{\text{Cobertura}}$ maiores que os erros observacionais são:

- Trager: Nenhum índice.
- Puzia: CN_1, CN_2, Fe4383, Fe4668, Fe5015, $H\gamma A$, Mg_2.
- Sharina: Ca4227, Ca4455, Fe4383, Fe4531, Fe4668, Fe5015, $H\gamma A$,Mg_1, Mg_2.

A Figura 3.9, mostra o espaço de parâmetros em idade-metalicidade em que erros observacionais de Trager, Puzia e Sharina são maiores que $\Delta\text{idx}_{\text{Cobertura}}$. A análise dos resultados é apresentada a seguir:

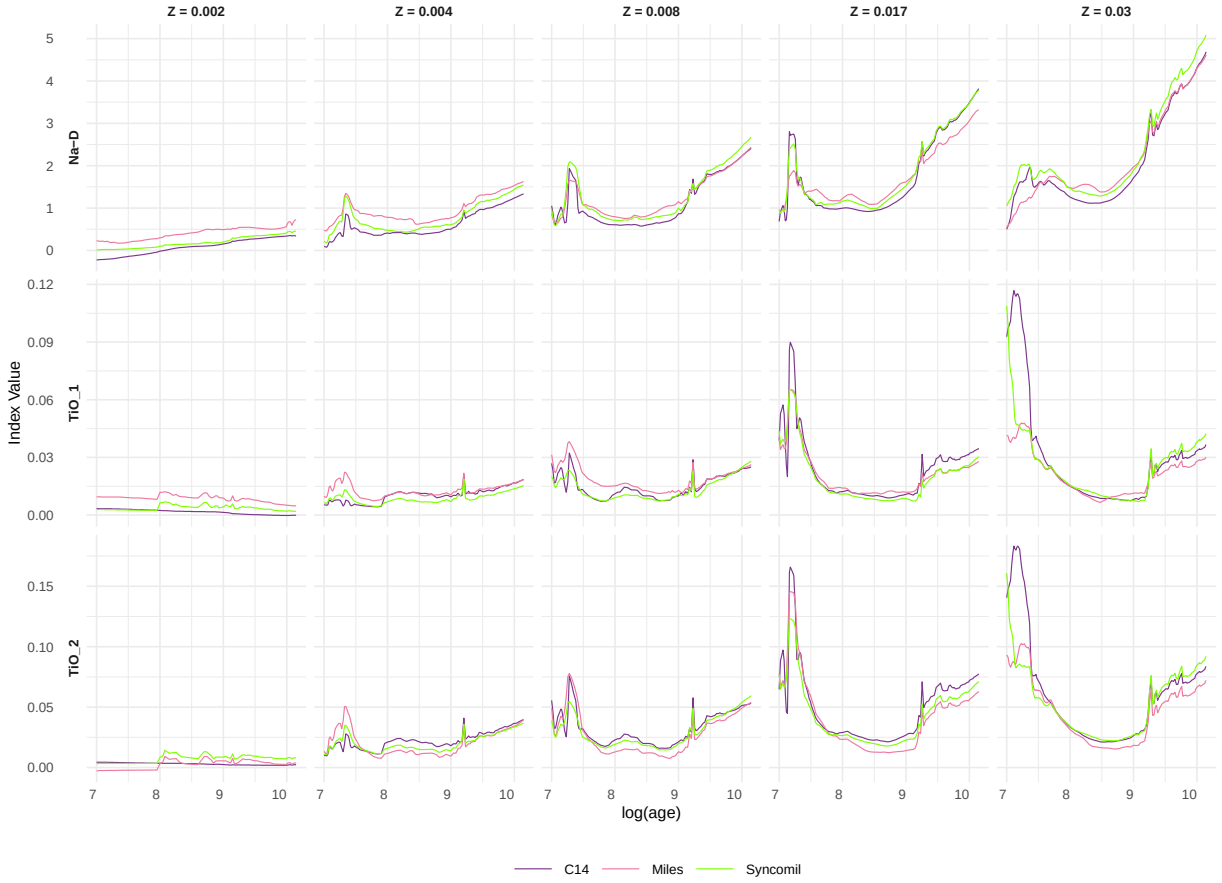

Figura 3.7: Evolução temporal de cada elemento ou linha para os diferentes modelos, onde o eixo horizontal representa a idade logarítmica em anos e o eixo vertical representa o índice espectral para $Na-D$, TiO_1 e TiO_2.

- Ca4427: Os modelos se concentram na metalicidade $Z = 0.008$ e em idades com $\log(\text{age}) > 9$.
- Ca4455: Observa-se uma maior densidade de modelos para metalicidades $Z \leq 0.008$ com $\log(\text{age}) > 7.0$.
- CN_1 e CN_2: A maioria dos pontos ocorre para metalicidades $Z \leq 0.008$ e $\log(\text{age}) < 8.0$.
- Fe4383: Possuí uma distribuição para todas as idade e metalicidade $Z \leq 0.017$.
- Fe4668: Apresenta uma tendência maior em metalicidade $Z \leq 0.008$ e idades $7 < \log(\text{age}) < 8$.
- Fe4531: Sua maior concentração está em metalicidade $Z = 0.017$ e idade $\log(\text{age}) <$

Figura 3.8: Distribuição dos erros observacionais para os conjuntos de dados de Trager, Sharina e Puzia.

8.0.

- Fe5015: Apresenta distribuição em todas as metalicidades em log(age) < 8.5, mas para metalicidade $Z = 0.017$ possuí para as demais idades.
- Fe5270, Fe5335: Possui uma quantidade menor de pontos em metalicidade $Z = 0.017$.
- Fe5406, Fe5709: Apresenta poucos pontos em $Z = 0.017$.
- $H\beta$, $H\delta A$, $H\delta F$, $H\gamma A$ e $H\gamma F$: Valores bem distribuídos pelas idades e metalicidades.
- TiO_1: Os pontos sem concentram em $Z \geq 0.017$ e idades log(age) < 7.5.
- TiO_2: Maior concentração para a maiores metalicidade $Z \geq 0.017$ em idade menores que $log(age) = 10$.

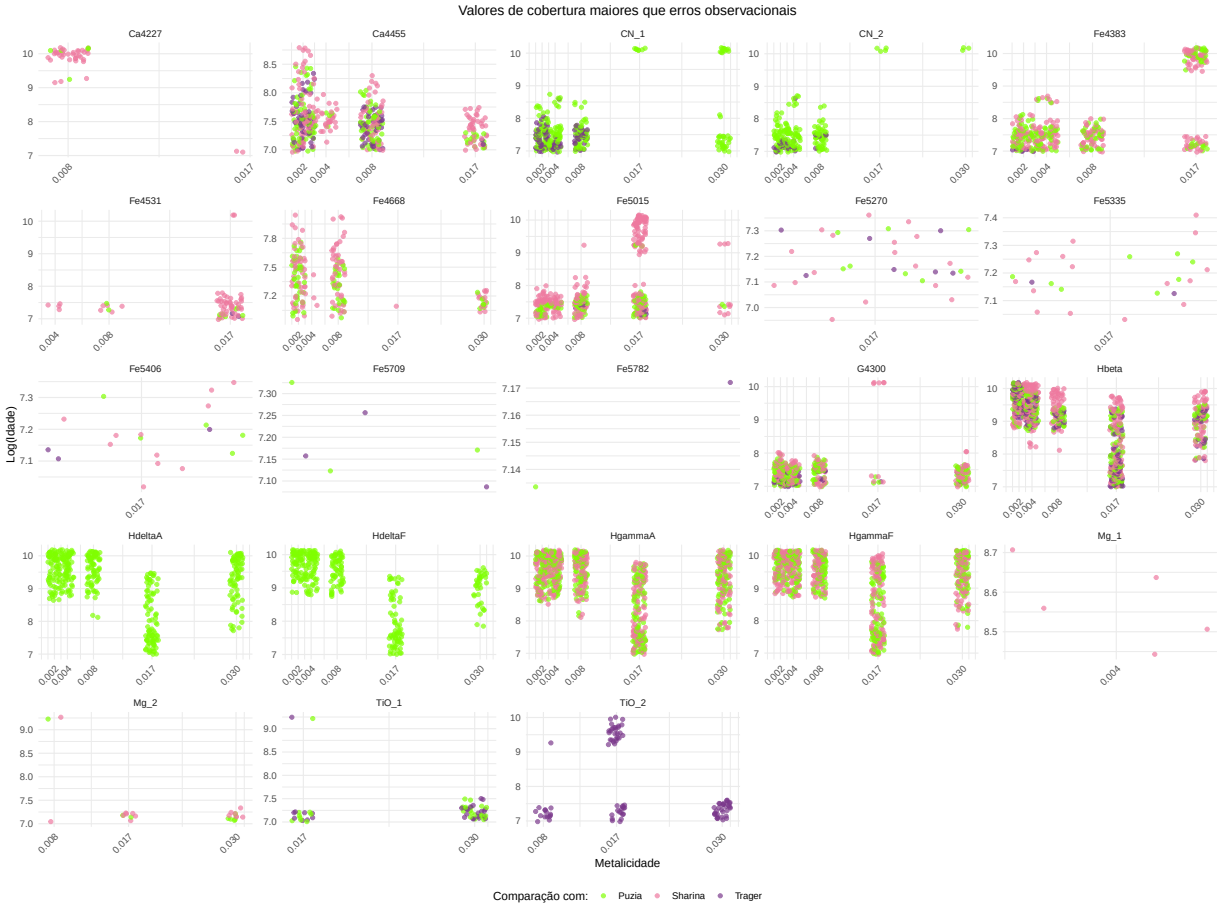

Figura 3.9: Relação idade-metalicidade para casos onde $\Delta\text{idx}_{\text{Cobertura}}$ produz valores superiores aos erros observacionais.

Na Figura 3.10 também temos o espaço de parâmetros em idade-metalicidade para os erros observacionais de Trager, Puzia e Sharina, mas nesse caso é para aqueles maiores que $\Delta\text{idx}_{\text{Sintético}}$. A seguir, analisamos os resultados:

- Ca4455: Possui pouca densidade de pontos que se concentram em $Z \geq 0.017$ para idade de $\log(\text{age}) > 8.25$.
- CN_1, CN_2, Fe4383 e Fe4668: Tem uma boa distribuição em todas idades e metalicidades.
- Fe4531 e Fe5406: Poucos pontos em $Z = 0.030$.
- Fe5015: Apresenta distruição em todas as metalicidades, mas para metalicidade $Z \leq 0.017$ com idade $\log(\text{age}) < 8$ e para $Z = 0.030$ $\log(\text{age}) > 8$.

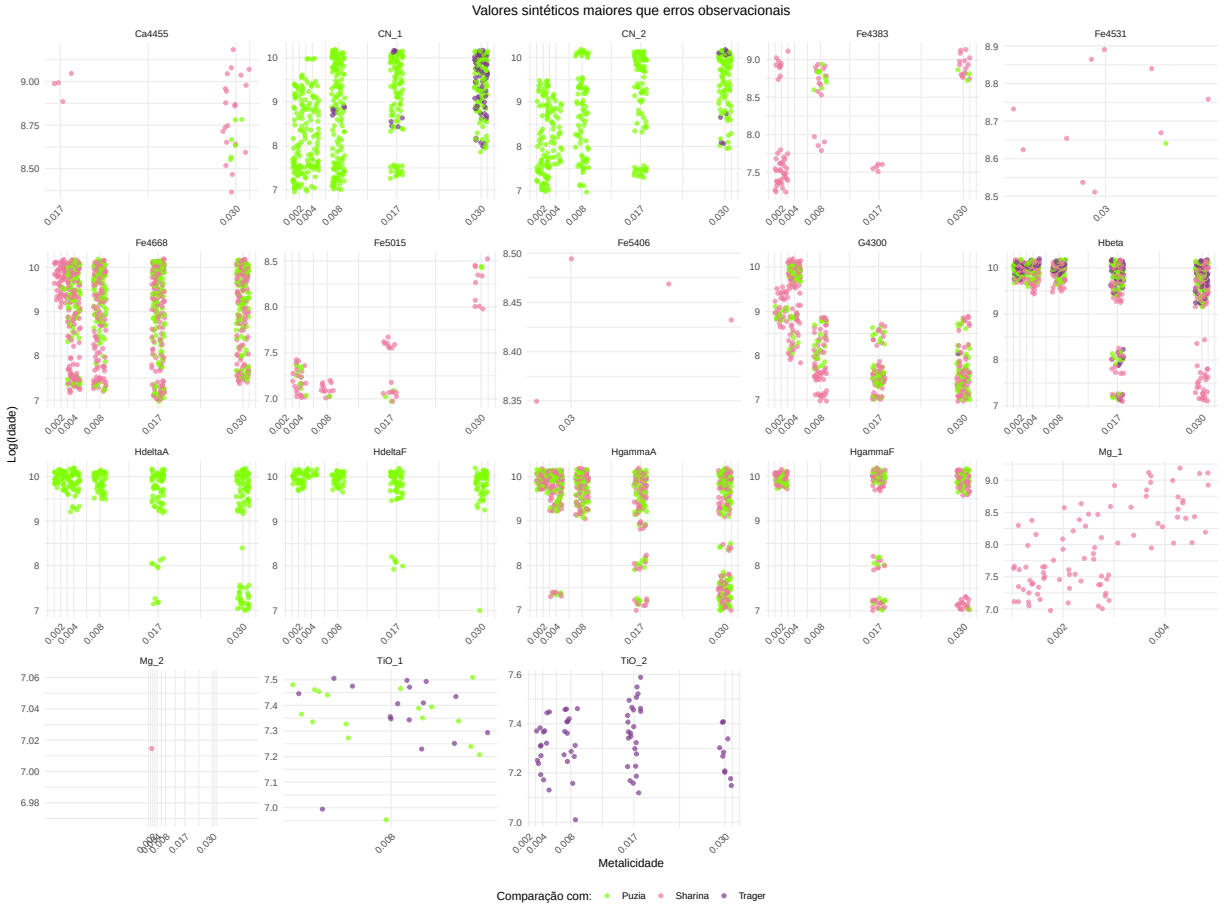

Figura 3.10: Relação idade-metalicidade para casos onde $\Delta \text{idx}_{\text{Sintético}}$ produz valores superiores aos erros observacionais.

- G4300: Para a metalicidade $Z = 0.0002$ as idades são $\log(\text{age}) > 8.5$ e para as demais $\log(\text{age}) < 9$.
- $H\beta$, $H\delta A$, $H\delta F$,$H\gamma A$ e $H\gamma F$: Para $Z \leq 0.08$ as idades são $\log(\text{age}) > 9$ e para as demais metalicidades contempla todas as idades.
- Mg_1: Possui pontos apenas em $Z = 0.004$ com idades de $7.0 < \log(\text{age}) < 9.0$.
- Mg_2: Apenas um ponto em 0.002.
- TiO_1: Pontos apenas em $Z = 0.008$ com idade $7.0 < \log(\text{age}) < 7.5$
- TiO_2: Distribuição em todas as metalicidades e idades $7.0 < \log(\text{age}) < 7.6$.

Capítulo 4

Conclusões

Este trabalho realiza a análise comparativa entre os efeitos sintéticos e de cobertura considerando diferentes regiões do espaço de parâmetros de idade e metalicidade.

Podemos reproduzir os resultados de Coelho et al. (2020) sendo condizente com o esperado como mostrado na Figura 3.1. A partir da análise das Figuras 3.2 a 3.7 podemos ver alguns padrões como descrito a seguir.

As discrepâncias tendem a aumentar com a metalicidade para a maior parte dos índices, com exceção do índice Fe4383 (a divergência diminui com maiores metalicidades). As maiores divergências foram identificados para idades abaixo de $\log(\text{age}) = 8.5$ e acima de $\log(\text{age}) = 9.25$.

A comparação com os erros observacionais proposto na Tabela 3.2 nos mostra que para Trager (observações de galáxias) nenhum índice apresentou discrepâncias entre modelos superiores aos erros observacionais. Para Puzia (observações de aglomerados extragalácticos), 7 índices mostraram diferenças significativas em $\Delta\text{idx}_{\text{Sintético}}$, e 7 índices para $\Delta\text{idx}_{\text{Cobertura}}$. Para Sharina (aglomerados extragalácticos), 10 índices apresentaram discrepâncias relevantes no $\Delta\text{idx}_{\text{Sintético}}$ e 9 no $\Delta\text{idx}_{\text{Cobertura}}$.

Para os espaços de parâmetros vistos nas Figuras 3.9 e 3.10 o critério baseado em $\Delta\text{idx}_{\text{Cobertura}}$ (Trager, Puzia e Sharina) mostra maior sensibilidade para $Z \leq 0.008$ e idades $\log(\text{age}) > 7.0$, enquanto o critério $\Delta\text{idx}_{\text{Sintético}}$ apresenta uma resposta mais diversificada, abrangendo todo o espaço de parâmetros com padrões específicos para cada índice.

Com base nos resultados obtidos a partir do trabalho, pode-se concluir que a escolha entre modelos semi-empíricos e totalmente teóricos depende do objetivo em questão. A análise dos índices espectrais em relação à observações nos mostra faixas de confiança de aplicações para cada índice que pode auxiliar na escolha do tipo de modelo a ser usado.

Referências Bibliográficas

Bressan A., Marigo P., Girardi L., Salasnich B., Dal Cero C., Rubele S., Nanni A., PARSEC: stellar tracks and isochrones with the PAdova and TRieste Stellar Evolution Code, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2012, vol. 427, p. 127

Bruzual G., Charlot S., Stellar population synthesis at the resolution of 2003, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2003, vol. 344, p. 1000

Cenarro A. J., Peletier R. F., Sánchez–Blázquez P., Selam S. O., Toloba E., Cardiel N., Falcón–Barroso J., Gorgas J., Jiménez-Vicente J., Vazdekis A., Medium-resolution Isaac Newton Telescope library of empirical spectra – II. The stellar atmospheric parameters, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2006, vol. 374, p. 664

Chabrier G., The Galactic Disk Mass Function: Reconciliation of the Hubble Space Telescope and Nearby Determinations, The Astrophysical Journal, 2003, vol. 586, p. L133

Coelho P. R. T., Determinação de parâmetros atmosféricos de estrelas em NGC 6528 e NGC 6553 - aglomerados globulares de referência para o estudo de populações ricas em metais, Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, 2000, Dissertação de Mestrado, 49 f.

Coelho P. R. T., A new library of theoretical stellar spectra with scaled-solar and α-enhanced mixtures, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2014, vol. 440, p. 1027–1043

Coelho P. R. T., Bruzual G., Charlot S., To use or not to use synthetic stellar spectra in population synthesis models?, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2020, vol. 491, p. 2025

Conroy C., Modeling the Panchromatic Spectral Energy Distributions of Galaxies, ARA&A, 2013, vol. 51, p. 393

Faber S. M., Friel E. D., Burstein D., Gaskell C. M., Old stellar populations. II. an analysis of K-giant spectra., ApJS, 1985, vol. 57, p. 711

Marcillac D., Elbaz D., Charlot S., Liang Y. C., Hammer F., Flores H., Cesarsky C., Pasquali A., The star formation history of luminous infrared galaxies, Astronomy & Astrophysics, 2006, vol. 458, p. 369–383

Puzia T. H., Kissler-Patig M., Thomas D., Maraston C., Saglia R. P., Bender R., Richtler T., Goudfrooij P., Hempel M., VLT spectroscopy of globular cluster systems: I. The photometric and spectroscopic data set, Astronomy & Astrophysics, 2004, vol. 415, p. 123–143

Sharina M. E., Afanasiev V. L., Puzia T. H., Ages, metallicities and [/Fe] ratios of globular clusters in NGC 147, 185 and 205, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2006, vol. 372, p. 1259–1274

Sánchez-Blázquez P., Peletier R. F., Jiménez-Vicente J., Cardiel N., Cenarro A. J., Falcón-Barroso J., Gorgas J., Selam S., Vazdekis A., Medium-resolution Isaac Newton Telescope library of empirical spectra, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2006, vol. 371, p. 703

Trager S. C., Worthey G., Faber S. M., Burstein D., Gonzalez J. J., Old Stellar Populations. VI. Absorption[U+2010]Line Spectra of Galaxy Nuclei and Globular Clusters, The Astrophysical Journal Supplement Series, 1998, vol. 116, p. 1–28

Worthey G., Ottaviani L., H and H Absorption Features in Stars and Stellar Populations, The Astrophysical Journal Supplement Series, 2009, vol. 111, p. 377