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

Lucas Do Nascimento Degi

Confirmação Espectroscópica de Aglomerados de Galáxias Descobertos Pelo S-PLUS/PzWav

São Paulo
2021

Lucas Do Nascimento Degi

Confirmação Espectroscópica de Aglomerados de Galáxias Descobertos Pelo S-PLUS/PzWav

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Astronomia do 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: Prof. Dr. Eduardo Serra Cypriano

São Paulo

2021

Esse trabalho é dedicado ao Antônio Marcos Degi, meu pai, que foi o maior responsável por eu chegar até aqui. Também dedico a todas as milhares de vítimas e familiares de vítimas da Covid-19 no Brasil.

Agradecimentos

Tenho gratidão eterna aos meus pais, que sempre me incentivaram e deram suporte em tudo na vida, sem eles eu não seria nada.

Agradeço à minha família que está sempre disposta a ajudar no que for necessário, principalmente meus avós, tios e tias.

Tenho uma lista muito grande, muito maior do que eu mereço, de amigos a quem sou grato por estarem do meu lado nos momentos bons e também nas horas mais difíceis. Me faltam palavras pra descrever a importância que vocês tiveram no meu último ano, mas não apenas nele.

Agradeço aos colegas da faculdade por sofrerem ao meu lado e me carregarem pra frente nas matérias mais complicadas.

Agradeço à Stephane Werner e ao Eduardo Cypriano, por terem feito as observações e coletado os dados utilizados nesse projeto.

Obrigado ao meu orientador, Eduardo, por ter paciência na construção desse trabalho.

Agradeço ao CNPq, pelo apoio financeiro, sob o projeto n^o 139130/2021-7.

Deixo esses agradecimentos genéricos, de certa forma, pois não há espaço nessa monografia pra nomear todos que foram essenciais pra mim nesse ciclo, sou uma pessoa de muita sorte por ter vocês ao meu lado.

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

"*Trade your certainty for awe.*"

Dying in Circles - Silent Planet

Resumo

Contexto: O S-PLUS é um *survey* que visa mapear o céu austral utilizando 12 bandas fotométricas, o que possibilita que sejam obtidas boas medidas de *redshift* fotométrico para galáxias distantes e tênues. A partir desses dados foram detectados possíveis aglomerados de galáxias, utilizando o algoritmo PzWav.

Objetivos: Confirmar a existência de três destes candidatos a aglomerados, previamente desconhecidos, usando espectroscopia.

Métodos: Foram feitas observações com o instrumento Goodman do SOAR, capaz de obter dados de espectroscopia multi-objetos. Após a redução dos dados, os *redshifts* das galáxias foram medidos através do pacote RVSAO do *software* IRAF, e confirmados com análise posterior através da identificação do comprimento de onda das linhas mais fortes presentes nesses espectros.

Resultados: Foram confirmadas as existências de dois aglomerados de galáxias, ambos com 6 galáxias identificadas como membros em cada. O primeiro deles na região SPLUS2119+0117 com *redshift* $\bar{z} = 0,1355 \pm 0,0012$ e dispersão de velocidades $\sigma = 793 \pm 24\,km/s$, e o outro na região SPLUS01510101 com $\bar{z} = 0,2290 \pm 0,0011$ e dispersão de velocidades $\sigma = 521 \pm 12\,km/s$. Ainda foram encontradas evidências inconclusivas sobre a existência de um aglomerado na região SPLUS2056+0123 por volta de $\bar{z} = 0,1771 \pm 0,0011$.

Abstract

Context: S-PLUS is a survey that aims to map the southern sky using 12 photometric bands, which allows good photometric redshift measurements to be made for distant and faint galaxies. Using this data, galaxy cluster candidates were detected by the PzWav algorithm.

Objectives: Confirm the existence of three, previously unknown, cluster candidates, using spectroscopy.

Methods: Observations were made using the Goodman instrument at SOAR telescope, capable of obtaining multi-object slit spectroscopic data. After reducing the data, galaxies redshifts were measured using the RVSAO package on IRAF, and further confirmed by the identification of the strongest spectral lines wavelengths present in the spectra.

Results: The existence of two galaxy clusters was confirmed, each with 6 galaxies identified as members. The first of them at SPLUS2119+0117 region with a mean redshift $\bar{z} = 0.1355 \pm 0.0012$ and velocity dispersion $\sigma = 793 \pm 24\, km/s$, and another at the SPLUS01510101 region with $\bar{z} = 0.2290 \pm 0.0011$ and $\sigma = 521 \pm 12\, km/s$. Some inconclusive evidences of the existence of a cluster were found at SPLUS2056+0123 region, with a redshift $\bar{z} = 0.1771 \pm 0,0011$.

Sumário

1. Introdução 15
1.1 Aglomerados de Galáxias 15
1.2 Contexto 16

2. Metodologia 19
2.1 Redução de Dados 19
2.2 Cálculo das Velocidades Radiais 27

3. Resultados 31
3.1 SPLUS2119+0117 31
3.2 SPLUS2056+0123 33
3.3 SPLUS01510101 34

4. Conclusões e Perspectivas 37

Referências 39

Apêndice 41

A. SPLUS2119+0117 43

B. SPLUS2056+0123 49

C. SPLUS01510101 57

Capítulo 1

Introdução

1.1 Aglomerados de Galáxias

A maior parte das galáxias no Universo conhecido se encontra em algum tipo de associação, como grupos ou aglomerados. Os aglomerados de galáxias são as estruturas em larga escala que se formaram mais recentemente na história do Universo e tiveram tempo de atingir um estado de equilíbrio dinâmico. Isso está de acordo com o cenário hierárquico de formação de estruturas, que é característico do modelo cosmológico λCDM, mais aceito atualmente. Esse modelo postula um Universo em expansão acelerada, causada por uma constante cosmológica (λ), e com a presença de matéria escura dinamicamente fria (*Cold Dark Matter* - CDM), que se encaixa satisfatoriamente nas observações das últimas décadas. Sendo assim, a catalogação dos aglomerados de galáxias é importante para a determinação de parâmetros cosmológicos, visto que eles são muito sensíveis a mudanças nessas variáveis (Cypriano 2014) (Voit 2005) e por isso servem como bons laboratórios.

Existem três componentes principais que constituem um aglomerado de galáxias, em termos de massa. As galáxias, correspondentes à cerca de 2-3% da massa total, o meio intra-aglomerado (ICM - *intracluster medium*), que é responsável por 13-16% da massa, e a matéria escura, que constitui entre 80-85% da massa total de um aglomerado típico (Lima Neto 2020). Essas estruturas podem abrigar de centenas a milhares de galáxias, conectadas pela atração gravitacional. Suas massas podem variar entre 10^{14} a $10^{15}\,M_{\odot}$ e o diâmetro alcança $\approx 2\,Mpc$. Como demonstrado em estudos anteriores (e.g. Girardi et al. 1998), a dinâmica dos membros do aglomerado está relacionada com a sua massa e temperatura do gás intra-aglomerado. Por conta disso, se torna importante medir a dispersão de velocidades para que as características (massa total, temperatura do gás intra-aglomerado) desses

objetos sejam computadas. Tipicamente, o que se espera encontrar para aglomerados de galáxias são dispersões de velocidade entre $\approx 500 - 1200\,km/s$ (Werner 2019).

Na astronomia, e na ciência como um todo, é importante catalogar objetos conhecidos para que eles possam ser estudados com maior profundidade. Para os aglomerados de galáxias, o catálogo de Abell é o mais completo atualmente, daqueles abrangendo toda a esfera celeste. A maior dificuldade na busca por esses objetos é separar os verdadeiros aglomerados daqueles que são apenas efeitos de projeção de grupos alinhados na linha de visada. Esse fenômeno ocorre porque aglomerados de galáxias são objetos tridimensionais, localizados num espaço também tridimensional, mas quando analisamos as imagens encontramos informações em apenas duas dimensões. Para sanar este problema é necessário determinar a distância das galáxias observadas, o que pode ser feito medindo-se o *redshift* desses objetos. É possível obter essa informação por diferentes técnicas, com variados graus de precisão. Nesse trabalho, utilizamos observações espectroscópicas para determinar o *redshift* (z), comparando comprimentos de onda (λ) de linhas espectrais nas galáxias com suas contrapartes em repouso, como visto na Equação 1.1:

$$z = \frac{\lambda_{obs} - \lambda_{rep}}{\lambda_{rep}} \tag{1.1}$$

1.2 Contexto

O S-PLUS (*Southern Photometric Local Universe Survey*) é uma colaboração internacional, fundada por universidades brasileiras e outras instituições latino-americanas, que tem como objetivo mapear o céu do hemisfério Sul com maior qualidade utilizando um telescópio robótico (T80S) com um espelho primário de 826 mm de diâmetro e equipado com um sistema de 12 filtros fotométricos, localizado no *Cerro Tololo Interamerican Observatory* (CTIO), no Chile (Mendes de Oliveira et al. 2019). Com os dados do primeiro *Data Release* do projeto foi possível detectar alguns candidatos a aglomerados de galáxias localizados na região da *Stripe 82* utilizando o código PzWav (Gonzalez 2014), que faz a detecção através da análise da distribuição de galáxias no céu e seus redshifts fotométricos (Werner et al. in prep.).

Por contar com 12 bandas de fotometria (ver Figura 1.1), os dados do S-PLUS permitem obter valores de *redshift* fotométrico com maior precisão do que *surveys* de galáxias

semelhantes que contam com apenas 4 ou 5 bandas de observação. Alguns aglomerados encontrados em Werner (2019) não foram catalogados na literatura ainda e por essa razão foram escolhidas três regiões do céu (Figura 1.2) que não tinham informações espectroscópicas, para serem observadas com o telescópio SOAR. As medidas de *redshift* espectroscópico permitem uma incerteza menor do que o fotométrico e por conta disso podem confirmar ou não a existência desses candidatos a aglomerados. As observações ocorreram em julho de 2019, utilizando o instrumento Goodman (Clemens et al. 2004), capaz de obter imagens de espectroscopia multi-objetos. Neste trabalho, analisaremos os dados coletados a fim de confirmar a existência dos candidatos a aglomerados de galáxias.

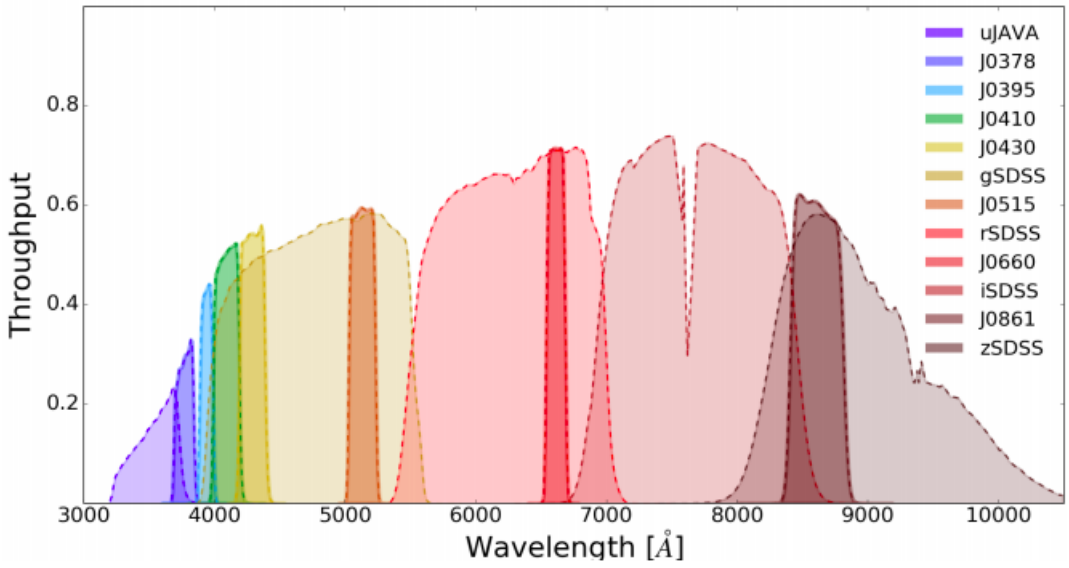

Figura 1.1: Sistema de filtros do S-PLUS. Esse sistema é o mesmo utilizado pelo telescópio T80 no *Cerro Javalambre*. O eixo y mostra a eficiência total de cada filtro, obtido pela multiplicação da média da curva de transmissão do filtro, a transmissão atmosférica, a eficiência do CCD e da curva de refletividade do espelho primário. Cada filtro é identificado de acordo na legenda à direita. Gráfico retirado de (Mendes de Oliveira et al. 2019).

Figura 1.2: Uma das regiões observadas com o telescópio SOAR. Imagem do Legacy Survey, link de acesso.

Capítulo 2

Metodologia

Para realizar a análise dos dados coletados no observatório SOAR é necessário que eles sejam reduzidos e preparados. Portanto, na Seção 2.1 detalharemos o passo-a-passo desse processo, para que sirva de referência para outros projetos utilizando o instrumento de espectroscopia multi-objetos Goodman/SOAR.

2.1 Redução de Dados

Os *softwares* utilizados para a realização desse trabalho foram o *Image Reduction and Analysis Facility* (IRAF)[1] e sua versão baseada em *Python* (Pyraf)[2], que é responsável pelo tratamento dos dados, e o *SAOImage DS9*[3], que atua como auxiliar na visualização das imagens, já que é capaz de reproduzir arquivos de extensão FITS (*Flexible Image Transport System*).

Foram observadas três regiões distintas do céu, cada uma delas com uma máscara de espectroscopia multi-objetos, que devem ser trabalhadas separadamente. Portanto, é recomendável que se organize as imagens de acordo com as máscaras.

1. Para iniciar, crie listas com as imagens de ciência, as imagens de *bias* e as imagens das lâmpadas de comparação. Isso irá facilitar e agilizar o processo de redução dos dados.

2. No pacote *ccdred* usar a tarefa *zerocombine* para combinar todas as imagens de *bias*. Os parâmetros usados estão na Figura 2.1.

[1] `https://iraf.net/`

[2] `https://iraf-community.github.io/pyraf.html`

[3] `https://sites.google.com/cfa.harvard.edu/saoimageds9`

3. Usando a tarefa *ccdproc* corta-se a imagem, eliminando as regiões que não contêm informações relevantes. Ao mesmo tempo a imagem combinada dos *bias* é subtraída da imagem de ciência com o objetivo de reduzir o ruído introduzido pelas correntes eletrônicas no detector CCD (*charge-coupled device*). Os parâmetros utilizados estão na Figura 2.2.

```
                                  IRAF
                Image Reduction and Analysis Facility
PACKAGE = ccdred
   TASK = zerocombine

input   =                       List of zero level images to combine
(output = ▉                  Zero) Output zero level name
(combine=                 average) Type of combine operation
(reject =                  minmax) Type of rejection
(ccdtype=                       ) CCD image type to combine
(process=                     no) Process images before combining?
(delete =                     no) Delete input images after combining?
(clobber=                     no) Clobber existing output image?
(scale  =                   none) Image scaling
(statsec=                       ) Image section for computing statistics
(nlow   =                      0) minmax: Number of low pixels to reject
(nhigh  =                      1) minmax: Number of high pixels to reject
(nkeep  =                      1) Minimum to keep (pos) or maximum to reject (neg)
(mclip  =                    yes) Use median in sigma clipping algorithms?
(lsigma =                     3.) Lower sigma clipping factor
(hsigma =                     3.) Upper sigma clipping factor
(rdnoise=                rdnoise) ccdclip: CCD readout noise (electrons)
(gain   =                   gain) ccdclip: CCD gain (electrons/DN)
(snoise =                     0.) ccdclip: Sensitivity noise (fraction)
(pclip  =                   -0.5) pclip: Percentile clipping parameter
(blank  =                     0.) Value if there are no pixels
(mode   =                     ql)
```

Figura 2.1: Parâmetros utilizados na tarefa *zerocombine*.

4. O próximo passo é combinar as imagens de ciência. Isso irá aumentar a razão sinal/ruído (S/N) e, principalmente, permite remover os sinais causados por raios cósmicos, melhorando a qualidade dos dados. A tarefa usada é *combine* e os parâmetros estão na Figura 2.3. Na Figura 2.4 temos uma comparação da imagem antes e depois de passar por esse processo. Nesse momento deve-se repetir os passos 1 a 4 para as imagens das lâmpadas de comparação, que serão usadas para a calibração dos espectros por comprimento de onda mais tarde. A única diferença é que o parâmetro *combine* deve ser alterado para *median*.

5. Agora, é necessário recortar os espectros bidimensionais individualmente para cada galáxia observada (Figura 2.5). O pacote que será utilizado é o *apextract*, a tarefa *apall* é suficiente para realizar todos os passos a seguir, porém ela apresentou problemas de funcionamento e é recomendável que sejam utilizadas outras tarefas, que serão detalhadas abaixo.

```
                                IRAF
                Image Reduction and Analysis Facility
PACKAGE = ccdred
   TASK = ccdproc

images  = ▉          @sci.lis  List of CCD images to correct
(output =      edit_//@sci.lis) List of output CCD images
(ccdtype=                     ) CCD image type to correct
(max_cac=                   0) Maximum image caching memory (in Mbytes)
(noproc =                  no) List processing steps only?

(fixpix =                  no) Fix bad CCD lines and columns?
(oversca=                  no) Apply overscan strip correction?
(trim   =                 yes) Trim the image?
(zerocor=                 yes) Apply zero level correction?
(darkcor=                  no) Apply dark count correction?
(flatcor=                  no) Apply flat field correction?
(illumco=                  no) Apply illumination correction?
(fringec=                  no) Apply fringe correction?
(readcor=                  no) Convert zero level image to readout correction?
(scancor=                  no) Convert flat field image to scan correction?

(readaxi=                line) Read out axis (column|line)
(fixfile=                     ) File describing the bad lines and columns
(biassec=               image) Overscan strip image section
(trimsec=     [25:2069,10:925]) Trim data section
(zero   =           Zero.fits) Zero level calibration image
(dark   =                     ) Dark count calibration image
(flat   =                     ) Flat field images
(illum  =                     ) Illumination correction images
(fringe =                     ) Fringe correction images
(minrepl=                  1.) Minimum flat field value
(scantyp=           shortscan) Scan type (shortscan|longscan)
(nscan  =                   1) Number of short scan lines

(interac=                 yes) Fit overscan interactively?
(functio=           chebyshev) Fitting function
(order  =                   1) Number of polynomial terms or spline pieces
(sample =                   *) Sample points to fit
(naverag=                   1) Number of sample points to combine
(niterat=                   1) Number of rejection iterations
(low_rej=                  3.) Low sigma rejection factor
(high_re=                  3.) High sigma rejection factor
(grow   =                  1.) Rejection growing radius
(mode   =                  ql)
```

Figura 2.2: Parâmetros utilizados na tarefa *ccdproc*.

6. Para posicionar as fendas, utiliza-se a tarefa *apfind*. No terminal gráfico, use a tecla n para escolher o centro de uma nova fenda, a tecla u define o limite superior da fenda e l define o limite inferior. Se desejar ampliar alguma região, utilize a tecla w para entrar no modo janela, seguido da tecla e duas vezes para definir os cantos inferior esquerdo e superior direito da nova janela de visualização. Para retornar para a janela inicial, clique w novamente seguido da tecla a. Os comandos do modo janela são válidos para todas as tarefas no terminal gráfico. As fendas posicionadas podem ser vistas na Figura 2.5.

7. Ainda na tarefa *apfind*, digite b para entrar na função *fit background*. Use a tecla t para apagar a região de *background* definida automaticamente. A tecla s duas vezes define os limites da nova região de céu que deve ser subtraída do espectro contínuo. Após definir os pontos, tecla f irá fazer um novo ajuste. O comando :order n define a ordem da função de ajuste, onde n é um número inteiro. Tecla q salva as mudanças e

```
                                  IRAF
                Image Reduction and Analysis Facility
PACKAGE = ccdred
   TASK = combine

input   = ▉    edit_//@sci.lis  List of images to combine
output  =              SciComb  List of output images
(plfile =                     ) List of output pixel list files (optional)
(sigma  =                     ) List of sigma images (optional)

(ccdtype=                     ) CCD image type to combine (optional)
(subsets=                   no) Combine images by subset parameter?
(delete =                   no) Delete input images after combining?
(clobber=                   no) Clobber existing output image?

(combine=              average) Type of combine operation
(reject =             crreject) Type of rejection
(project=                   no) Project highest dimension of input images?
(outtype=                 real) Output image pixel datatype
(offsets=                 none) Input image offsets
(masktyp=                 none) Mask type
(maskval=                   0.) Mask value
(blank  =                   0.) Value if there are no pixels

(scale  =                 none) Image scaling
(zero   =                 none) Image zero point offset
(weight =                 none) Image weights
(statsec=                     ) Image section for computing statistics

(lthresh=                INDEF) Lower threshold
(hthresh=                INDEF) Upper threshold
(nlow   =                    1) minmax: Number of low pixels to reject
(nhigh  =                    1) minmax: Number of high pixels to reject
(nkeep  =                    1) Minimum to keep (pos) or maximum to reject (neg)
(mclip  =                  yes) Use median in sigma clipping algorithms?
(lsigma =                   3.) Lower sigma clipping factor
(hsigma =                   3.) Upper sigma clipping factor
(rdnoise=              rdnoise) ccdclip: CCD readout noise (electrons)
(gain   =                 gain) ccdclip: CCD gain (electrons/DN)
(snoise =                   0.) ccdclip: Sensitivity noise (fraction)
(sigscal=                  0.1) Tolerance for sigma clipping scaling corrections
(pclip  =                 -0.5) pclip: Percentile clipping parameter
(grow   =                    0) Radius (pixels) for 1D neighbor rejection
(mode   =                   ql)
```

Figura 2.3: Parâmetros utilizados na tarefa *combine*.

retorna para a seleção de fendas, teclas + e - navegam entre as fendas posicionadas. Um ajuste adequado pode ser visto na Figura 2.6.

8. Após definir as fendas e as regiões do céu a serem subtraídas utiliza-se a tarefa *aptrace*. Esse passo irá identificar o espectro contínuo na imagem e "rastreá-lo". Para isso, define-se uma função de ajuste que se encaixe nos pontos encontrados pelo algoritmo, portanto o ajuste deve ser bom, com um $RMS(Root\ Mean\ Square) < 1$. É recomendado o uso de polinômios de Legendre para realizar o ajuste, se necessário use funções de ordens grandes (> 3) com o comando :order, é possível excluir *outliers* usando a tecla d. Use as mesma teclas do passo anterior para definir a região de ajuste. Um exemplo pode ser visto na Figura 2.7.

9. Agora a imagem está preparada para que os espectros unidimensionais sejam extraídos. A tarefa utilizada é *apsum*, os parâmetros estão na Figura 2.8.

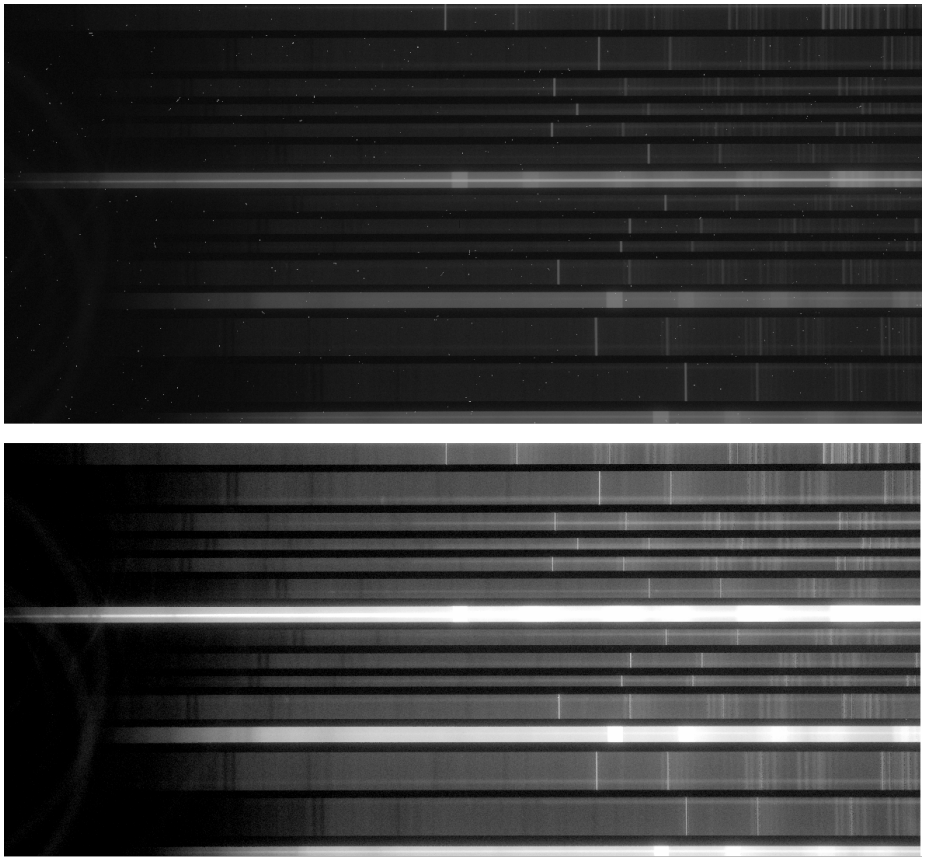

Figura 2.4: Comparação das imagens de ciência. A imagem do topo é uma única exposição, enquanto a de baixo é a combinação das imagens após o processo da tarefa *combine*.

10. Repete-se o último passo para a imagem de comparação. Porém usa-se a imagem de ciência como referência e o parâmetro *background* deve ser alterado para *none*.

11. Com os espectros unidimensionais preparados, será usado o pacote *onedspec*. A primeira tarefa será *identify* que irá marcar os comprimentos de onda das linhas de emissão das lâmpadas de comparação. No caso, foi utilizada apenas uma lâmpada de Mércurio-Argônio (HgAr), pois o site[4] do observatório SOAR não recomenda a utilização da lâmpada de Neônio (Ne), que também estava disponível para realizar a calibração, para o modo 400 M1, utilizado nas observações. Para identificar as linhas presentes no espectro usa-se imagens de referência, como visto na Figura 2.9. Com a tecla m é marcada um nova linha, que deve ser identificada com o respectivo comprimento de onda em Angstroms. Repita o processo para 3 ou 4 linhas ao longo do espectro. A tecla l marca novas linhas de emissão e faz um ajuste, para verificar os

[4] `https://soardocs.readthedocs.io/projects/lamps/en/latest/`

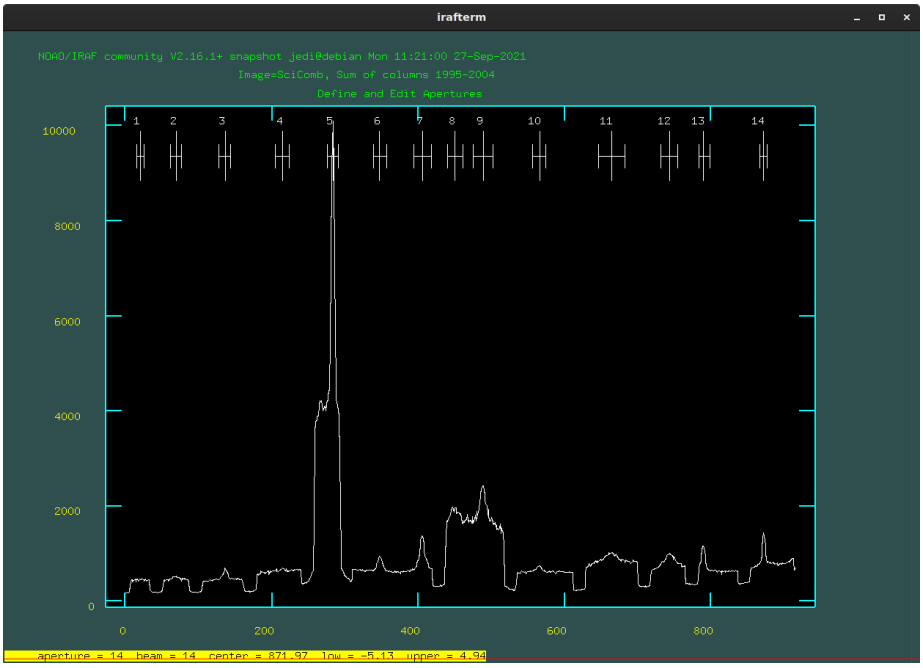

Figura 2.5: Fendas posicionadas com a tarefa *apfind* para a extração de espectros unidimensionais.

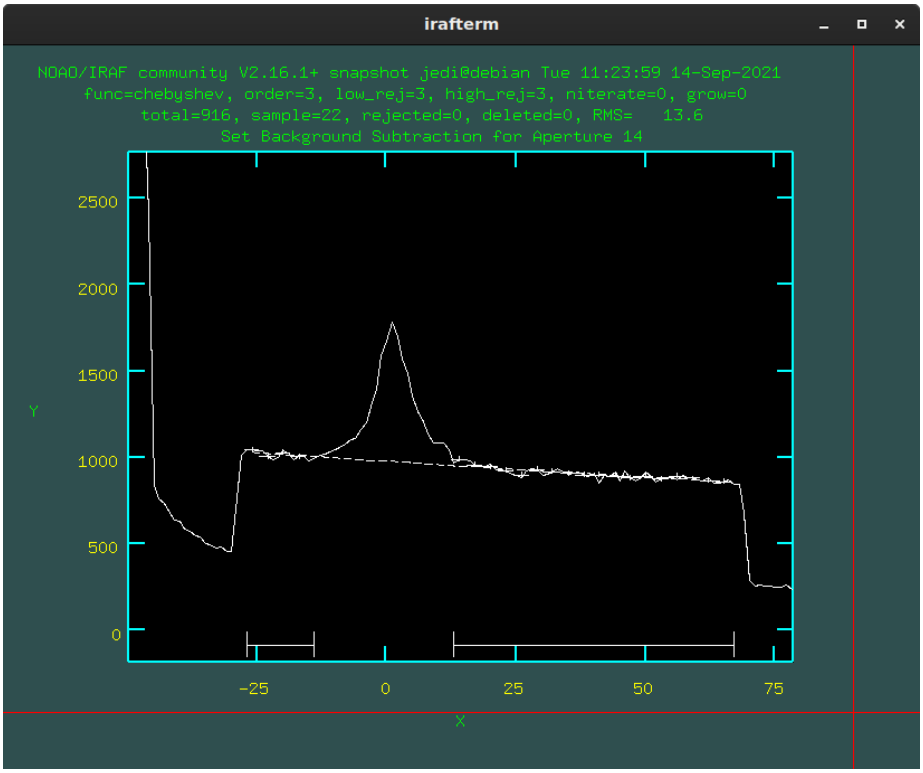

Figura 2.6: Ajuste para a subtração do céu.

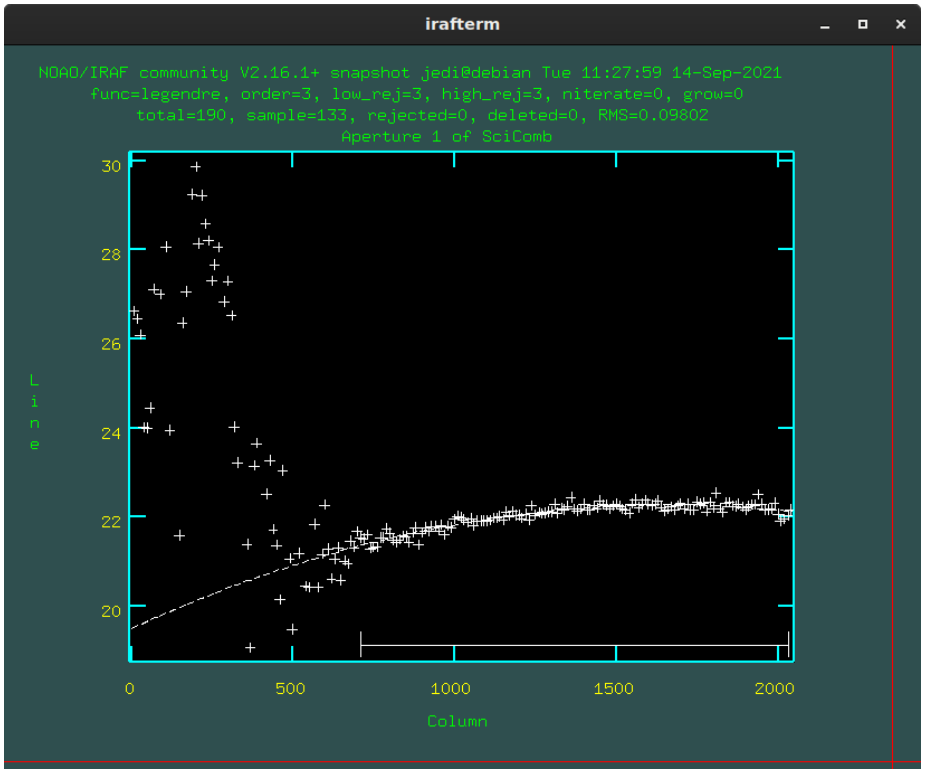

Figura 2.7: Ajuste para definir a região do espectro contínuo com a tarefa *aptrace*. Na região azul desses espectros (colunas 0 a 700, aproximadamente) a razão sinal/ruído é muito baixa e o algoritmo não é capaz de localizar o contínuo. Por esse motivo os pontos dessa região são excluídos.

resíduos use a tecla f. Recomenda-se não usar uma função de ajuste linear, portanto altere a ordem dela conforme necessário.

12. Esse passo deve ser repetido para todos os espectros de comparação e pode ser feito automaticamente com a tarefa *reidentify*. Porém, é preciso cautela, já que muitas vezes essa tarefa não cumpre sua missão de forma adequada, verifique cada espectro individualmente.

13. Agora, é necessário associar cada espectro de comparação a seu respectivo espectro de ciência. Para isso é usada a tarefa *refspectra*, basta inserir a lista dos espectros unidimensionais de ciência no parâmetro *input* e a lista de espectros de comparação no parâmetro *referen*.

14. Por fim, para finalizar a calibração por comprimento de onda é utilizada a tarefa *dispcor*. Os parâmetros estão na Figura 2.10.

```
                                  I R A F
                     Image Reduction and Analysis Facility
PACKAGE = apextract
   TASK = apsum

input   =                       List of input images
(output =                      ) List of output spectra
(apertur=                      ) Apertures
(format =             onedspec) Extracted spectra format
(referen=                      ) List of aperture reference images
(profile=                      ) List of aperture profile images

(interac=                  yes) Run task interactively?
(find   =                   no) Find apertures?
(recente=                   no) Recenter apertures?
(resize =                   no) Resize apertures?
(edit   =                   no) Edit apertures?
(trace  =                   no) Trace apertures?
(fittrac=                   no) Fit the traced points interactively?
(extract=                  yes) Extract apertures?
(extras =                   no) Extract sky, sigma, etc.?
(review =                  yes) Review extractions?

(line   =                INDEF) Dispersion line
(nsum   =                   10) Number of dispersion lines to sum or median

(backgro=                  fit) Background to subtract (none|average|fit)
(weights=                 none) Extraction weights (none|variance)
(pfit   =               fit1d) Profile fitting type (fit1d|fit2d)
(clean  =                   no) Detect and replace bad pixels?
(skybox =                    3) Box car smoothing length for sky
(saturat=                INDEF) Saturation level
(readnoi=                 3.99) Read out noise sigma (photons)
(gain   =                 2.06) Photon gain (photons/data number)
(lsigma =                   4.) Lower rejection threshold
(usigma =                   4.) Upper rejection threshold
(nsubaps=                    1) Number of subapertures per aperture
(mode   = ql)
```

Figura 2.8: Parâmetros para extrair os espectros unidimensionais usando a tarefa *apsum*.

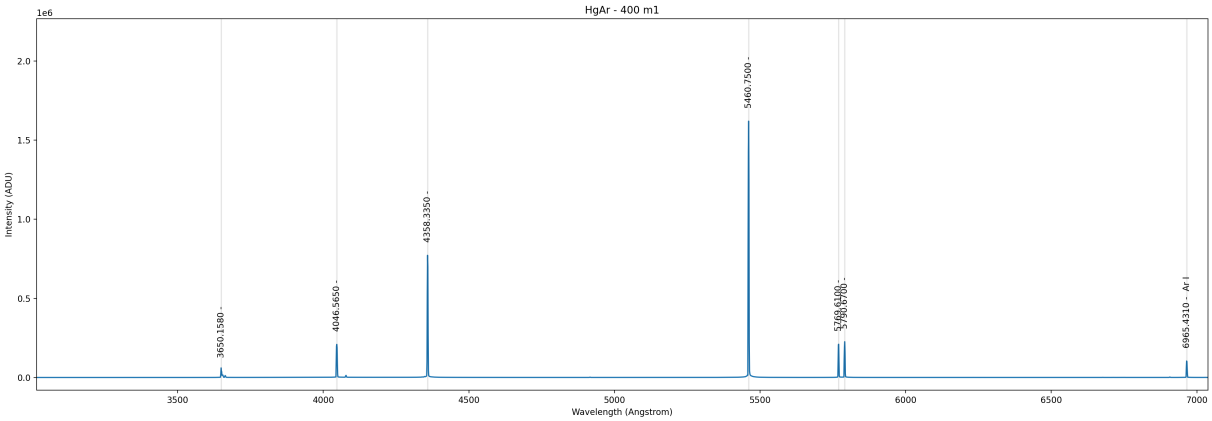

Figura 2.9: Imagem de referência para a lâmpada de HgAr, usada para calibrar o comprimento de onda.

15. Com o espectro de cada fenda extraído e calibrado, use a tarefa *splot* para corrigir eventuais linhas de emissão do céu ou raios cósmicos que não foram subtraídos corretamente. Para remover imperfeições digite a tecla k nos dois cantos, em seguida use a tecla - (menos) nos mesmos lugares. É possível suavizar o espectro usando a tecla s seguida de um número ímpar, isso reduz o ruído mas pode apagar linhas de

emissão ou absorção fracas. Finalmente, a tecla i permite salvar as alterações.

```
                                  IRAF
                    Image Reduction and Analysis Facility
PACKAGE = onedspec
   TASK = dispcor

input   = ▉       @ciencia.lis  List of input spectra
output  =    wl_//@ciencia.lis  List of output spectra
(lineari=                  yes) Linearize (interpolate) spectra?
(databas=             database) Dispersion solution database
(table  =                    ) Wavelength table for apertures
(w1     =                INDEF) Starting wavelength
(w2     =                INDEF) Ending wavelength
(dw     =                INDEF) Wavelength interval per pixel
(nw     =                INDEF) Number of output pixels
(log    =                   no) Logarithmic wavelength scale?
(flux   =                  yes) Conserve total flux?
(blank  =                   0.) Output value of points not in input
(samedis=                   no) Same dispersion in all apertures?
(global =                   no) Apply global defaults?
(ignorea=                   no) Ignore apertures?
(confirm=                   no) Confirm dispersion coordinates?
(listonl=                   no) List the dispersion coordinates only?
(verbose=                  yes) Print linear dispersion assignments?
(logfile=                    ) Log file
(mode   =                   al)
```

Figura 2.10: Parâmetros para finalizar a calibração dos espectros unidimensionais usando a tarefa *dispcor*.

2.2 Cálculo das Velocidades Radiais

Ao final da etapa de redução de dados, os espectros estão prontos (Figura 2.11) para que o *redshift* de cada galáxia seja calculado. Isso pode ser feito utilizando-se o pacote externo do IRAF *Radial Velocity Package* (RVSAO), que oferece algumas opções diferentes para a análise da velocidade radial dos objetos. Para o nosso conjunto de dados a tarefa *xcsao* se mostrou mais adequada, ela calcula a velocidade radial através da correlação cruzada com espectros de modelos com velocidades bem conhecidas, usando para tanto, linhas de emissão e absorção. Maiores informações podem ser encontradas em Kurtz & Mink (1998). É possível comparar cada espectro com uma gama de modelos de galáxias com características diversas de uma única vez e selecionar o modelo que apresenta a melhor correlação cruzada. É importante notar que os modelos (*templates*) a serem usados na tarefa *xcsao* podem estar em um diretório diferente do diretório dos espectros, mas para que a comparação com vários *templates* de uma única vez funcione corretamente, é necessário que a lista deles esteja no mesmo diretório dos espectros a serem analisados. A confiança no resultado é avaliada pelo valor-R, que é considerado aceitável quando é maior que 3,0 (Kurtz and Mink 1998).

Como estamos lidando com dados de espectroscopia multi-objetos de galáxias distantes, a razão sinal/ruído (S/N) é baixa para vários casos, o que dificulta a análise dos dados e prejudica a confiança nos resultados. Por esse motivo, os valores de *redshift* obtidos para cada galáxia foram testados em um programa em Python que desloca os espectros para seu comprimento de onda de repouso e compara com linhas de emissão e absorção (Figura 2.12), a fim de verificar se os resultados encontrados pelo RVSAO foram satisfatórios.

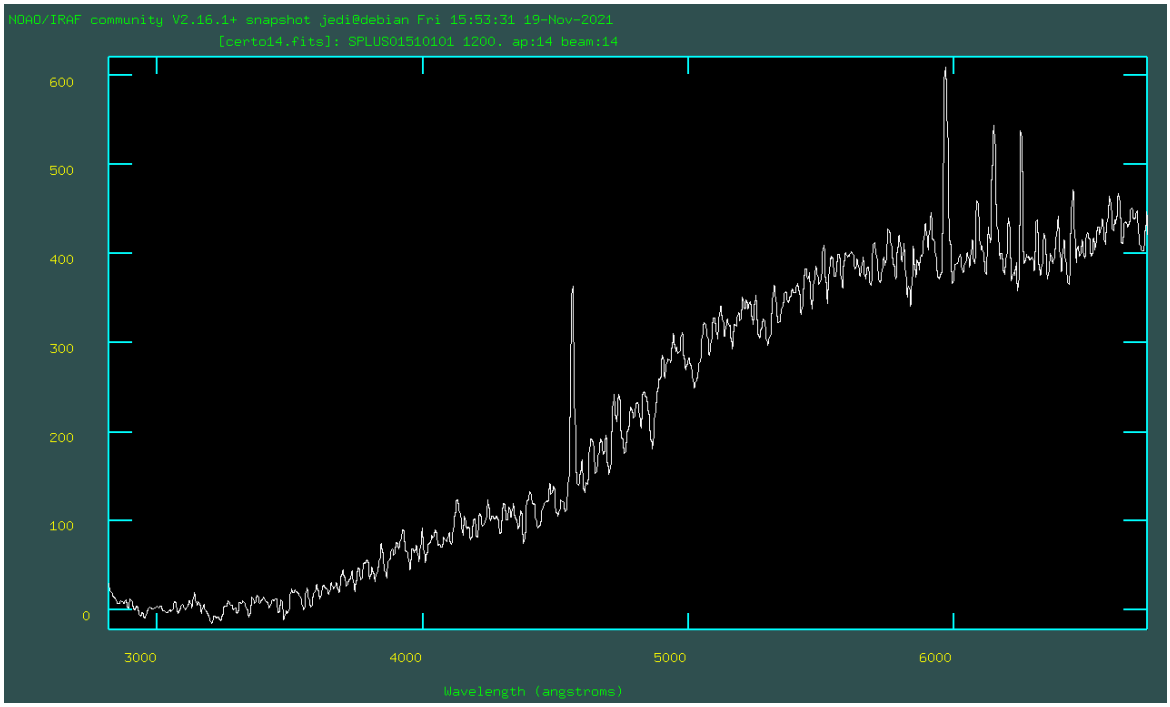

Figura 2.11: Exemplo de espectro pronto para a análise de seus dados.

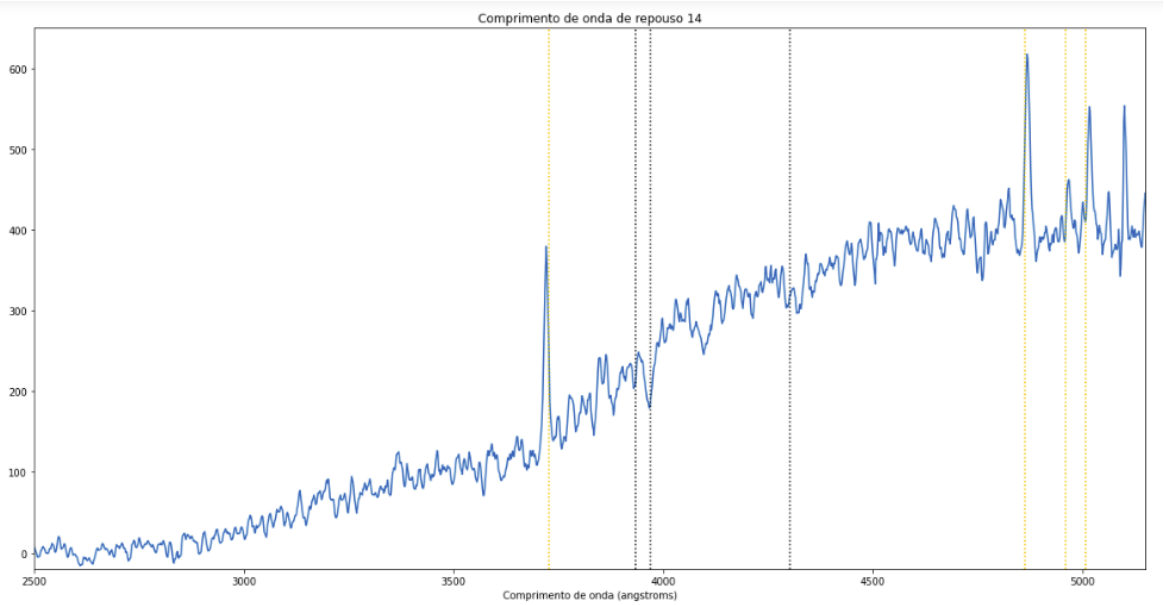

Figura 2.12: Exemplo de espectro comparado com linhas espectrais. As linhas laranjas são linhas de emissão e as pretas linhas de absorção. As linhas de absorção, da esquerda para direita, são K e H do Cálcio (3933 Å e 3969 Å), Banda-G (4303 Å). As linhas de emissão são OII (3727 Å), H_β (4862 Å) e o dubleto OIII (4959 Å e 5007Å).

Capítulo 3

Resultados

Foram analisadas imagens de 3 máscaras distintas, onde esperava-se encontrar aglomerados de galáxias, segundos dados fotométricos (Werner 2019). Na Figura 3.1 vemos as regiões do céu observadas com o SOAR. Cada uma das imagens contém 14 objetos que podem ter suas velocidades radiais calculadas e, portanto, seus *redshifts*. Com isso, podemos estimar a região do espaço em que as galáxias se encontram e confirmar a existência dos aglomerados. Os resultados são apresentados a seguir.

3.1 SPLUS2119+0117

Foram excluídos quatro objetos da análise nessa região. Um deles apresentou uma velocidade radial negativa, e foi identificado como uma estrela.Não foi possível obter uma medição satisfatória para os outros três objetos devido à baixa razão S/N. Podemos ver na Figura 3.2 o histograma dos *redshifts* medidos em 10 objetos. É possível notar uma concentração em torno de $z = 0,13$, assim, foram selecionadas as galáxias desse grupo para análise posterior. Os *redshifts* medidos para todas as galáxias se encontram na Tabela A.1.

Das 6 galáxias com velocidades radiais semelhantes, encontrou-se um *redshift* médio $\bar{z} = 0,1355 \pm 0,0012$ e uma dispersão de velocidades $\sigma = 793 \pm 24\, km/s$. As incertezas foram estimadas utilizando o método estatítico de *bootstrap* com 50000 reamostragens (o mesmo procedimento foi aplicado para os valores nas Seções 3.2 e 3.3). Na Tabela 3.1 vemos as medidas obtidas.

Figura 3.1: Regiões do céu observadas com o instrumento Goodman/SOAR. Imagens retiradas do *Legacy Survey*. A imagem mais acima corresponde à região SPLUS2119+0117, a do meio representa a região SPLUS2056+0123, e a imagem de baixo a região SPLUS01510101.

Tabela 3.1 - Medidas de *redshift* obtidas para a região SPLUS2119+0117.

SPLUS2119+0117		
id	**z**	**Valor-R**
1	0,1338 ± 0,0003	5,85
3	0,1303 ± 0,0005	4,56
5	0,1349 ± 0,0004	3,50
6	0,1394 ± 0,0005	3,55
8	0,1385 ± 0,0003	4,11
9	0,1358 ± 0,0003	4,04

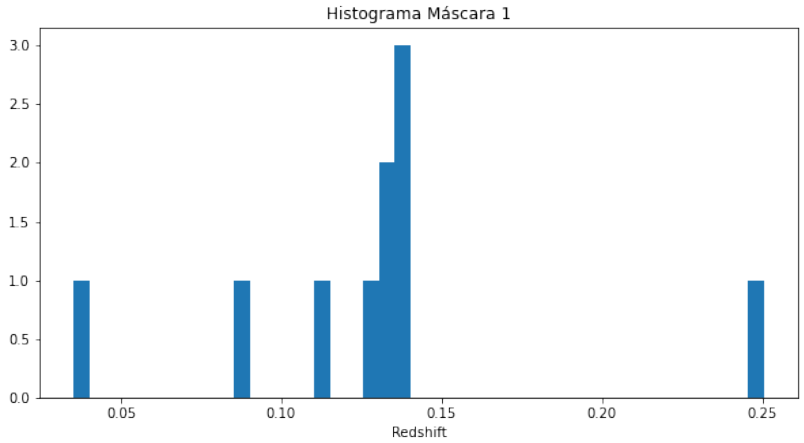

Figura 3.2: Histograma de redshifts da região SPLUS2119+0117.

3.2 SPLUS2056+0123

Para a análise dessa região do céu, novamente construímos o histograma dos *redshifts* como visto na Figura 3.3. Os objetos com espectros muito ruidosos foram excluídos. Os dados para todas as galáxias podem ser encontrados na Tabela B.1.

É possível notar que não há uma concentração clara de galáxias em um dado valor de *redshift*, apesar de existir um pico por volta de $z = 0,18$. As 4 galáxias próximas ao maior pico foram selecionadas para uma análise mais aprofundada. O *redshift* médio é $\bar{z} = 0,1771 \pm 0,0011$ e a dispersão de velocidades é $\sigma = 572 \pm 16\, km/s$. Porém, essa amostra é muito pequena, é possível incluir uma quinta galáxia que apresenta uma velocidade radial relativamente próxima a esse grupo. Com isso, obtemos um *redshift* $\bar{z} = 0,1807 \pm 0,0034$

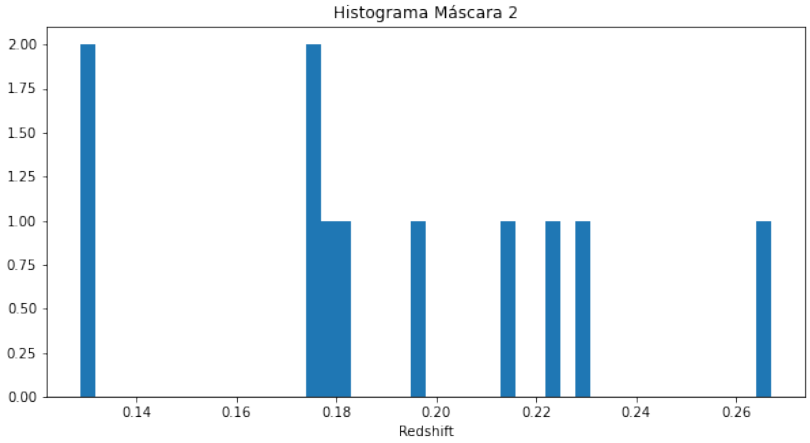

Figura 3.3: Histograma de redshifts da região SPLUS2056+0123.

e a dispersão de velocidades é $\sigma = 1920 \pm 94\, km/s$. As medidas obtidas para esse grupo estão na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Medidas de *redshift* obtidas para a região SPLUS2056+0123.

SPLUS2056+0123		
id	**z**	**Valor-R**
1	0,1953 ± 0,0001	5,04
3	0,1747 ± 0,0002	4,13
4	0,1753 ± 0,0011	3,42
5	0,1780 ± 0,0010	3,05
11	0,1804 ± 0,0003	3,18

3.3 SPLUS01510101

Durante a análise dos dados dessa máscara foi notado um erro sistemático nos resultados calculados pelo RVSAO. Como mencionado na Seção 2.2, um programa em Python foi escrito para comparar os *redshifts* obtidos com a tarefa *xcsao* com as linhas espectrais em repouso. Se o valor calculado for correto as linhas de absorção do espectro irão coincidir com as marcações no gráfico. Como é possível ver na Figura 3.4, existe uma diferença significativa. Como essa máscara apresentou objetos com uma razão S/N maior que as outras, foi possível calcular manualmente o *redshift* para 11 dos 14 objetos observados, a fim de obtermos maior confiança nos resultados. A diferença entre os valores calculados

pelo RVSAO e manualmente aumenta conforme a velocidade radial também aumenta, e é bastante similar para objetos com *redshifts* próximos. A causa desse erro é desconhecida.

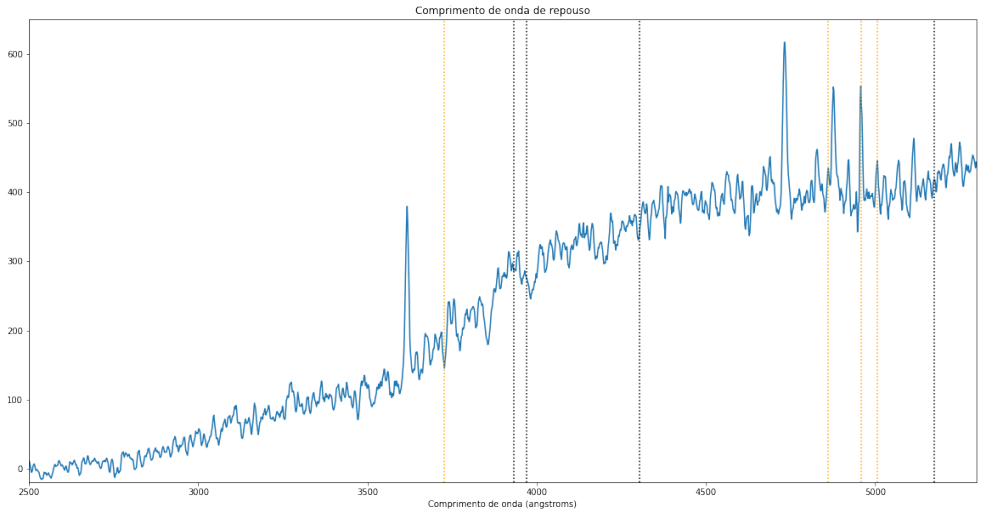

Figura 3.4: Exemplo do erro sistemático encontrado no cálculo de *redshift* do RVSAO. As linhas laranjas são linhas de emissão e as pretas linhas de absorção. As linhas de absorção, da esquerda para direita, são K e H do Cálcio (3933 Å e 3969 Å), Banda-G (4303 Å) e Magnésio I (5175 Å). As linhas de emissão são OII (3727 Å), H_β (4862 Å) e o dubleto OIII (4959 Å e 5007Å).

Com os resultados corrigidos foi construído o histograma visto na Figura 3.5. Além das três galáxias que não foram recalculadas manualmente por conta do espectro conter muito ruído, foram excluídos dois objetos com velocidade radial negativa, que claramente não fazem parte do suposto aglomerado em análise. Nota-se uma concentração na região de $z = 0,23$, onde 6 galáxias estão localizadas. Com esta seleção chegamos a um valor de *redshift* médio $\bar{z} = 0,2290 \pm 0,0011$ e dispersão de velocidades $\sigma = 521 \pm 12\,km/s$. Na Tabela 3.3 encontram-se os valores obtidos. Nota-se que a incerteza é maior do que nos casos anteriores, justamente por conta da diferente abordagem. A tabela com todos os resultados é encontrada na Tabela C.1.

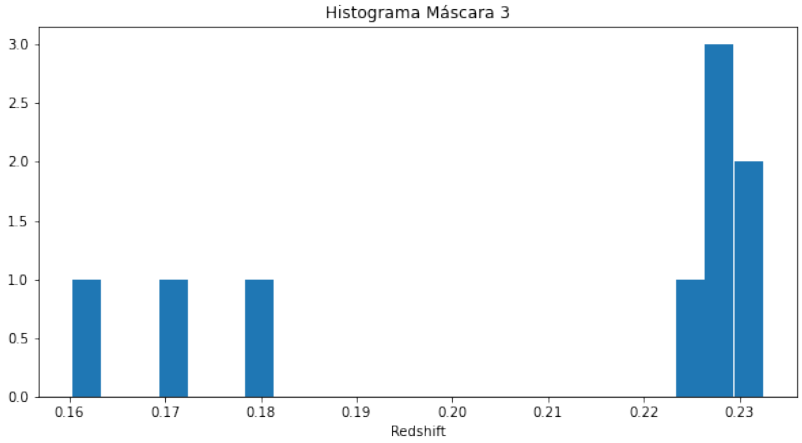

Figura 3.5: Histograma de redshifts da região SPLUS01510101, após a exclusão das galáxias de fundo.

Tabela 3.3 - Medidas de *redshift* obtidas para a região SPLUS01510101.

SPLUS01510101	
id	**z**
1	0,2266 ± 0,0010
5	0,2324 ± 0,0009
6	0,2288 ± 0,0018
7	0,2290 ± 0,0008
8	0,2308 ± 0,0008
9	0,2263 ± 0,0009

Capítulo 4

Conclusões e Perspectivas

Foram apresentadas as medidas de *redshift* de galáxias em três regiões do céu onde se esperavam encontrar aglomerados de galáxias, segundo estimativas de *redshift* fotométrico (Werner 2019). Com os resultados obtidos é possível afirmar que em duas dessas regiões (SPLUS2119+0117 e SPLUS01510101) existem, de fato, aglomerados de galáxias.

No caso de SPLUS2119+0117 foram identificadas 6 galáxias que fazem parte do aglomerado, localizado aproximadamente em $\bar{z} = 0,1355 \pm 0,0012$. Apesar da amostra pequena de membros do aglomerado é possível estimar pela dispersão de velocidades $\sigma = 793 \pm 24\, km/s$ que trata-se de um aglomerado de médio porte. O redshift fotométrico estimado para este objeto no trabalho realizado por Werner (2019) é $z = 0,145$, que é um valor razoavelmente próximo do encontrado usando os dados espectroscópicos.

Para a região SPLUS01510101 também foram identificadas 6 galáxias que compõem o aglomerado, que se localiza em um *redshift* por volta de $\bar{z} = 0,2290 \pm 0,0011$. Pela dispersão de velocidades $\sigma = 521 \pm 12\, km/s$ pode-se estimar que é um aglomerado de pequeno porte, ou grupo de galáxias. Pelos dados fotométricos anteriores, era esperado que fosse encontrado um aglomerado nessa parte do céu com *redshift* aproximadamente $z = 0,175$. Embora os valores não sejam concordantes, os dados espectroscópicos são mais precisos. Além disso, foram localizadas galáxias com velocidades radiais próximas da estimativa de fotometria, porém em número muito pequeno para que se possa afirmar algo a respeito da existência de um aglomerado nessa região.

Por último, na região SPLUS2056+0123 foi encontrada uma concentração de galáxias por volta de $\bar{z} = 0,1771 \pm 0,0011$. Nesse caso, existem 4 galáxias muito próximas, que apresentam dispersão de velocidades $\sigma = 571 \pm 16\, km/s$, o que caracteriza um aglomerado pequeno. Entretanto, essa amostra é muito limitada para que se tenha certeza.

Incluindo na análise uma quinta galáxia como pertencente ao aglomerado encontra-se o valor $\sigma = 1920 \pm 94\, km/s$, que é muito alto, isso implica que os objetos estudados não estão ligados gravitacionalmente e não fazem parte de uma única estrutura. Logo, os resultados obtidos para esse campo de observação são inconclusivos e necessitam estudos posteriores. A estimativa dos dados fotométricos para esse candidato a aglomerado é $z = 0,145$ (Werner 2019).

É possível estimar as massas dos dois aglomerados encontrados através da relação demonstrada em Biviano et al.(2006), que representa uma boa aproximação, dado o número pequeno de nossa amostra. A equação que relaciona a massa do aglomerado e sua dispersão de velocidades é:

$$M_v \equiv A \left(\frac{\sigma_v}{10^3\, kms^{-1}} \right)^3 \times 10^{14} h^{-1} M_\odot \,, \tag{4.1}$$

onde $A = 1,50 \pm 0,02$. Apesar de σ_v não ser diretamente observável, é possível encontrar esse valor baseado apenas na dispersão de velocidades na linha de visada. Assumindo que não há uma direção preferencial na dispersão de velocidades, usamos $\sigma_v = \sqrt{3}\sigma$ e $h = 0,7$ obtemos uma primeira aproximação para a massa de virial desses objetos. Com isso temos os valores mostrados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Medidas de massa para os aglomerados. O asterisco indica o objeto que necessita estudos posteriores.

Massas dos Aglomerados

Região	**Massa** ($10^{14} M_\odot$)
SPLUS2119+0117	5,55 ± 0,10
SPLUS2056+0123(*)	2,08 ± 0,04
SPLUS01510101	1,58 ± 0,03

Referências Bibliográficas

Biviano, A., Murante, G., Borgani, S. et al., 2006, On the efficiency and reliability of cluster mass estimates based on member galaxies, A&A, 456, 23B.

Clemens, J. C., Crain, J. A., & Anderson, R., 2004, The Goodman Spectrograph, Proceedings of the SPIE, 5492, 331-340.

Cypriano, E. S., 2014, Observações de Aglomerados de Galáxias, Tese de Livre-Docência, IAG/USP, São Paulo.

Girardi, M., Ciuricin, G., Mardirossian, F. et al., Optical Mass Estimates of Galaxy Cluster. ApJ 506, 45

Gonzalez, A., 2014, Cluster detection via wavelets. In *Building the Euclid Cluster Survey - Scientific Program, proceedings of a conference held July 6-11 2014 at the Sexten Center fo Astrophysics.*

Kurtz, M. J. and Mink, D. J., 1998, RVSAO 2.0: Digital Redshifts and Radial Velocities, PASP 110, 934.

Lima Neto, G.B. 2020, Notas de Aula: Astronomia Extragaláctica e Cosmologia. Notas de Aula, acesso em 18/10/2021.

Mendes de Oliveira, C., Ribeiro, T., Schoenell, W. et al., The Southern Photometric Local Universe Survey (S-PLUS): improved SEDs, morphologies, and redshifts with 12 optical filters. MNRAS, 2019, 489, 241-267.

Voit G. M., 2005, Tracing cosmic evolution with cluster galaxies, Reviews of Modern Physics, 77, 207

Werner, S. V. 2019, SPACE: S-PLUS GAlaxy Cluster CataloguE DR1 Stripe 82; Dissertação de Mestrado IAG-USP.

Apêndice

Apêndice A

SPLUS2119+0117

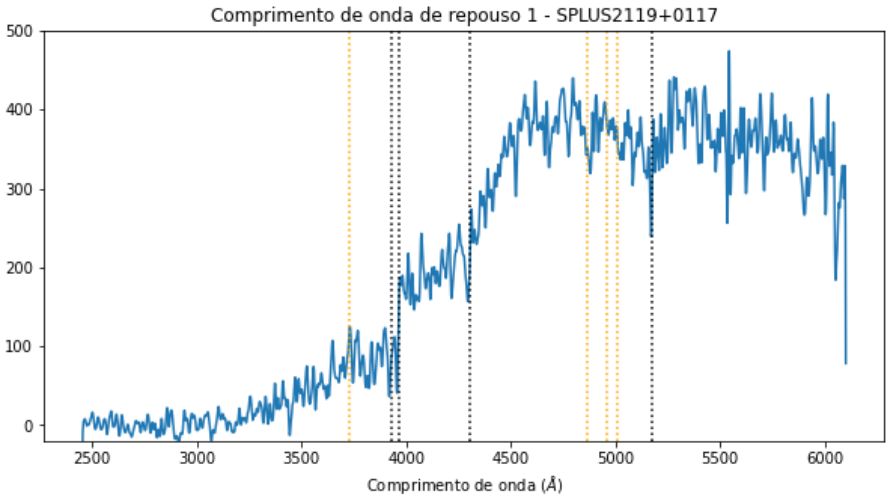

Figura A.1: Espectro da galáxia 1 da região SPLUS2119+0117. As linhas laranjas são linhas de emissão e as pretas linhas de absorção. As linhas de absorção, da esquerda para direita, são K e H do Cálcio (3933 Å e 3969 Å), Banda-G (4303 Å) e Magnésio I (5175 Å). As linhas de emissão são OII (3727 Å), H_β (4862 Å) e o dubleto OIII (4959 Å e 5007Å).

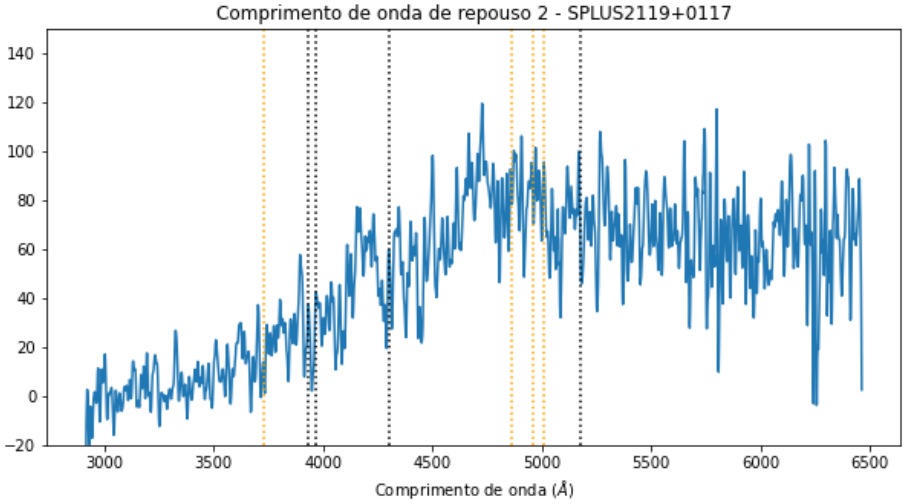

Figura A.2: Espectro da galáxia 2 da região SPLUS2119+0117.

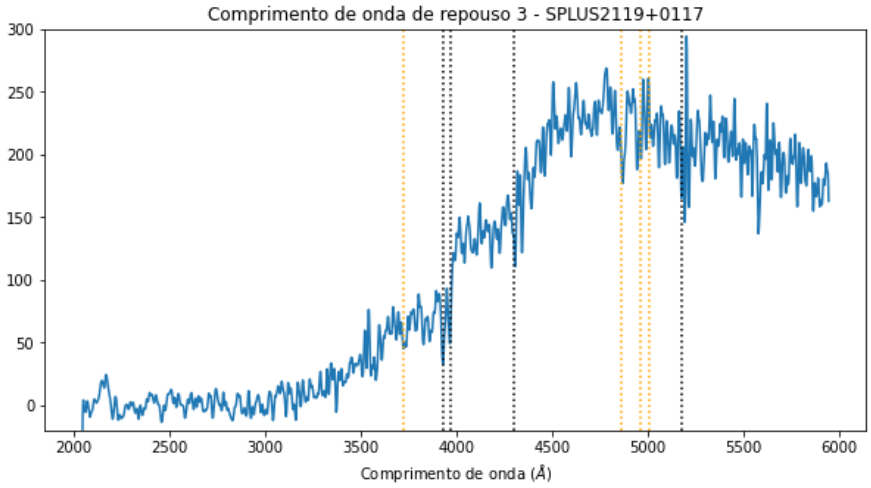

Figura A.3: Espectro da galáxia 3 da região SPLUS2119+0117.

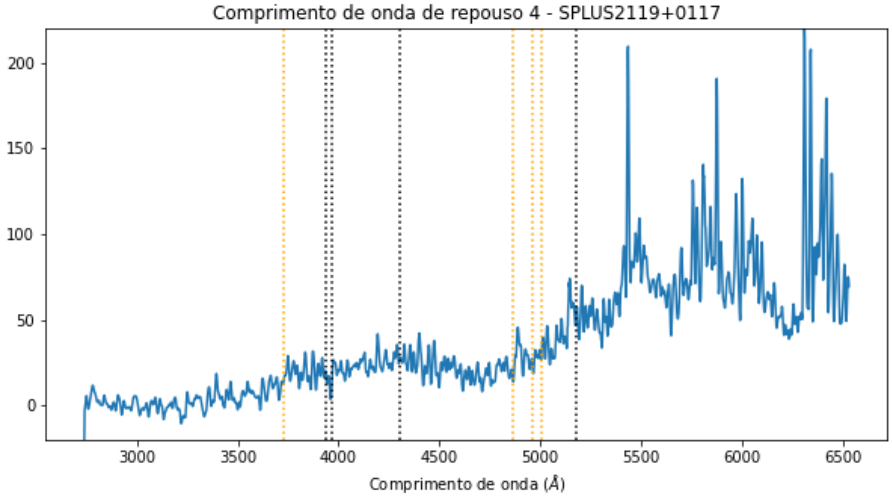

Figura A.4: Espectro da galáxia 4 da região SPLUS2119+0117.

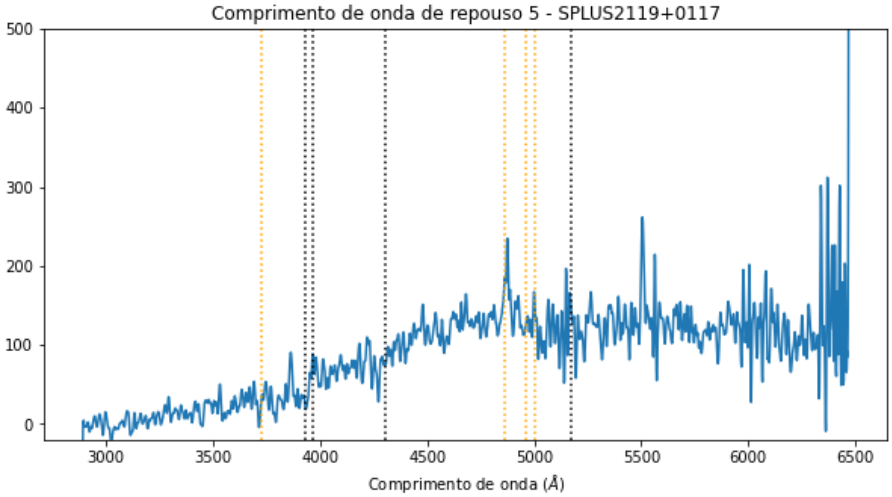

Figura A.5: Espectro da galáxia 5 da região SPLUS2119+0117.

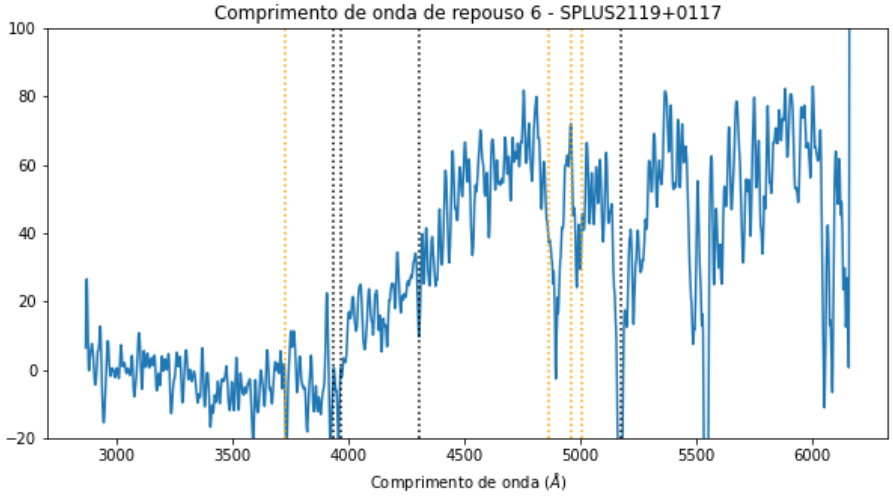

Figura A.6: Espectro da galáxia 6 da região SPLUS2119+0117.

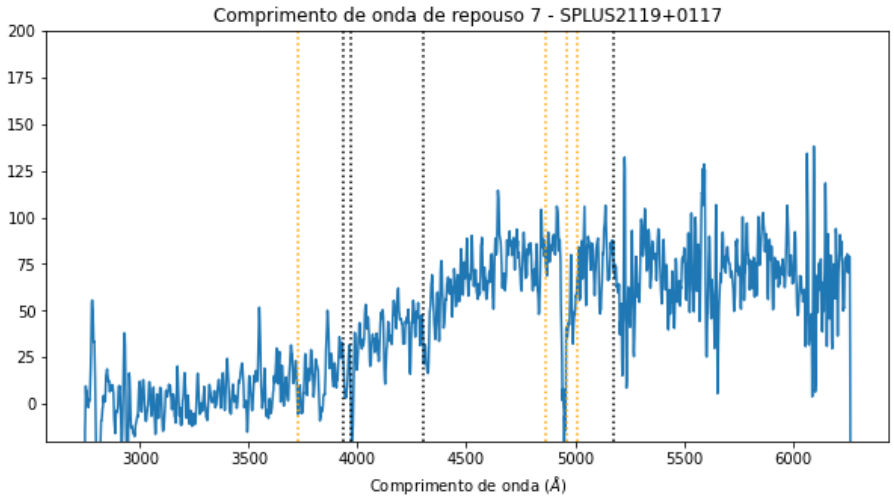

Figura A.7: Espectro da galáxia 7 da região SPLUS2119+0117.

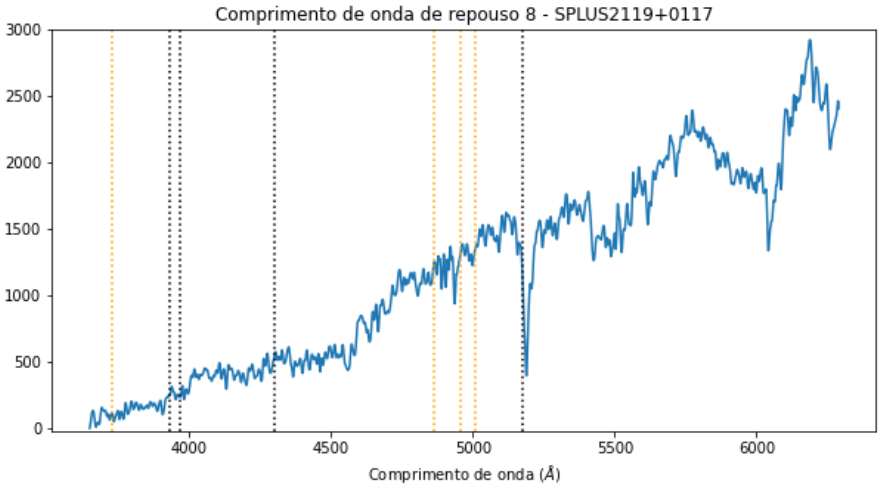

Figura A.8: Espectro da galáxia 8 da região SPLUS2119+0117.

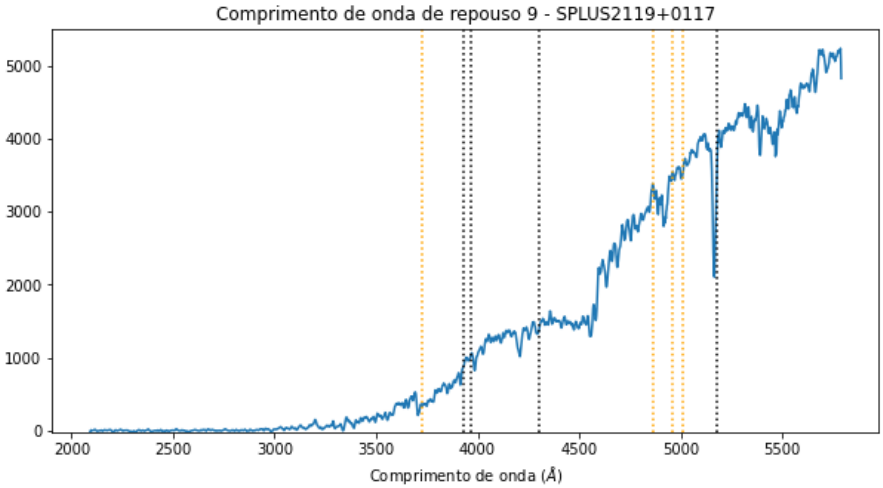

Figura A.9: Espectro da galáxia 9 da região SPLUS2119+0117.

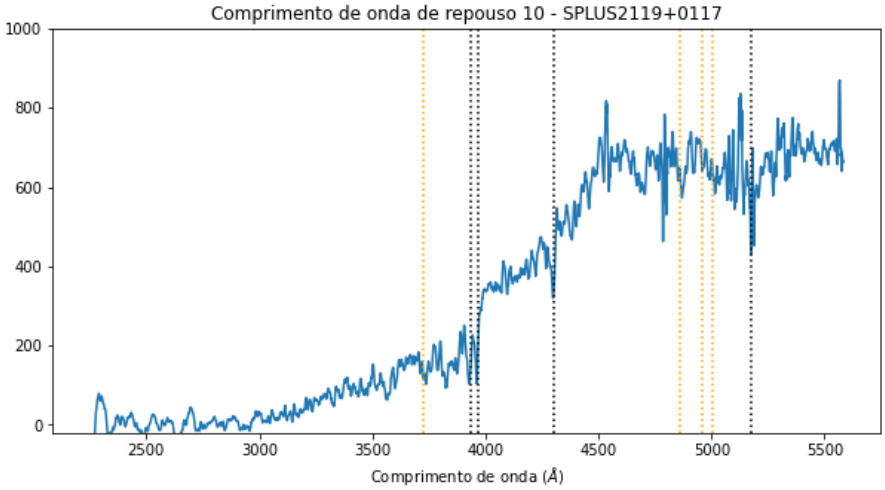

Figura A.10: Espectro da galáxia 10 da região SPLUS2119+0117.

Tabela A.1 - Medidas de *redshift* obtidas para a região SPLUS2119+0117.

SPLUS2119+0117		
id	**z**	**Valor-R**
1	0,1338 ± 0,0003	5,85
2	0,0899 ± 0,0003	3,10
3	0,1303 ± 0,0005	4,56
4	0,0353 ± 0,0002	4,09
5	0,1349 ± 0,0004	3,50
6	0,1394 ± 0,0005	3,55
7	0,1127 ± 0,0003	2,40
8	0,1385 ± 0,0003	4,11
9	0,1358 ± 0,0003	4,04
10	0,2479 ± 0,0002	8,58

Apêndice B

SPLUS2056+0123

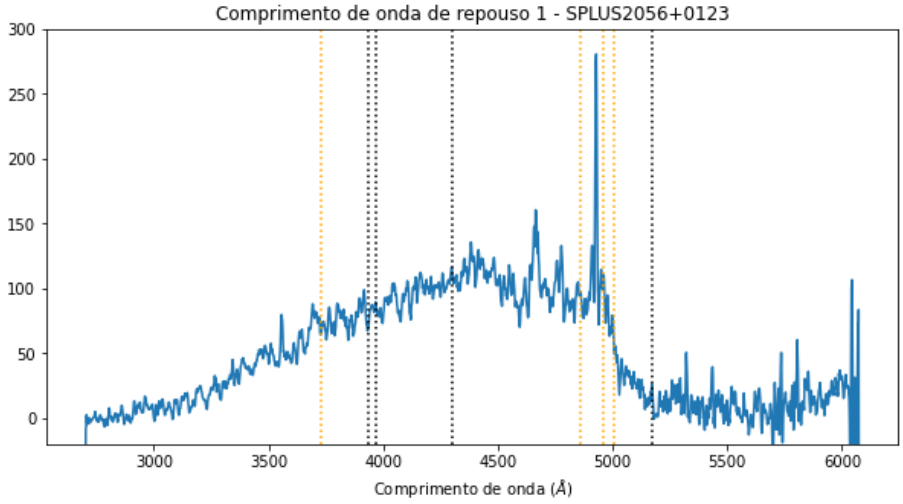

Figura B.1: Espectro da galáxia 1 da região SPLUS2056+0123. As linhas laranjas são linhas de emissão e as pretas linhas de absorção. As linhas de absorção, da esquerda para direita, são K e H do Cálcio (3933 Å e 3969 Å), Banda-G (4303 Å) e Magnésio I (5175 Å). As linhas de emissão são OII (3727 Å), H_β (4862 Å) e o dubleto OIII (4959 Å e 5007Å).

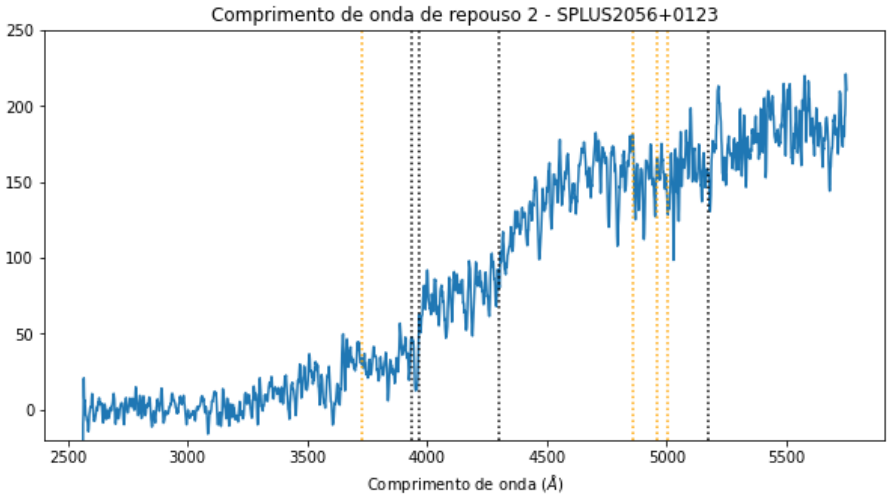

Figura B.2: Espectro da galáxia 2 da região SPLUS2056+0123.

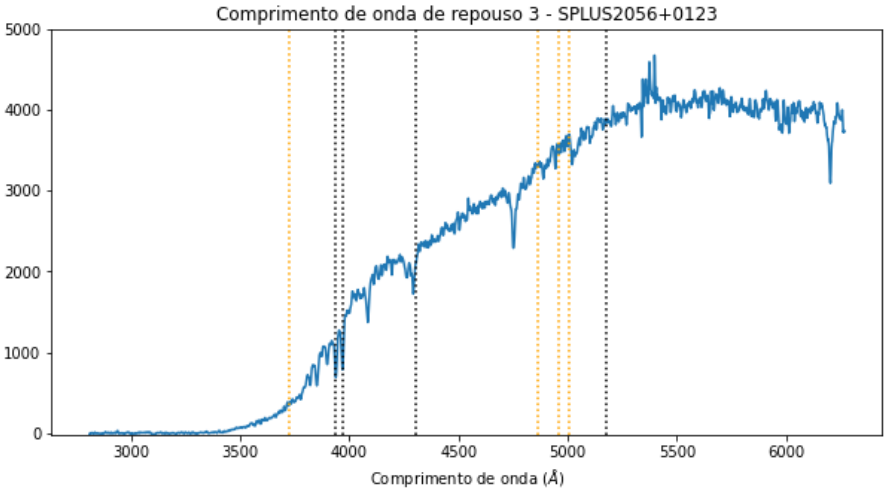

Figura B.3: Espectro da galáxia 3 da região SPLUS2056+0123.

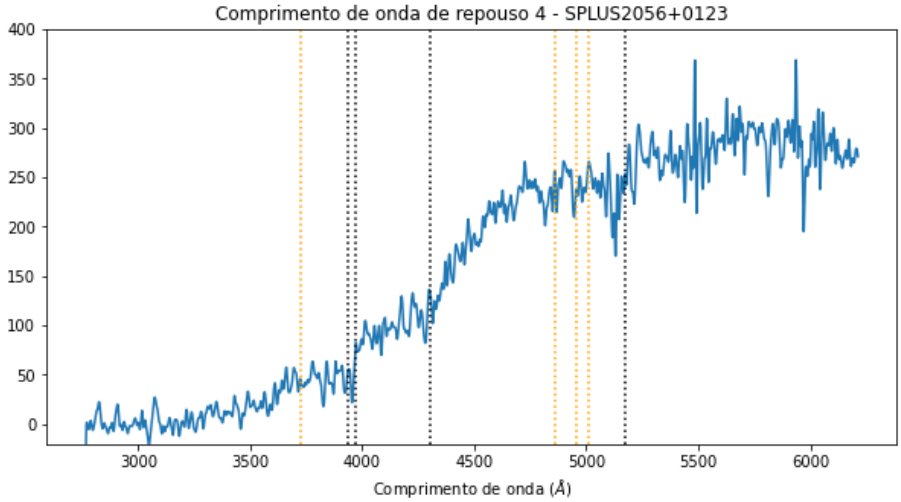

Figura B.4: Espectro da galáxia 4 da região SPLUS2056+0123.

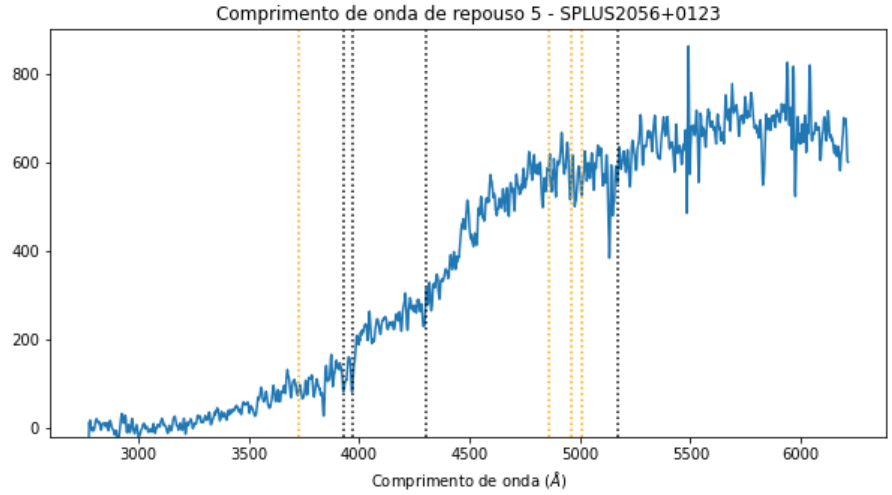

Figura B.5: Espectro da galáxia 5 da região SPLUS2056+0123.

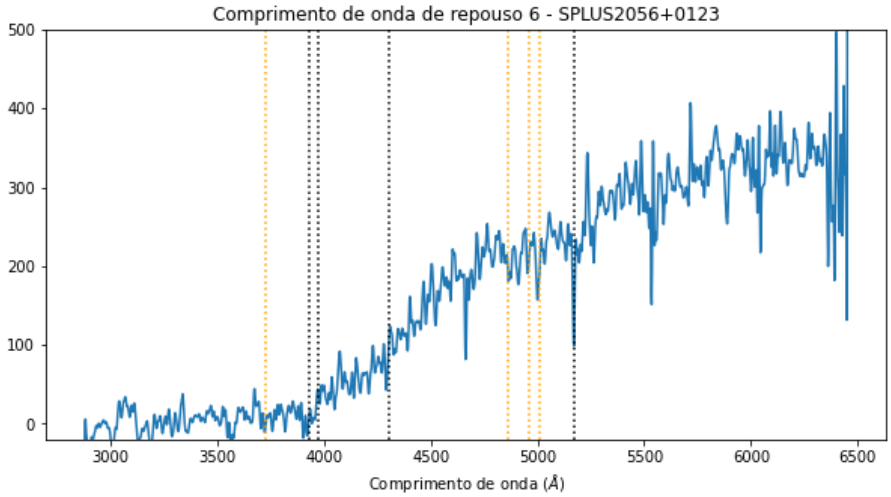

Figura B.6: Espectro da galáxia 6 da região SPLUS2056+0123.

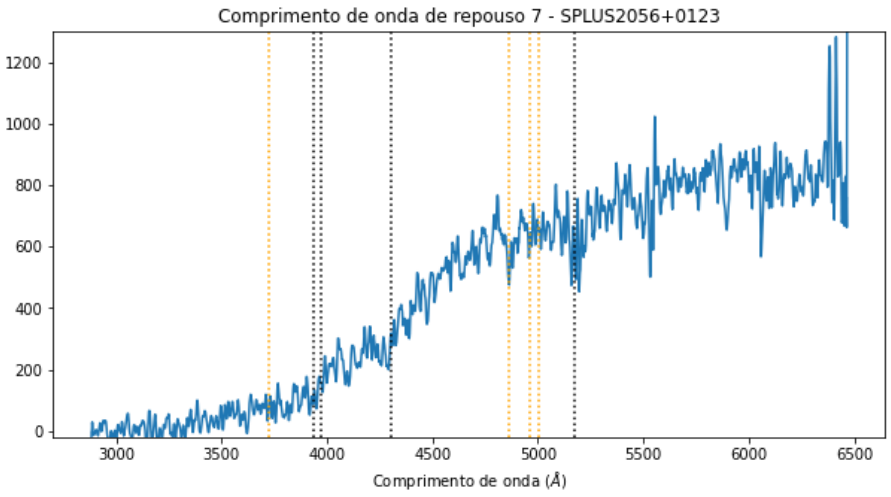

Figura B.7: Espectro da galáxia 7 da região SPLUS2056+0123.

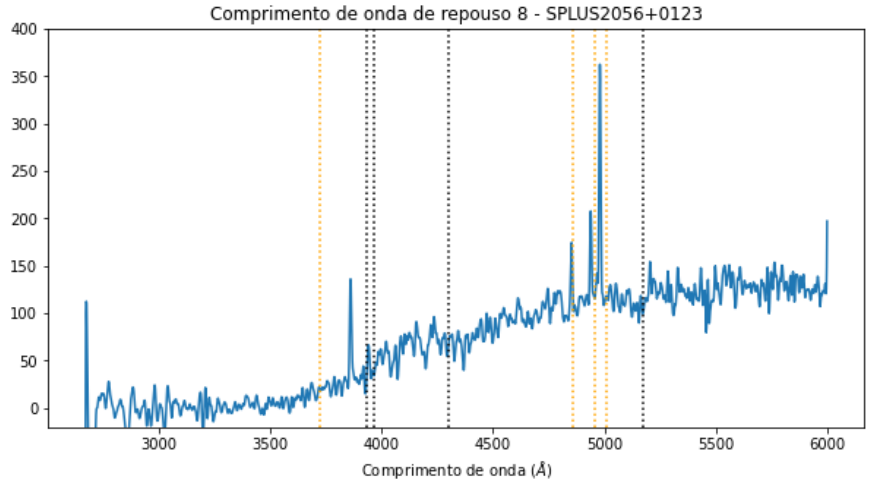

Figura B.8: Espectro da galáxia 8 da região SPLUS2056+0123.

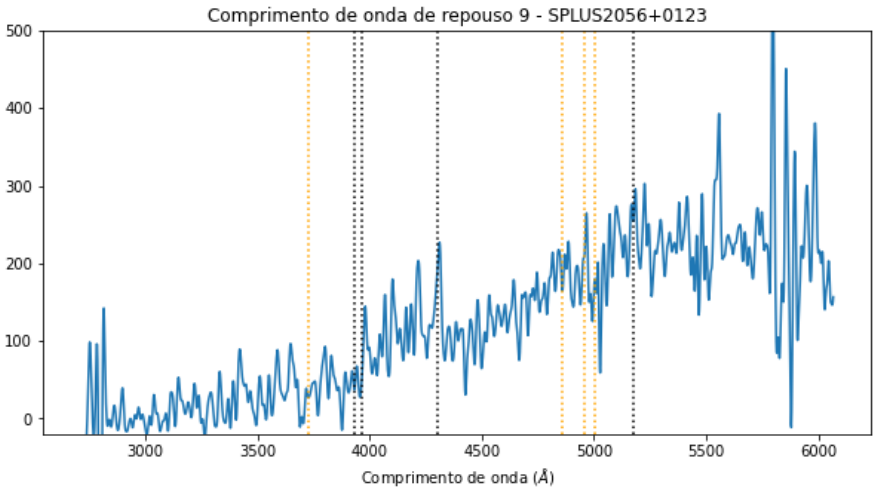

Figura B.9: Espectro da galáxia 9 da região SPLUS2056+0123.

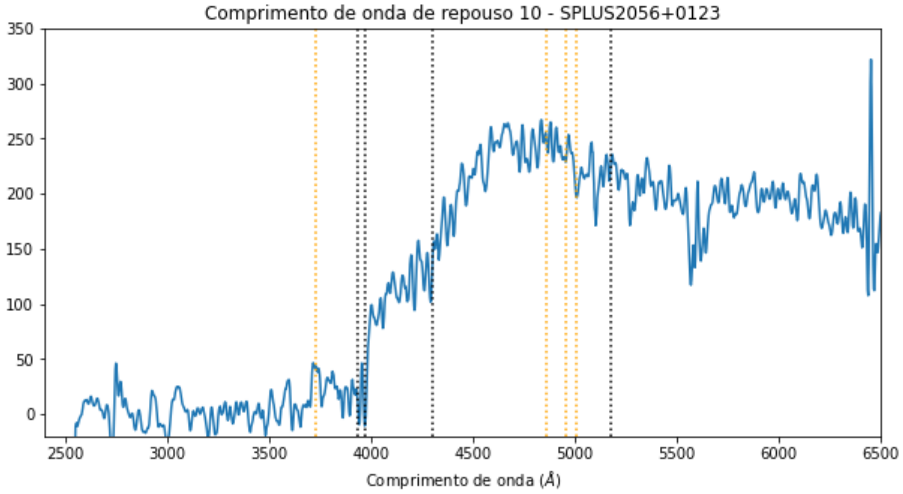

Figura B.10: Espectro da galáxia 10 da região SPLUS2056+0123.

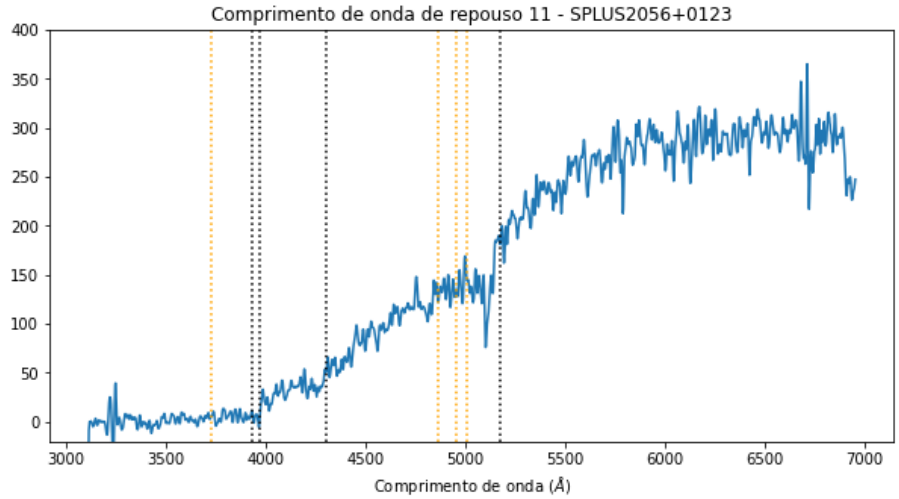

Figura B.11: Espectro da galáxia 11 da região SPLUS2056+0123.

Tabela B.1 - Medidas de *redshift* obtidas para a região SPLUS2056+0123.

SPLUS2056+0123

id	**z**	**Valor-R**
1	0,1953 ± 0,0001	5,04
2	0,2641 ± 0,0002	3,07
3	0,1747 ± 0,0002	4,13
4	0,1753 ± 0,0011	3,42
5	0,1780 ± 0,0010	3,05
6	0,1312 ± 0,0002	4,78
7	0,1289 ± 0,0003	4,91
8	0,2296 ± 0,0003	5,47
9	0,2148 ± 0,0002	2,49
10	0,2227 ± 0,0001	3,39
11	0,1804 ± 0,0003	3,18

Apêndice C

SPLUS01510101

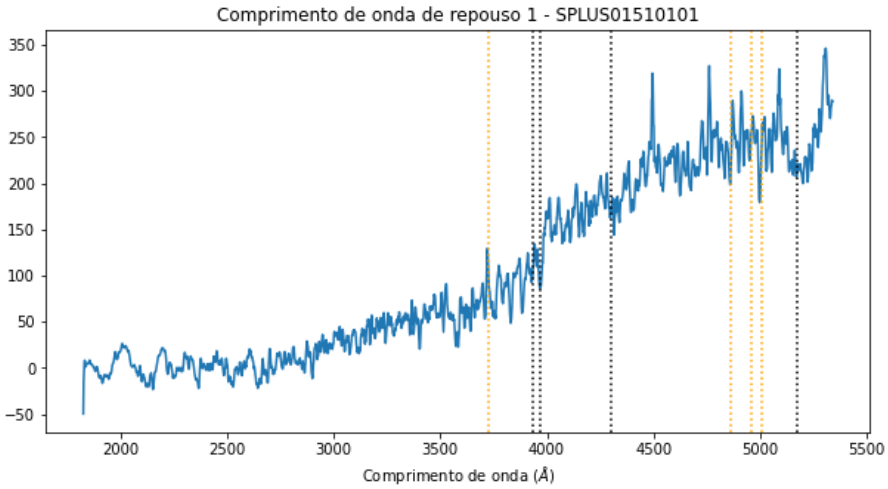

Figura C.1: Espectro da galáxia 1 da região SPLUS01510101. As linhas laranjas são linhas de emissão e as pretas linhas de absorção. As linhas de absorção, da esquerda para direita, são K e H do Cálcio (3933 Å e 3969 Å), Banda-G (4303 Å) e Magnésio I (5175 Å). As linhas de emissão são OII (3727 Å), H_β (4862 Å) e o dubleto OIII (4959 Å e 5007Å).

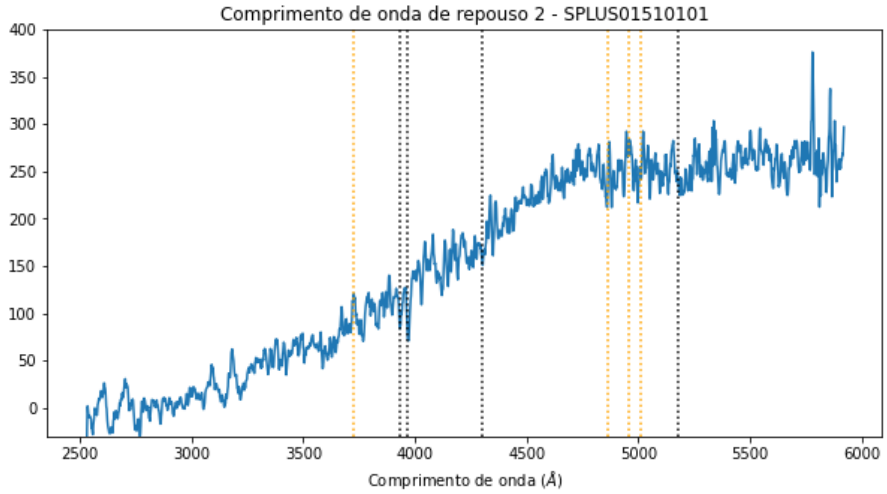

Figura C.2: Espectro da galáxia 2 da região SPLUS01510101.

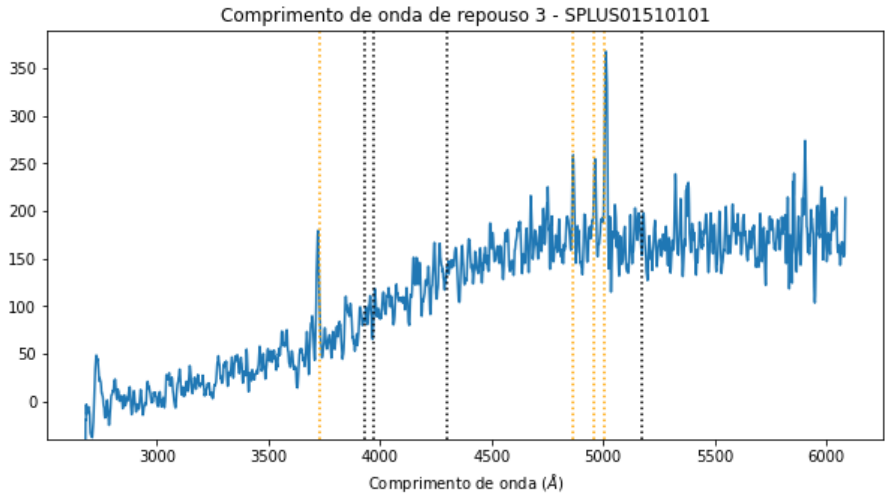

Figura C.3: Espectro da galáxia 3 da região SPLUS01510101.

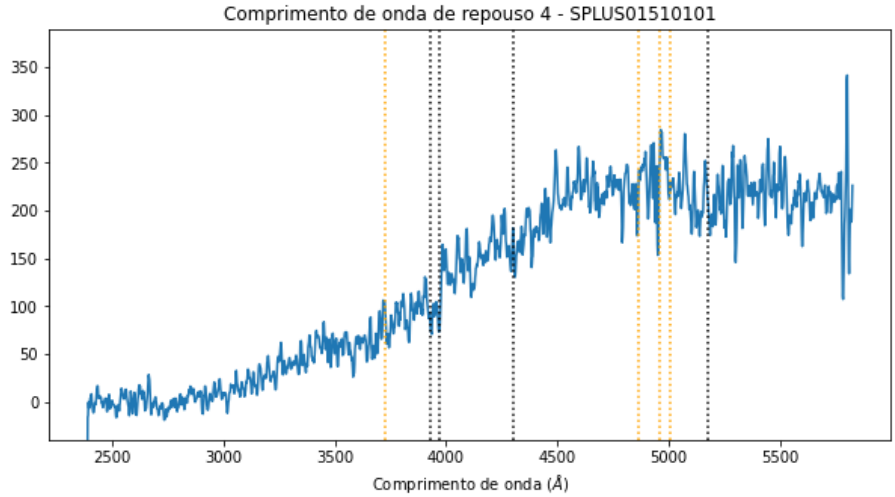

Figura C.4: Espectro da galáxia 4 da região SPLUS01510101.

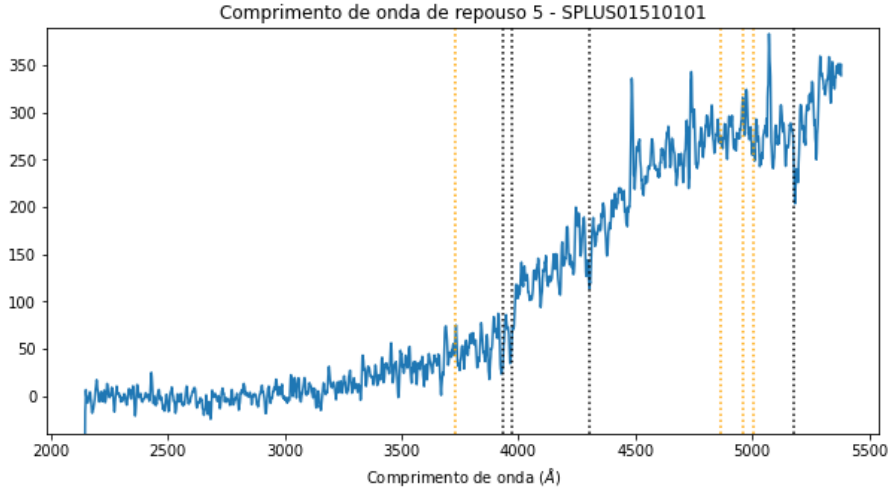

Figura C.5: Espectro da galáxia 5 da região SPLUS01510101.

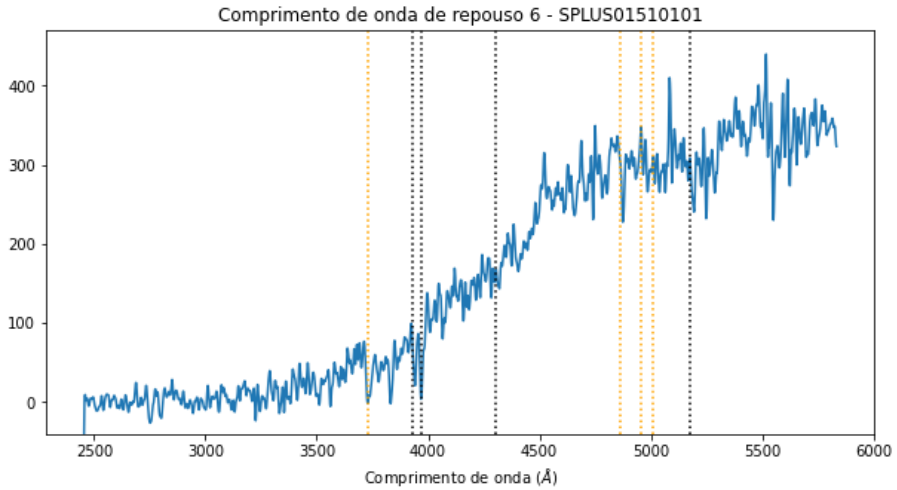

Figura C.6: Espectro da galáxia 6 da região SPLUS01510101.

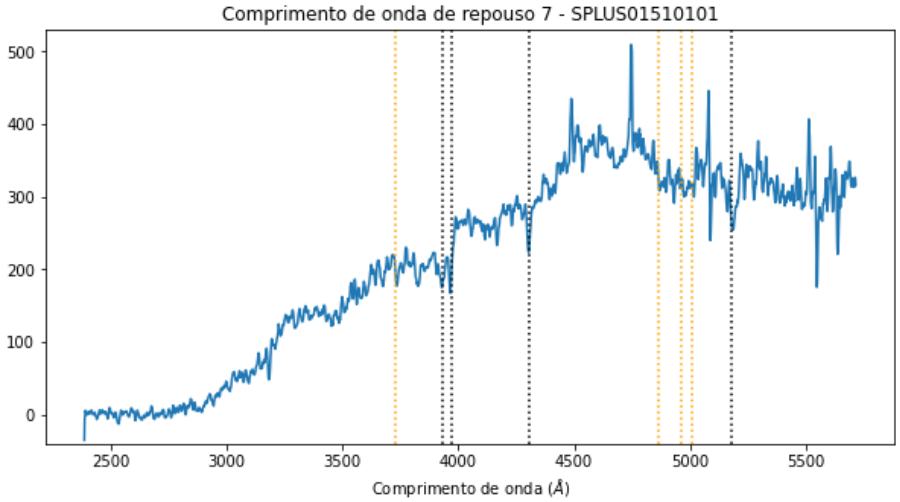

Figura C.7: Espectro da galáxia 7 da região SPLUS01510101.

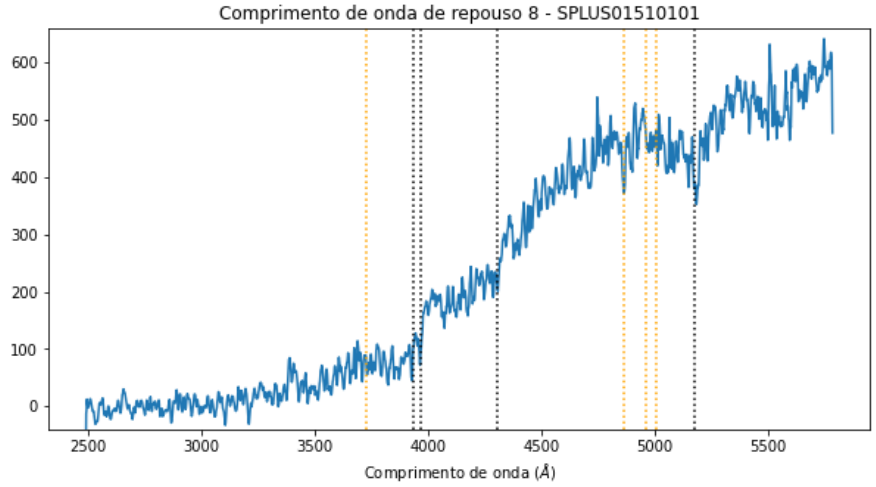

Figura C.8: Espectro da galáxia 8 da região SPLUS01510101.

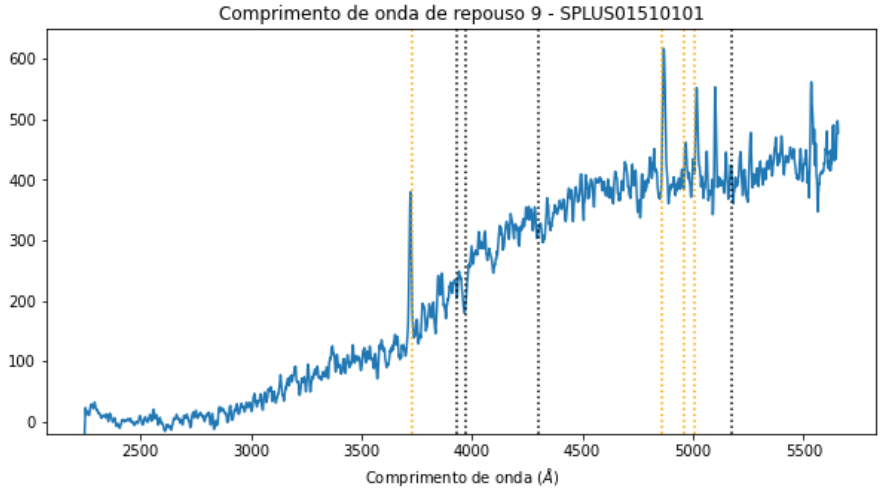

Figura C.9: Espectro da galáxia 9 da região SPLUS01510101.

Tabela C.1 - Medidas de *redshift* obtidas para a região SPLUS2056+0123.

SPLUS2056+0123	
id	**z**
1	0,2266 ± 0,0010
2	0,1699 ± 0,0002
3	0,1604 ± 0,0010
4	0,1808 ± 0,0007
5	0,2324 ± 0,0009
6	0,2288 ± 0,0018
7	0,2290 ± 0,0008
8	0,2308 ± 0,0008
9	0,2263 ± 0,0009