

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
INSTITUTO DE FÍSICA  
DEPARTAMENTO DE ASTRONOMIA

Investigando as populações estelares  
de galáxias Starburst através de  
espectroscopia no infravermelho próximo\*

Natacha Zanon Dametto

Dissertação realizada sob orientação do Prof. Dr. Rogério Riffel e apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Física da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Física.

Porto Alegre, RS, Brasil  
Julho de 2014

\* Trabalho financiado pelo CNPq

*“I was born not knowing and have had only a little time  
to change that here and there.”*

**Richard Feynman**

(Letter to Armando Garcia J, December 11, 1985.)

# Agradecimentos

★ Ao Rogério, meu professor, paraninfo, orientador e grande amigo, por todo o apoio e compreensão durante todos esses anos.

★ À minha mãe, meu pai e meu irmão, pelo apoio incondicional na minha escolha profissional, assim como pelo amor e compreensão nas horas mais difíceis.

★ Ao meu amigo, namorado e colega de trabalho Guilherme, pelo carinho e companheirismo nas madrugadas de trabalho, além do incentivo nos momentos mais incertos.

★ Aos meus amigos, pela compreensão das repetidas ausências e pelos bons encontros regados a muitas risadas.

★ Aos meus colegas de pós-graduação e também grandes amigos (em especial: Anelise, Jaderson, José e Eduardo) pelas inúmeras discussões, fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho, e pelas noites divertidas de paddle.

★ À Miriani, pelas ótimas aulas e pelos conselhos, que me ajudaram durante esse período importante da minha vida.

# Resumo

Utilizamos espectros obtidos com o espectrógrafo SpeX (em 0.8-2.4 $\mu$ m), anexado ao telescópio de 3m IRTF (*Infrared Telescope Facility*) da NASA, para investigar a distribuição espacial das populações estelares (SPs) em quatro galáxias *Starburst*: NGC 34, NGC 1614, NGC 3310 e NGC 7714. O código usado neste trabalho foi o STARLIGHT, atualizado com os modelos de populações estelares simples calculados por Maraston (2005). Nossos principais resultados são: a luz do infravermelho próximo, no entorno da região nuclear das galáxias, é dominada por SPs de idade jovem ( $t \leq 50 \times 10^6$  anos) a intermediária ( $50 \times 10^6 < t \leq 2 \times 10^9$  anos), somando de 40% a 100% da contribuição em luz. O predomínio de SPs de idade jovem a intermediária também é observado na região central das galáxias, com exceção de NGC 1614, para a qual a contribuição da SP velha ( $t \geq 2 \times 10^9$  anos) prevalece no núcleo. Além disso, encontramos evidências de uma estrutura em forma de anel circumnuclear de formação estelar e de um núcleo secundário em NGC 1614, em concordância com resultados da literatura. Também sugerimos que o processo de interação e/ou fusão em três das galáxias da amostra (NGC 1614, NGC 3310 e NGC 7714) pode explicar os baixos valores de metalicidade derivados para a componente jovem de SP dessas fontes. Nesse cenário, o gás não processado, pobre em metais, da galáxia companheira teria escoado para a região central das galáxias e diluído o gás já presente nessa região, antes de começar o último surto de formação estelar. No intuito de aprofundarmos nossa análise, aplicamos o mesmo procedimento de síntese de SP para os novos modelos de síntese evolutiva de SP de Maraston & Strömbäck (2011). Nossos resultados mostram que os novos modelos, de mais alta resolução espectral, tendem a realçar a contribuição da componente velha e intermediária da SP, em detrimento das idades mais jovens.

# Abstract

We employ the NASA 3m Infrared Telescope Facility's near-infrared spectrograph SpeX at 0.8-2.4 $\mu$ m to investigate the spatial distribution of the stellar populations (SPs) in four well known Starburst galaxies: NGC 34, NGC 1614, NGC 3310 and NGC 7714. We use the STARLIGHT code updated with the synthetic simple stellar populations models computed by Maraston (2005). Our main result is that the NIR light in the nuclear surroundings of the galaxies is dominated by young ( $t \leq 50 \times 10^6$  yr) to intermediate age ( $50 \times 10^6 < t \leq 2 \times 10^9$  yr) SPs, summing from  $\sim 40\%$  up to 100% of the light contribution. A predominance of young to intermediate age SP is also observed in the central region of the galaxies, except for NGC 1614 in which the old SP ( $t \geq 2 \times 10^9$  yr) prevails in the nucleus. Furthermore, we find evidence of a circumnuclear star-forming ring-like structure and a secondary nucleus in NGC 1614, in agreement with previous studies. We also suggest that the merger/interaction experienced by three of the galaxies studied (NGC 1614, NGC 3310 and NGC 7714) can explain the lower metallicity values derived for the young SP component in these sources. In this scenario, the fresh unprocessed metal poor gas from the destroyed/interacting companion galaxy is driven to the centre of the galaxies and mixed with the central region gas, before star formation takes place. In order to deepen our analysis, we apply the same procedure of SP synthesis using Maraston & Strömbäck (2011) the evolutionary population synthesis models. Our results show that the newer and higher resolution models tend to enhance the old/intermediate age SP contribution over the younger ages.

# Abreviaturas

- AGN: Núcleos ativo de galáxias (*Active Galactic Nuclei*).
- EPS: Síntese evolutiva de população estelar (*Evolutionary Population Synthesis*).
- FIR: Infravermelho distante (*Far-Infrared*).
- FUV: Ultravioleta distante (*Far-Ultraviolet*).
- IFU: Unidade de campo integral (*Integral Field Unit*).
- IMF: Função de massa inicial (*Initial Mass Function*).
- IR: Infravermelho (*Infrared*).
- LINER: Região nuclear de linhas de emissão de baixa ionização (*Low-ionization Nuclear Emission-line Region*).
- LIRG: Galáxia Luminosa no infravermelho (*Luminous Infrared Galaxy*).
- MIR: Infravermelho médio (*Mid Infrared*).
- NIR: Infravermelho próximo (*Near Infrared*).
- RSG: Supergigante vermelha (*Red Supergiant*).
- SB: Galáxia Starburst (*Starburst Galaxy*).
- SED: Distribuição espectral de energia (*Spectral Energy Distribution*).
- SFH: Histórico de formação estelar (*Star Formation History*).
- SFR: Taxa de formação estelar (*Star Formation Rate*).
- SMC: Pequena Nuvem de Magalhães (*Small Magellanic Cloud*).
- SNR: Razão sinal-ruído (*Signal-to-Noise Ratio*).
- SP: População estelar (*Stellar Population*).
- SSP: População estelar simples (*Simple Stellar Population*).
- TP-AGB: Pulsos térmicos do ramo assintótico das gigantes (*Thermally Pulsing Asymptotic Giant Branch*).
- UV: Ultravioleta (*Ultraviolet*).

# Conteúdo

<b>Conteúdo</b>	<b>VI</b>
<b>Lista de Tabelas</b>	<b>VIII</b>
<b>Lista de Figuras</b>	<b>1</b>
<b>1 Introdução</b>	<b>2</b>
1.1 Galáxias Starburst . . . . .	2
1.2 Objetivos . . . . .	6
<b>2 A Amostra</b>	<b>7</b>
2.1 Estudos Anteriores da População Estelar da Amostra . . . . .	8
<b>3 Dados</b>	<b>13</b>
3.1 Observações e redução de dados . . . . .	13
<b>4 Método de Síntese de População Estelar</b>	<b>21</b>
4.1 A Base de Elementos . . . . .	22
4.2 O Código: STARLIGHT . . . . .	25
4.3 As Incertezas no Ajuste . . . . .	27
<b>5 Resultados e Discussão</b>	<b>29</b>
5.1 NGC 34 . . . . .	39
5.2 NGC 1614 . . . . .	40
5.3 NGC 3310 . . . . .	41
5.4 NGC 7714 . . . . .	44
5.5 Gás em Emissão . . . . .	45
5.6 Comparação entre os modelos de M05 e M11 . . . . .	55
<b>6 Conclusões</b>	<b>58</b>

<b>CONTEÚDO</b>	<b>VII</b>
<b>Apêndice A: Ajustes</b>	<b>61</b>
<b>Apêndice B: Artigo</b>	<b>79</b>
Dametto et al. (2014) . . . . .	79
<b>Referências Bibliográficas</b>	<b>80</b>



# Lista de Tabelas

3.1	Registro das Observações . . . . .	15
5.1	Resultados médios da síntese de população estelar . . . . .	38
5.2	Comparação dos valores de $A_v$ para NGC 1614. . . . .	43
5.3	Comparação dos valores de $A_v$ para NGC 7714. . . . .	45
5.4	Valores de SFR encontrados na literatura . . . . .	51
5.5	Fluxos observados . . . . .	52
5.6	Parâmetros físicos estimados para a amostra . . . . .	53
5.7	Fluxos corrigidos por avermelhamento . . . . .	54

# Lista de Figuras

1.1	Espectros nucleares . . . . .	4
2.1	Ponte de matéria entre NGC 7714 e NGC 7715 . . . . .	12
3.1	Posição da fenda . . . . .	14
3.2	Espectros nuclear e estendidos de NGC 34 . . . . .	17
3.3	Idem à Fig. 3.2 para NGC 1614 . . . . .	18
3.4	Idem à Fig. 3.2 para NGC 3310 . . . . .	19
3.5	Idem à Fig. 3.2 para NGC 7714 . . . . .	20
4.1	SSPs da base de elementos . . . . .	24
4.2	Espectro observado $\times$ suavizado . . . . .	25
5.1	Resultado da síntese para o núcleo de NGC 34 . . . . .	30
5.2	Idem à Fig. 5.1 para NGC 1614 . . . . .	31
5.3	Idem à Fig. 5.1 para NGC 3310 . . . . .	31
5.4	Idem à Fig. 5.1 para NGC 7714 . . . . .	32
5.5	Análise global de NGC 34 . . . . .	34
5.6	Idem à Fig. 5.5 para NGC 1614 . . . . .	35
5.7	Idem à Fig. 5.5 para NGC 3310 . . . . .	36
5.8	Idem à Fig. 5.5 para NGC 7714 . . . . .	37
5.9	Campo de $8'' \times 8''$ centrais de NGC 1614 . . . . .	42
5.10	Modelos de M05 $\times$ M11 para NGC 34 e NGC 1614 . . . . .	56
5.11	Idem à Figura 5.10 para NGC 3310 e NGC 7714 . . . . .	57

# Capítulo 1

## Introdução

### 1.1 Galáxias Starburst

A primeira evidência da existência de galáxias com atividade do tipo *Starburst* foi descoberta por Morgan (1958), que identificou estruturas peculiares (*Hot Spots*) na região nuclear de algumas galáxias (e.g. NGC 1808, NGC 3351, NGC 4321 e NGC 5248). Posteriormente, em um estudo sistemático de uma amostra contendo algumas destas galáxias classificadas por Morgan (1958), Sérsic & Pastoriza (1965) mostraram a relação existente entre o núcleo dessas galáxias e seu respectivo tipo morfológico. Esses autores concluíram que as galáxias com esse tipo de núcleo têm tipo morfológico que corresponde a uma espiral barrada (SB) ou uma espiral intermediária barrada (SaB) e as dividiram em dois subgrupos: os núcleos do tipo *Hot Spots* e os do tipo *Núcleo Amorfo*. Os núcleos do tipo *Hot Spots* seriam estruturas estendidas ou esferoidais, uniforme e simetricamente dispostas em uma região definida (como exemplos teríamos NGC 1097 e NGC 1365). Já os do tipo *Núcleo Amorfo* seriam núcleos esféricos cercados por uma estrutura difusa e assimétrica, podendo também apresentar uma segunda estrutura esferoidal, tomando a forma de um ‘haltere’ (e.g. NGC 1433 e NGC 5236). Em estudos subsequentes, Pastoriza (1967, 1975) demonstrou que essas galáxias, as quais vieram a ser chamadas de galáxias Sérsic-Pastoriza (Osmer et al., 1974), tinham características bastante similares às de regiões H II (ou seja, regiões compostas por gás ionizado por estrelas quentes do tipo O e B, associadas com regiões de formação estelar recente). A partir destes resultados pioneiros, seguiram-se inúmeros estudos na tentativa de compreender melhor a natureza desses objetos.

Definem-se como galáxias *Starburst* (SBs) os objetos cuja energia emitida é dominada pela emissão de estrelas jovens e massivas (tipo O e B, Weedman, 1983).

Essas fontes apresentam intensa formação estelar, geralmente na região central ( $r \lesssim 1$  kpc). Suas taxas de formação estelar (SFRs, do inglês *Star Formation Rates*) variam de 5 a  $50M_{\odot}\text{yr}^{-1}$ , dentro de uma região que se estende de 0.1 a 1 kpc do núcleo. Esses valores excedem em  $\sim 10^3$  vezes os encontrados para uma região similar em galáxias normais (Heckman, 2000). Por exemplo, Güsten (1989) encontra um SFR de  $0.5M_{\odot}\text{yr}^{-1}$  dentro de  $\sim 100$  pc no centro Galáctico. Além disso, o espectro desses objetos é caracterizado por linhas de emissão bastante intensas, como as linhas de recombinação do hidrogênio e hélio e linhas de transições proibidas do enxofre, oxigênio e nitrogênio (ver Fig. 1.1). Essas linhas são características de galáxias espirais, principalmente por estas apresentarem grandes quantidades de gás.

As galáxias do tipo SB estão entre os melhores laboratórios para se estudar a formação e evolução de estrelas massivas, o efeito destas no meio interestelar, assim como os processos físicos envolvidos na formação de galáxias e no enriquecimento do meio intergaláctico. As estrelas massivas, que são a fonte de energia das SBs, têm temperaturas efetivas entre  $\sim 20\,000 - 50\,000$  K e emitem a maior parte de sua radiação no ultravioleta (UV, do inglês *Ultraviolet*, 912 - 2000Å, Heckman, 2000). Sendo as SBs ricas em poeira e gás interestelar, os grãos de poeira absorvem estes fótons, se aquecem e alcançam o equilíbrio termodinâmico reemitindo essa radiação no infravermelho (IR, do inglês *Infrared*, Barvainis, 1987) produzindo, assim, as linhas proeminentes de emissão/absorção de gás molecular e poeira neste intervalo espectral (Riffel et al., 2006, Wu et al., 2009, Sales et al., 2010).

A evolução estelar para o estágio de supergigante vermelha (RSGs, do inglês *Red Supergiants*) se dá de forma bastante rápida em estrelas massivas. Quanto maior for a massa da estrela, maior será a pressão de radiação necessária para contrabalançar a pressão gravitacional, fazendo com que a estrela tenha que produzir mais energia através da fusão nuclear, do que estrelas de baixa massa. Essas RSGs, portanto, são fortes indicadores de populações estelares (SPs, do inglês *Stellar Populations*) jovens, proporcionando meios para a identificação de surtos de formação estelar recentes no infravermelho próximo (NIR, do inglês *Near Infrared*, Oliva et al., 1995).

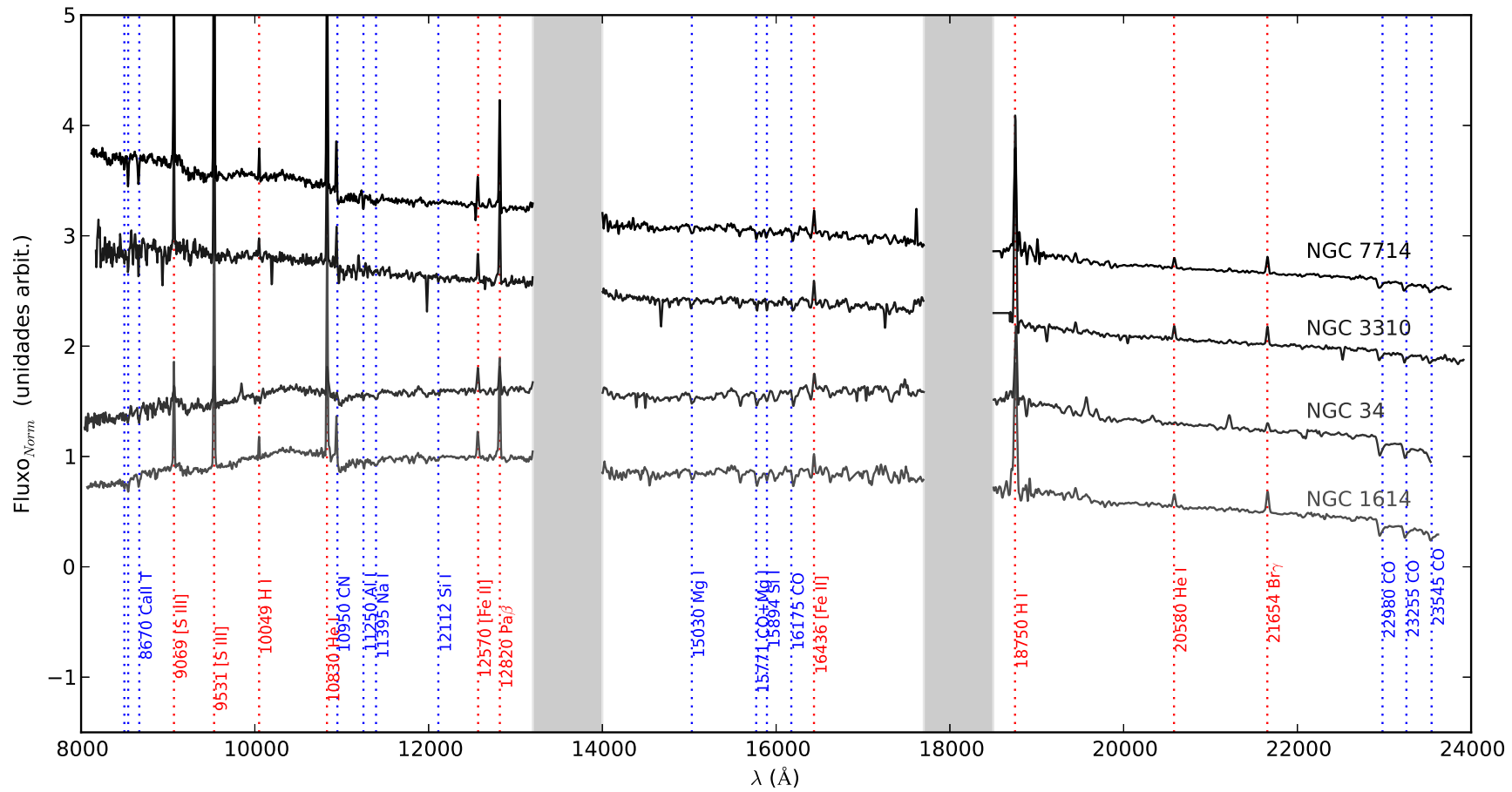


Figura 1.1: Espectros normalizados ( $\lambda = 12280\text{\AA}$ ) do núcleo das galáxias, ordenados de acordo com os seus formatos, do mais inclinado (*topo*) ao mais plano (*base*). Algumas linhas de absorção (*azul*) e emissão (*vermelho*) estão identificadas. As regiões de absorção telúrica estão marcadas na área sombreada.

Quando as estrelas massivas entram na fase dos pulsos térmicos do ramo assintótico das gigantes (TP-AGB, do inglês *Thermally Pulsing Asymptotic Giant Branch*), elas contribuem de maneira significativa para a luz integrada observada no NIR (até 40% na banda K), principalmente a associada com SPs de idade jovem à intermediária ( $\sim 0.2 - 2 \times 10^9$  anos, Frogel et al., 1990). Com as novas gerações de modelos de síntese evolutiva de população estelar (EPS, do inglês *Evolutionary Population Synthesis*), os quais incluem espectros empíricos de estrelas na fase das TP-AGBs (Maraston, 2005, Maraston & Strömbäck, 2011, a seguir M05 e M11, respectivamente), tornou-se possível o estudo detalhado das SPs de galáxias no NIR. Outro benefício da inclusão desses espectros empíricos de estrelas ricas em carbono e oxigênio (Lançon & Wood, 2000a) aos modelos foi a detecção de bandas e linhas de absorção características do NIR (e.g. CN em  $1.1\mu\text{m}$ , CO em  $1.6$  e  $2.4\mu\text{m}$ , Na I em  $1.1$  e  $2.2\mu\text{m}$ , Mg I em  $1.6\mu\text{m}$ ). Riffel et al. (2007), por exemplo, detectaram a banda do CN em  $1.1\mu\text{m}$  no espectro de galáxias SBs e AGNs<sup>1</sup> (do inglês *Active Galactic Nuclei*). Além disso, Martins et al. (2013) detectaram a banda do CN em  $1.1$  e  $1.4\mu\text{m}$  em um estudo de 23 galáxias HII.

Embora traçar formação estelar no NIR seja uma tarefa difícil, esse intervalo espectral é o mais adequado para revelar SPs em fontes altamente obscurecidas (Origlia & Oliva, 2000). Com a melhora nos detectores sensíveis a essa região, tornou-se possível a obtenção de espectros de moderada resolução em fontes fracas e com emissão estendida (Riffel et al., 2008, a seguir R08), possibilitando o estudo detalhado das SPs na região do NIR. Além disso, a cobertura simultânea de uma grande faixa de comprimentos de onda ( $0.8 - 2.4\mu\text{m}$ ), proporcionada por esses instrumentos via espectroscopia de dispersão cruzada, permite a obtenção de resultados mais robustos para a síntese de SP, pois há mais vínculos observacionais no ajuste. Além disso, a espectroscopia de dispersão cruzada evita efeitos da atmosfera e de abertura, os quais geralmente afetam a espectroscopia de fenda longa em bandas únicas, como as bandas *J*, *H*, e *K*. Vale a pena ressaltar que o *James Webb Space Telescope* (JWST) vai ser otimizado para observações no IR. Deste modo, é importante testar o potencial da síntese de SPs nesse intervalo espectral.

Apesar da razoável quantidade de resultados sobre SPs obtidos através do NIR, poucos estudos se concentraram na análise das SPs ao longo das direções espaciais a distâncias maiores do que poucas centenas de parsecs do núcleo. É preciso, portanto,

---

<sup>1</sup>As galáxias com núcleo ativo (AGNs) apresentam um núcleo aparentemente estelar, contudo, os fenômenos físicos que ocorrem na região nuclear dessas fontes não podem ser explicados unicamente por fusão nuclear no interior das estrelas, mas sim por processos gravitacionais (acréscimo de matéria por um buraco negro supermassivo).

desenvolver premissas para a análise das SPs ao longo da direção radial da galáxia e comparar esses resultados com estudos em outros comprimentos de onda. Com isso, podemos encontrar informações adicionais e/ou complementares às obtidas em outros comprimentos de onda.

## 1.2 Objetivos

O estudo das SPs é de suma importância para a compreensão do conteúdo estelar das galáxias. O processo de síntese de SP permite a construção de um histórico de formação estelar da galáxia. É também uma ferramenta muito importante para o entendimento da conexão entre os AGNs e os *starbursts*.

A utilização do intervalo espectral do NIR se destaca por permitir acessar áreas altamente obscurecidas pela poeira em outros intervalos espectrais comumente estudados, como óptico e UV. Além disso, o NIR é o intervalo espectral propício para se encontrar as assinaturas das SPs dominadas por estrelas massivas e evoluídas, que se encontram nas fases das RSGs (e.g. Oliva et al., 1995) e das TP-AGBs (e.g. M05 e R08).

Neste trabalho, estudaremos a variação espacial das SPs ao longo do bojo de quatro galáxias SB na região do NIR. As quatro fontes escolhidas para este estudo foram: NGC 34, NGC 1614, NGC 3310 e NGC 7714. Esses objetos foram bastante estudados em outros intervalos de comprimento de onda, nos permitindo, assim, comparar com os resultados obtidos no NIR. Também compararemos as taxas de formação estelar com as derivadas a partir das linhas de recombinação do hidrogênio. Desta forma, construiremos um cenário de formação estelar para cada uma das fontes.

Além disso, todas as galáxias da amostra estão em processo de interação e/ou fusão. Como a maior parte dos sistemas a altos *redshifts* exibem intensos surtos de formação estelar e são altamente interagentes ( $z \sim 1-5$ , Carilli & Walter, 2013), o estudo detalhado de SBs no universo próximo é de grande importância para a compreensão do histórico de formação estelar do universo jovem.

# Capítulo 2

## A Amostra

A amostra estudada neste trabalho compreende quatro galáxias: NGC 34, NGC 1614, NGC 3310 e NGC 7714, classificadas como SBs. Essas galáxias foram amplamente estudadas nas regiões espectrais do óptico e do NIR (veja Seção 2.1) e suas extensões espaciais e proximidade nos permitem um estudo detalhado das SPs a distâncias de algumas centenas de parsecs do núcleo. Uma importante característica da amostra é que todas as fontes estão em processo de interação e/ou fusão. A interação entre galáxias pode disparar surtos de formação estelar (Mihos & Hernquist, 1996), assim como criar estruturas peculiares como caudas de maré, pontes de matéria (e.g. Toomre & Toomre, 1972) e anéis de formação estelar (e.g. Lynds & Toomre, 1976). As evidências disso são a presença de regiões HII brilhantes nos anéis (e.g. Fosbury & Hawarden, 1977, Marston & Appleton, 1995) e nas caudas de maré estendidas (e.g. Duc & Renaud, 2013), comumente observadas nesse tipo de objeto. Galáxias interagentes costumam apresentar forte emissão no IR, uma vez que estas apresentam quantidades significativas de gás e poeira (Rieke et al., 1980).

Com isso em mente, também é importante enfatizar a importância do estudo detalhado de sistemas interagentes no universo próximo usando o intervalo espectral do NIR. Esse resultados podem oferecer apoio adicional a estudos de fontes a altos *redshifts* (e.g. Pope et al., 2013), uma vez que quase todos os sistemas de galáxias apresentavam intensos surtos de formação estelar e eram fortemente interagentes no universo jovem ( $z \sim 1-5$ , Carilli & Walter, 2013).



## 2.1 Estudos Anteriores da População Estelar da Amostra

Nesta seção, resumiremos algumas informações da literatura a respeito das SPs das galáxias estudadas na presente dissertação.

### NGC 34

À distância de 78.4 Mpc, essa LIRG<sup>1</sup> (do inglês *Luminous Infrared Galaxy*) foi classificada como um *merger* (i.e., um sistema oriundo da fusão de duas ou mais galáxias) por Vorontsov-Velyaminov (1959).

A classificação da atividade nuclear desta galáxia é controversa. Por exemplo, Mazzarella et al. (1991) e Riffel et al. (2006) classificaram essa fonte como uma SB. Já segundo outros autores, o espectro nuclear dessa fonte na região óptica apresenta, tanto características intrínsecas de espectros de SBs, como de galáxias do tipo Seyfert 2<sup>2</sup> (e.g. Veron-Cetty & Veron, 1986, Goldader et al., 1997, Gonçalves et al., 1999).

Utilizando imagens e observações espectroscópicas no óptico, Schweizer & Seitzer (2007) propuseram um cenário sobre o processo de fusão de NGC 34. Eles sugerem que duas galáxias ricas em gás e de massas diferentes (com uma razão de massa estimada como sendo  $1/3 \leq m/M \leq 2/3$ ) se fundiram, dando origem a um surto de formação estelar ao longo de toda a galáxia. Esse surto teria ocorrido primeiramente há  $\sim 600 \times 10^6$  anos (apresentando um pico há  $100 \times 10^6$  anos) e, segundo os autores, parece ter formado um extenso sistema de aglomerados globulares jovens com idades entre 0.1 à  $1.0 \times 10^9$  anos. Este trabalho também revela um disco exponencial azul de estrelas jovens, o qual teria se formado há  $\sim 400 \times 10^6$  anos. No presente, os dois núcleos das galáxias parecem ter se fundido, o surto de formação estelar encolheu para o seu estado central ( $\leq 1$  kpc) atual e há evidências de um forte *outflow* de gás.

Também, R08 analisaram os 230 pc centrais dessa fonte no NIR e detectaram uma SP de idade jovem a intermediária com metalicidade solar. Esses resultados estão de acordo com o fato de que a banda de absorção do CN presente no espectro da galáxia (Riffel et al., 2007) é bastante intensa, característica de SPs com a idade encontrada por esses autores ( $\sim 1 \times 10^9$  anos, M05).

<sup>1</sup>Define-se como LIRG, uma galáxia com luminosidade no IR ( $L_{IR} = L[8-1000\mu\text{m}]$ ) no intervalo de  $10^{11} \leq L_{IR}/L_{\odot} \leq 10^{12}$  (Soifer et al., 1987). A maioria dessas fontes são sistemas em interação/fusão, com grandes quantidades de gás molecular ( $\sim 10^{10} M_{\odot}$ ).

<sup>2</sup>Galáxias Seyfert são uma classe de AGN. Elas apresentam núcleo muito brilhante e intensas linhas de emissão de alta ionização.

## NGC 1614

À distância de 63.7 Mpc, NGC 1614 é considerada um bom laboratório para estudar surtos de formação estelar, uma vez que apresenta extinção moderada e se encontra praticamente *face-on* (Alonso-Herrero et al., 2001). Essa fonte é catalogada como LIRG e apresenta uma estrutura externa espetacular com caudas de maré, sugerindo que sua morfologia e a luminosidade intensa no IR resultam da interação/fusão com pelo menos outras duas galáxias (e.g. Neff et al., 1990, Alonso-Herrero et al., 2001). Ainda, a emissão estendida altamente assimétrica, presente no entorno dessa fonte, favorece o cenário em que essa interação ainda esteja ocorrendo (e.g. Kotilainen et al., 2001).

Observações da Câmera do *Hubble Space Telescope/NIR* e do Espectrógrafo Multi-Objeto (NICMOS) reportadas por Alonso-Herrero et al. (2001) mostram intensas linhas de absorção do CO. Os autores sugerem que essas linhas estejam traçando um surto de formação estelar intenso no núcleo de NGC 1614, com um diâmetro de  $\sim 45$  pc, rodeado por um anel ( $\sim 600$  pc de diâmetro) de regiões H II supergigantes revelado pelo mapa da linha de emissão de Pa $\alpha$ . Essa estrutura coincide com um anel de emissão do contínuo em rádio detectado por Olsson et al. (2010), que concluíram que a atividade do tipo LINER<sup>3</sup> (do inglês *Low-ionization Nuclear Emission-line Region*), observada em NGC 1614, pode ser associada à atividade *starburst*, e não a um AGN. Alonso-Herrero et al. (2001) também sugerem que a presença de um núcleo secundário nessa galáxia pode ser interpretada como fragmentos da galáxia companheira, menor do que NGC 1614, a qual já teria sido destruída. Ainda, essa fonte foi classificada como um sistema em estágio avançado de fusão por Doyon et al. (1989) e Neff et al. (1990).

Similarmente aos resultados encontrados para NGC 34, R08 encontraram uma SP dominante de  $\sim 1 \times 10^9$  anos de idade e metalicidade solar nos 154 pc centrais de NGC 1614, concordando com o fato dos espectros integrados dessas duas fontes serem bastante similares.

## NGC 3310

É uma SB próxima bastante estudada ( $d=13.2$  Mpc), cuja morfologia perturbada sugere que essa fonte passou por pelo menos um processo de fusão recentemente (Elmegreen et al., 2002). Balick & Heckman (1981) foram os primeiros a propor esse

---

<sup>3</sup>O núcleo da galáxia é classificado como LINER, quando seu espectro apresenta linhas de baixa ionização (e.g. [O I]  $\lambda 6300$  e [N II]  $\lambda \lambda 6548, 6583$ ) relativamente intensas, quando comparadas com o H $\alpha$ .

cenário de fusão, propondo que a formação estelar ocorrida nos últimos 100 milhões de anos foi disparada pela colisão de NGC 3310 com uma galáxia anã. Esses autores também afirmam que a já bem conhecida morfologia do tipo ‘flecha’ (Walker & Chincarini, 1967), no lado oeste da galáxia, está associada com o remanescente da galáxia anã. NGC 3310 abriga um anel circumnuclear com diâmetro angular de  $8''$  a  $12''$  (720 - 1080 pc, Elmegreen et al., 2002), preenchido por regiões H II gigantes (Pastoriza et al., 1993). Esse anel foi estudado ao longo de um grande intervalo de comprimentos de onda: raios-x (e.g. Zezas et al., 1998), UV distante (FUV, do inglês *Far-Ultraviolet*, e.g. Smith et al., 1996), UV (e.g. Meurer et al., 1995), óptico (e.g. Grothues & Schmidt-Kaler, 1991, Pastoriza et al., 1993, Balick & Heckman, 1981), NIR (e.g. Telesco & Gatley, 1984, Pastoriza et al., 1993, Elmegreen et al., 2002), IR (e.g. Telesco & Gatley, 1984) e rádio (e.g. Balick & Heckman, 1981).

Em um estudo da SP dos 56 pc centrais dessa galáxia na região espectral do NIR, R08 detectaram uma intensa formação estelar com SP dominante de  $1 \times 10^9$  anos, a qual contribui com até  $\sim 30\%$  da luz emitida nessa região e intervalo espectral.

## NGC 7714

É uma SB de tipo morfológico SBc (de Vaucouleurs et al., 1991), que se encontra a 37.3 Mpc de distância e foi classificada como protótipo de SB por Weedman et al. (1981). Essa galáxia está em interação com a companheira NGC 7715 e sugere-se que esta seja a causa dos surtos de formação estelar nela observados (Kinney et al., 1993). Essa fonte foi bastante estudada, com uma ampla quantidade de dados, nos intervalos espectrais do óptico e do NIR (e.g. Gonzalez-Delgado et al., 1995, González Delgado et al., 1999, Lançon et al., 2001, Brandl et al., 2004). Lançon et al. (2001) encontram que a região nuclear ( $\sim 330$  pc) dessa fonte vem formando estrelas nas últimas centenas de milhões de anos, com uma SFR média de  $1M_{\odot}$  por ano. De forma similar, analisando as cores do contínuo no óptico e FIR (do inglês *Far Infrared*), Bernlöhr (1993) calcula que a idade do *starburst* central (raio de  $4''.5$ ) nessa galáxia é da ordem de 20 milhões de anos. Ainda nesse trabalho, o autor sugere que o surto de formação estelar em NGC 7714 tenha começado de 3 a  $9 \times 10^7$  anos mais tarde do que na sua companheira NGC 7715, cujo espectro (nos 750 pc centrais) é bem ajustado por uma SP pós *starburst*, cujo surto de formação estelar teria cessado há  $\sim 60$  milhões de anos atrás.

Estudando imagens de  $H_{\alpha}$ , Gonzalez-Delgado et al. (1995) concluíram que os surtos de formação estelar nos  $5''$  (945 pc) centrais dessa galáxias são uma coleção de pequenas regiões H II com idades entre  $3 \times 10^6$  to  $5 \times 10^6$  anos. Em outro trabalho,

estudando a região central (300 pc) de NGC 7714, desde o UV até o NIR, González Delgado et al. (1999) determinaram a idade do surto de formação estelar no núcleo dessa fonte como sendo de  $\sim 4.5 \times 10^6$  anos. Apresentando baixa absorção de silicatos e temperatura da componente mais quente da poeira como sendo 30 K no infravermelho médio (MIR, do inglês *Mid Infrared*), NGC 7714 é definida por Brandl et al. (2004) como o modelo ideal de *starburst* jovem e desobscurecido.

Smith & Wallin (1992) estudaram o histórico de evolução da interação do par NGC 7714/NGC 7715 através de dados em rádio dessas galáxias (em uma abertura de  $40'' \times 40''$ ). Eles calcularam como sendo  $\sim 1.1 \times 10^8$  anos o tempo que se passou desde a maior aproximação entre essas fontes e sugerem que o surto de formação estelar teria começado somente há  $\sim 5 \times 10^6$  anos em NGC 7714. Esse atraso entre a aproximação das galáxias e o começo do surto de formação estelar é encontrado com bastante frequência em modelos de formação estelar em sistemas interagentes (Mihos & Hernquist, 1996). Ainda nesse trabalho, esses autores mostram uma ponte de HI entre as galáxias, conforme a Figura 2.1 e discutem que a morfologia da formação estelar em NGC 7714 pode ser bem explicada por um modelo de *inflow* de gás impulsionado pela rotação de uma barra no disco da galáxia (Roberts et al., 1979). Essa barra teria sido formada pela interação com galáxia companheira e estaria dirigindo gás para as regiões centrais de NGC 7714, abastecendo o surto de formação estelar nesse objeto.

Além disso, R08 detectaram três surtos de formação estelar nessa galáxia, um dominante com uma SP de  $1 \times 10^9$  anos que contribui com até  $\sim 34\%$  da luz emitida e dois surtos menores, com idades de  $30 \times 10^6$  ( $\sim 10\%$ ) e  $50 \times 10^6$  ( $\sim 13\%$ ) para os 115 pc centrais deste objeto.

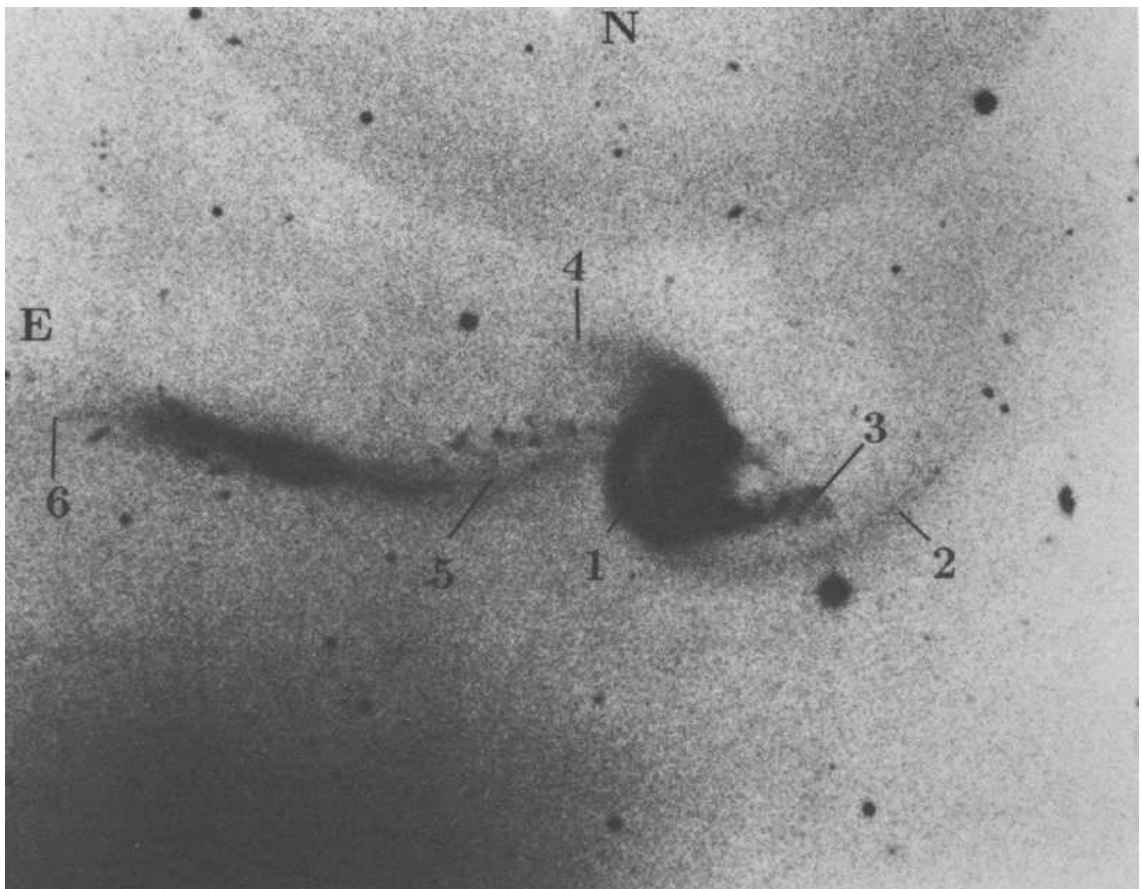


Figura 2.1: Imagem das galáxias NGC 7714 e NGC 7715 do atlas de Arp (1966). O campo da imagem tem  $5.0' \times 3.9'$ . NGC 7714 é a galáxia à oeste e NGC 7715 é a galáxia alongada à leste. Os números na figura indicam: (1) o anel em NGC 7714; (2), (3) e (4) as caudas de maré de NGC 7714, (5) a ponte de matéria entre as galáxias e (6) a cauda de maré de NGC 7715. Figura retirada de Smith & Wallin (1992).

# Capítulo 3

## Dados

### 3.1 Observações e redução de dados

Os dados utilizados neste trabalho compreendem extrações nucleares e extra-nucleares de quatro SBs do universo local: NGC 1614, NGC 34, NGC 3310 e NGC 7714. Vale ressaltar que as SP dos espectros nucleares destes objetos foram estudadas por R08, porém esses autores utilizaram apenas algumas regiões do contínuo e larguras equivalentes dos espectros nucleares integrados dessa amostra. Nosso trabalho, além de fazer um estudo dos espectros extra-nucleares dessas galáxias, está baseado em um método diferente para síntese de SP, o qual utiliza o espectro inteiro, excluindo as linhas de emissão e dados espúrios.

Os espectros no NIR das galáxias foram obtidos no *Infrared Telescope Facility* (IRTF - telescópio de 3m otimizado para o IR da NASA, localizado no monte Mauna Kea, Havaí/EUA) em dois turnos de observação. O primeiro foi em 21 de Abril de 2002 e o segundo em 24 de Outubro de 2003. A Tabela 3.1 mostra o registro das observações para as quatro galáxias.

O espectrógrafo SpeX<sup>1</sup> (Rayner et al., 2003) foi utilizado no modo de dispersão cruzada (SXD, 0.8-2.4 $\mu$ m). O detector usado foi CCD ALADDIN 3 InSb, o qual consiste em uma rede de 1024 $\times$ 1024 pixels, com uma escala espacial de 0,15"/pixel. Uma fenda de 0.8"  $\times$  15" orientada ao longo do ângulo paralático (veja Tabela 3.1) foi utilizada, resultando em uma resolução espectral de em média 320 kms<sup>-1</sup> (R $\sim$ 900). Este valor foi determinado a partir das linhas das lâmpadas de calibração e do espectro do céu, sendo aproximadamente constante ao longo de todo o intervalo espectral, com uma pequena variação de  $\sim$  3%. Durante as diferentes noites, o *seeing* foi em média 0.8".

---

<sup>1</sup><http://irtfweb.ifa.hawaii.edu/~spex/>

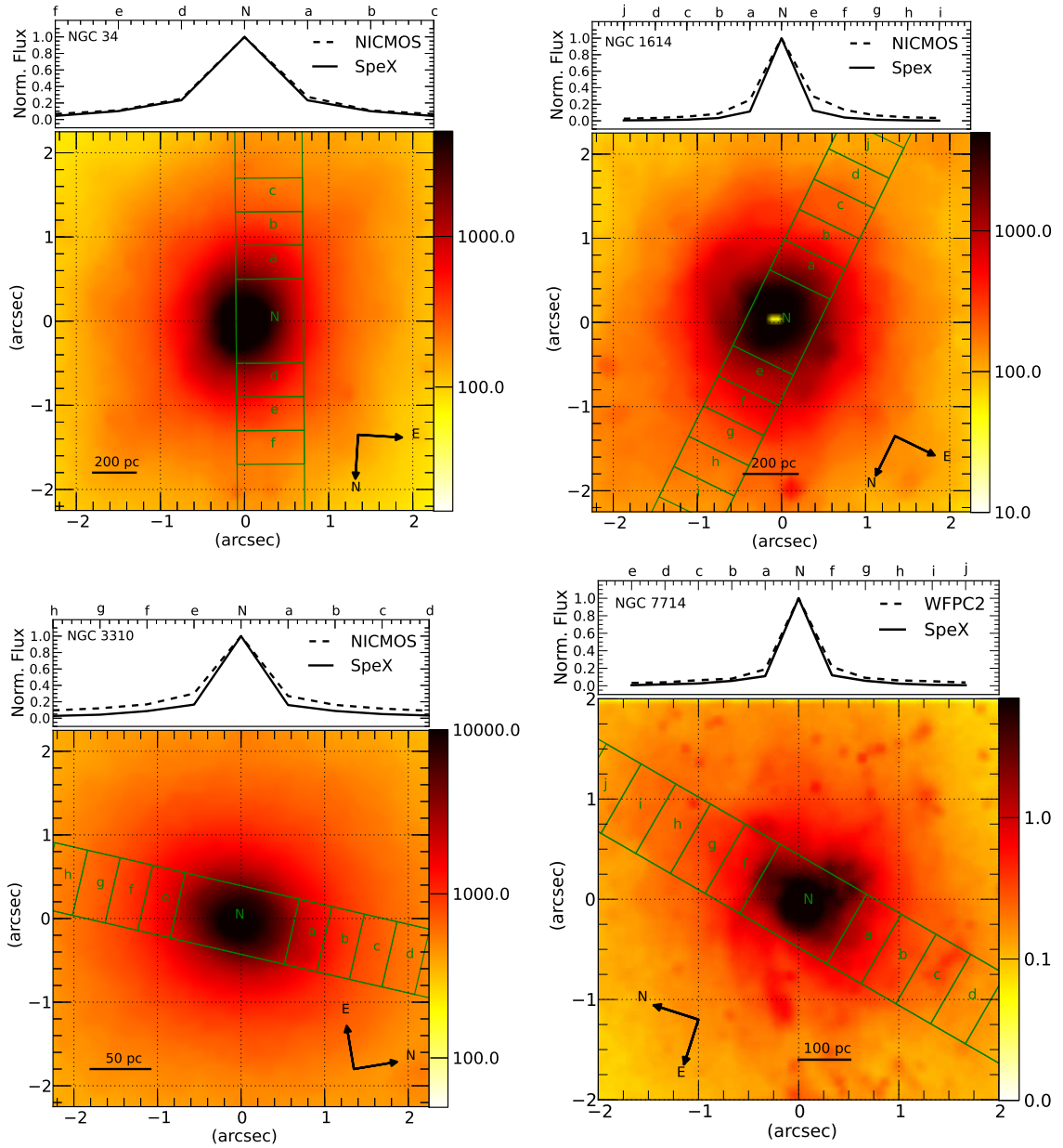


Figura 3.1: *Superior:* Perfil da imagem do NICMOS e da fenda do SpeX (perfil do contínuo em  $\lambda_{cent}=12230\text{\AA}$ ). *Inferior:* posição da fenda sobreposta à imagem do NICMOS das galáxias. Para NGC 7714 nós apresentamos a imagem da WFPC2/F814W.

Tabela 3.1: Registro das Observações.

Informações	NGC 34	NGC 1614	NGC 3310	NGC 7714
Tipo Morfológico	SB/Sy2	SB	SB	H II
RA (h m s)	00:11:06	04:33:59	10:38:45	23:36:14
DEC (deg ' ")	-12:06:26	-08:34:46	00:33:06	02:09:18
$z^*$	0.019774	0.016070	0.003641	0.009931
Data das Observações	24/10/03	24/10/03	21/04/02	24/10/03
$T_{\text{exp}}$ (s)	1680	1800	840	2400
Massa de Ar	1.19	1.14	1.21	1.05
$PA_{\text{obs}}$ (deg)	4	0	158	348
$E(B-V)_G^{**}$ (mag)	0.027	0.154	0.022	0.052
Abertura Nuclear <sup>***</sup> (")	1.0	1.0	1.4	1.0
Escala (pc/")	383	324	71	192

Notas da Tabela: \* *Redshift* médio da abertura nuclear, determinado pela posição das linhas de emissão de [S III]  $0.9531\mu\text{m}$ , He I  $1.083\mu\text{m}$ , Pa $\beta$  and Br $\gamma$ ; \*\* Extinção Galáctica tirada dos mapas de Schlegel et al. (1998); \*\*\* Diâmetro da abertura da extração nuclear; Espectros extra-nucleares foram extraídos com uma abertura de diâmetro de  $0.4''$ , até que a emissão estendida caísse à 1% do valor do pico.

Como o SpeX não fornece a posição do centro da fenda, nós derivamos esses valores através da comparação do perfil da fenda com o perfil da imagem, utilizando uma estatística de minimização de  $\chi^2$ . Os resultados são mostrados na Fig. 3.1, a qual indica a posição da fenda e as regiões das extrações sobrepostas à imagem do NICMOS das galáxias. Para NGC 7714 apresentamos a imagem da *Wide Field and Planetary Camera 2* (WFPC2) no filtro F814W ( $\lambda = 7940\text{\AA}$ ), pois nenhuma imagem do NICMOS dessa galáxia estava disponível.

As observações foram feitas em um padrão OBJETO-CÉU-CÉU-OBJETO, com a posição do céu geralmente a vários minutos de arco do núcleo da galáxia, livre de emissão estendida ou estrelas de fundo. Imediatamente após a observação de cada galáxia, uma estrela A0V (com massa de ar parecida com a da galáxia) foi observada, no intuito de remover as bandas telúricas e fazer a calibração em fluxo no espectro (veja Riffel et al., 2006, no qual é fornecida uma descrição completa dos procedimentos da redução dos dados). Em resumo, os procedimentos de redução espectral, extração e calibração em comprimento de onda foram feitos utilizando o SPEXTOOL<sup>2</sup> (Cushing et al., 2004), software interno desenvolvido e disponibilizado pelo time do SpeX para a comunidade do IRTF. Além do espectro nuclear, um número variável de espectros extra-nucleares foi extraído para cada galáxia, dependendo do tamanho

<sup>2</sup><http://irtfweb.ifa.hawaii.edu/cushing/Spextool.html>



da emissão estendida através da fenda (veja a Figura 3.1). É listado na Tabela 3.1 o diâmetro das aberturas nucleares. Os espectros extra-nucleares foram extraídos com um diâmetro de  $0.4''$  ao longo da direção espacial, dos dois lados da abertura nuclear, até que o sinal caísse a 1% do pico do valor nuclear.

A remoção das bandas telúricas e a calibração em fluxo foram feitas utilizando o XTELLCOR (Vacca et al., 2003), outro software disponibilizado pelo time do SpeX, o qual foi projetado especificamente para realizar correções das bandas telúricas em espectros obtidos com o SpeX. Depois disso, as diferentes ordens foram unidas em um único espectro 1D cobrindo de  $0.8\mu\text{m}$  a  $2.4\mu\text{m}$ , utilizando a rotina XMERGEORDERS. A concordância entre duas regiões de ordens consecutivas que se sobrepõem foi excelente e apresentou, geralmente, desvios de menos de 1%. Os *redshifts* para cada abertura foram determinados pela posição das linhas de emissão de [S III]  $0.9531\mu\text{m}$ , He I  $1.083\mu\text{m}$ , Pa $\beta$  e Br $\gamma$ , que são as mais intensas, medidas em todos os espectros e utilizados para a correção por efeito Doppler<sup>3</sup>. Por último, o espectro final foi corrigido por extinção Galáctica utilizando a lei de Cardelli et al. (1989) e os mapas de extinção de Schlegel et al. (1998). As Figuras 3.2 a 3.5 mostram os espectros nucleares e extra-nucleares para cada fonte, já corrigidos por *redshift*. As linhas de emissão e absorção mais intensas foram marcadas, assim como as regiões das bandas de absorção telúricas.

---

<sup>3</sup>Os *redshifts* listados na Tabela 3.1 são da abertura nuclear de cada galáxia.

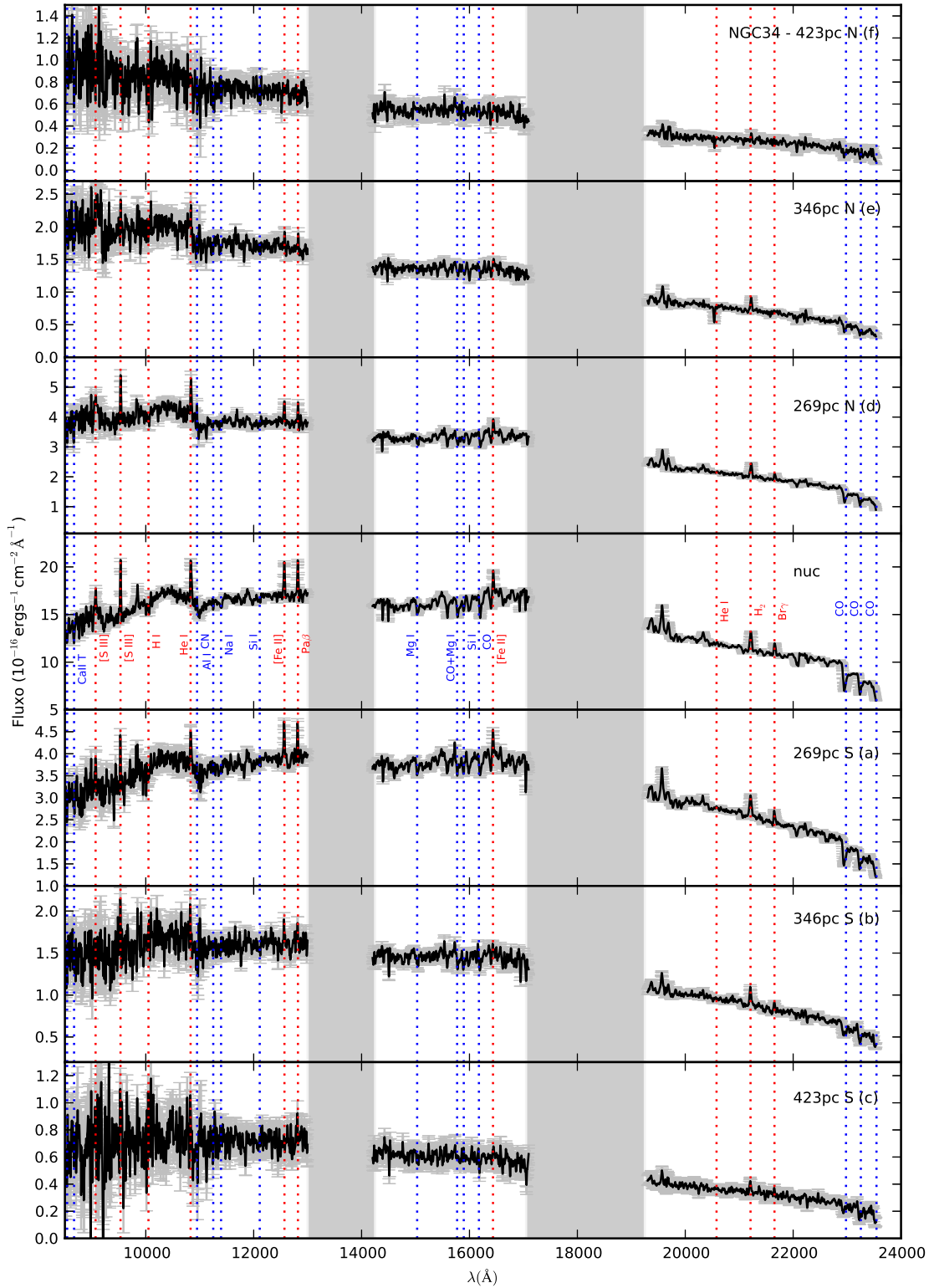


Figura 3.2: Espectros da região nuclear e estendida para a galáxia NGC 34. Norte (N) e Sul (S) estão nas legendas. As letras representando as aberturas são as mesmas usadas nas outras figuras (ver Fig. 3.1). As incertezas estão em *cinza*. As principais linhas de absorção (*azul*) e emissão (*vermelho*) estão marcadas. Regiões de absorção telúricas estão marcadas na área sombreada (*cinza*).

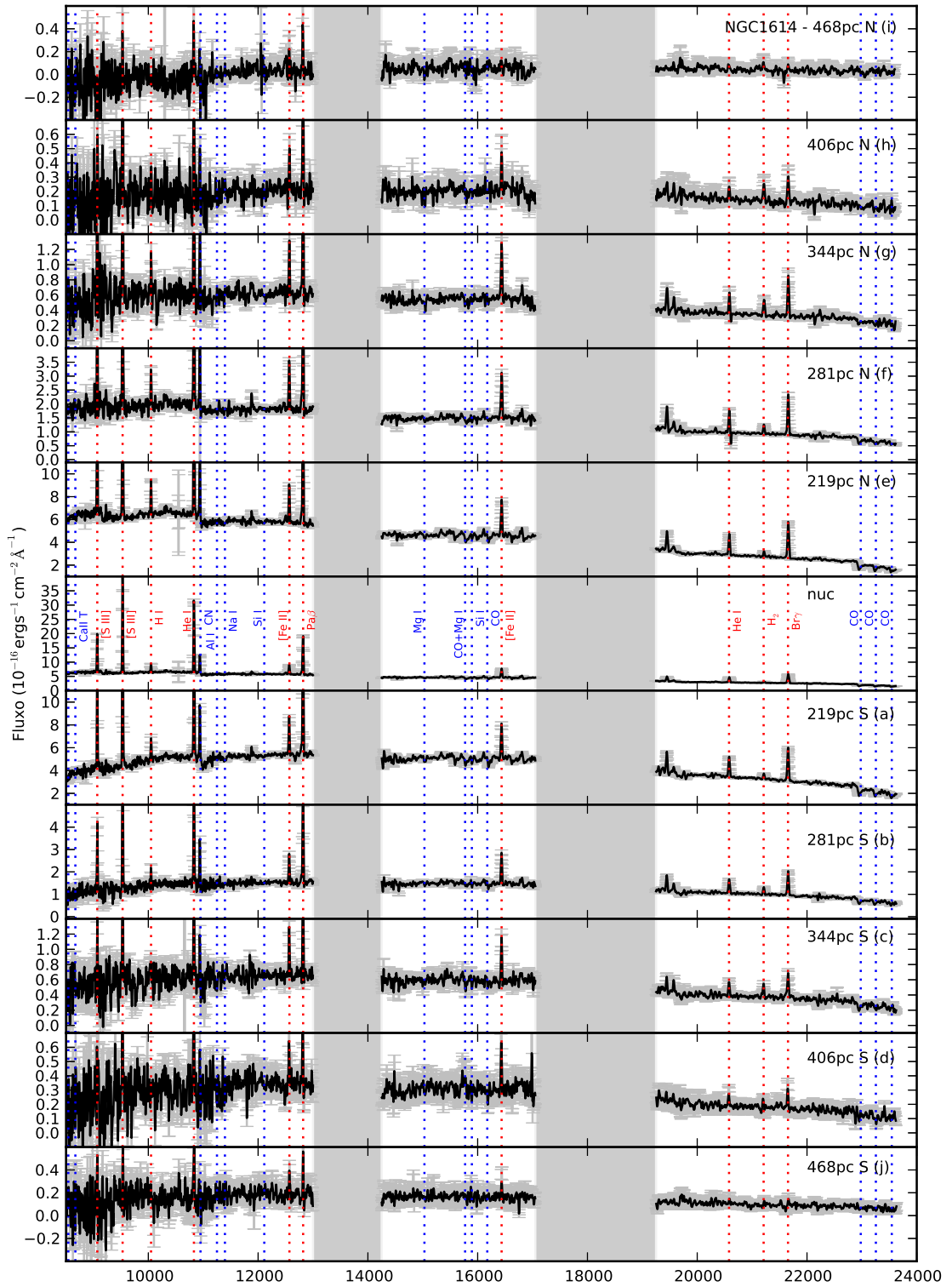


Figura 3.3: Idem à Fig. 3.2, para a galáxia NGC 1614.

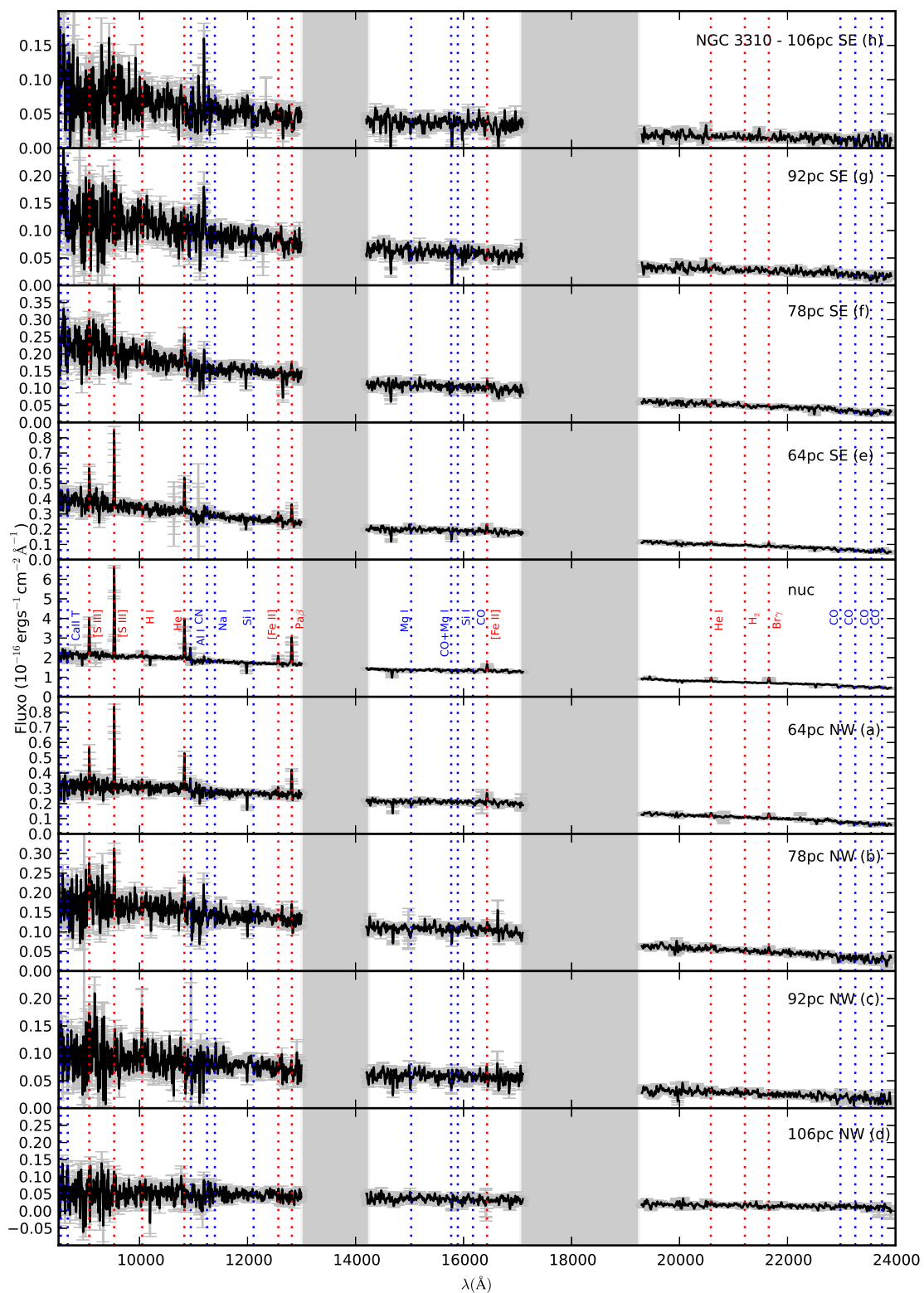


Figura 3.4: Idem à Fig. 3.2, para a galáxia NGC 3310. Noroeste (NO) e Sudeste (SE) estão nas legendas.

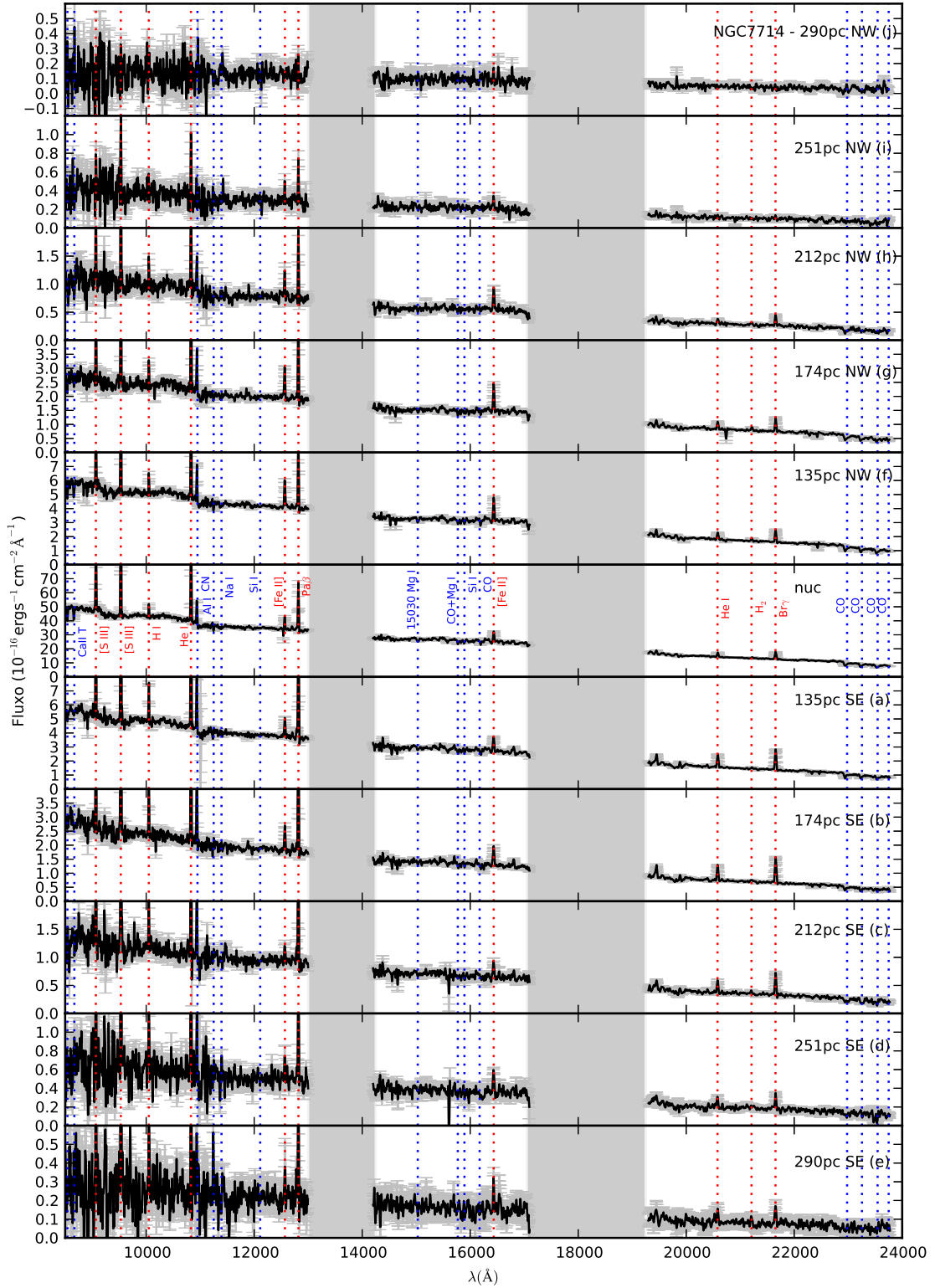


Figura 3.5: Idem à Fig. 3.2, para a galáxia NGC 7714. Noroeste (NO) e Sudeste (SE) estão nas legendas.

## Capítulo 4

# Método de Síntese de População Estelar

Tendo em vista que grandezas físicas globais, como idade e metalicidade, não podem ser extraídas diretamente do espectro integrado de SPs de galáxias, desenvolveram-se ao longo do tempo métodos comparativos, também conhecidos como método de síntese de SP. Tal processo consiste na combinação de diversos espectros de populações estelares simples (SSPs, do inglês *Simple Stellar Populations*), cujas propriedades são bem conhecidas, para formar o espectro da população de interesse e, com isso, inferir suas propriedades físicas. Uma SSP é um grupo de estrelas de mesma idade e composição química (Renzini, 1981).

Existem, basicamente, dois métodos utilizados para fazer síntese de SPs em espectros integrados de galáxias a partir da combinação de SSPs. A diferença entre esses dois métodos está, essencialmente, no modo como as SSPs são obtidas e/ou calculadas. O primeiro método consiste na construção de uma biblioteca de SSPs empíricas, através da obtenção do espectro integrado de aglomerados, com idade e metalicidade conhecidas. Bica & Alloin (1986) implementaram esse método na região do óptico, observando 63 aglomerados de estrelas da Via Láctea e das Nuvens de Magalhães, com idades entre  $10^6 \leq t \leq 1.65 \times 10^{10}$  anos e metalicidades entre  $-2.1 \leq [Z/Z_{\odot}] \leq 0.1$ . A principal vantagem desse método é ser livre de limitações da teoria de evolução estelar, assim como suposições sobre a função inicial de massa (IMF, do inglês *Initial Mass Function*). Um problema, entretanto, é que SPs muito diferentes das dos aglomerados próximos não podem ser sintetizadas.

O segundo método é conhecido como síntese evolutiva de população estelar (EPS). Nesse método, o conteúdo estelar dos aglomerados para as diferentes idades e metalicidades é modelado de forma teórica, posteriormente combinando-se os

espectros estelares teóricos e/ou empíricos para produzir o espectro integrado da SSP. Os trabalhos pioneiros nessa abordagem foram Tinsley (1972) e Tinsley & Gunn (1976). Existem duas técnicas para o cálculo do modelo da SSP, as quais diferem-se pela variável de integração adotada no cálculo da evolução: aqueles que utilizam uma grade de isócronas e integram observáveis em função da massa em cada estágio evolutivo (e.g. Charlot & Bruzual, 1991, Kotulla et al., 2009); e aqueles que utilizam o teorema do consumo de combustível, cuja variável de integração seria esse combustível, i.e. a quantidade de hidrogênio e/ou hélio que é consumida através da queima nuclear para as fases além da sequência principal (e.g. M05, M11).

Dito isso, passemos para os dois principais ingredientes da síntese de SP: a base de elementos (um conjunto de modelos de SSPs) e o código utilizado para fazer a mistura das SSPs.

## 4.1 A Base de Elementos

O objetivo da síntese de SP é quantificar a contribuição de cada SP ao espectro integrado da galáxia. Para isso, o código mistura as SSPs que compõem a base de elementos até ajustar o espectro da fonte. Assim, um conjunto ideal de elementos para compor a base deveria cobrir o intervalo de propriedades espectrais observadas na amostra de galáxias, propiciando resolução suficiente em idade e metalicidade para ajustar, da melhor forma possível, o espectro observado (Cid Fernandes et al., 2005a). Em outras palavras, um conjunto confiável seria uma biblioteca de espectros integrados de aglomerados de estrelas (i.e. eles dependem somente das idades e metalicidades das estrelas e são livres de qualquer suposição com relação à evolução estelar e IMF, Bica & Alloin, 1986, Riffel et al., 2011b). Entretanto, até agora, não existe nenhuma biblioteca desse tipo disponível para o intervalo espectral do NIR. Assim, o uso de uma base de elementos composta por SSPs teóricas, cobrindo esse intervalo espectral, tem se tornado uma abordagem bastante comum (Riffel et al., 2009, 2010, 2011a, Storchi-Bergmann et al., 2012, Martins et al., 2010, 2013).

Tendo em vista que o NIR carrega assinaturas de estrelas evoluídas (e.g. Riffel et al., 2007, Ramos Almeida et al., 2009, Martins et al., 2013) e que isso é crucial para modelar o espectro em absorção de galáxias nesse intervalo espectral, nós utilizamos os modelos EPS de M05. Eles incluem espectros empíricos de estrelas ricas em carbono e oxigênio (Lançon & Wood, 2000b) e com isso, são capazes de prever essas assinaturas. Esses modelos (espectros em *cinza* na Figura 4.1) cobrem um intervalo de idades de  $0.001 \times 10^6$  a  $15 \times 10^9$  anos, de acordo com uma grade de 67 modelos

com 4 metalicidades diferentes<sup>1</sup> ( $0.02 \leq Z/Z_{\odot} \leq 2$ ).

Como pequenas diferenças na SP são insignificantes em dados reais (i.e. elas são diluídas pelo ruído em dados observados, Cid Fernandes et al., 2004), nós decidimos incluir somente os espectros de SSPs representativos (i.e. somente aqueles que apresentam diferenças significativas com relação ao espectro subsequente) na base de elementos, no intuito de evitar informações redundantes e degenerescências (veja, por exemplo, Schmidt et al., 1991). Para escolhermos quais espectros iriam compor a base, calculamos o módulo da diferença entre duas SSPs consecutivas em idade ( $t$ ), normalizada pelo número de pixels ( $N$ ), ou seja, resolvendo a equação:

$$Idades_{dif} = \frac{1}{N} \sum_{\lambda} |F_{\lambda}(t_i) - F_{\lambda}(t_{i+1})|. \quad (4.1)$$

Um exemplo do resultado desse processo, para metalicidade solar, é mostrado na Figura 4.1. As SSPs representativas (que constituem a base de elementos) estão marcadas com uma estrela e são traçadas em *azul*, conforme mostra a Figura 4.1. Note que esse procedimento foi feito somente para o intervalo espectral de 8000Å a 24500Å, para quatro metalicidades, com todas as idades disponíveis. O conjunto final compreende 31 idades ( $t=0.0010, 0.0030, 0.0035, 0.0040, 0.0050, 0.0055, 0.0060, 0.0065, 0.0070, 0.0075, 0.0080, 0.0085, 0.0090, 0.010, 0.015, 0.020, 0.025, 0.030, 0.050, 0.080, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.7, 0.8, 1.0, 1.5, 2.0, 3.0, 13.0 \times 10^9$  anos) e quatro metalicidades ( $Z= 0.02, 0.5, 1$  e  $2 Z_{\odot}$ ), resultando em uma base de elementos composta por 124 SSPs.

É importante chamar a atenção para o fato de que a resolução espectral dos modelos de M05, no NIR ( $R \leq 250$ ), é significativamente mais baixa que a dos espectros observados da amostra ( $R \sim 750$ , Rayner et al., 2003) e varia com o comprimento de onda ( $\Delta\lambda=20\text{Å}$  na banda J,  $\Delta\lambda=50\text{Å}$  na banda H e  $\Delta\lambda=100\text{Å}$  na banda K). Por essa razão, degradamos os espectros observados à resolução dos modelos, convoluindo-os com uma gaussiana. Um exemplo de um espectro degradado é mostrado na Figura 4.2.

---

<sup>1</sup>Vale ressaltar que Maraston fornece modelos com  $Z=0.005Z_{\odot}$  e  $Z=3.5Z_{\odot}$ , mas somente para idades maiores do que  $1 \times 10^9$  anos, portanto, eles não foram incluídos na base. Note ainda, que estamos usando as metalicidades relativas à metalicidade do Sol. Nesses modelos  $Z_{\odot} = 0.02$ .



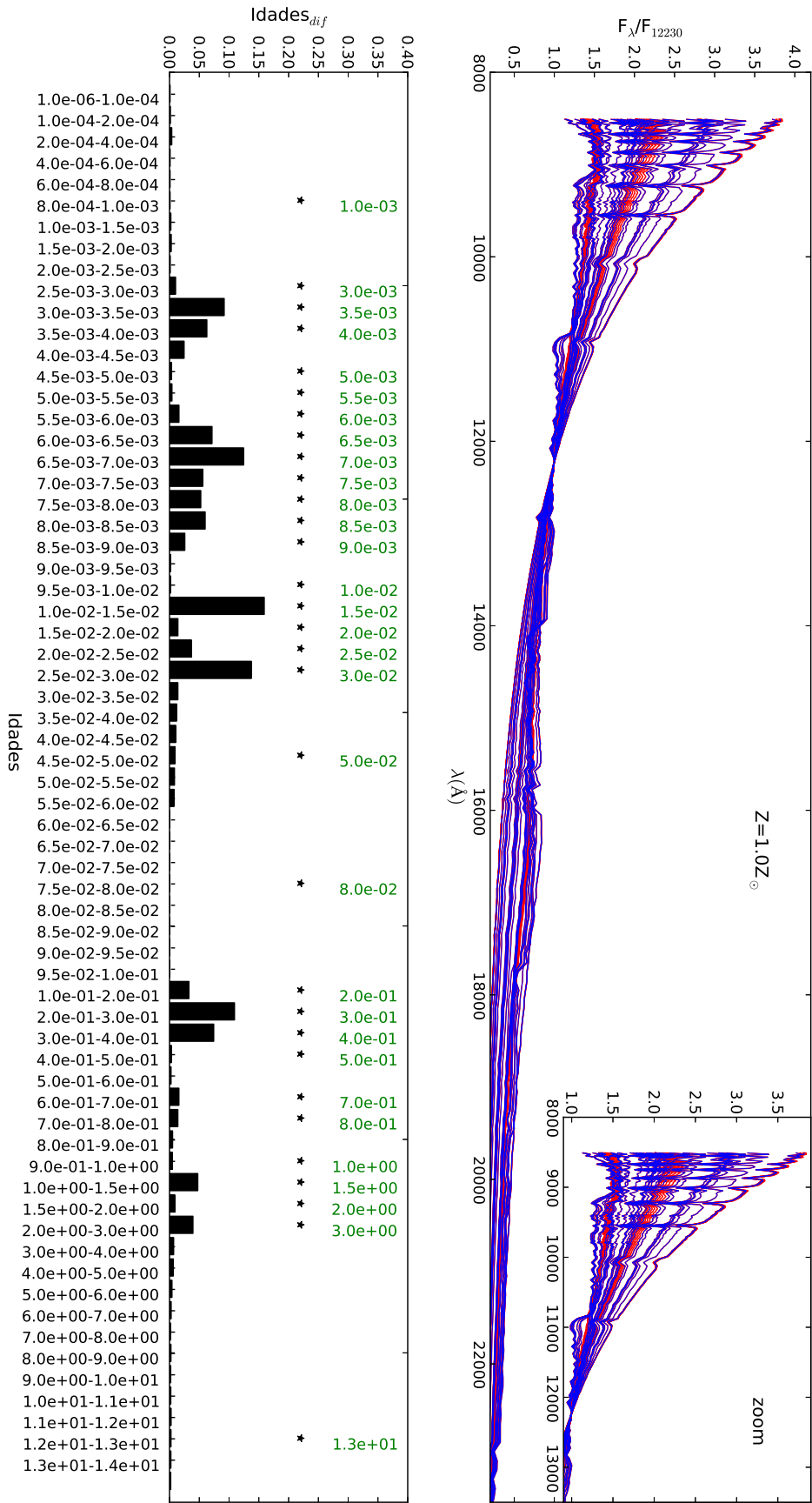


Figura 4.1: Todas as 67 SSPs de M05 para  $Z=Z_{\odot}$  são mostradas em (*vermelho*) no painel superior, juntamente com as 31 SSPs selecionadas (*azul*) para compor a base de elementos para essa metalicidade. No painel inferior, mostramos a diferença quadrática de duas SSPs com idades consecutivas. Os modelos representativos escolhidos para compor a base de elementos estão marcados com uma estrela e desenhados em *azul* no painel superior. Um zoom da parte mais azul dos espectros (onde as maiores diferenças são observadas) também é mostrado.

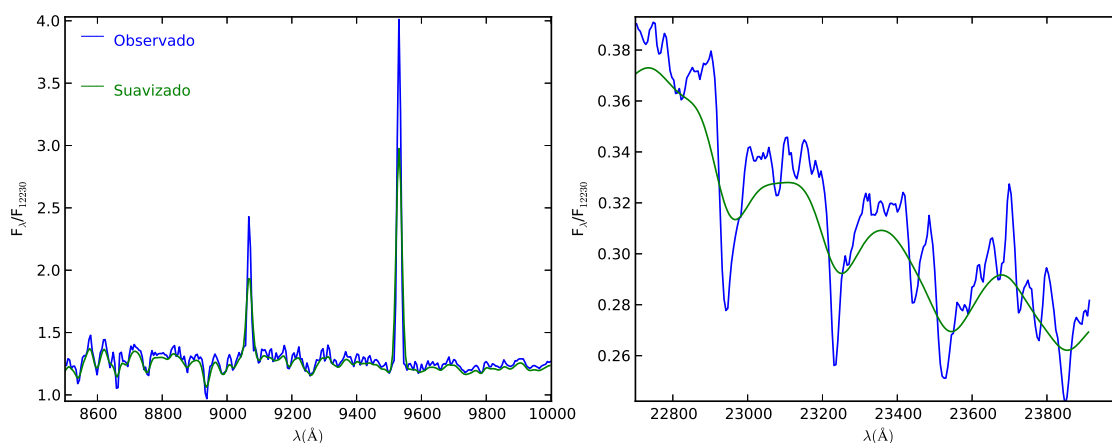


Figura 4.2: Comparação entre o espectro observado do núcleo de NGC 3310 (*azul*) e o espectro resultante da suavização gaussiana (*verde*). O espectro foi dividido em duas partes, o *painel esquerdo* mostra o efeito da suavização nas linhas de emissão e o *painel direito* mostra o efeito na banda de absorção do CO.

## 4.2 O Código: STARLIGHT

Uma vez que a base de elementos foi definida, o outro ingrediente chave para síntese de SP é o código, o qual vai misturar as componentes individuais da base (as SSPs) para ajustar o espectro observado. Neste trabalho, utilizamos o código STARLIGHT (Cid Fernandes et al., 2004, 2005b, Mateus et al., 2006, Asari et al., 2007), o qual combina técnicas computacionais originalmente desenvolvidas para síntese empírica de SP com ingredientes dos modelos EPS. Resumidamente, o código ajusta o espectro observado  $O_\lambda$  com uma combinação, em diferentes proporções, das SSPs que compõem a base de elementos ( $b_{j,\lambda}$ ), tiradas dos modelos EPS. Uma característica importante desse código é que ele ajusta o espectro inteiro, de 8000Å a 24000Å, excluindo as linhas de emissão e dados espúrios (e.g. raios cósmicos, ruído e regiões das bandas telúricas), que são mascarados ou removidos do ajuste (veja mais detalhes a seguir).

A extinção do fluxo devido à poeira é modelada pelo STARLIGHT assumindo uma distribuição uniforme da poeira na linha de visada. O código nos permite escolher a lei de extinção a ser utilizada no ajuste. Optamos pela Lei de Calzetti et al. (2000), pois essa é a mais adequada para o cálculo do avermelhamento em SBs. Como a nossa cobertura espectral vai até  $\sim 24000\text{Å}$ , optamos pela Lei de Calzetti implementada pelo código *hyperz*<sup>2</sup> (Bolzonella et al., 2000), o qual calcula a Lei de

<sup>2</sup>O *hyperz* é um código público que calcula *redshifts* fotométricos, via ajuste da distribuição espectral de energia (SED, do inglês *Spectral Energy Distribution*) da fonte.

Calzetti para comprimentos de onda maiores ( $\lambda > 22000\text{\AA}$ ) do que em Calzetti et al. (2000).

A dispersão de velocidades é um parâmetro livre para o STARLIGHT, o qual alarga cinematicamente as SSPs, a fim de melhor ajustar as linhas de absorção do espectro observado. Os resultados desse passo, contudo, não são relevantes no nosso caso, uma vez que a resolução dos modelos é muito baixa.

Essencialmente, o código resolve a seguinte equação para um espectro modelo  $M_\lambda$  (Cid Fernandes et al., 2005a):

$$M_\lambda = M_{\lambda_0} \left[ \sum_{j=1}^{N_\star} x_j b_{j,\lambda} r_\lambda \right] \otimes G(v_\star, \sigma_\star), \quad (4.2)$$

na qual  $M_{\lambda_0}$  é o fluxo sintético no comprimento de onda de normalização ( $\lambda_0 = 12240\text{\AA}$ );  $x_j$  é a contribuição da  $j$ -ésima componente do vetor de SP da base de elementos;  $b_{j,\lambda} r_\lambda$  é o espectro avermelhado da  $j$ -ésima SSP normalizada em  $\lambda_0$ , sendo  $r_\lambda = 10^{-0.4(A_\lambda - A_{\lambda_0})}$  o termo de extinção;  $\otimes$  denota o operador convolução e  $G(v_\star, \sigma_\star)$  é a distribuição gaussiana usada para modelar os movimentos estelares na linha de visada, centrados em uma velocidade  $v_\star$ , com dispersão  $\sigma_\star$ . Nós escolhemos  $\lambda_0 = 12240\text{\AA}$  como comprimento de onda de normalização, uma vez que esta região é livre de linhas de emissão e absorção (Riffel et al., 2008). O STARLIGHT normaliza todos os espectros da base por  $F_{\lambda_0}$ . Já o espectro observado é normalizado pelo fluxo mediano medido em uma janela de  $80\text{\AA}$ , no caso deste trabalho, centrada em  $\lambda_0$ , definida de maneira a evitar os efeitos de um pixel ruim (ruído, raios cósmicos etc.) em  $\lambda_0$  no espectro observado. Finalmente, o código investiga o espaço de combinações lineares entre os espectros da base, procurando por uma solução que minimize o  $\chi^2$  (melhor ajuste), dado pela equação abaixo:

$$\chi^2 = \sum_{\lambda} [(O_\lambda - M_\lambda)w_\lambda]^2$$

Tanto o  $\chi^2$ , quanto o Adev (outro parâmetro de saída do STARLIGHT), podem ser usados para medir a qualidade e robustez do ajuste da SP. O Adev é o desvio percentual médio  $|O_\lambda - M_\lambda|/O_\lambda$ , sendo  $O_\lambda$  o espectro observado e  $M_\lambda$  o modelo ajustado. O código utiliza uma combinação de métodos estatísticos para a realização dos ajustes, tais quais o algoritmo de *simulated annealing*<sup>3</sup> (Kirkpatrick et al., 1983) e o algoritmo de *Metropolis-Hastings*<sup>4</sup> (Metropolis et al., 1953, Hastings, 1970), que

<sup>3</sup>*Simulated annealing* é um método probabilístico para se encontrar um mínimo global de uma função, a qual pode ter vários mínimos locais.

<sup>4</sup>O algoritmo de *Metropolis-Hastings* é um método de MCMC (do inglês *Markov Chain Monte*

gradualmente focam na região mais provável do espaço de parâmetros, evitando que o código fique preso em um mínimo local.

As linhas de emissão e os dados espúrios (ruído, regiões de bandas telúricas, raios cósmicos etc.) são mascarados utilizando  $w_\lambda = 0$  para as regiões onde essas características são encontradas. No nosso caso, as principais linhas de emissão mascaradas foram: [SIII] 9069Å, [SIII] 9531Å, HeI 10830Å, Pa $\gamma$  10938Å, [Fe II] 12570Å, Pa $\beta$  12810Å, [Fe II] 16444Å, Pa $\alpha$  19570Å, Br $\gamma$  21650Å and H $_2$  21213Å. As Figuras 5.1 a 5.4, apresentam exemplos das regiões que foram mascaradas.

Em suma, após excluir os pontos mascarados no espectro, o processo de minimização do STARLIGHT consiste nos seguintes estágios: (i) o código faz uma ampla varredura do espaço de parâmetros, começando de uma alta ‘temperatura’ (em termos estatísticos) para permitir que o sistema explore todos os tipos de configurações e, então, implementando um cronograma de resfriamento, que gradualmente reduz a ‘temperatura’, deixando, assim, que o sistema se estabeleça em estados de mais baixa energia, (ii) exclusão de pixels que não puderam ser ajustados no primeiro estágio, por desviarem muito do melhor ajuste ( $M_\lambda$ ) encontrado nessa primeira etapa, (iii) ajuste detalhado utilizando toda as SSPs da base de elementos e (iv) o ajuste é aperfeiçoado repetindo toda sequência de etapas, excluindo as componentes irrelevantes ( $x_j=0$ ) ao ajuste. Uma discussão detalhada dos procedimentos de ajuste do STARLIGHT pode ser encontrada em Cid Fernandes et al. (2004, 2005a) e no manual do código, disponível em <http://astro.ufsc.br/starlight/>.

### 4.3 As Incertezas no Ajuste

O uso de métodos estatísticos para interpretar os resultados da síntese espectral de SP é amplamente difundido (e.g. Panter et al., 2007), uma vez que trabalhar com resultados médios tende a diminuir as incertezas associadas (Cid Fernandes et al., 2013). No nosso caso, outro bom motivo para o uso da estatística na interpretação dos resultados é o cálculo das incertezas associadas ao ajuste, uma vez que o STARLIGHT não fornece essas estimativas como um parâmetro de saída padrão. A maneira mais simples de se determinar esses valores é perturbando o espectro observado, levando em conta os erros associados a ele (Cid Fernandes et al., 2013). No intuito de estimar essas incertezas, nós simulamos 100 espectros para cada espectro observado de cada abertura das galáxias da amostra. O fluxo simulado para

---

*Carlo*), geralmente utilizado para a obtenção de uma sequência de amostragens aleatórias, a partir de uma distribuição de probabilidade, para a qual uma amostragem direta é de difícil realização.

cada comprimento de onda ( $\lambda_i$ ) foi calculado assumindo uma distribuição gaussiana das incertezas. Portanto, o fluxo médio em cada  $\lambda_i$  é correspondente ao valor do fluxo medido naquele ponto e o desvio padrão é dado pelos erros fornecidos pelo SPEXTOOL.

O STARLIGHT fornece um único conjunto de parâmetros (uma única solução) do melhor ajuste, entre muitas milhões de tentativas durante sua amostragem guiada de forma probabilística do espaço de parâmetros. Essas soluções singulares, entretanto, não são necessariamente únicas matematicamente. Neste cenário, nós fizemos a síntese de SP, não só nos espectros observados, mas também em todos os simulados, no intuito de obter um resultado médio e um desvio padrão associado para cada abertura de cada galáxia. Como resultado, temos uma estimativa das incertezas associadas ao ajuste da SP em cada abertura (veja Figuras 5.1 a 5.4).

# Capítulo 5

## Resultados e Discussão<sup>1</sup>

Através de um estudo sistemático da variação das SPs ao longo da galáxia, construímos um cenário para a formação estelar nas quatro SBs estudadas neste trabalho. Um exemplo da análise individual dos resultados para a extração nuclear de cada galáxia é mostrado nas Figuras 5.1 a 5.4. Esses gráficos incluem as seguintes informações:

- no painel superior, mostramos o resultado da síntese (em *vermelho*) e os pontos mascarados (em *azul*), ambos sobrepostos ao espectro observado (em *preto*); abaixo, está o espectro residual (a linha pontilhada em *vermelho* marca o ponto zero em fluxo);
- o painel inferior apresenta quatro histogramas, da esquerda para a direita temos:
  - as contribuições dos vetores de SP separadas somente por idade (metalicidades somadas), pesadas em fluxo ( $\Sigma x_j$ );
  - as contribuições dos vetores de SP separadas somente por idade (metalicidades somadas), pesadas em massa ( $\Sigma \mu_j$ );
  - as contribuições dos vetores de SP separadas por idade e por metalicidade, pesadas em fluxo ( $x_j$ );
  - as contribuições dos vetores de SP separadas por idade e por metalicidade, pesadas em massa ( $\mu_j$ ).

Com essas figuras, nós podemos analisar os resultados da síntese individualmente para cada abertura de cada galáxia, controlando a qualidade dos ajustes e

---

<sup>1</sup>Baseado em Dametto et al. (2014)

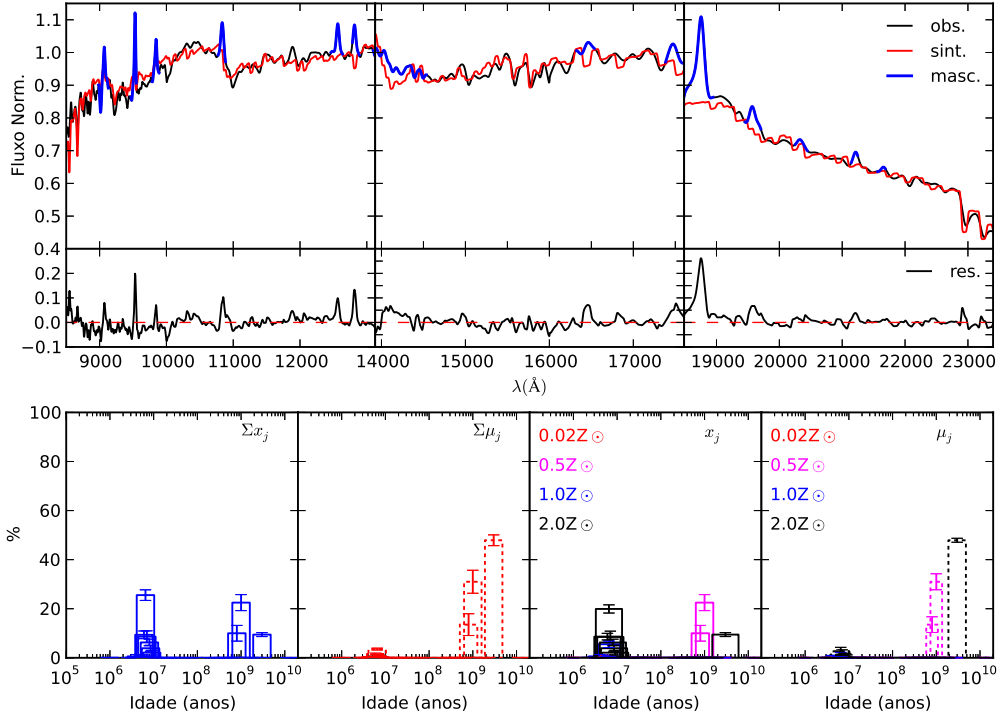


Figura 5.1: Resultados para a região nuclear de NGC 34. *Painéis Superiores*: apresentamos o resultado da síntese (*vermelho*) e os pontos mascarados (*azul*), ambos sobrepostos ao espectro observado (*preto*) da galáxia, abaixo, o espectro residual é mostrado (a linha pontilhada em *vermelho* marca o ponto zero em fluxo). *Painéis Inferiores*: nós apresentamos quatro histogramas, os dois à esquerda mostram as contribuições dos vetores de SP separadas somente por idade (metallicidades somadas), pesadas em fluxo ( $\Sigma x_j$ ) e em massa ( $\Sigma \mu_j$ ) e os dois à direita mostram as contribuições dos vetores SP separadas por idade e por metalicidade, pesadas em fluxo ( $x_j$ ) e em massa ( $\mu_j$ ), respectivamente. As regiões das bandas telúricas foram omitidas.

aperfeiçoando os arquivos das máscaras, quando necessário. Vale a pena ressaltar que as barras de erro dos histogramas no painel inferior provém do resultado médio encontrado entre os 100 espectros simulados mais o espectro observado para cada abertura (para mais detalhes, veja Seção 4.3).

Por outro lado, agrupar os vetores de SP em bins maiores de idade pode proporcionar uma descrição mais grosseira, porém mais confiável, do histórico de formação estelar (SFH, do inglês *Star Formation History*) das galáxias (Cid Fernandes et al., 2001, 2003, Riffel et al., 2010, 2011a, entre outros.). Na verdade, Cid Fernandes et al. (2001) mostraram que as incertezas nas medidas, assim como o uso de conjuntos reduzidos de observáveis, são responsáveis pela disseminação de uma forte contribuição em uma componente preferencial entre os elementos da base com idades

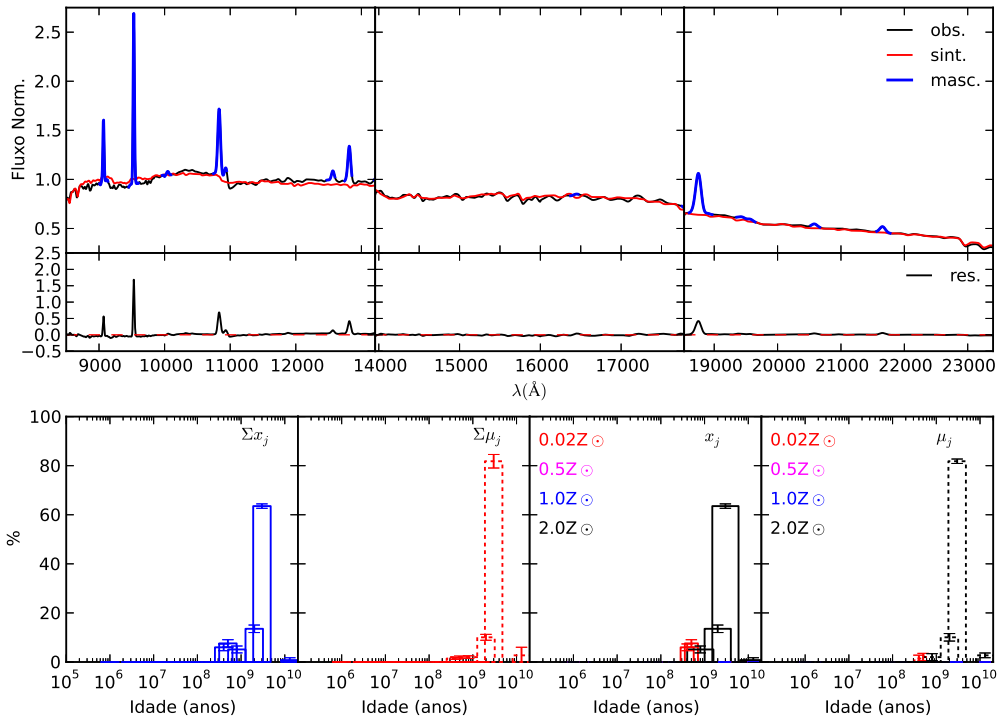


Figura 5.2: Idem à Fig. 5.1 para a galáxia NGC 1614.

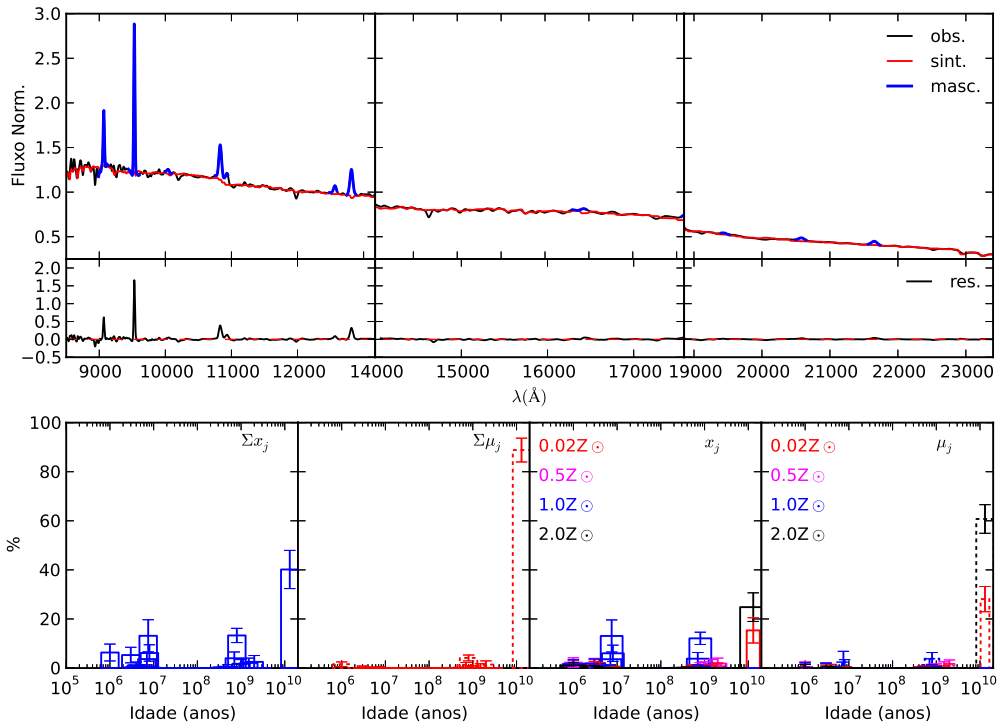


Figura 5.3: Idem à Fig. 5.1 para a galáxia NGC 3310.



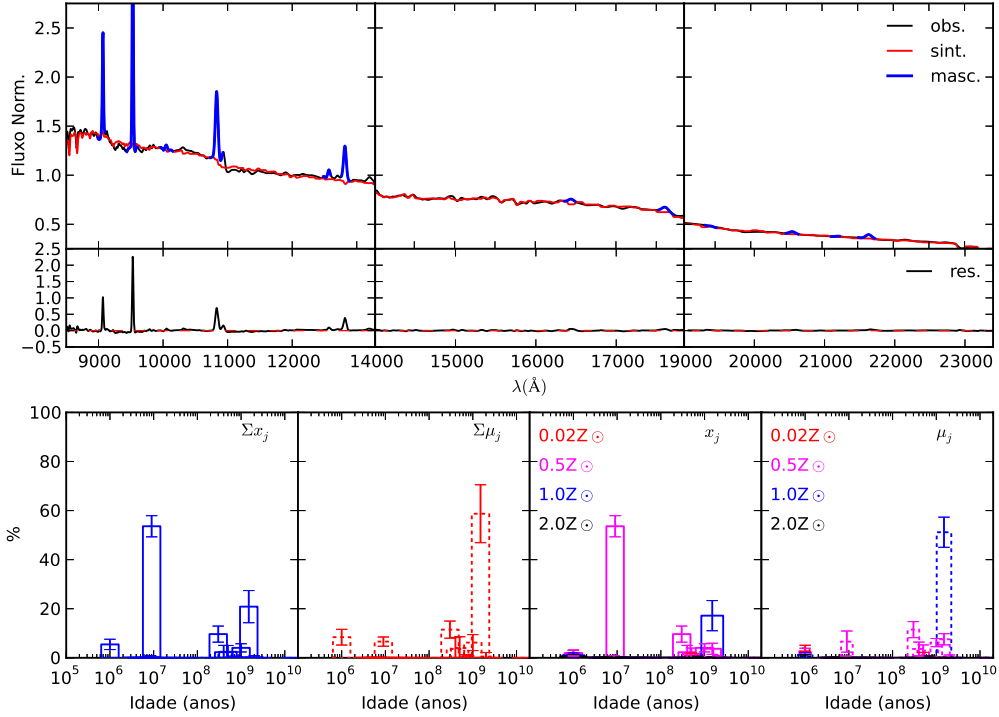


Figura 5.4: Idem à Fig. 5.1 para a galáxia NGC 7714.

próximas. Neste sentido, nós usamos uma definição similar a deCid Fernandes et al. (2005b) para os vetores de SP agrupados, conforme segue: *jovem*:  $x_y$  ( $t \leq 50 \times 10^6$  anos), *intermediária*:  $x_i$  ( $50 \times 10^6 < t \leq 2 \times 10^9$  anos) e *velha*:  $x_o$  ( $t > 2 \times 10^9$  anos), a fim de discutir resultados médios para o SFH das galáxias.

Além disso, no intuito de descrever o comportamento da metalicidade na mistura de SPs ao longo da galáxia, nós utilizamos também as definições de metalicidade média pesada em fluxo e em massa apresentadas por esses autores, como segue:

$$\langle Z_{\star} \rangle_F = \sum_{j=1}^{N_{\star}} x_j Z_j, \quad (5.1)$$

para a metalicidade média pesada em fluxo e

$$\langle Z_{\star} \rangle_M = \sum_{j=1}^{N_{\star}} m_j Z_j \quad (5.2)$$

para a metalicidade média pesada em massa, na qual  $Z_j$  é a metalicidade associada à  $j$ -ésima componente do vetor de SP ( $x_j$ : pesada em luz e  $m_j$ : pesada em massa) da base de elementos. Ambas as definições estão restritas ao intervalo de metalicidades de  $0.02Z_{\odot}$  a  $2Z_{\odot}$  da base de elementos.

Para analisarmos melhor os resultados obtidos com os vetores de SP agrupados, criamos uma série de histogramas para cada uma das galáxias estudadas, mostrados nas Figuras 5.5 a 5.8. Esses histogramas nos ajudam na construção de um cenário de formação estelar para cada galáxia, revelando as idades predominantes da SP, assim como indicando a presença de possíveis subestruturas nucleares<sup>2</sup>. Cada figura inclui sete painéis, conforme descritos abaixo:

- os painéis *a* e *b* apresentam uma análise global dos resultados para cada galáxia, mostrando as contribuições médias (em fluxo e em massa, respectivamente) dos vetores de SP agrupados ao longo das aberturas (*azul*, *amarelo* e *branco* representam as componentes *jovem*, *intermediária* e *velha*, respectivamente);
- o painel *c* mostra a metalicidade média pesada em fluxo e em massa;
- a extinção ( $A_v$ ) ao longo das aberturas é mostrada no painel *d*;
- o  $\chi^2$  e o Adev médios são apresentados no painel *e*;
- o perfil do contínuo em  $\lambda_{cent} = 12230\text{\AA}$  aparece no painel *f*;
- a razão sinal-ruído é mostrada no painel *g*.

As barras de erro dos gráficos nos painéis de *a-e* provém do resultado médio encontrado entre os 100 espectros simulados mais o espectro observado para cada abertura (para mais detalhes veja Seção 4.3). O valor do fluxo do contínuo em cada abertura (painel *f*) foi calculado como sendo a média dos fluxos  $F_\lambda$  do espectro, dentro de um intervalo de comprimento de onda (12200 - 12260 $\text{\AA}$ , região livre de linhas de emissão e/ou absorção). As barras de erro desse gráfico correspondem ao desvio padrão da média dos fluxos. A razão sinal-ruído (SNR, do inglês *Signal-to-Noise Ratio* - painel *g*) foi estimada como sendo a razão entre esse valor médio de  $F_\lambda$  (entre 12200 - 12260 $\text{\AA}$ ) e seu desvio padrão.

É importante mencionar que as incertezas aumentam, quanto menor for o SNR (barras de erro maiores nas aberturas mais externas - veja as Figuras 5.5 a 5.8). Todavia, decidimos incluir esses resultados (para  $\text{SNR} \leq 10$ ) na análise, uma vez que eles seguem a mesma tendência da distribuição da SP ao longo das galáxias. Os resultados médios da síntese de SP, usados para construir os histogramas, estão listados na Tabela 5.1.

A seguir, descrevemos os resultados obtidos através da nossa análise da SP ao longo de cada galáxia e os comparamos com os resultados encontrados na literatura.

<sup>2</sup>Aqui, assumimos que dois picos de SP, aproximadamente simétricos ao núcleo, possam representar um anel de SP com aquela idade, pois nossa fenda passa por esses dois pontos do anel.

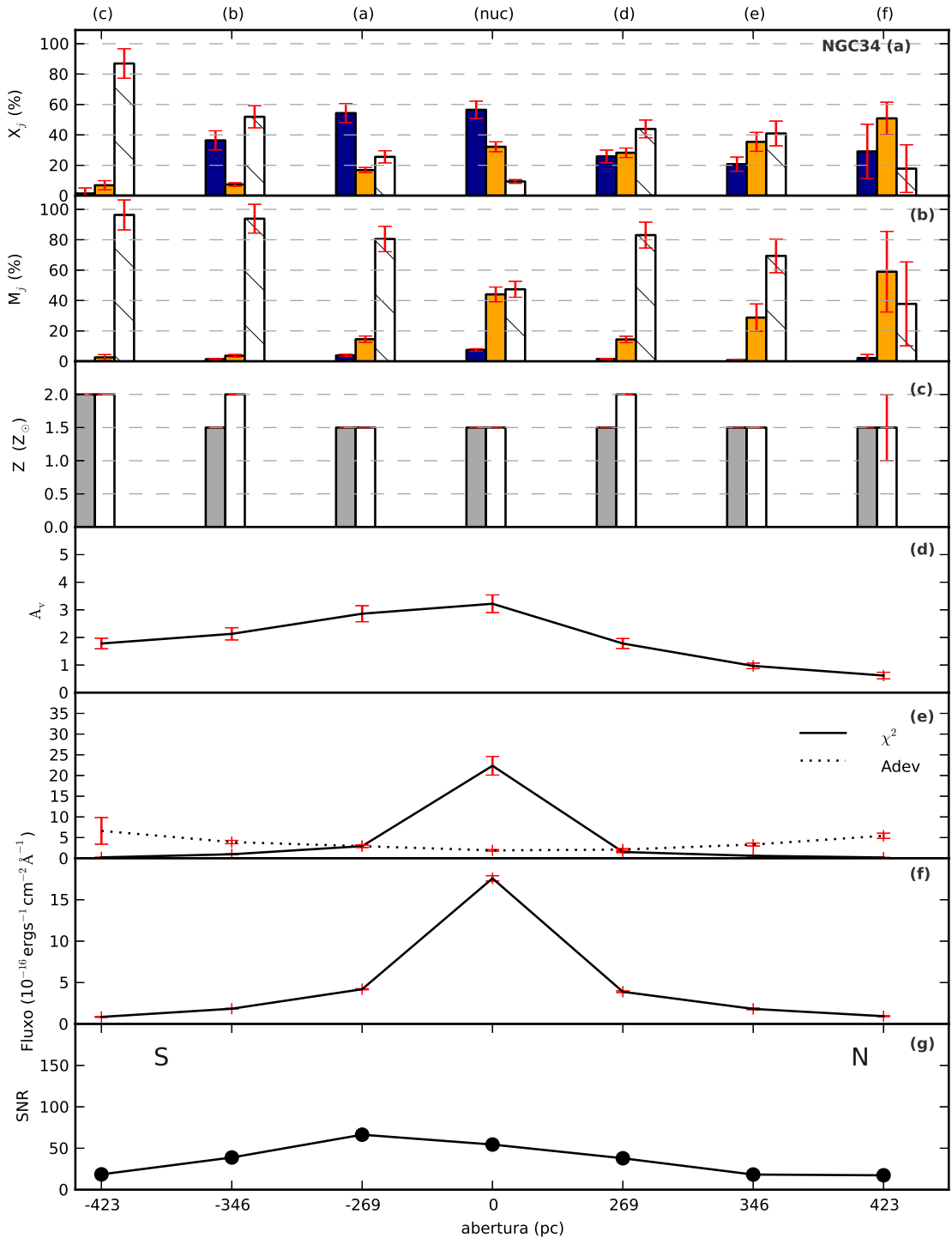


Figura 5.5: Análise global da galáxia NGC 34. Os painéis *a* e *b* apresentam as contribuições médias (em fluxo e em massa, respectivamente) dos vetores de SP agrupados ao longo das aberturas. *Azul*, *amarelo* e *branco* representam as componentes *jovem* ( $t \leq 50 \times 10^6$  anos), *intermediária* ( $50 \times 10^6 < t \leq 2 \times 10^9$  anos), respectivamente; o painel *c* mostra  $Z_F$  (*preenchido*) e  $Z_M$  (*vazio*); a extinção ( $A_v$ ) ao longo das aberturas é mostrada no painel *d*; o  $\chi^2$  e o Adev médios são apresentados no painel *e*; o perfil do contínuo em  $\lambda_{cent} = 12230\text{\AA}$  aparece no painel *f* e por último, a razão sinal-ruído (SNR) é mostrada no painel *g*. As letras no topo da figura correspondem àquelas da Figura 3.1. As direções Norte (N) e Sul (S) estão indicadas no painel *g*.

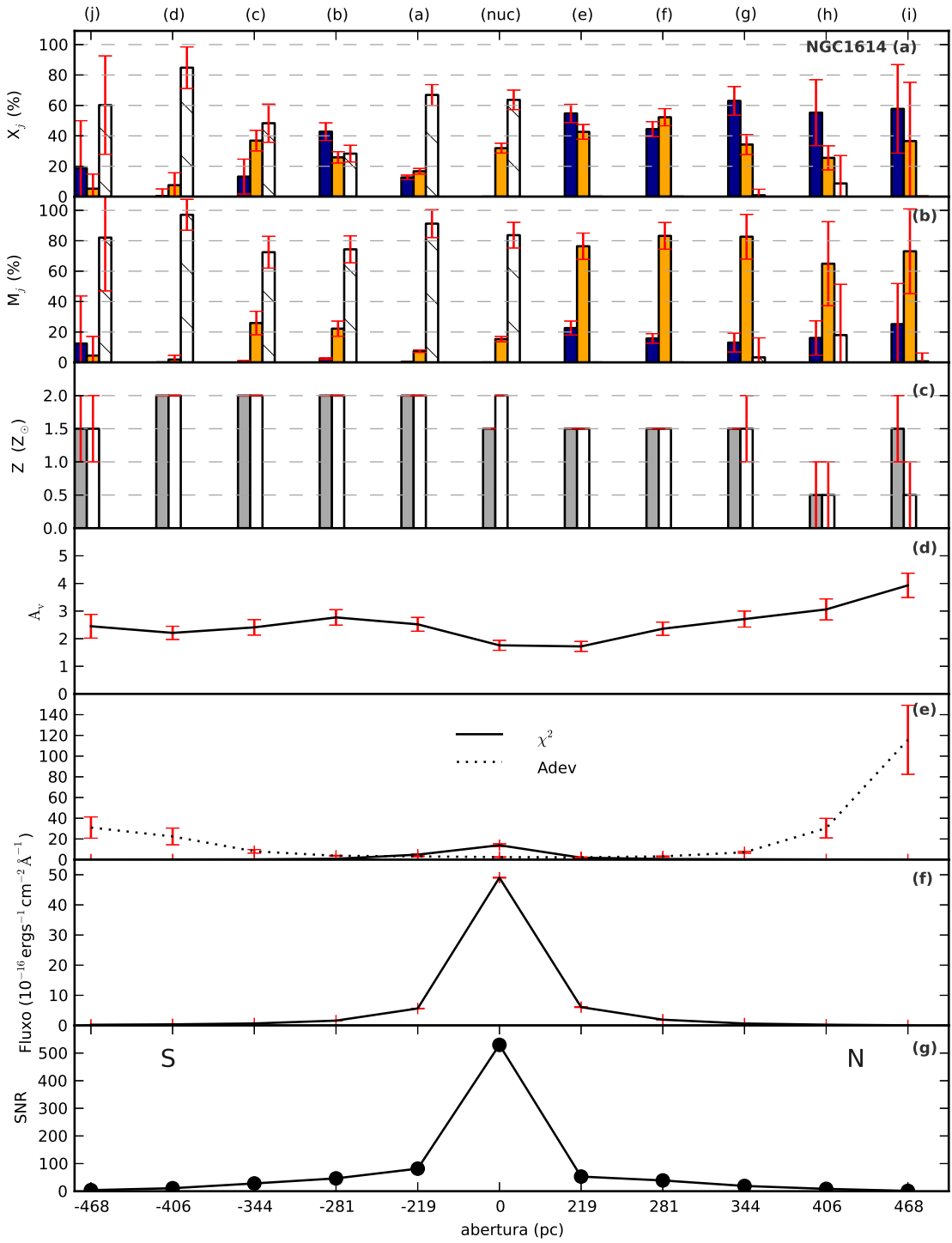


Figura 5.6: Idem à Fig. 5.5 para a galáxia NGC 1614.

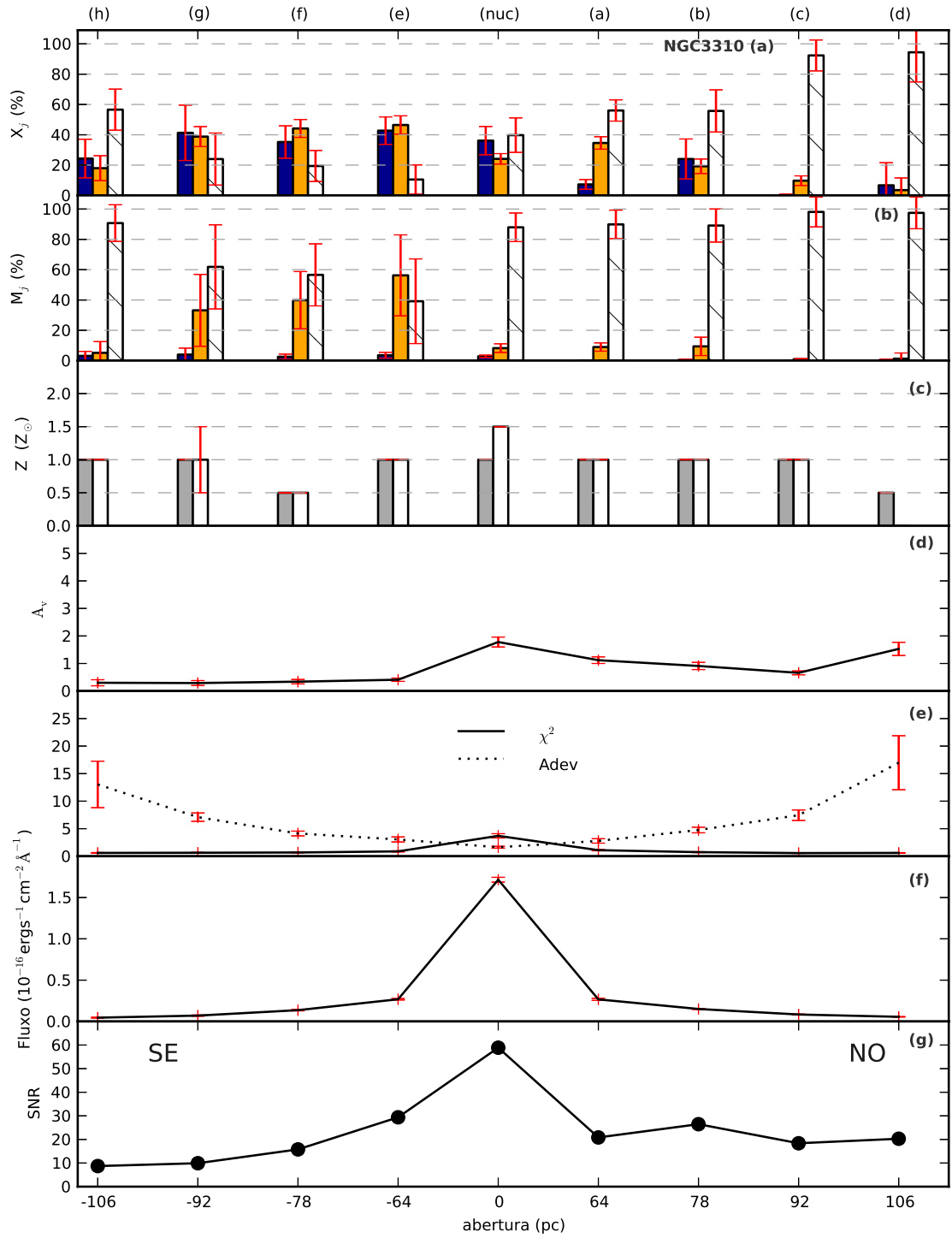


Figura 5.7: Idem à Fig. 5.5 para a galáxia NGC 3310. As direções Noroeste (NO) e Sudeste (SE) estão indicadas no painel *g*.

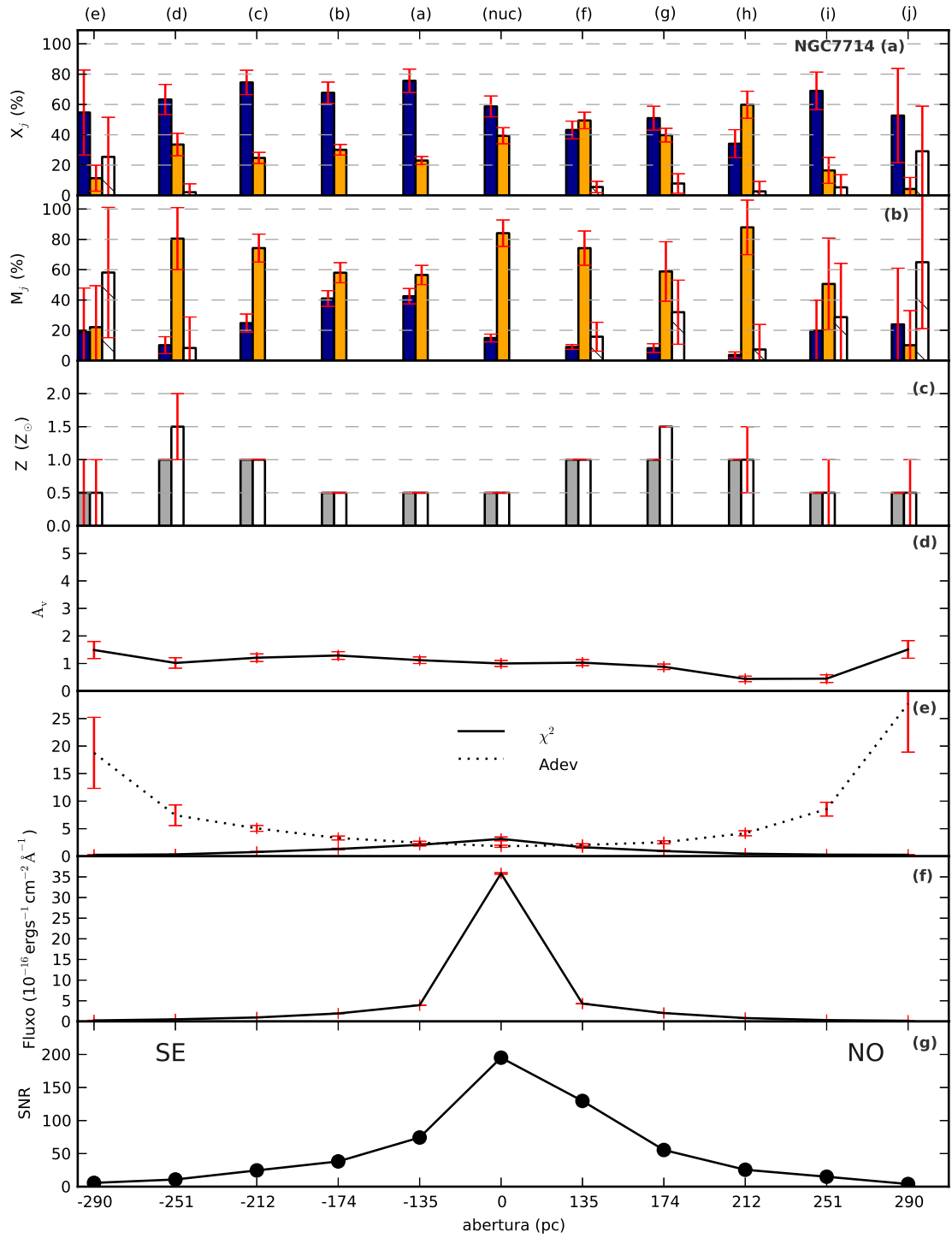


Figura 5.8: Idem à Fig. 5.5 para a galáxia NGC 7714. As direções Noroeste (NO) e Sudeste (SE) estão indicadas no painel *g*.

Tabela 5.1: Resultados médios da síntese de população estelar para as galáxias da amostra.

Galáxia	Abertura (pc)	$X_y$ (%) (1)	$X_i$ (%) (2)	$X_o$ (%) (3)	$M_y$ (%) (4)	$M_i$ (%) (5)	$M_o$ (%) (6)	$Z_L$ ( $Z_\odot$ ) (7)	$Z_M$ ( $Z_\odot$ ) (8)	$A_v$ (mag) (9)	Adev (%) (10)	$\chi^2$ (11)
NGC 34	(c)423 S	1±4	7±3	87±10	...	3±2	96±10	2.0	2.0	1.78±0.19	6.6±3	0.2
	(b)346 S	36±6	7±1	52±7	1	4±1	94±9	1.5	2.0	2.13±0.22	3.9	1.0±0.1
	(a)269 S	54±6	17±2	26±4	4±1	15±2	81±8	1.5	1.5	2.86±0.29	2.9	3.0±0.3
	Nuc	57±6	32±3	9±1	8	44±5	47±5	1.5	1.5	3.22±0.32	1.9	22.4±2.3
	(d)269 N	26±4	28±3	44±6	1	14±2	83±9	1.5	2.0	1.78±0.18	2.1	1.5±0.2
	(e)346 N	21±5	35±6	41±8	1	29±9	69±11	1.5	1.5	0.97±0.10	3.3	0.6±0.1
	(f)423 N	29±18	51±11	18±16	2±2	59±27	38±28	1.5	1.5±0.5	0.62±0.12	5.4±1	0.2
NGC 1614	(j)468 S	19±31	5±10	60±32	12±31	5±13	82±35	1.5±0.5	1.5±0.5	2.45±0.43	31.0±10.3	0.2
	(d)406 S	0±5	8±8	85±14	...	2±3	97±10	2.0	2.0	2.21±0.24	22.5±8.1	0.2
	(c)344 S	13±11	37±7	48±13	1	26±8	72±10	2.0	2.0	2.41±0.28	8.1±1.7	0.3
	(b)281 S	43±6	26±4	28±5	2±1	22±5	74±9	2.0	2.0	2.77±0.28	3.8±0.4	0.9±0.1
	(a)219 S	13±2	17±2	67±7	...	7±1	91±9	2.0	2.0	2.52±0.25	3.2±0.3	4.9±0.5
	Nuc	...	32±3	64±6	...	15±2	84±8	1.5	2.0	1.76±0.18	2.5±0.3	14.0±1.4
	(e)219 N	55±6	43±5	...	23±5	76±9	...	1.5	1.5	1.72±0.18	2.3±0.3	2.0±0.2
	(f)281 N	44±5	52±6	...	16±3	83±9	...	1.5	1.5	2.36±0.24	3.2±0.3	0.7±0.1
	(g)344 N	63±9	34±7	1±4	13±6	83±15	3±13	1.5	1.5±0.5	2.71±0.29	7.1±0.8	0.4±0.1
	(h)406 N	55±22	26±8	9±	16±11	65±28	18±33	0.5±0.5	0.5±0.5	3.06±0.38	30.4±9.4	0.3
	(i)468 N	58±29	37±39	...	25±27	73±28	1±5	1.5±0.5	0.5±0.5	3.93±0.44	115.7±33.3	0.2
NGC 3310	(d)106 N	7±15	4±8	94±20	0±1	1±4	97±11	0.5	...	1.53±0.24	17.0±4.9	0.6±0.1
	(c)92 N	0±1	10±3	92±10	...	1	98±10	1.0	1.0	0.66±0.07	7.5±1.0	0.6±0.1
	(b)78 N	24±13	19±4	56±14	...	9±6	89±11	1.0	1.0	0.91±0.13	4.8±0.5	0.7±0.1
	(a)64 N	7±3	35±4	56±7	...	9±3	90±9	1.0	1.0	1.12±0.12	2.8±0.4	1.1±0.1
	Nuc	36±9	24±3	40±11	3±1	8±3	88±9	1.0	1.5	1.78±0.18	1.6±0.2	3.7±0.4
	(e)64 S	43±9	46±6	10±10	4±2	56±27	39±28	1.0	1.0	0.41±0.06	3.1±0.5	0.9±0.1
	(f)78 S	35±11	44±6	19±10	3±2	40±19	57±20	0.5	0.5	0.34±0.08	4.1±0.4	0.6±0.1
	(g)92 S	41±18	39±7	24±17	4±4	33±24	62±28	1.0	1.0±0.5	0.29±0.09	7.1±0.8	0.6±0.1
	(h)106 S	24±13	18±8	57±14	3±3	5±7	91±12	1.0	1.0	0.30±0.11	13.0±4.2	0.6±0.1
NGC 7714	(e)290 S	55±28	11±9	25±26	19±29	22±27	58±43	0.5±0.5	0.5±0.5	1.49±0.31	18.77±6.45	0.25±0.03
	(d)251 S	63±10	34±7	2±6	10±6	81±20	8±20	1.0	1.5±0.5	1.02±0.19	7.44±1.88	0.33±0.04
	(c)212 S	75±8	25±4	...	25±6	74±9	...	1.0	1.0	1.21±0.14	5.06±0.53	0.77±0.08
	(b)174 S	68±7	30±3	...	41±5	58±7	...	0.5	0.5	1.29±0.14	3.31±0.35	1.31±0.14
	(a)135 S	76±8	23±3	...	42±5	57±6	...	0.5	0.5	1.12±0.12	2.46±0.26	2.07±0.21
	Nuc	59±7	39±5	...	15±3	84±9	...	0.5	0.5	1.00±0.11	1.81±0.20	3.15±0.35
	(f)135 N	43±6	49±5	6±4	9±1	74±11	16±10	1.0	1.0	1.03±0.11	2.05±0.21	1.64±0.17
	(g)174 N	51±8	40±5	8±6	8±3	59±20	32±21	1.0	1.5	0.88±0.10	2.54±0.27	0.94±0.10
	(h)212 N	34±9	60±9	3±7	4±2	88±18	7±17	1.0	1.0±0.5	0.44±0.10	4.17±0.45	0.46±0.05
	(i)251 N	69±12	16±9	5±8	20±20	51±30	29±35	0.5	0.5±0.5	0.45±0.14	8.55±1.25	0.29±0.04
	(j)290 N	53±31	4±8	29±30	24±37	10±23	65±44	0.5	0.5±0.5	1.51±0.32	27.69±8.79	0.26±0.03

Sempre que as incertezas eram zero, esse valor foi omitido.

## 5.1 NGC 34

Os painéis *a* e *b* da Figura 5.5 mostram o predomínio das idades mais jovens no entorno do núcleo, sobretudo na direção Sul, enquanto que a SP de idade intermediária é mais pronunciada a Norte do núcleo. A contribuição da SP velha é realçada no histograma das frações pesadas em massa, conforme esperado, uma vez que, quanto mais velha for a população, menos luz ela vai emitir, diminuindo a contribuição em fluxo e aumentando a contribuição em massa dessa componente. Nossos resultados estão de acordo com os encontrados na literatura. Por exemplo, estudando as propriedades ópticas de NGC 34 em uma escala mais ampla (70 kpc centrais) do que a utilizada no nosso estudo, Schweizer & Seitzer (2007) concluíram que essa fonte suporta um rico sistema de aglomerados estelares jovens e massivos, um disco azul exponencial e um *outflow* de gás bastante acentuado, todos assinaturas de uma fusão recente rica em gás e acompanhada de intensa formação estelar. Essa fonte também foi estudada por R08 na região espectral do NIR. Esses autores encontraram uma SP de idade intermediária ( $\sim 1 \times 10^9$  anos) dominante nos 230 pc centrais dessa fonte.

Na Figura 5.5c nós apresentamos a metalicidade média pesada em fluxo e em massa ao longo das aberturas de NGC 34. Nossos resultados apontam para valores acima da metalicidade solar ( $Z_{\odot}=0.02$ ) para todas as aberturas desse objeto. Além disso, nas aberturas em que a metalicidade média pesada em massa apresenta valores mais altos do que a pesada em fluxo, temos um aumento na contribuição da SP velha. Isso pode estar associado com a já bem conhecida degenerescência idade-metalicidade, i.e. para um valor de massa fixo, SPs de alta metalicidade parecem mais frias - e mais velhas - do que SPs de mais baixa metalicidade, resultando, portanto, em uma alta razão M/L. Nesse contexto, pode-se interpretar que a metalicidade média pesada em fluxo é mais sensível à componente jovem da SP, enquanto que a metalicidade média pesada em massa é mais sensível à componente velha.

O lado Norte da galáxia apresenta valores mais baixos de extinção visual ( $A_v < 2.0$  mag) do que a região nuclear ( $A_v \sim 3.0$  mag) e do que o lado Sul ( $A_v \sim 2.0$  mag), sugerindo um avermelhamento diferencial ao longo do bojo da galáxia. Para melhor compararmos nossos resultados com aqueles encontrados na literatura, nós estimamos um valor médio da extinção visual ajustada pelo STARLIGHT, resultando em  $\bar{A}_v=2.49\pm 0.10$  mag para NGC 34<sup>3</sup>. Utilizando os valores de  $E(B-V)$  citados por Veilleux et al. (1995), Goldader et al. (1997) derivaram o avermelhamento na banda

<sup>3</sup>Vale a pena ressaltar que essa média (ponderada) foi feita levando em conta as incertezas em  $A_v$  para cada abertura.



K para essa fonte e encontraram  $A_k=0.67$  mag (em uma abertura de  $1''.5 \times 4''.5$  na galáxia), o que resulta em  $A_v=6.2$  mag, utilizando a relação de Mathis (1990,  $A_k=0.108A_v$ ).

No intuito de acessarmos a qualidade do ajuste, apresentamos o gráfico do  $\chi^2$  e do Adev (desvio percentual médio) na Figura 5.5e, o perfil do contínuo em  $\lambda_{cent} = 12230\text{Å}$  na Figura 5.5f e o SNR ao longo das aberturas na Figura 5.5g. Na medida em que o SNR cai para valores abaixo de 10, nas aberturas mais externas, o desvio percentual médio (Adev) atinge valores maiores. Conforme ressaltado anteriormente, nós decidimos manter essas aberturas na análise, uma vez que estas seguem a tendência da distribuição das SPs ao longo da galáxia. Entretanto, elas devem ser tomadas somente como uma estimativa<sup>4</sup>.

## 5.2 NGC 1614

Pela análise da Fig. 5.6a, podemos ver o predomínio de SP velha no núcleo, se estendendo até  $\sim 220$  pc na direção Sul, enquanto que do lado Norte somente as populações mais jovens ( $t \leq 2 \times 10^9$  anos) estão presentes. Modelando o surto de formação estelar no NIR dos kpc centrais dessa fonte, Alonso-Herrero et al. (2001) associaram a forte concentração de CO detectada no núcleo (resolvido em 45 pc) com as primeiras estrelas formadas neste surto ( $10^9$  anos ou mais). Os resultados desses autores apresentam o mesmo intervalo de idades encontrado no presente trabalho para a região nuclear dessa galáxia.

Além disso, encontramos evidências que sugerem a presença de um anel circumnuclear<sup>5</sup> de diâmetro de  $\sim 600$  pc, com SP de idade jovem a intermediária. Em concordância com nossos resultados, Olsson et al. (2010) também encontraram evidências desse anel, através de observações em rádio do contínuo dessa galáxia. Esse anel também foi identificado por Alonso-Herrero et al. (2001). Conforme podemos ver pela Figura 5.2 (retirada de Alonso-Herrero et al., 2001), a imagem da linha de emissão de Pa $\alpha$  revela uma estrutura em forma de anel, com aproximadamente 600 pc de diâmetro, possivelmente formado por regiões HII. Esses autores também sugerem que o surto de formação estelar começou no núcleo e se propagou para um raio de  $\sim 300$  pc (formando o anel circumnuclear), o que estaria de acordo

<sup>4</sup>Isso é válido para todas as galáxias da amostra.

<sup>5</sup>Como nós utilizamos uma fenda unidimensional, podemos ver um aumento na SP jovem/intermediária somente nos dois lados do núcleo, de forma que não podemos afirmar se esse padrão se estende ao longo de todo o entorno nuclear. Uma análise mais aprofundada vai ser feita utilizando dados de IFU (do inglês *Integral Field Unit*) dessa galáxia.

com o fato de que encontramos uma SP mais velha na região nuclear, seguida de uma população mais jovem, possivelmente associada ao anel de formação estelar. É válido ressaltar que esses anéis nucleares são bastante comuns em AGNs (e.g. Riffel et al., 2011a, 2010, Storchi-Bergmann et al., 2012).

O aumento na contribuição da SP de idade intermediária a  $\sim 300$  pc ao Norte do núcleo (veja Figura 5.6a) pode ser interpretado como uma evidência do núcleo secundário, também identificado por Alonso-Herrero et al. (2001, veja a Figura 5.2) como sendo remanescente da fusão de NGC 1614 com uma galáxia menor, a qual já foi em grande parte destruída. Ainda, R08 detectaram uma SP dominante de  $1 \times 10^9$  anos (idade intermediária) nos 154 pc internos dessa fonte, contribuindo com  $43 \pm 7\%$  da luz, valor similar ao que encontramos para essa componente da SP ( $31 \pm 3\%$ ) nessa região.

Nós encontramos valores acima da metalicidade solar para a metalicidade média pesada em luz e em massa (veja Figura 5.6c). À medida em que a contribuição da componente mais jovem da SP cresce em direção ao Norte, a metalicidade tende a atingir menores valores, sugerindo uma SP jovem mais pobre em metais desse lado da galáxia. Nesse cenário, a galáxia pequena que teria se fundido com NGC 1614 no passado (Alonso-Herrero et al., 2001) teria diluído o gás no sistema remanescente, dando origem a uma SP jovem pobre em metais, mais pobre do que a SP já presente em NGC 1614.

Os valores derivados pelo STARLIGHT para a extinção visual variam de 1.7 a 3.9 mag ( $\bar{A}_v = 2.66 \pm 0.08$ ). Os valores encontrados em estudos anteriores estão de acordo com os nossos resultados, conforme podemos ver pela Tabela 5.2. O único trabalho que apresenta valores bem diferentes dos nossos para o  $A_v$  de NGC 1614 é o de Puxley & Brand (1994). É válido ressaltar que alguns dos trabalhos citados derivam a extinção na banda K ( $A_k$ , Goldader et al., 1995, Alonso-Herrero et al., 2001, Kotilainen et al., 2001) para essa galáxia, ao invés da extinção na banda V. Assim como para NGC 34, a relação derivada em Mathis (1990) foi utilizada para convertamos  $A_k$  em  $A_v$ .

### 5.3 NGC 3310

Nossos resultados apontam para uma SP dominante de idade jovem/intermediária a Sudeste do núcleo (veja a Figura 5.7a). Um aumento da contribuição da SP mais velha na direção oposta pode ser vista nos dois histogramas, em fluxo e em massa (painel a e b). Semelhante ao nosso trabalho, vários outros estudos na região óptica

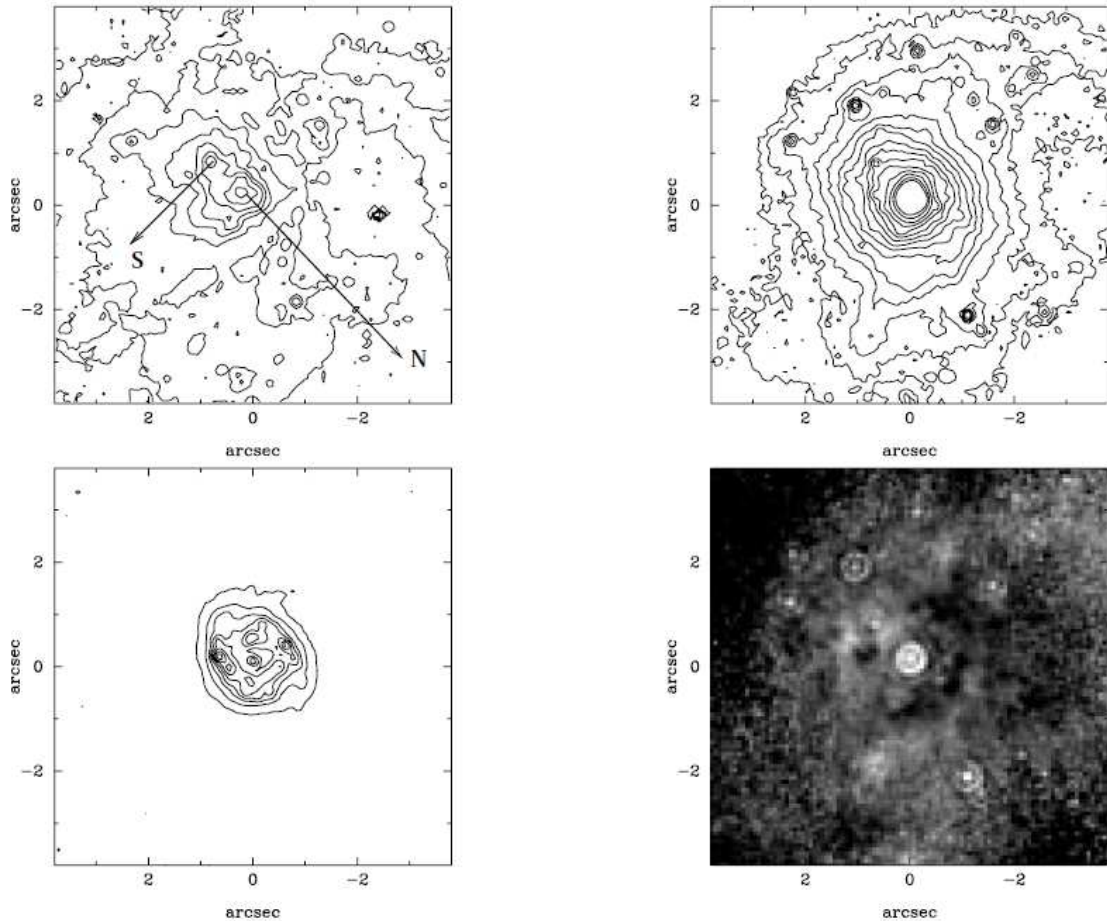


Figura 5.9: Campo de  $8'' \times 8''$  centrais de NGC 1614. Partindo do painel superior esquerdo, em sentido horário: contornos em escala linear da imagem no filtro F606W da WFPC2, contorno em escala linear da banda H (imagem da câmera NIC2, com o filtro F160W), mapa de cor de  $H-K$  em escalas de cinza (regiões mais escuras apresentam maior extinção) e contornos da linha de emissão de  $\text{Pa}\alpha$  subtraída do contínuo (NIC2 F190N - NIC2 F187N). Todas as imagens estão orientadas com o Norte para cima e Leste para esquerda. A posição do núcleo (N) e do núcleo secundário (S) é mostrada no painel superior esquerdo. Figura retirada de Alonso-Herrero et al. (2001).

Tabela 5.2: Comparação dos valores de extinção visual  $A_v$  derivados pelo STARLIGHT com os resultados encontrados na literatura para NGC 1614.

Referência	$A_v$ (mag)	Abertura	Notas
Bushouse (1986)	$\sim 3.0$	raio de $3''.7$	(1)
Neff et al. (1990)	3.0 - 5.0	$20'' \times 20''$	(2)
Neff et al. (1990)	3.0	$2''.7 \times 4''.3$	(3)
Puxley & Brand (1994)	$10.6 \pm 2.0$	$9'' \times 3''$	(4)
Oliva et al. (1995)	$\sim 4.0$	$2''.2 \times 4''.4$	(5)
Goldader et al. (1995)	2.96	$3'' \times 12''$	(6)
Shier et al. (1996)	4.9	$2''.4 \times 4''.8$	(7)
Alonso-Herrero et al. (2001)	4.0	$19''.5 \times 19''.5$	(8)
Kotilainen et al. (2001)	3.8	$3''.5 \times 3''.5$	(9)
Kotilainen et al. (2001)	1.8 e 3.5	$2'' \times 2''$	(10)
Dametto et al. (2014)*	$2.66 \pm 0.08$	$2'' \times 2''$	(11)

Notas: (1) usando razões de linhas da série de Balmer; (2) usando cores do NIR; (3) usando fluxos de  $\text{Br}\gamma$  e os de  $\text{H}\alpha$ , medidos por Bushouse (1986); (4) usando linhas da série de Balmer e Brackett e assumindo um modelo composto de poeira e gás em uma distribuição homogênea na linha de visada; (5) usando cores do NIR; (6) usando valores de  $E(B-V)$  citados por Veilleux et al. (1995); (7) usando cores do NIR; (8) usando o fluxo de duas linhas de emissão do [FeII] em  $1.257$  e  $1.644\mu\text{m}$ , assim como linhas de recombinação do hidrogênio ( $\text{Pa}\beta$  e  $\text{Br}\gamma$ ); (9) usando fluxos de linhas de recombinação; (10) usando cores do NIR (à SE do núcleo e à NO do núcleo, respectivamente); (11) usando a Lei de Calzetti et al. (2000). \*artigo publicado com os resultados descritos nessa dissertação.

do espectro (Balick & Heckman, 1981, Telesco & Gatley, 1984, Schweizer & Seitzer, 1988) estimaram a idade do *starburst* dessa galáxia entre  $10^7$  e  $10^8$  anos.

Pastoriza et al. (1993) estudaram o espectro óptico do núcleo e 6 regiões HII circundantes, quatro delas localizadas a menos de 400 pc do núcleo da galáxia <sup>6</sup>. Esses autores propõem um modelo de duas idades para o *starburst* dessa fonte e baixos valores de metalicidade ( $0.2 - 0.4 Z_{\odot}$ ) para a região circumnuclear (raio  $< 400$  pc) e regiões HII no disco. Para o núcleo, entretanto, eles encontram valores próximos à metalicidade solar, em concordância com nossos resultados ( $Z \sim 0.02 = Z_{\odot}$  ao longo das aberturas, veja a Figura 5.7c). R08, estudando os 56 pc centrais dessa fonte na região espectral do NIR, detectaram uma SP dominante de  $1 \times 10^9$  anos. De forma similar ao cenário proposto para NGC 1614 (veja Seção 5.2), os baixos valores de metalicidade encontrados para NGC 3310 sugerem que o gás, presente na galáxia em interação com essa fonte (Balick & Heckman, 1981), deve ser pobre em metais, dando origem, então, a uma SP menos enriquecida.

A extinção visual ajustada pela STARLIGHT para essa galáxia foi de  $A_v \sim 1.7$  mag

<sup>6</sup>A abertura analisada por esse autores para NGC 3310 é maior do que a estudada neste trabalho, a qual compreende somente a região nuclear de Pastoriza et al. (1993). Vale a pena ressaltar que as aberturas usadas para essa galáxia são as mais internas da amostra, atingindo somente 106 pc de distância do núcleo.

no núcleo, variando de 0.27 mag a Sudeste até 1.5 mag a Noroeste do núcleo ( $\bar{A}_v = 1.43 \pm 0.06$ ). Da mesma forma que para NGC 1614, Goldader et al. (1995) derivou a extinção para NGC 3310 e encontrou  $A_v = 2.69$  mag (em uma abertura de  $3'' \times 9''$ ), um valor ligeiramente maior do que o encontrado no nosso trabalho. É válido mencionar que essa é a galáxia com interação menos intensa da amostra.

## 5.4 NGC 7714

A análise da contribuição em fluxo dos vetores agrupados de SP na Figura 5.8a claramente mostra o predomínio da componente de SP jovem ao longo do bojo da galáxia. Enquanto a contribuição da SP jovem aumenta na direção Sudeste, a componente de idade intermediária cresce na direção oposta. Bernlöhr (1993) calcula que a idade do *starburst* central (raio de  $4''.5$ ) nessa fonte é de  $\sim 2 \times 10^7$  anos, o que concorda com nossos resultados. Na verdade, vários outros estudos anteriores, na região espectral do UV e óptico, detectaram SP de idade jovem nas centenas e milhares de parsecs centrais de NGC 7714 (Gonzalez-Delgado et al., 1995, González Delgado et al., 1999, Lançon et al., 2001, Cid Fernandes et al., 2003), em acordo com os resultados do nosso trabalho. González Delgado et al. (1999), além de encontrarem uma SP jovem ( $4.5 \times 10^6$  anos) na parte central (300 pc) da galáxia, também sugerem a presença de uma população mais velha, da ordem de dezenas de milhões de anos ou mais, menos concentrada no núcleo e que se estende a escalas de kiloparsecs. Esses resultados concordam com a contribuição da componente de idade intermediária da SP que encontramos no nosso trabalho.

Além disso, conforme mencionado na Seção 2.1, Smith & Wallin (1992) sugere que o surto de formação estelar, na região central de NGC 7714, tenha começado a  $\sim 5 \times 10^6$  anos atrás, de forma similar aos nossos resultados. R08 também encontra uma SP dominante de  $1 \times 10^9$  anos, estudando os 115 pc centrais dessa fonte no intervalo espectral do NIR .

Conforme pode ser visto na Figura 5.8c, os valores de metalicidade média encontrados para NGC 7714 são baixos, na sua maioria abaixo da metalicidade solar, em concordância com resultados da literatura (French, 1980, Gonzalez-Delgado et al., 1995). Pela análise dessa mesma figura, nota-se uma diminuição dos valores de metalicidade média, na medida em que a contribuição da componente jovem da SP aumenta. Isso pode ser explicado por um cenário em que o gás pobre em metais da companheira NGC 7715 ( $0.001 < Z/Z_\odot < 0.02$ , Bernlöhr, 1993) teria diluído o gás já presente em NGC 7714, dando origem, então, a uma SP jovem mais pobre em

Tabela 5.3: Comparação dos valores de extinção visual  $A_v$  derivados pelo STARLIGHT com os resultados encontrados na literatura para NGC 7714.

Referência	$A_v$ (mag)	Abertura	Notas
Smith & Wallin (1992)	1.6	$10'' \times 30''$	(1)
Puxley & Brand (1994)	$0.86 \pm 0.13$	$10'' \times 30''$	(2)
Oliva et al. (1995)	1.0 - 2.0	$2''.2 \times 4''.4$	(3)
Kotilainen et al. (2001)	1.2 e 1.7	$6'' \times 7''$	(4)
Dametto et al. (2014)*	$1.13 \pm 0.04$	$2'' \times 2''$	(5)

Notas: (1) usando a razão de linhas de  $H\alpha/H\beta$  medida por French (1980) e assumindo um modelo de poeira na linha de visada; (2) usando os fluxos das linhas da série de Balmer e Brackett e assumindo um modelo de poeira na linha de visada; (3) usando cores do NIR; (4) usando cores do NIR e fluxos de linhas de recombinação, respectivamente; (5) usando a Lei de Calzetti et al. (2000). \*artigo publicado com os resultados descritos nessa dissertação.

metais.

Pela Figura 5.8c, podemos ver que a extinção é aproximadamente constante ao longo das aberturas para NGC 7714, com  $\bar{A}_v = 1.13 \pm 0.04$ . Pela análise da Tabela 5.3, vemos que nossos resultados são bastante similares aos encontrados por outros autores para essa galáxia.

## 5.5 Gás em Emissão

Além das linhas de absorção provenientes da SP, essas fontes são classificadas como galáxias *HII/starforming*, com base nas linhas de emissão dos seus espectros na região do óptico. Os espectros do NIR não são muito diferentes, apresentando linhas de emissão intensas, conforme podemos ver nas Figuras 3.2 à 3.5.

Através da medida do fluxo dessas linhas, podemos obter informações com respeito ao avermelhamento e SFR, por exemplo, e comparar com os resultados obtidos através da síntese de SP. As linhas de emissão medidas foram  $[SIII] \lambda 9530$ ,  $HeI \lambda 10830$ ,  $[FeII] \lambda 12570$ ,  $Pa\beta \lambda 12810$ ,  $[FeII] \lambda 16440$ ,  $H_2 \lambda 21210$  e  $Br\gamma \lambda 21650$ . É importante mencionar que o procedimento padrão para se medir o fluxo das linhas de emissão de um espectro consiste em, primeiramente, subtrair o contínuo estelar ajustado pela síntese de SP e, posteriormente, realizar as medidas de fluxo no espectro residual. Conforme discutido na Seção 4.1, os espectros utilizados na síntese de SP foram degradados à baixa resolução dos modelos de M05 ( $R \leq 250$ ), o que acabou por diluir de forma significativa as linhas de emissão do espectro residual, impossibilitando que as medidas fossem feitas com confiabilidade nesses espectros. Neste trabalho, portanto, fizemos as medidas nos espectros sem subtrair a contribuição do contínuo estelar.

No intuito de estimar os efeitos do avermelhamento no gás em emissão, nós derivamos o coeficiente de extinção interestelar  $c$  (Eq. 5.6), a extinção na banda V  $A_v$  (Eq. 5.12) e o excesso de cor  $E(B-V)$  (Eq. 5.13), a partir dos fluxos das linhas de emissão. Seguindo a derivação feita no Cap. 7.2 de Osterbrock (1989):

$$I_{\lambda_{obs}} = I_{\lambda_{int}} 10^{-cf(\lambda)}, \quad (5.3)$$

sendo  $I_{\lambda_{obs}}$  o fluxo observado,  $I_{\lambda_{int}}$  o fluxo intrínseco da fonte (corrigido),  $c$  o coeficiente de extinção e  $f(\lambda)$  a curva de extinção. Para encontrarmos uma expressão para  $c$ , fazemos a razão dos fluxos medidos para as linhas de  $\text{Pa}\beta$  e  $\text{Br}\gamma$ :

$$\frac{I(\text{Pa}\beta)_{obs}}{I(\text{Br}\gamma)_{obs}} = \frac{I(\text{Pa}\beta)_{int}}{I(\text{Br}\gamma)_{int}} \times 10^{-c[f(\text{Pa}\beta)-f(\text{Br}\gamma)]}. \quad (5.4)$$

Os valores das curvas de extinção, nos comprimentos de onda próximos dos das linhas de emissão de  $\text{Pa}\beta$  e  $\text{Br}\gamma$ , foram retirados da Tabela 7.1 de Osterbrock (1989), na coluna para a razão da extinção total (em todos os comprimentos de onda) com relação à extinção na banda V,  $R_V$  da Pequena Nuvem de Magalhães (SMC, do inglês *Small Magellanic Cloud*):  $f(\text{Pa}\beta) = 0.334$  e  $f(\text{Br}\gamma) = 0.170$ . Vale ressaltar que escolhemos os valores de  $f(\lambda)$  para  $R_{V_{SMC}}$ , uma vez que a curva de extinção das SBs é semelhante à ajustada para a SMC (Calzetti et al., 1994, Gordon et al., 2003). Assim, assumindo o valor intrínseco da razão das linhas de emissão  $\text{Pa}\beta/\text{Br}\gamma$  como sendo 5.86, seguindo o caso B de recombinação do H I ( $T=10\,000\text{K}$ ,  $N=10^2\text{cm}^{-3}$ , Osterbrock, 1989), encontramos:

$$\frac{I(\text{Pa}\beta)_{obs}}{I(\text{Br}\gamma)_{obs}} = 5.86 \times 10^{-c(0.164)}, \quad (5.5)$$

tal que, a expressão para o coeficiente de extinção fica:

$$c = -6.1 \times \log \left( \frac{1}{5.86} \times \frac{I(\text{Pa}\beta)_{obs}}{I(\text{Br}\gamma)_{obs}} \right). \quad (5.6)$$

Partindo da definição de  $A_\lambda$ :

$$A_\lambda = -2.5 \times \log \left( \frac{I_{\lambda_{obs}}}{I_{\lambda_{int}}} \right) \quad (5.7)$$

e comparando com a Eq. 5.3, encontramos que:

$$A_\lambda = 2.5cf(\lambda). \quad (5.8)$$

Substituindo  $cf(\lambda) = 0.4A_\lambda$  na Eq. 5.3, temos que:

$$I_{\lambda\text{obs}} = I_{\lambda\text{int}} 10^{-0.4A_{\lambda}}. \quad (5.9)$$

De forma análoga à derivação de  $c$ , fazemos:

$$\frac{I_{\lambda1\text{obs}}}{I_{\lambda2\text{obs}}} = \frac{I_{\lambda1\text{int}}}{I_{\lambda2\text{int}}} \times 10^{-0.4(A_{\lambda1} - A_{\lambda2})}. \quad (5.10)$$

Usando a definição de curva de extinção  $f(\lambda) \equiv A_{\lambda}/A_v$ :

$$\frac{I_{\lambda1\text{obs}}}{I_{\lambda2\text{obs}}} = \frac{I_{\lambda1\text{int}}}{I_{\lambda2\text{int}}} \times 10^{-0.4A_v[f(\lambda1) - f(\lambda2)]}, \quad (5.11)$$

sendo  $\lambda1 = Pa\beta$  e  $\lambda2 = Br\gamma$ , temos a fórmula para o avermelhamento:

$$A_v = -15.24 \times \log \left( \frac{1}{5.86} \times \frac{I(Pa\beta)_{\text{obs}}}{I(Br\gamma)_{\text{obs}}} \right). \quad (5.12)$$

Adotando o  $R_v$ , da Lei de Calzetti ( $R_v = 4.05 \pm 0.80$ , Calzetti et al., 2000), podemos derivar também o  $E(B-V)$  com a seguinte equação:

$$E(B - V) = \frac{A_v}{R_v}. \quad (5.13)$$

Os fluxos medidos são listados na Tabela 5.5. Para corrigirmos os fluxos observados, utilizamos a Eq. 5.3 e os valores para as curvas de extinção, nos comprimentos de onda próximos aos das linhas de emissão, tirados de Osterbrock (1989):  $f([\text{SIII}]) = f(\text{HeI}) = 0.466$ ,  $f([\text{FeII}] \lambda 12570) = f(Pa\beta) = 0.334$ ,  $f([\text{FeII}] \lambda 16440) = 0.188$  e  $f(\text{H}_2) = f(Br\gamma) = 0.170$ .

A propagação dos erros nas medidas de fluxo das linhas de emissão para o cálculo de  $c$ ,  $A_v$ ,  $E(B-V)$  e dos fluxos corrigidos foi realizada através da equação (Bevington & Robinson, 1992):

$$\sigma_x^2 = \sigma_u^2 \left( \frac{\partial x}{\partial u} \right)^2 + \sigma_v^2 \left( \frac{\partial x}{\partial v} \right)^2 + 2\sigma_{uv} \left( \frac{\partial x}{\partial u} \right) \left( \frac{\partial x}{\partial v} \right), \quad (5.14)$$

que propaga o erro da medida de  $x$  em função de duas variáveis  $u$  e  $v$ , sendo  $\sigma_u$  e  $\sigma_v$  os erros das medidas  $u$  e  $v$ , respectivamente,  $\sigma_{uv}$  é o termo de covariância entre  $u$  e  $v$ , que é nulo no nosso caso, porque  $u$  e  $v$  são independentes. Da Eq. 5.14, obtivemos a fórmula específica para propagar os erros das medidas de fluxo das linhas de emissão. Para o coeficiente de extinção:

$$\sigma_c^2 = [6.1 \times \log(e)]^2 \times \left[ \left( \frac{\sigma_{I(Pa\beta)_{\text{obs}}}}{I(Pa\beta)_{\text{obs}}} \right)^2 + \left( \frac{\sigma_{I(Br\gamma)_{\text{obs}}}}{I(Br\gamma)_{\text{obs}}} \right)^2 \right]. \quad (5.15)$$



A fórmula para a propagação do erro para os fluxos corrigidos fica:

$$\sigma_{I_{\lambda_{\text{int}}}}^2 = 10^{2\text{cf}(\lambda)} \times [\sigma_{I_{\lambda_{\text{obs}}}}^2 + \sigma_c^2 I_{\lambda_{\text{obs}}}^2 f^2(\lambda) (\ln 10)^2]. \quad (5.16)$$

Para a propagação do erro para o avermelhamento é:

$$\sigma_{A_v}^2 = [\log(e)]^2 \times \left[ \left( \frac{\sigma_{I(\text{Pa}\beta)_{\text{obs}}}}{I(\text{Pa}\beta)_{\text{obs}}} \right)^2 + \left( \frac{\sigma_{I(\text{Br}\gamma)_{\text{obs}}}}{I(\text{Br}\gamma)_{\text{obs}}} \right)^2 \right]. \quad (5.17)$$

Por fim, a fórmula para a propagação do erro para o excesso de cor:

$$\sigma_{E(B-V)}^2 = \sigma_{A_v}^2 \times \left( \frac{1}{R_v} \right)^2 + \sigma_{R_v}^2 \left( \frac{A_v}{R_v^2} \right)^2. \quad (5.18)$$

Os parâmetros de avermelhamento estão listados na Tabela 5.6 e os fluxos corrigidos na Tabela 5.7.

Em um trabalho anterior, Rodríguez-Ardila et al. (2005) mediram as linhas de emissão dos espectros nucleares para uma amostra de galáxias que inclui as quatro fontes estudadas no presente trabalho, e derivaram valores para  $E(B-V)$  inferiores aos listados na Tabela 5.6. Nós acreditamos que essa diferença possa estar relacionada com o fato de que esses autores utilizaram a lei de extinção de CCM (Cardelli et al., 1989) para ajustar o avermelhamento do espectro nuclear das quatro fontes. A lei de extinção mais adequada para calcular o avermelhamento em SBs é a lei de Calzetti (Calzetti et al., 1994, 2000, Fischera et al., 2003), que foi utilizada no presente trabalho. Essa lei é derivada de resultados puramente empíricos em uma amostra de SBs próximas. A ausência do *bump* em  $\lambda 2175\text{\AA}$ , a característica mais proeminente da curva de extinção da Via Láctea, na curva de atenuação derivada por Calzetti et al. (2000), sugere que as SBs apresentam tipos de grãos de poeira similares aos da Pequena Nuvem de Magalhães.

Na verdade, comparando os resultados para  $A_v$  obtidos através da razão dos fluxos de  $\text{Pa}\beta/\text{Br}\gamma$  (Tabela 5.6 - Col.2) com os derivados pelo código STARLIGHT (Tabela 5.6 - Col.3), podemos ver que os valores médios calculados através dos fluxos das linhas de emissão são maiores do que os obtidos através do ajuste da SP. Uma possível explicação para essa discrepância seja considerar que as estrelas quentes que ionizam o gás estão associadas a regiões com mais poeira do que as estrelas frias, as quais contribuem para o contínuo estelar (Calzetti et al., 1994). Essa diferença também poderia estar relacionada com o fato de que as galáxias da amostra estão em processo de interação, de forma que movimentos do gás, induzidos pelas forças de maré e *outflows* de ventos estelares, se tornam mais frequentes (e.g. Heckman

et al., 1990). Neste cenário, choques induzidos por esses fluxos de gás em larga escala influenciam as linhas de emissão do gás e contaminam as razões de linhas (e.g. Colina et al., 2005).

As linhas de emissão também podem ser utilizadas para estimar o SFR ao longo das galáxias da amostra, assumindo que essas linhas sejam excitadas exclusivamente pelos fótons emitidos pelas estrelas. Utilizando a expressão para o cálculo do SFR de Kennicutt (1998):

$$\text{SFR} = 7.9 \times 10^{-42} \times L(\text{H}\alpha)_{\text{int}}, \quad (5.19)$$

assim como a expressão para a luminosidade em  $\text{H}\alpha$  ( $L(\text{H}\alpha)$ ):

$$L(\text{H}\alpha)_{\text{int}} = 103 \times L(\text{Br}\gamma)_{\text{int}}, \quad (5.20)$$

nós derivamos o SFR para cada abertura de cada galáxia da amostra, através da luminosidade em  $\text{Br}\gamma$  já corrigida por avermelhamento:

$$L(\text{Br}\gamma)_{\text{int}} = 4\pi R \times I(\text{Br}\gamma)_{\text{int}}, \quad (5.21)$$

sendo  $R$  a distância da galáxia (Seção 2.1) e  $I(\text{Br}\gamma)$  o fluxo da linha de emissão de  $\text{Br}\gamma$  corrigido por avermelhamento (Tabela 5.7). A propagação dos erros nas medidas de fluxo das linhas de emissão para o cálculo de  $L(\text{Br}\gamma)$ ,  $L(\text{H}\alpha)$  e dos SFRs foi feita utilizando a Eq. 5.14, tal que:

$$\sigma_{L(\text{Br}\gamma)_{\text{int}}}^2 = (4\pi R)^2 \times \sigma_{I(\text{Br}\gamma)_{\text{int}}}^2, \quad (5.22)$$

é a expressão para a propagação do erro para a luminosidade de  $\text{Br}\gamma$ . A fórmula para a propagação do erro para a luminosidade de  $\text{H}\alpha$  fica:

$$\sigma_{L(\text{H}\alpha)_{\text{int}}}^2 = 1.06 \times 10^4 \times \sigma_{L(\text{Br}\gamma)_{\text{int}}}^2. \quad (5.23)$$

Por fim, a fórmula para a propagação do erro para o SFR:

$$\sigma_{\text{SFR}}^2 = 7.9 \times 10^{-44} \times \sigma_{L(\text{H}\alpha)_{\text{int}}}^2. \quad (5.24)$$

Os valores de SFR estão listados na Tabela 5.6. Tendo em vista que o STARLIGHT calcula a massa que foi processada em estrelas nos últimos  $t$  anos ( $M_{\star}^{\text{ini}}(t)$ ), podemos usar essa informação para estimar um SFR médio ao longo de um tempo  $t$ . Escolhemos  $t$  como sendo 10 milhões de anos, para levar em conta somente estrelas jovens (do tipo O e B), capazes de ionizar o gás ao seu redor.

Segundo o manual do STARLIGHT, a massa (em  $M_{\odot}$ ) que foi processada em estrelas<sup>7</sup>, ao longo da vida da galáxia pode ser calculada como:

$$M_{\star}^{ini} = M_{ini\_total} \times 4\pi d^2 \times 3.826 \times 10^{-33}, \quad (5.25)$$

sendo  $M_{ini\_total}$  um parâmetro de saída do STARLIGHT e  $d$  a distância da galáxia em centímetros.

Tendo em vista que extraímos resultados médios da síntese (veja Seção 4.3), calculamos um valor médio de  $M_{\star}^{ini}$  para cada abertura das galáxias da amostra. Com essa informação, podemos, então, proceder com o cálculo do SFR médio nos últimos  $t$  anos para cada abertura, conforme a Eq. 5.26:

$$SFR^{\star} = [M_{sum} \times M_{\star}^{ini}] / t, \quad (5.26)$$

sendo  $M_{sum} = \left( \sum_{j'} M_{ini\_j'} \right) / 100$  a soma de todas as contribuições em massa ( $M_{ini\_j}$ ) de cada SSP ( $j'$ , com até 10 milhões de anos) da base de elementos para o espectro modelado<sup>8</sup> e  $t = 10 \times 10^6$  anos. Os resultados para o SFR também estão listados na Tabela 5.6.

Como podemos ver pela análise da Tabela 5.6, os SFRs médios calculados para a abertura nuclear das galáxias através do fluxo da linha de emissão de Br $\gamma$  (Col.5) são os que apresentam as maiores diferenças com relação aos calculados através dos parâmetros de saída do STARLIGHT. Para NGC 34, nossos valores de SFR são consideravelmente menores do que os encontrados na literatura (Tabela 5.4). Sugerimos que essa discrepância possa estar relacionada com o tamanho da abertura analisada nesses trabalhos, muito mais ampla do que a nossa ( $2'' \times 2''$ ). Os resultados encontrados por Kotilainen et al. (2001), assumindo um modelo de surto de formação estelar instantâneo, tendem a concordar com os encontrados no presente trabalho para NGC 1614 e NGC 7714.

Além disso, nós sugerimos que o valor desprezível de SFR derivado para a abertura nuclear de NGC 1614, através do ajuste de SP, possa ser explicado, se considerarmos a classificação de LINER dessa fonte. Nesse cenário, as linhas de emissão intensas, presentes no espectro nuclear dessa galáxia, podem estar associadas à ati-

<sup>7</sup>A massa inicial não leva em conta a massa que é devolvida para o meio interestelar através de explosões de supernova e ventos estelares. Esse valor é diferente do utilizado nos histogramas das Figuras 5.1 à 5.4 e 5.5 à 5.8 para contribuição em massa dos vetores de SP. Nessas figuras, o cálculo da contribuição em massa já leva em conta a massa que é devolvida para o meio interestelar.

<sup>8</sup>Vale a pena ressaltar que essa contribuição será um número entre 0 e 1, sendo 1=100% , com relação à massa inicial.

Tabela 5.4: Valores de SFR encontrados na literatura para as galáxias da amostra.

Galáxia	Referência	SFR $M_{\odot}\text{yr}^{-1}$	Abertura	Notas
NGC 34	Prouton et al. (2004)	$\sim 50$	$3' \times 3'$	(1)
	Fernández et al. (2010)	64	$3' \times 2'$	(2)
NGC 1614	Alonso-Herrero et al. (2001)	52	$45'' \times 250''$	(3)
	Alonso-Herrero et al. (2001)	36	$0''.9 \times 0''.9$	(4)
	Kotilainen et al. (2001)	2.1 - 4.8	$3''.9$	(5)
	Kotilainen et al. (2001)	11 - 25	$3''.9$	(6)
NGC 3310	Smith et al. (1996)	8.6	$204''$	(7)
	Werk et al. (2011)	3	$20'' \times 20''$	(8)
	Miralles-Caballero et al. (2014)	13.8	$60'' \times 60''$	(9)
	Miralles-Caballero et al. (2014)	4.4	$60'' \times 60''$	(8)
NGC 7714	Kotilainen et al. (2001)	0.1 - 3.9	$11''.2$	(5)
	Kotilainen et al. (2001)	0.4 - 16	$11''.2$	(6)

Notas: (1) através da luminosidade no FIR; (2) através da luminosidade em rádio; (3) através da luminosidade no FIR; (4) assumindo que 70% da formação estelar da galáxia ocorra na região nuclear (eles confirmam esse valor também através da luminosidade de  $\text{Pa}\alpha$  no anel circumnuclear dessa fonte); (5) utilizando o fluxo em  $\text{Br}\gamma$  e assumindo um modelo de formação estelar constante; (6) utilizando o fluxo em  $\text{Br}\gamma$  e assumindo um modelo de surto de formação estelar instantâneo; (7) através das magnitudes no FUV; (8) através da luminosidade de  $\text{H}\alpha$ ; (9) através do ajuste espectrofotométrico da SED;

vidade do AGN. A presença do núcleo ativo poderia ter cessado a formação estelar na região central dessa fonte e limitado o *starburst* às regiões mais externas<sup>9</sup>. É importante reforçar o cenário em que choques induzidos pelo fluxo de gás em larga escala em sistemas interagentes afetam as linhas de emissão do gás, podendo contaminar as razões de linhas usadas para determinar os SFRs e avermelhamento, por exemplo.

Para NGC 3310, os valores de SFR encontrados com os dois métodos são similares, entretanto valores encontrados na literatura são maiores do que os encontrados no presente trabalho. Essa discrepância pode estar relacionada com o tamanho do campo analisado nesses estudos anteriores.

<sup>9</sup>Uma análise adequada dessa evidência exigiria um estudo de IFU da região nuclear dessa galáxia.

Tabela 5.5: Fluxos observados em unidades de  $10^{-15}$  erg cm $^{-2}$  s $^{-1}$ .

Galáxia	Abertura	[SIII]	HeI	[FeII]	Pa $\beta$	[FeII]	H $_2$	Br $\gamma$
		0.953 $\mu$ m (1)	1.083 $\mu$ m (2)	1.257 $\mu$ m (3)	1.281 $\mu$ m (4)	1.644 $\mu$ m (5)	2.121 $\mu$ m (6)	2.165 $\mu$ m (7)
NGC 34	(c)423 S	0.54 $\pm$ 0.21	0.46 $\pm$ 0.17	...	0.23 $\pm$ 0.08	0.25 $\pm$ 0.14	0.25 $\pm$ 0.03	0.09 $\pm$ 0.03
	(b)346 S	1.15 $\pm$ 0.31	0.65 $\pm$ 0.26	0.38 $\pm$ 0.12	0.37 $\pm$ 0.13	0.00 $\pm$ 0.00	0.73 $\pm$ 0.11	0.22 $\pm$ 0.06
	(a)269 S	1.46 $\pm$ 0.30	2.24 $\pm$ 0.52	1.63 $\pm$ 0.15	1.23 $\pm$ 0.11	1.78 $\pm$ 0.45	2.08 $\pm$ 0.22	0.81 $\pm$ 0.12
	Nuc	10.60 $\pm$ 0.84	12.00 $\pm$ 1.66	8.41 $\pm$ 0.82	7.58 $\pm$ 0.71	9.32 $\pm$ 2.34	8.21 $\pm$ 0.75	4.45 $\pm$ 0.54
	(d)269 N	2.77 $\pm$ 0.32	2.92 $\pm$ 0.59	1.74 $\pm$ 0.17	1.06 $\pm$ 0.11	1.65 $\pm$ 0.48	1.48 $\pm$ 0.12	0.68 $\pm$ 0.08
	(e)346 N	0.70 $\pm$ 0.21	...	0.48 $\pm$ 0.14	0.38 $\pm$ 0.11	...	0.63 $\pm$ 0.07	...
	(f)423 N	...	...	...	...	...	...	...
NGC 1614	(j)468 S	0.80 $\pm$ 0.19	1.13 $\pm$ 0.20	0.41 $\pm$ 0.15	0.57 $\pm$ 0.09	0.28 $\pm$ 0.06	0.08 $\pm$ 0.03	0.15 $\pm$ 0.04
	(d)406 S	1.55 $\pm$ 0.28	1.89 $\pm$ 0.26	0.50 $\pm$ 0.08	0.92 $\pm$ 0.08	0.74 $\pm$ 0.08	0.14 $\pm$ 0.03	0.36 $\pm$ 0.03
	(c)344 S	4.14 $\pm$ 0.36	3.20 $\pm$ 0.23	1.12 $\pm$ 0.09	2.68 $\pm$ 0.10	1.28 $\pm$ 0.11	0.53 $\pm$ 0.06	1.12 $\pm$ 0.07
	(b)281 S	14.40 $\pm$ 0.36	11.00 $\pm$ 0.32	2.78 $\pm$ 0.18	9.46 $\pm$ 0.17	3.33 $\pm$ 0.24	0.83 $\pm$ 0.09	3.47 $\pm$ 0.11
	(a)219 S	46.20 $\pm$ 0.44	33.90 $\pm$ 0.64	7.11 $\pm$ 0.27	25.80 $\pm$ 0.27	8.17 $\pm$ 0.84	1.36 $\pm$ 0.17	9.67 $\pm$ 0.20
	Nuc	227.00 $\pm$ 1.79	187.00 $\pm$ 3.60	28.20 $\pm$ 1.49	97.30 $\pm$ 1.32	17.80 $\pm$ 4.40	...	32.00 $\pm$ 1.68
	(e)219 N	64.40 $\pm$ 0.33	51.00 $\pm$ 0.59	7.79 $\pm$ 0.34	29.80 $\pm$ 0.32	8.84 $\pm$ 0.85	1.35 $\pm$ 0.15	10.40 $\pm$ 0.17
	(f)281 N	27.90 $\pm$ 0.35	21.30 $\pm$ 0.23	4.12 $\pm$ 0.17	13.90 $\pm$ 0.16	4.61 $\pm$ 0.24	0.98 $\pm$ 0.08	4.63 $\pm$ 0.08
	(g)344 N	9.61 $\pm$ 0.31	7.01 $\pm$ 0.22	1.48 $\pm$ 0.14	5.21 $\pm$ 0.14	1.93 $\pm$ 0.11	0.65 $\pm$ 0.07	1.71 $\pm$ 0.07
	(h)406 N	3.37 $\pm$ 0.31	2.24 $\pm$ 0.25	0.57 $\pm$ 0.10	1.87 $\pm$ 0.10	0.57 $\pm$ 0.09	0.43 $\pm$ 0.07	0.65 $\pm$ 0.07
	(i)468 N	0.65 $\pm$ 0.17	0.91 $\pm$ 0.21	0.36 $\pm$ 0.09	0.73 $\pm$ 0.10	...	0.24 $\pm$ 0.07	0.13 $\pm$ 0.05
NGC 3310	(d)106 N	...	...	...	...	...	...	...
	(c)92 N	0.09 $\pm$ 0.03	...	...	0.03 $\pm$ 0.02	...	...	...
	(b)78 N	0.26 $\pm$ 0.06	0.13 $\pm$ 0.04	...	...	...	...	0.03 $\pm$ 0.01
	(a)64 N	0.73 $\pm$ 0.04	0.40 $\pm$ 0.03	0.07 $\pm$ 0.02	0.28 $\pm$ 0.02	0.13 $\pm$ 0.03	...	0.10 $\pm$ 0.01
	Nuc	6.58 $\pm$ 0.10	3.57 $\pm$ 0.11	0.75 $\pm$ 0.07	2.44 $\pm$ 0.07	0.86 $\pm$ 0.13	...	0.77 $\pm$ 0.05
	(e)64 S	0.74 $\pm$ 0.05	0.38 $\pm$ 0.05	0.09 $\pm$ 0.02	0.19 $\pm$ 0.02	0.11 $\pm$ 0.03	0.06 $\pm$ 0.02	0.06 $\pm$ 0.01
	(f)78 S	0.31 $\pm$ 0.06	0.25 $\pm$ 0.08	...	0.07 $\pm$ 0.03	0.05 $\pm$ 0.02	...	...
	(g)92 S	0.15 $\pm$ 0.06	...	...	...	...	...	...
	(h)106 S	...	...	...	...	...	...	...
NGC 7714	(e)290 S	3.61 $\pm$ 0.25	1.82 $\pm$ 0.19	0.36 $\pm$ 0.08	1.21 $\pm$ 0.07	0.33 $\pm$ 0.08	0.10 $\pm$ 0.04	0.30 $\pm$ 0.05
	(d)251 S	7.17 $\pm$ 0.37	4.27 $\pm$ 0.18	0.48 $\pm$ 0.14	2.58 $\pm$ 0.14	0.69 $\pm$ 0.13	...	0.47 $\pm$ 0.05
	(c)212 S	15.90 $\pm$ 0.27	10.10 $\pm$ 0.17	0.66 $\pm$ 0.16	5.24 $\pm$ 0.12	0.71 $\pm$ 0.13	0.17 $\pm$ 0.05	1.14 $\pm$ 0.05
	(b)174 S	37.30 $\pm$ 0.33	23.50 $\pm$ 0.25	1.98 $\pm$ 0.16	11.20 $\pm$ 0.13	1.96 $\pm$ 0.21	...	2.78 $\pm$ 0.08
	(a)135 S	59.90 $\pm$ 0.40	41.10 $\pm$ 0.41	2.98 $\pm$ 0.20	18.50 $\pm$ 0.17	2.59 $\pm$ 0.27	...	4.55 $\pm$ 0.11
	Nuc	195.00 $\pm$ 1.89	132.00 $\pm$ 2.40	17.00 $\pm$ 0.91	63.30 $\pm$ 0.97	17.10 $\pm$ 2.83	2.56 $\pm$ 0.63	15.90 $\pm$ 0.66
	(f)135 N	24.40 $\pm$ 0.28	14.90 $\pm$ 0.33	4.06 $\pm$ 0.17	9.12 $\pm$ 0.15	3.76 $\pm$ 0.34	0.55 $\pm$ 0.08	2.51 $\pm$ 0.09
	(g)174 N	14.60 $\pm$ 0.20	8.67 $\pm$ 0.20	2.43 $\pm$ 0.16	5.69 $\pm$ 0.13	2.24 $\pm$ 0.17	0.39 $\pm$ 0.07	1.44 $\pm$ 0.06
	(h)212 N	5.40 $\pm$ 0.21	3.21 $\pm$ 0.14	0.85 $\pm$ 0.08	2.14 $\pm$ 0.08	1.00 $\pm$ 0.08	0.19 $\pm$ 0.06	0.57 $\pm$ 0.04
	(i)251 N	1.27 $\pm$ 0.18	0.98 $\pm$ 0.14	0.29 $\pm$ 0.07	0.74 $\pm$ 0.08	0.29 $\pm$ 0.07	...	0.09 $\pm$ 0.03
	(j)290 N	0.25 $\pm$ 0.10	0.14 $\pm$ 0.07	...	0.14 $\pm$ 0.04	0.14 $\pm$ 0.06	...	...

Tabela 5.6: Parâmetros derivados a partir dos fluxos das linhas de emissão:  $c$ ,  $A_v$ ,  $E(B-V)$  e SFR.

Galáxia	Abertura	$c$ (1)	$A_v$ (mag) (2)	$A_v^*$ (mag) (3)	$E(B-V)$ (mag) (4)	SFR $M_{\odot}\text{yr}^{-1}$ (5)	SFR* $M_{\odot}\text{yr}^{-1}$ (6)
NGC 34	(c)423 S	2.21±1.28	5.52±0.32	2.86±0.29	1.36±0.22	0.13±0.08	3.65±0.60
	(b)346 S	3.32±1.18	8.28±0.29	2.13±0.22	2.05±0.33	0.48±0.26	0.65±0.21
	(a)269 S	3.59±0.46	8.96±0.11	1.79±0.19	2.21±0.35	1.97±0.46	0.02±0.06
	Nuc	3.28±0.41	8.20±0.10	3.23±0.32	2.02±0.32	9.63±1.93	34.64±3.68
	(d)269 N	3.52±0.42	8.79±0.10	1.78±0.18	2.17±0.34	1.62±0.32	2.43±0.65
	(e)346 N	...	...	0.97±0.10	...	...	0.28±0.10
	(f)423 N	...	...	0.62±0.12	...	...	0.20±0.18
	Médio	2.99±0.24	7.45±0.06	2.49±0.10	2.01±0.13		
NGC 1614	(j)468 S	1.16±0.82	2.89±0.20	2.52±0.25	0.71±0.12	0.09±0.04	1.11±0.14
	(d)406 S	2.21±0.32	5.52±0.08	2.77±0.28	1.36±0.22	0.34±0.05	1.28±0.20
	(c)344 S	2.38±0.19	5.95±0.05	2.41±0.28	1.47±0.23	1.13±0.11	0.18±0.16
	(b)281 S	2.04±0.10	5.09±0.02	2.21±0.24	1.26±0.20	3.04±0.15	0.00±0.03
	(a)219 S	2.09±0.06	5.23±0.02	2.45±0.43	1.29±0.20	8.67±0.28	0.08±0.14
	Nuc	1.75±0.14	4.36±0.04	1.76±0.18	1.08±0.17	25.06±1.93	...
	(e)219 N	1.91±0.05	4.76±0.01	1.73±0.18	1.17±0.19	8.66±0.23	12.44±1.9
	(f)281 N	1.78±0.06	4.45±0.01	2.36±0.24	1.10±0.17	3.67±0.10	6.60±1.43
	(g)344 N	1.74±0.13	4.35±0.03	2.71±0.29	1.07±0.17	1.34±0.09	0.89±0.15
	(h)406 N	1.89±0.32	4.73±0.08	3.06±0.38	1.17±0.18	0.54±0.09	0.24±0.14
	(i)468 N	0.12±1.08	0.30±0.27	3.93±0.41	0.08±0.02	0.06±0.03	0.04±0.03
	Médio	1.17±0.03	2.94±0.01	2.66±0.08	1.19±0.02		
	NGC 3310	(d)106 N	...	...	1.09±0.11	...	...
(c)92 N		...	...	0.91±0.13	...	...	...
(b)78 N		...	...	0.66±0.07	...	...	...
(a)64 N		1.97±0.33	4.91±0.08	1.53±0.24	1.21±0.19	...	...
Nuc		1.64±0.19	4.09±0.05	1.73±0.17	1.01±0.16	0.02	0.12±0.02
(e)64 S		1.64±0.52	4.10±0.13	0.39±0.07	1.01±0.16	...	...
(f)78 S		...	...	0.34±0.08	...	...	...
(g)92 S		...	...	0.27±0.08	...	...	...
(h)106 S		...	...	0.30±0.11	...	...	...
Médio		1.74±0.16	4.35±0.04	1.43±0.06	1.08±0.01		
NGC 7714	(e)290 S	1.00±0.47	2.49±0.12	1.12±0.12	0.62±0.10	0.06±0.01	2.58±0.31
	(d)251 S	0.18±0.32	0.45±0.08	1.29±0.14	0.11±0.02	0.07±0.01	1.63±0.24
	(c)212 S	0.65±0.13	1.63±0.03	1.21±0.14	0.40±0.06	0.20±0.01	0.36±0.09
	(b)174 S	1.00±0.08	2.50±0.02	1.02±0.19	0.62±0.10	0.56±0.02	0.15±0.05
	(a)135 S	0.98±0.07	2.44±0.02	1.49±0.31	0.60±0.10	0.90±0.03	0.07±0.05
	Nuc	1.03±0.12	2.58±0.03	1.00±0.11	0.64±0.10	3.23±0.20	15.48±2.35
	(f)135 N	1.28±0.10	3.19±0.03	1.03±0.11	0.79±0.12	0.56±0.03	1.70±0.26
	(g)174 N	1.05±0.13	2.63±0.03	0.88±0.10	0.65±0.10	0.30±0.02	0.48±0.11
	(h)212 N	1.19±0.21	2.97±0.05	0.44±0.10	0.73±0.12	0.12±0.01	0.07±0.03
	(i)251 N	...	...	0.45±0.14	...	0.01±0.00	0.01±0.01
	(j)290 N	...	...	1.51±0.32	...	...	0.03±0.02
	Médio	0.86±0.04	2.15±0.01	1.13±0.04	0.64±0.02		

Sempre que as incertezas eram zero, esse valor foi omitido.

\*Parâmetros de saída do STARLIGHT.



## 5.6 Comparação entre os modelos de M05 e M11

No intuito de aprofundarmos nossa análise, fizemos a síntese de SP para as quatro galáxias da amostra utilizando os novos modelos calculados por M11, os quais apresentam maior resolução espectral do que os de M05. Esses novos modelos foram construídos da mesma maneira do que os de M05 (e.g. relações massa-luminosidade para a sequência principal, teorema do consumo de energia, parâmetros atmosféricos, tratamento da fase das TP-AGBs e morfologia do ramo horizontal), porém são baseados em diferentes bibliotecas espectrais de estrelas (bibliotecas empíricas). Os modelos que se estendem até o intervalo espectral do NIR são aqueles baseados na biblioteca de Pickles (1998). Essa biblioteca, ao invés de incluir espectros de estrelas individuais, é formada (em sua maior parte) por espectros médios de diversas fontes. Entretanto, como não existem espectros suficientes para cobrir todas as fases evolutivas (com um grau satisfatório de tolerância) para metalicidades diferentes da metalicidade solar, os modelos que se estendem até o NIR foram calculados somente para  $Z=Z_{\odot}$ .

Além disso, acima de  $\sim 1\mu\text{m}$ , cerca de metade dos espectros dessa biblioteca não têm observações espectroscópicas. Dessa forma, os autores (M11) utilizaram fotometria de banda larga para construir uma distribuição de energia (suavizada), resultando em uma região sem linhas nos espectros de M11, o que pode implicar que algumas linhas de absorção do NIR não estejam bem resolvidas, mesmo nos modelos de mais alta resolução. Os autores desse trabalho (M11) também chamam a atenção para os modelos com idades bem jovens (abaixo de  $\sim 100$  milhões de anos), os quais devem ser usado com cautela, uma vez que esses espectros são significativamente atenuados pela absorção da poeira no UV.

No intuito de fazermos uma comparação adequada entre os modelos de M05 e M11, evitando as diferenças que possam surgir devido à diferença no intervalo de metalicidades, nós montamos uma base reduzida dos modelos de M05, contendo somente os modelos para metalicidade solar. Tanto a base com os modelos de M11, como a base reduzida dos modelos de M05, apresentam o mesmo intervalo de idades usado na Seção 4.1, mas somente para uma metalicidade ( $Z=Z_{\odot}$ ), resultando em um conjunto de 31 elementos para cada base. As Figuras 5.10 e 5.11 apresentam a comparação de alguns dos parâmetros de saída do código STARLIGHT para os modelos de M05 e M11.

Em geral, os resultados para os modelos de M11 tendem a realçar as componentes intermediária e velha da SP, em detrimento das idades mais jovens, quando comparados com os resultados para M05. A contribuição da componente de idade



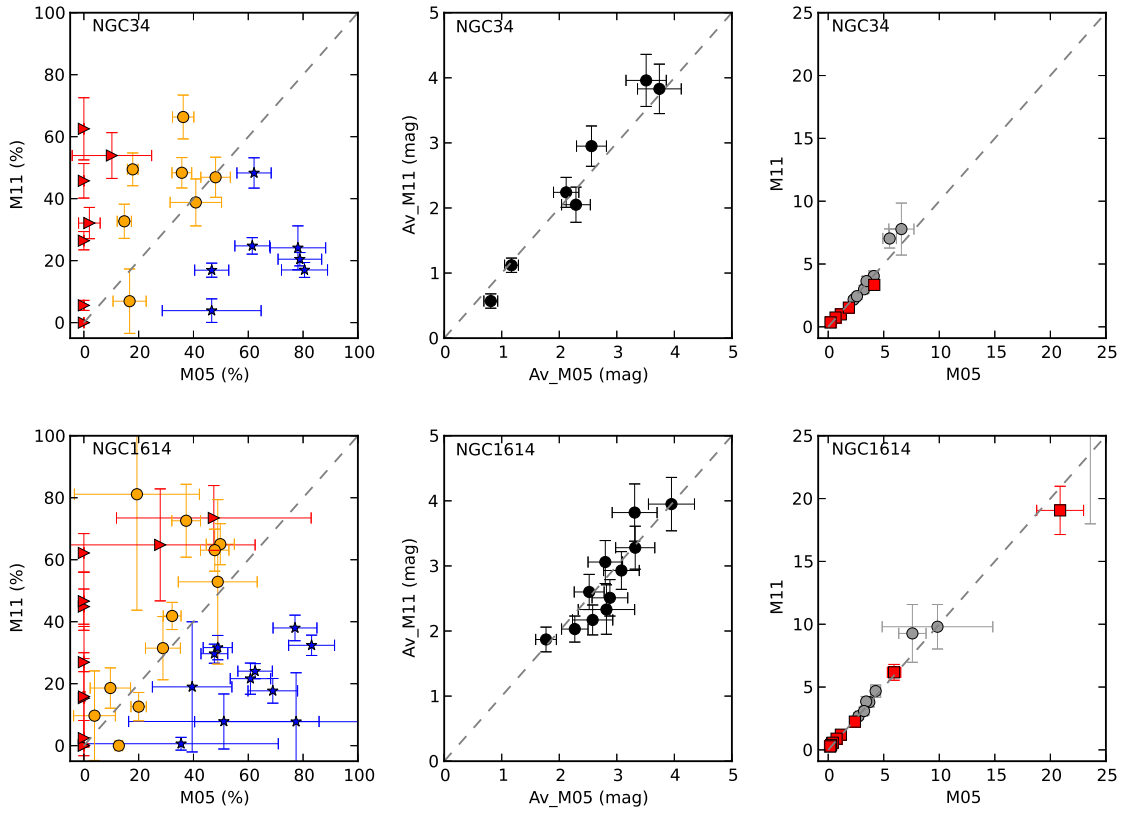


Figura 5.10: Comparação entre os resultados da síntese de SP obtidos usando os modelos de M05 e M11 para as galáxias NGC 34 (*painéis superiores*) e NGC 1614 (*painéis inferiores*). *Painel à Esquerda*: distribuição da SP. Os diferentes marcadores indicam a componente dos vetores de SP agrupados:  $X_y$  (*estrela*),  $X_i$  (*círculo preenchido*),  $X_o$  (*triângulo*). *Painéis Intermediários*: extinção visual ( $A_v$ ). *Painéis à Direita*: qualidade do ajuste. O marcador *quadrado* representa os valores de  $\chi^2$  e o *círculo preenchido* os valores do AdeV.

jovem da SP não ultrapassa o limite de 40% ao longo das galáxias, com exceção do núcleo de NGC 34, para o qual a contribuição dessa componente atinge  $\sim 48\%$ . Isso pode estar relacionado com o problema dos modelos mais jovens de M11, conforme foi mencionado anteriormente. A componente de idade intermediária da SP é a menos afetada pela escolha entre os dois modelos. Entretanto, essa componente tende a atingir contribuições maiores utilizando os modelos de M11 em duas galáxias, NGC 34 e NGC 7714. Essas duas fontes, na verdade, são as que apresentam maior contribuição da componente jovem de SP, quando utilizada a base de M05 com diferentes metalicidades ( $Z=0.02, 0.5, 1$  e  $2 Z_{\odot}$ , veja as Seções 5.1 e 5.4).

Os resultados para a extinção  $A_v$  parecem concordar bem para os dois modelos, conforme vemos nas Figuras 5.10 e 5.11. NGC 3310 e NGC 7714, entretanto, tendem a valores mais baixos de avermelhamento, quando usados os modelos de M11, assim

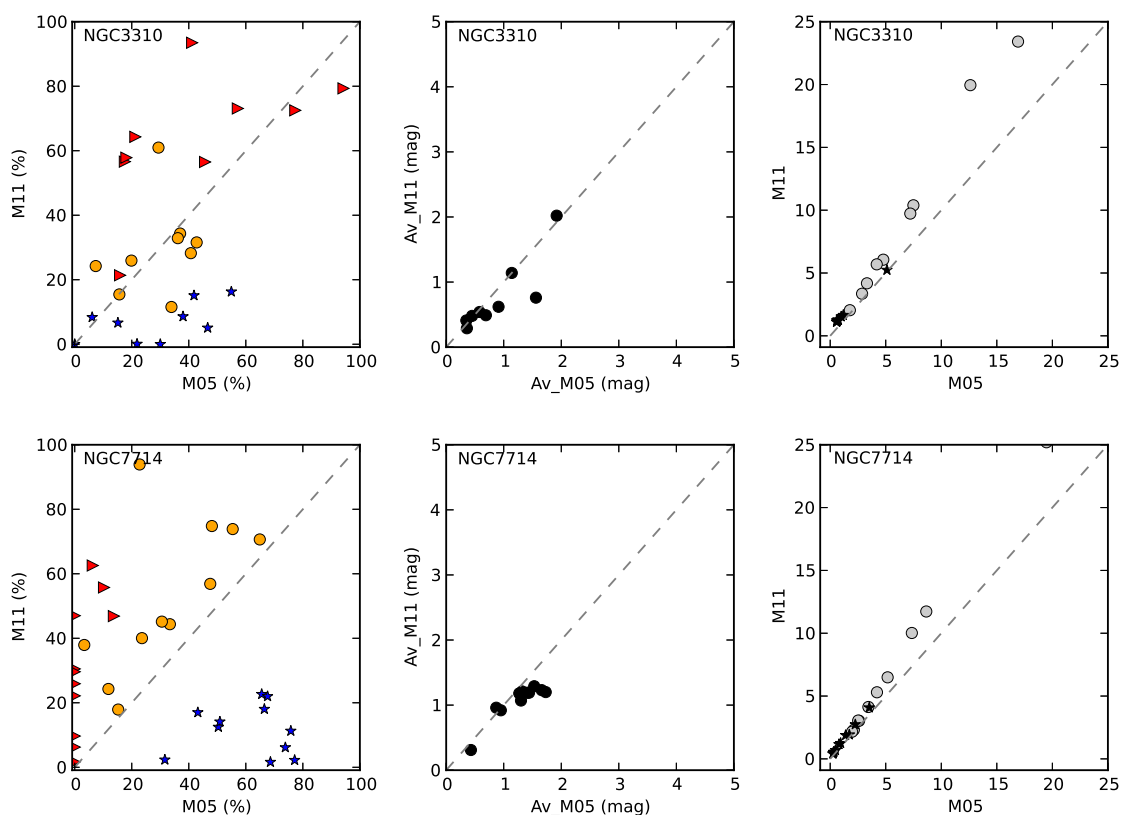


Figura 5.11: Ídem à Figura 5.10 para as galáxias NGC 3310 (*painéis superiores*) e NGC 7714 (*painéis inferiores*).

como apresentam valores maiores para o Adev e  $\chi^2$  (indicadores da qualidade do ajuste, veja a Seção 4.2).

Devido às limitações dos modelos de M11, como discutido anteriormente, não fica bem claro se o uso desses modelos de maior resolução espectral produzem resultados melhores e confiáveis o suficiente, para compensar o fato de que estão disponíveis somente para metalicidade solar no intervalo espectral do NIR. Assim, concluímos que os modelos de baixa resolução espectral de M05 ainda são a melhor opção para esse intervalo espectral.

# Capítulo 6

## Conclusões

Neste trabalho, estudamos a variação espacial das SPs na região central de quatro SBs do universo local: NGC 34, NGC 1614, NGC,3310 e NGC 7714, através de espectroscopia de fenda longa no NIR (de 0.8 à  $2.4\mu\text{m}$ ). Para isso, utilizamos o código de síntese de SP STARLIGHT, atualizado com os modelos EPS de M05. Esses modelos são os mais adequados para essa região espectral, uma vez que incluem um tratamento adequado da fase das TP-AGBs, crucial para modelar as SPs no intervalo espectral do NIR (M05, Riffel et al., 2011b). Nossas principais conclusões são:

- A luz no NIR das aberturas extra-nucleares das galáxias é dominada por estrelas de idade jovem ( $t \leq 50 \times 10^6$  anos) à intermediária ( $50 \times 10^6 < t \leq 2 \times 10^9$  anos), somando de 40% à 100% da contribuição em luz.
- O predomínio de SP de idade jovem à intermediária também é observado na região central das galáxias, com exceção de NGC 1614, para qual a contribuição da SP velha ( $t \geq 2 \times 10^9$  yr) prevalece no núcleo.
- Evidências de uma estrutura em forma de anel, com  $\sim 600$  pc de diâmetro, e de um núcleo secundário à  $\sim 300$  pc ao norte do núcleo foram detectadas em NGC 1614.
- O processo de interação e/ou fusão nas galáxias da amostra pode ser usado para explicar as discrepâncias nos valores de metalicidade da componente jovem nessas fontes. Nesse cenário, o gás não processado, pobre em metais, da galáxia companheira teria escoado para a região central das galáxias e diluído o gás já presente nessa região, antes de começar o surto de formação estelar. Assim, os

valores mais baixos de metalicidade encontrados para a componente jovem da SP ( $t \leq 50 \times 10^6$  anos), são atribuídos ao gás diluído pela galáxia companheira.

- Como os espectros da amostra estudada neste trabalho apresentam intensas linhas de emissão, nós medimos os fluxos dessas linhas ([SIII]  $\lambda 9530$ , HeI  $\lambda 10830$ , [FeII]  $\lambda 12570$ , Pa $\beta$   $\lambda 12810$ , [FeII]  $\lambda 16440$ , H<sub>2</sub>(1.0)S(1)<sub>o</sub>  $\lambda 21210$  e Br $\gamma$   $\lambda 21650$ ) e derivamos valores para a extinção visual ( $A_v$ ) e o SFR ao longo das aberturas das galáxias. Nossos resultados de extinção interestelar tendem a concordar com os resultados encontrados na literatura. Derivamos  $\bar{A}_v = 7.45 \pm 0.06$ ,  $2.94 \pm 0.01$ ,  $4.35 \pm 0.04$  e  $2.15 \pm 0.01$  para NGC 34, NGC 1614, NGC 3310 e NGC 7714, respectivamente. Os valores calculados para os SFRs tendem a ser menores do que os calculados em outros comprimentos de onda.
- A comparação entre os modelos de M05 e M11 indicam que o uso dos de M11 tendem a favorecer a contribuição da componente da SP intermediária e velha, com relação às idades mais jovens. Isso pode estar relacionado com o fato de que os espectros dos modelos mais jovens (abaixo de  $\sim 100$  milhões de anos) são significativamente atenuados pela absorção da poeira no UV. Além disso, acima de  $\sim 1\mu\text{m}$ , cerca de metade dos espectros não têm observações espectroscópicas. Dessa forma, os autores utilizaram fotometria de banda larga para construir uma distribuição de energia (suavizada), resultando em uma região sem linhas nos espectros de M11, o que pode implicar que algumas linhas de absorção do NIR não estejam bem resolvidas, mesmo nos modelos de mais alta resolução espectral. Devido às limitações dos modelos de M11, como discutido acima, não fica bem claro se o uso desses modelos de maior resolução espectral produzem resultados melhores e confiáveis o suficiente, para compensar o fato de que estão disponíveis somente para metalicidade solar no intervalo espectral do NIR. Assim, concluímos que os modelos de baixa resolução espectral de M05 ainda são a melhor opção para esse intervalo espectral.

Portanto, o estudo da distribuição da SP utilizando o intervalo espectral do NIR é uma ferramenta bastante útil para construir um cenário de formação estelar ao longo das galáxias. Ainda, os resultados para sistemas interagentes com intensa formação estelar no universo local podem oferecer apoio ao estudo de fontes a altos *redshifts*, as quais são de grande importância no entendimento do SFH do universo jovem.

Como perspectivas deste trabalho, pretendemos aplicar esse procedimento de análise da síntese de SP para a amostra de AGNs do atlas de Riffel et al. (2006), assim como para dados de IFU de algumas galáxias selecionadas.

# Apêndice A: Ajustes

Nesta seção, apresentaremos os gráficos com os ajustes da síntese de SP para todos os espectros das galáxias da amostra. Cada figura apresenta:

- *Painéis Superiores:* apresentamos o resultado da síntese (*vermelho*) e os pontos mascarados (*azul*), ambos sobrepostos ao espectro observado (*preto*) da galáxia, abaixo, o espectro residual é mostrado (a linha pontilhada em *vermelho* marca o ponto zero em fluxo).
- *Painéis Inferiores:* nós apresentamos quatro histogramas, os dois à esquerda mostram as contribuições dos vetores de SP separadas somente por idade (metallicidades somadas), pesadas em fluxo ( $\Sigma x_j$ ) e em massa ( $\Sigma \mu_j$ ) e os dois à direita mostram as contribuições dos vetores SP separadas por idade e por metalicidade, pesadas em fluxo ( $x_j$ ) e em massa ( $\mu_j$ ). As regiões das bandas telúricas foram omitidas.

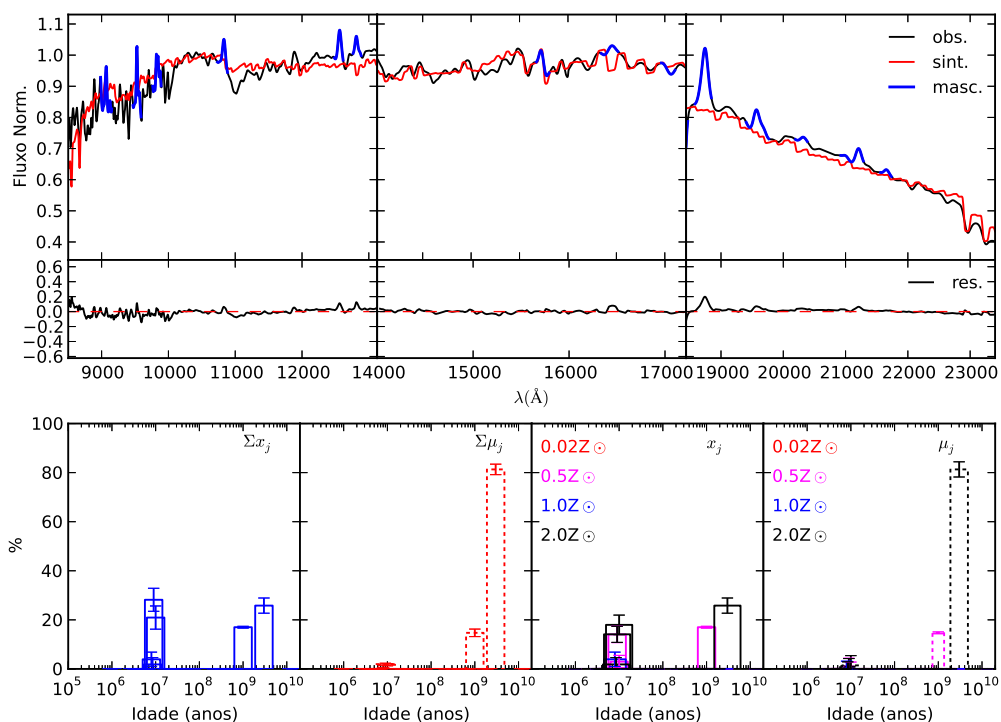


Figura 6.1: Resultados para a abertura  $a$  de NGC 34.

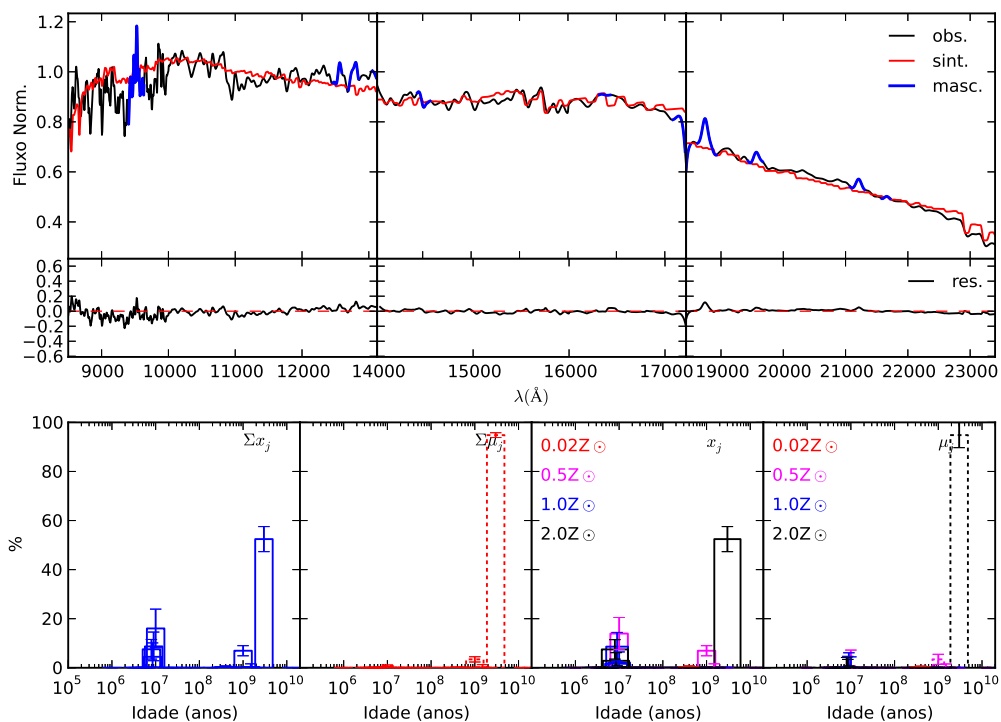


Figura 6.2: Resultados para a abertura  $b$  de NGC 34.

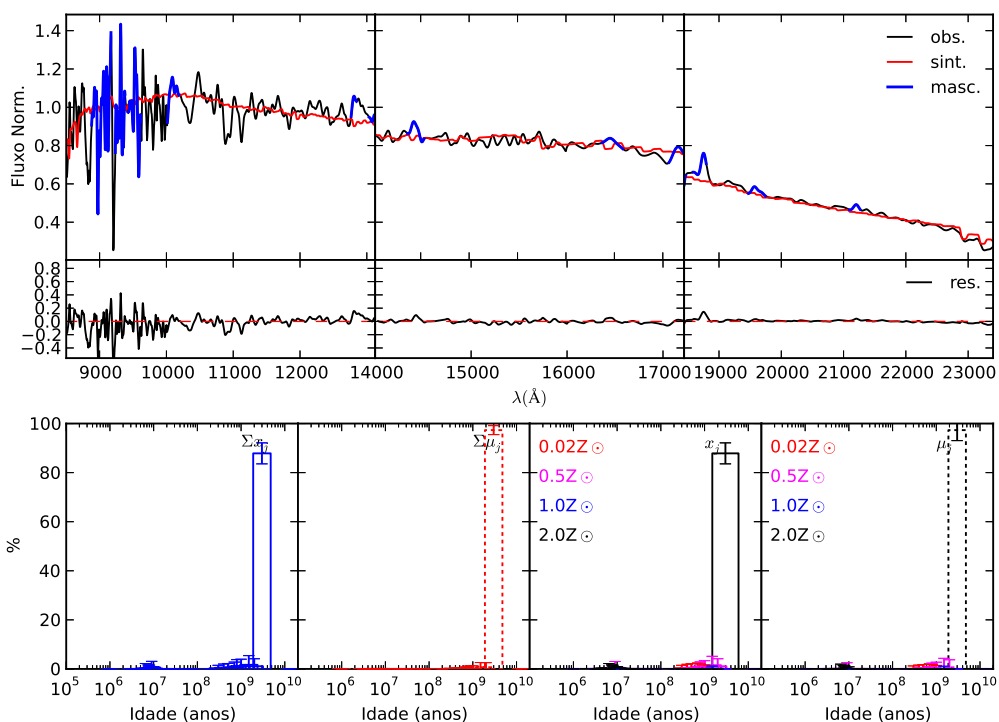


Figura 6.3: Resultados para a abertura  $c$  de NGC 34.

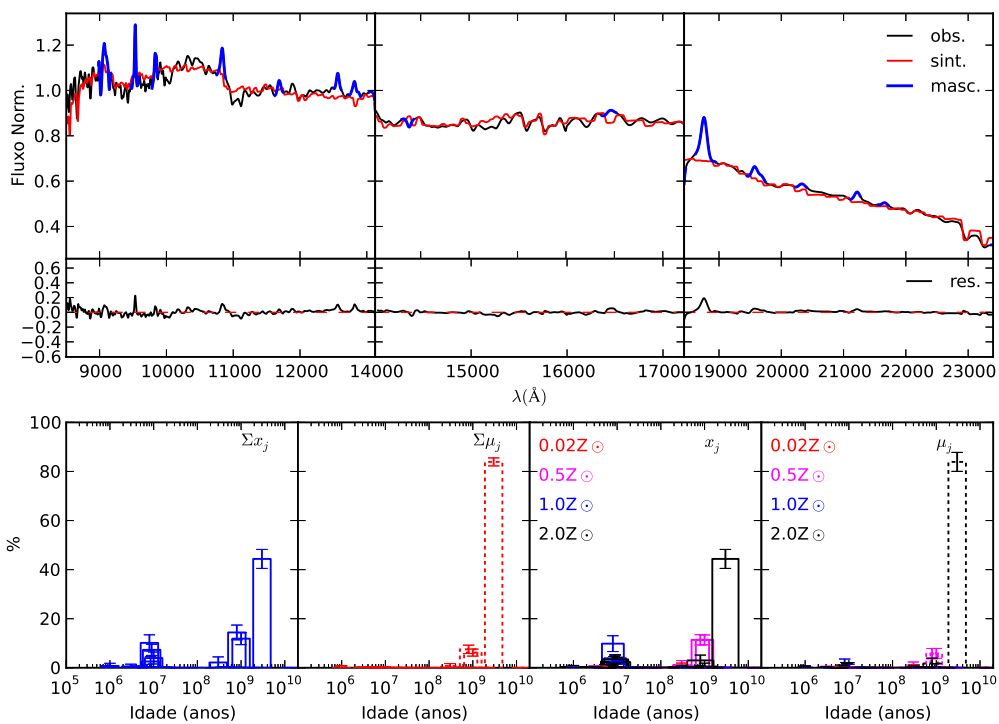


Figura 6.4: Resultados para a abertura  $d$  de NGC 34.



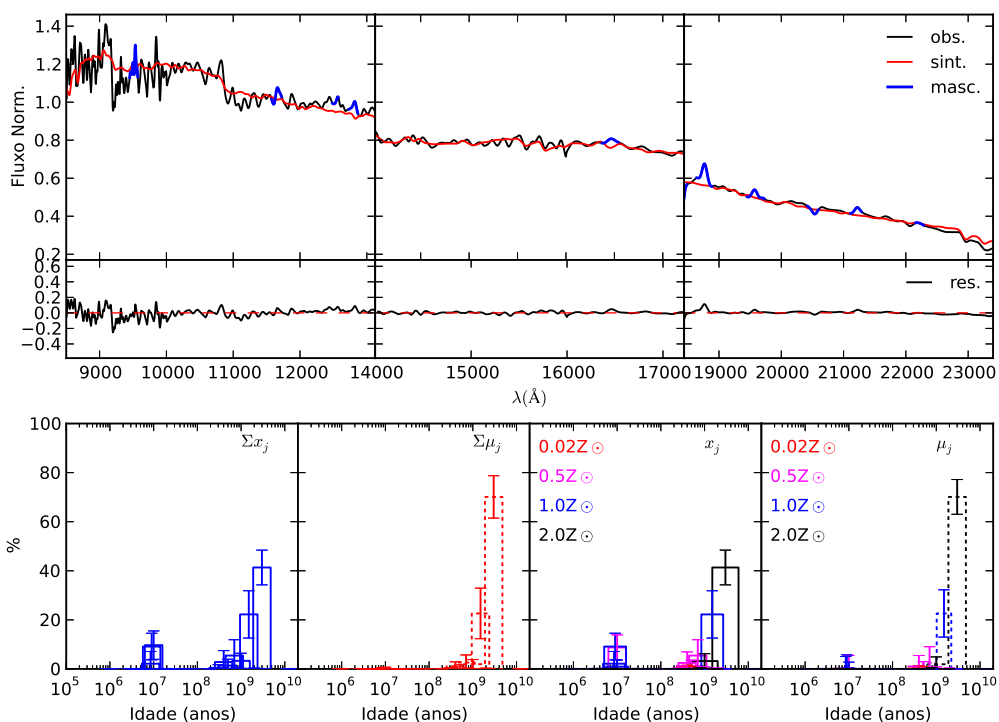


Figura 6.5: Resultados para a abertura  $e$  de NGC 34.

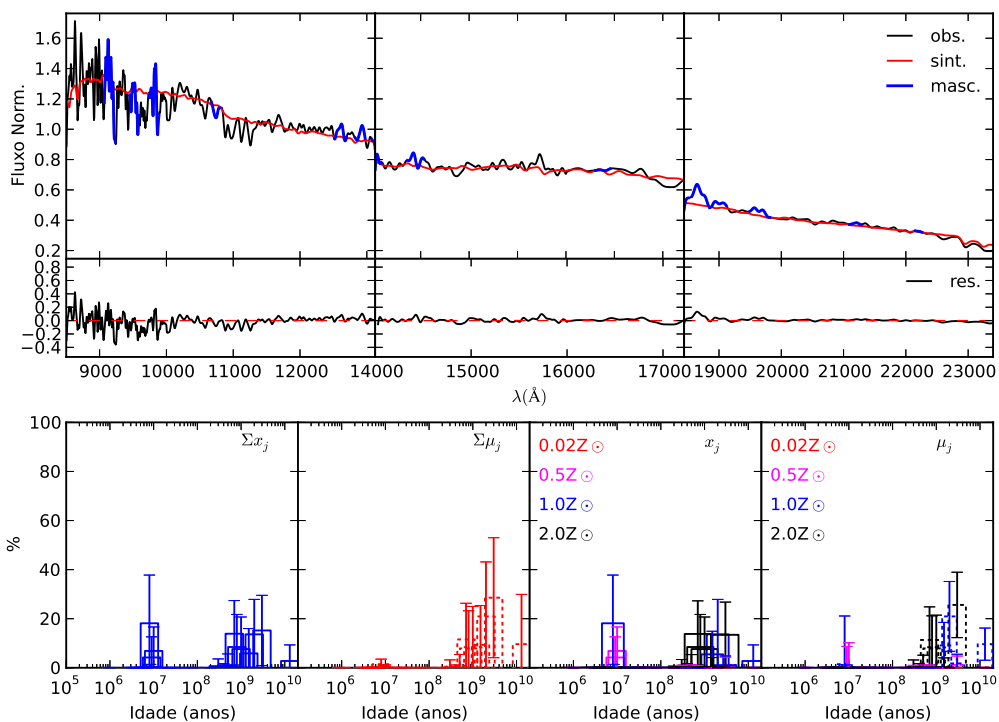


Figura 6.6: Resultados para a abertura  $f$  de NGC 34.

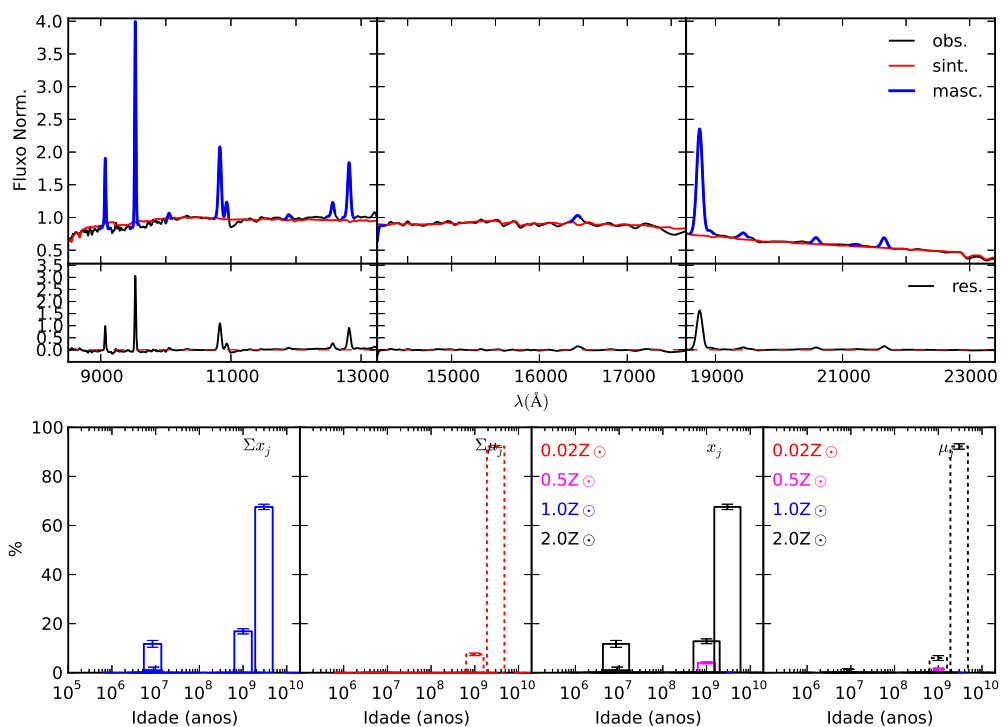


Figura 6.7: Resultados para a abertura  $a$  de NGC 1614.

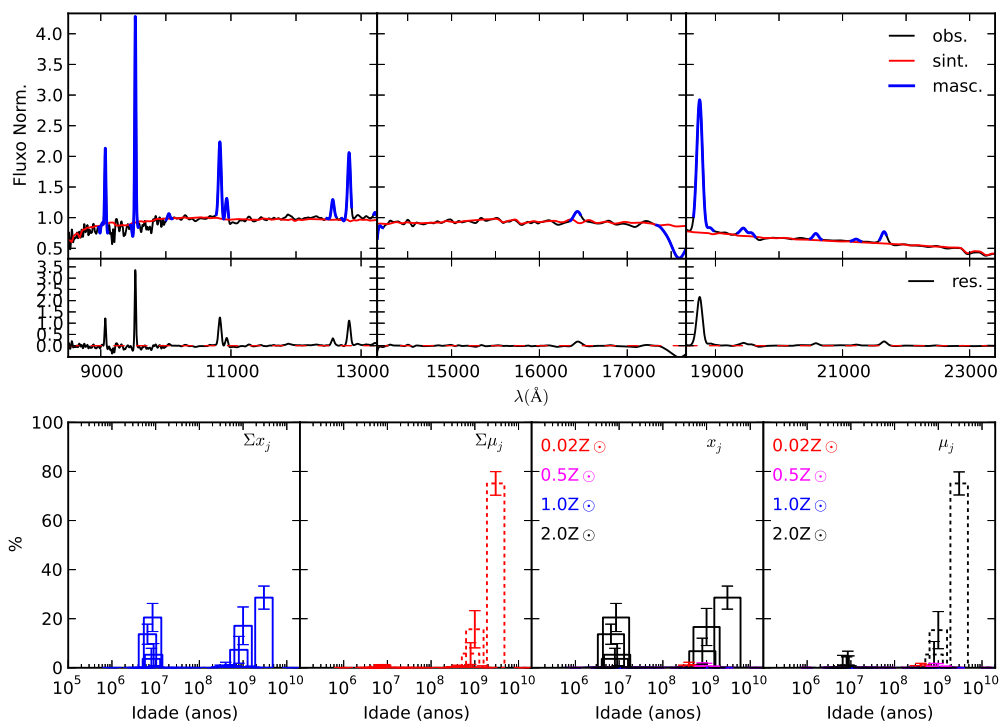


Figura 6.8: Resultados para a abertura  $b$  de NGC 1614.

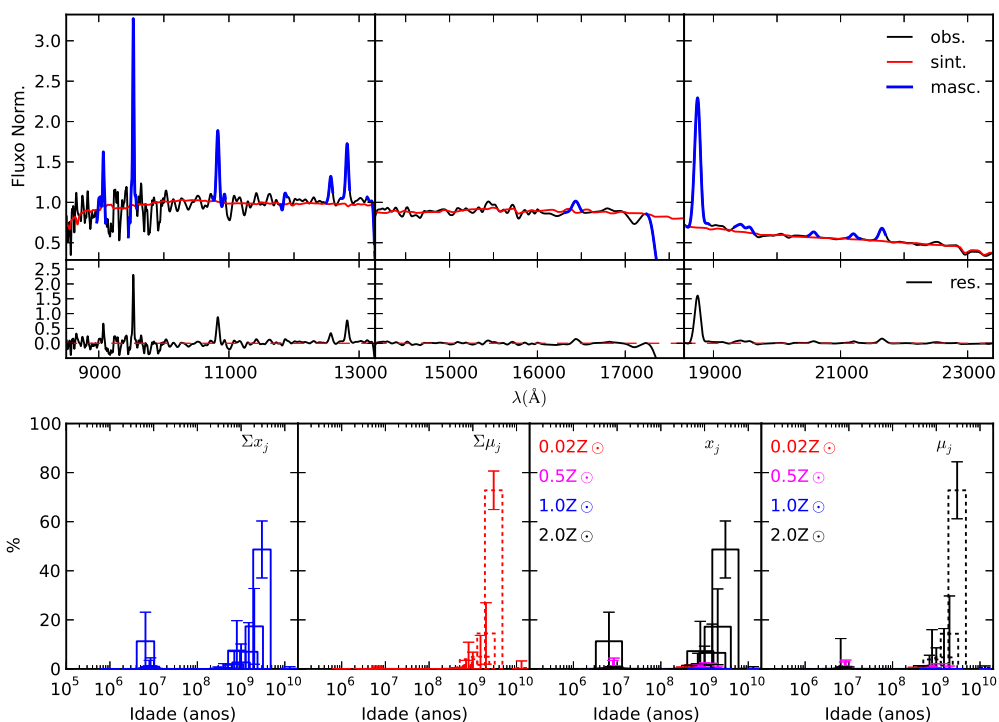


Figura 6.9: Resultados para a abertura *c* de NGC 1614.

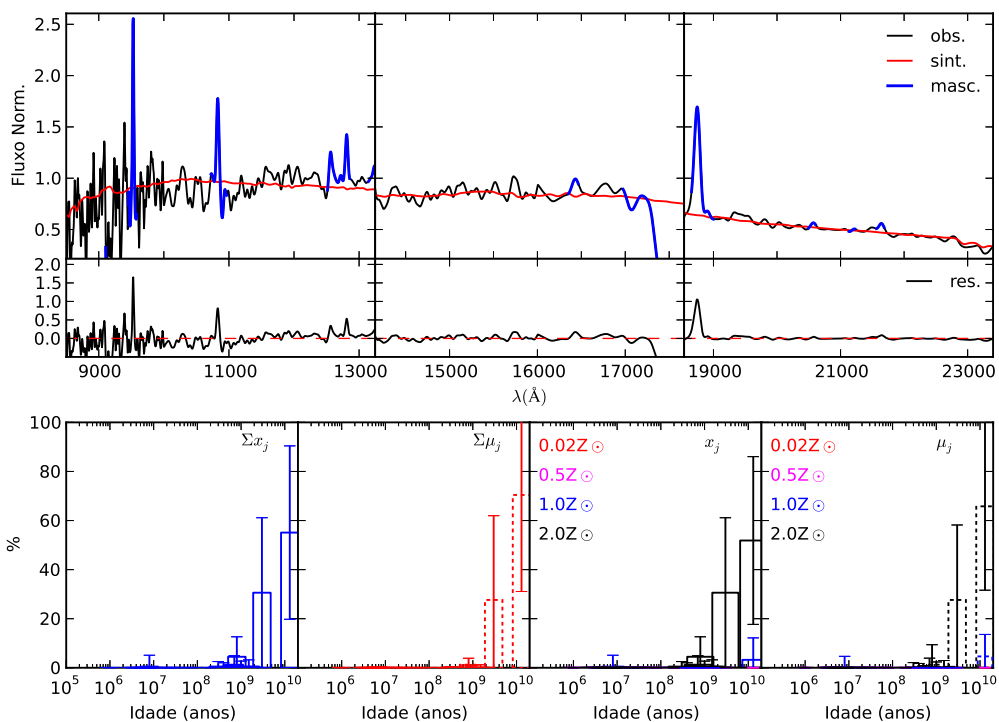


Figura 6.10: Resultados para a abertura *d* de NGC 1614.

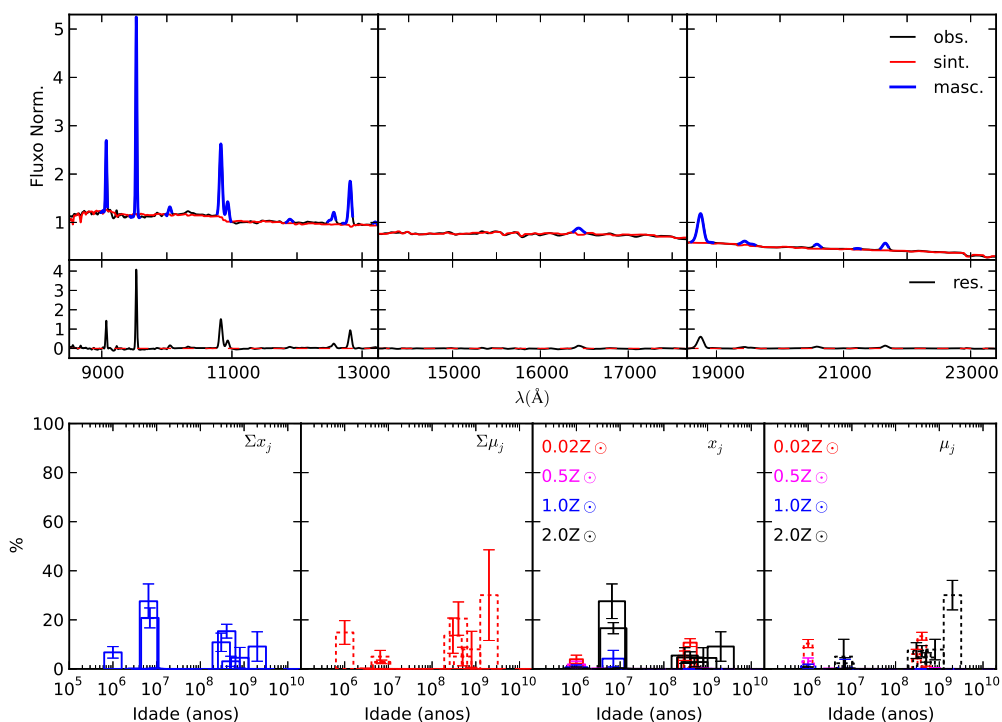


Figura 6.11: Resultados para a abertura  $e$  de NGC 1614.

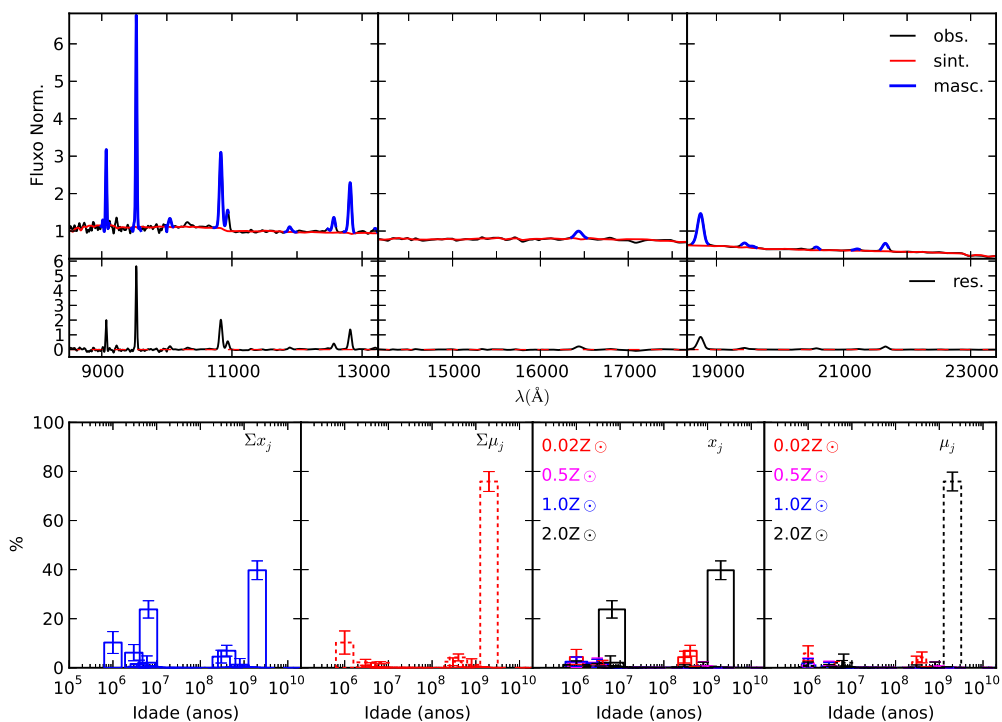


Figura 6.12: Resultados para a abertura  $f$  de NGC 1614.

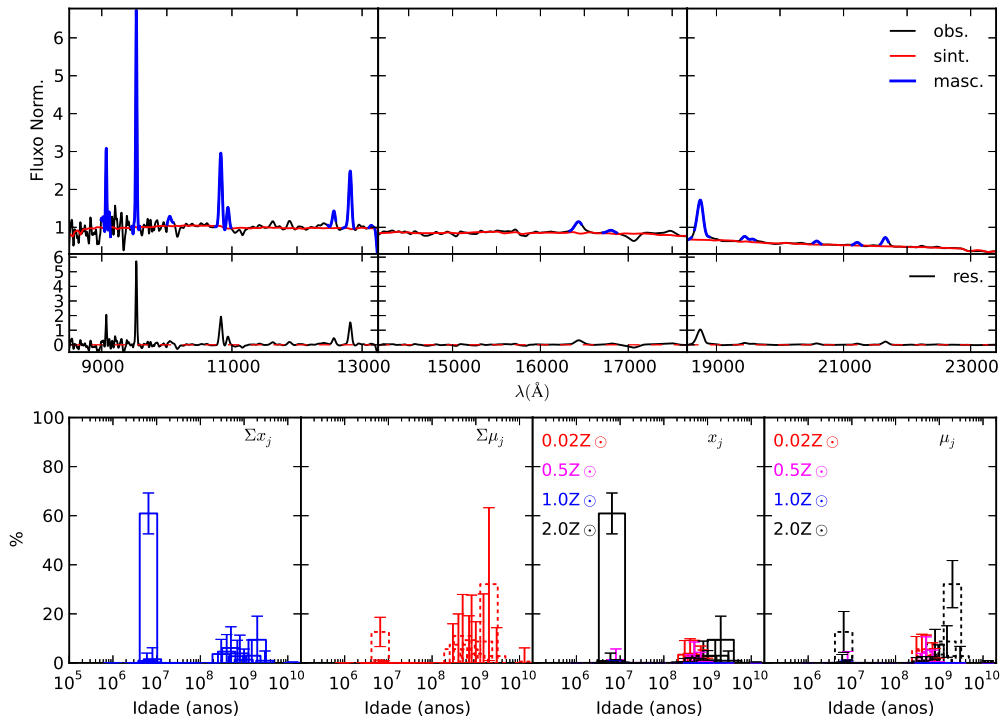


Figura 6.13: Resultados para a abertura  $g$  de NGC 1614.

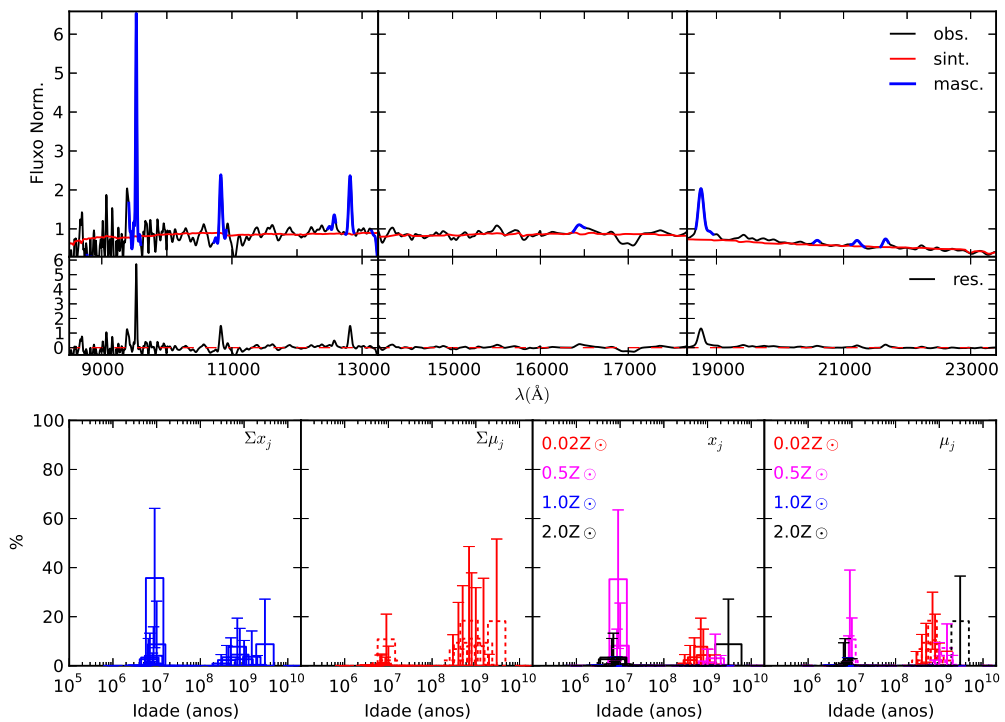


Figura 6.14: Resultados para a abertura  $h$  de NGC 1614.

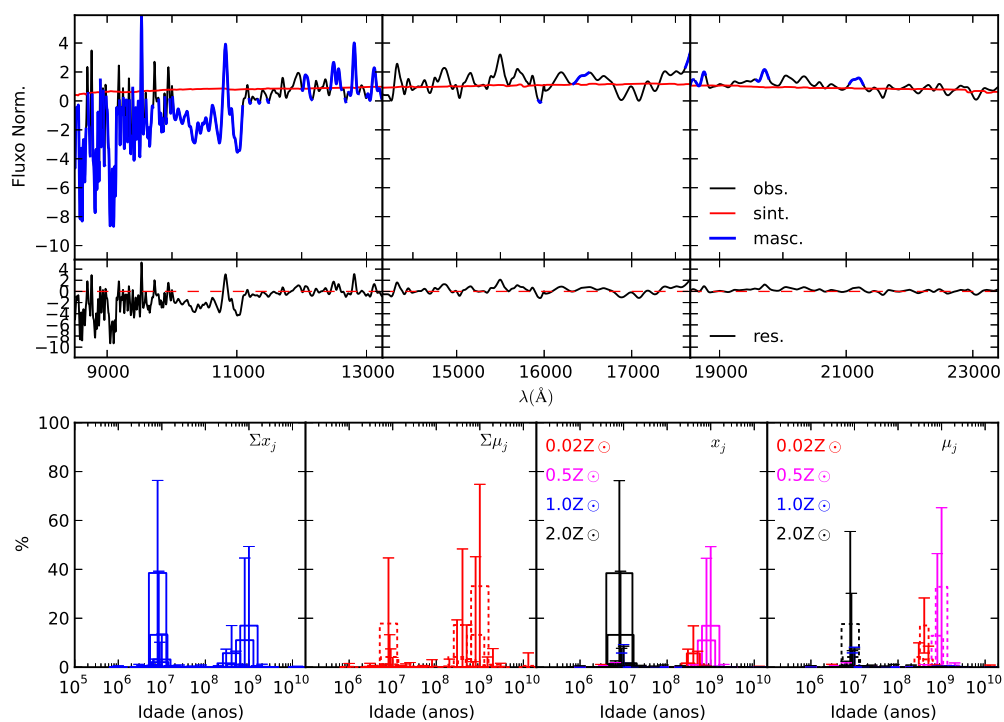


Figura 6.15: Resultados para a abertura *i* de NGC 1614.

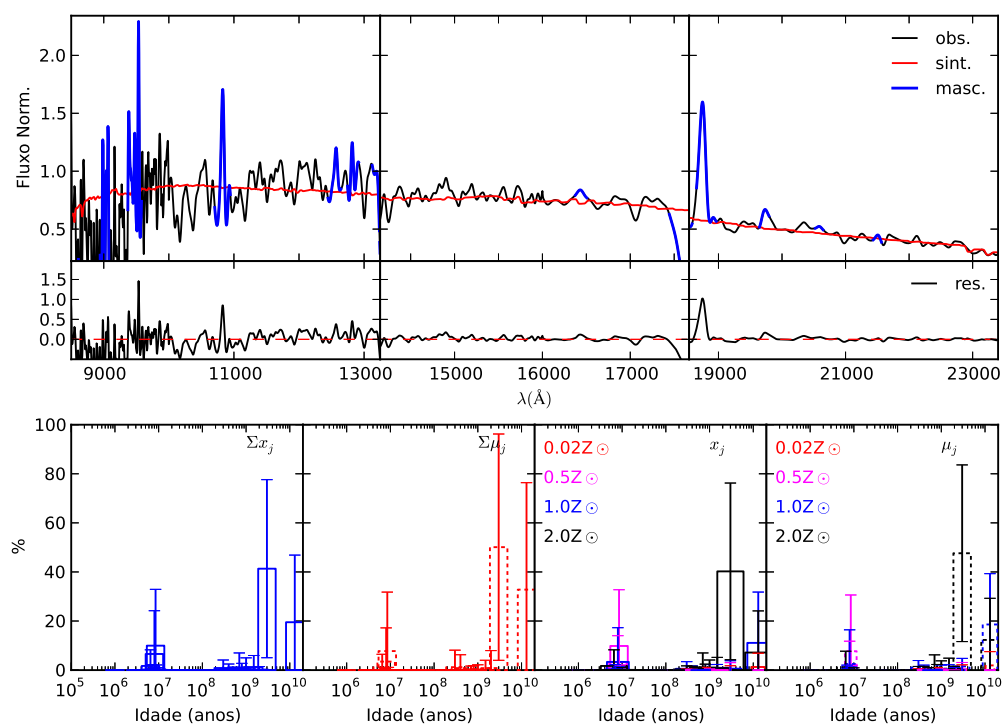


Figura 6.16: Resultados para a abertura *j* de NGC 1614.

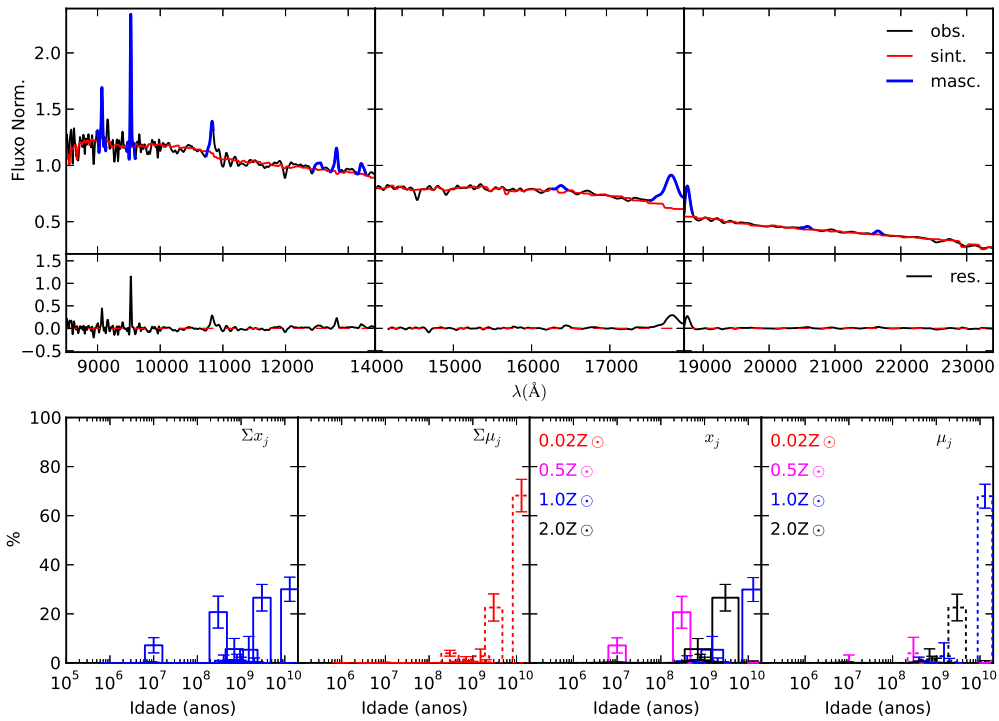


Figura 6.17: Resultados para a abertura *a* de NGC 3310.

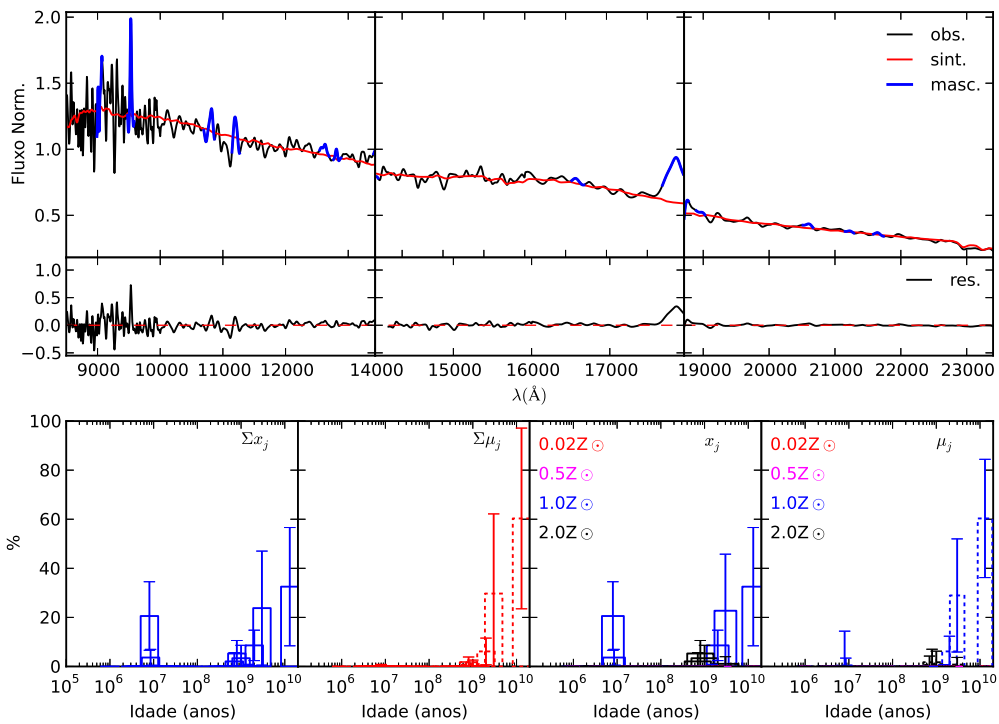


Figura 6.18: Resultados para a abertura *b* de NGC 3310.

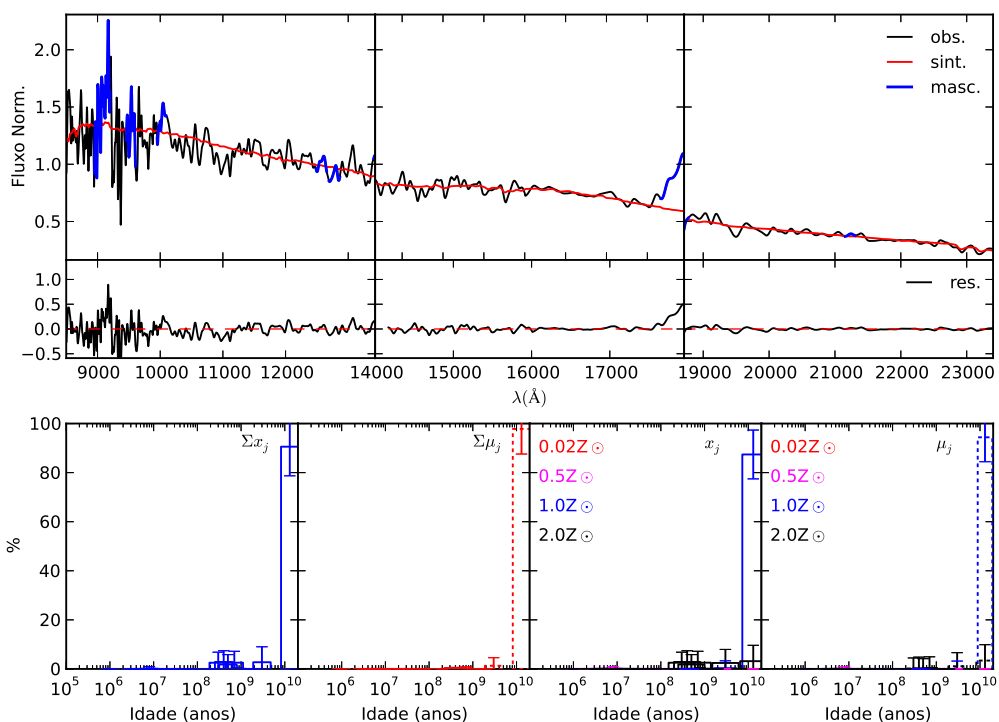


Figura 6.19: Resultados para a abertura  $c$  de NGC 3310.

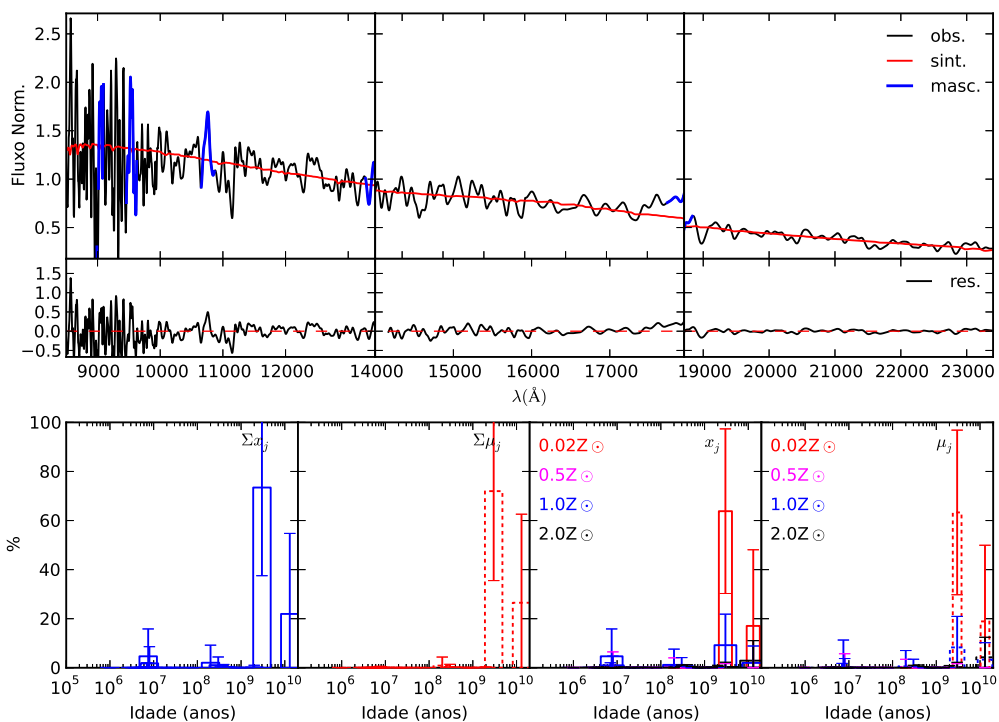


Figura 6.20: Resultados para a abertura  $d$  de NGC 3310.



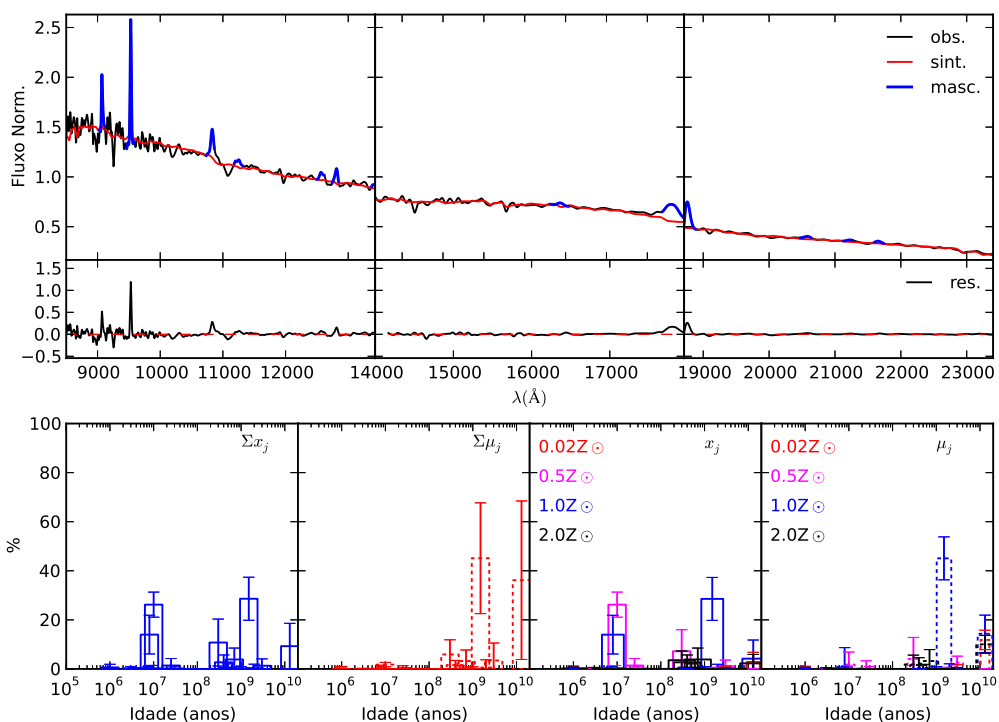


Figura 6.21: Resultados para a abertura  $e$  de NGC 3310.

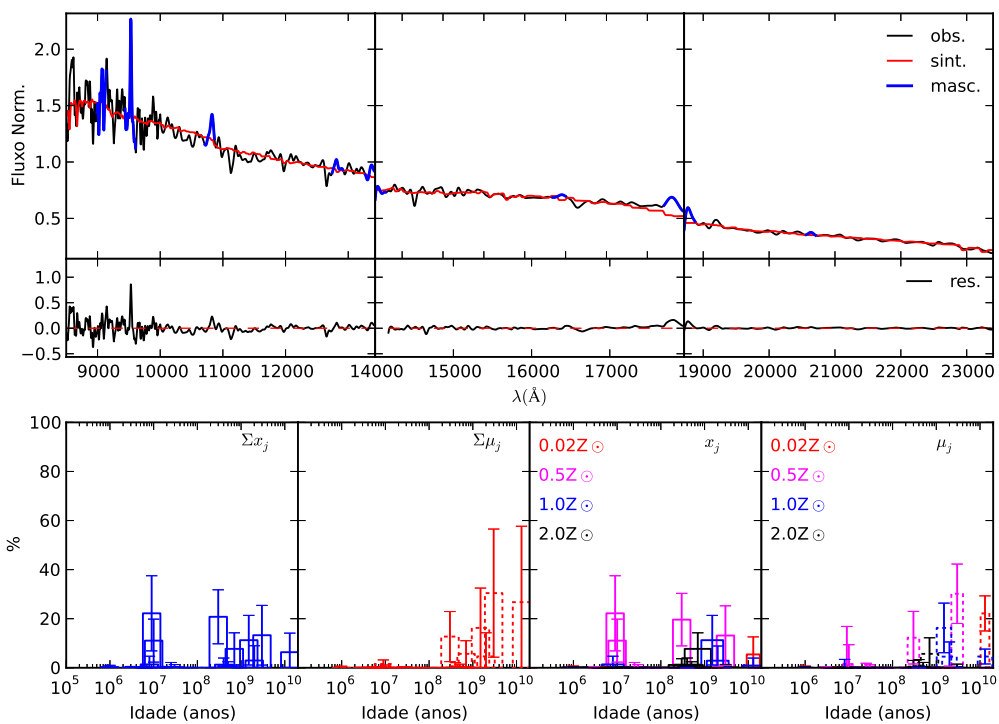


Figura 6.22: Resultados para a abertura  $f$  de NGC 3310.

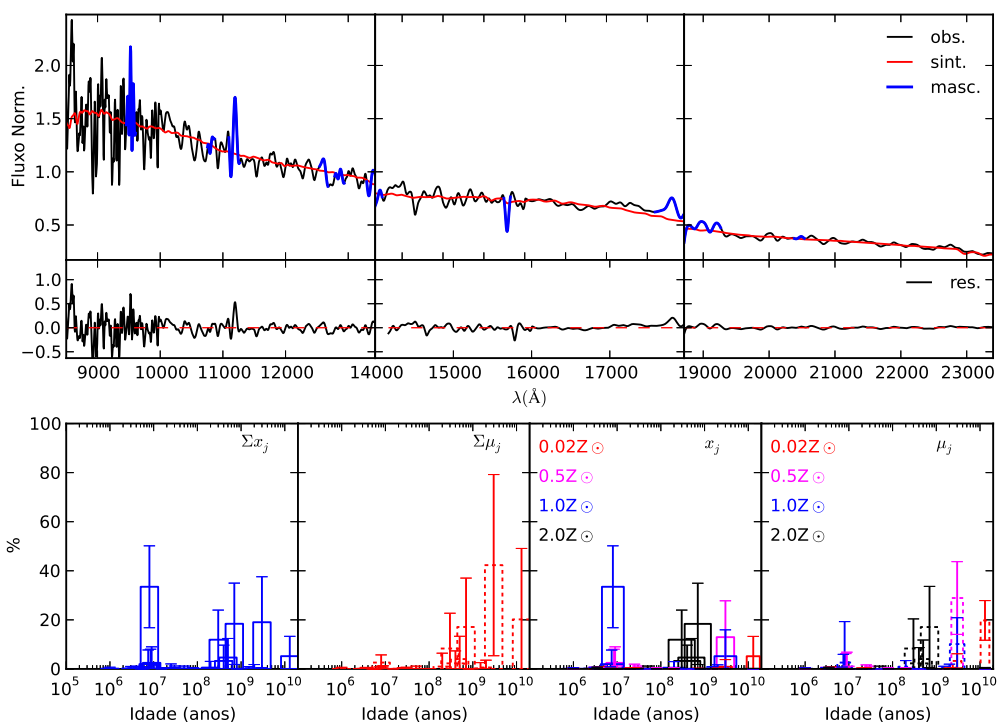


Figura 6.23: Resultados para a abertura  $g$  de NGC 3310.

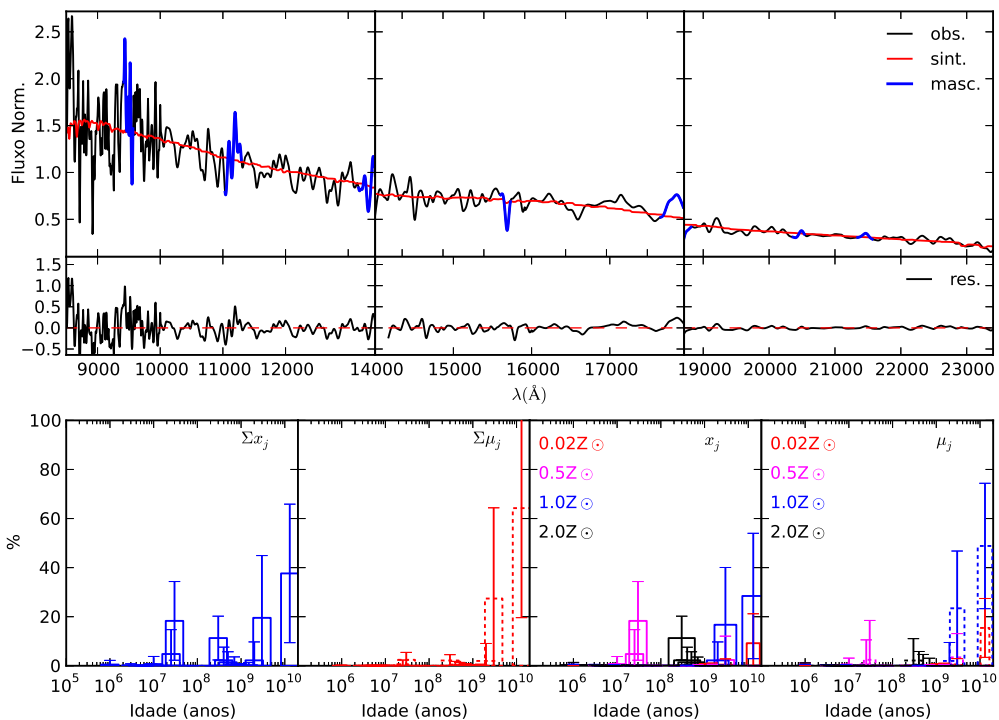


Figura 6.24: Resultados para a abertura  $h$  de NGC 3310.

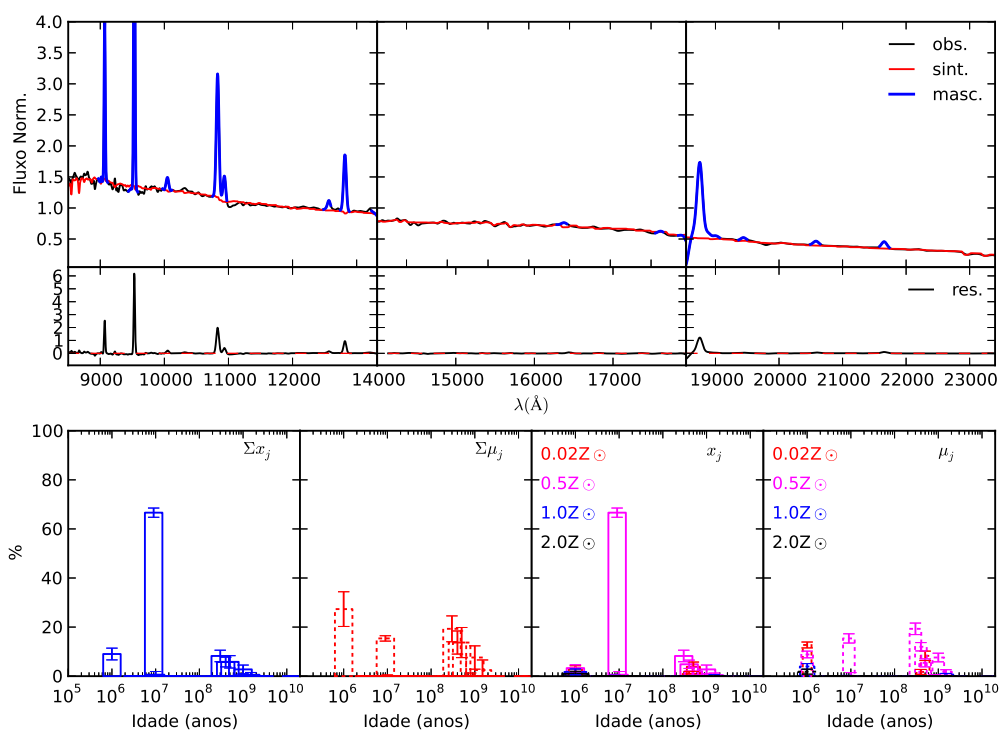


Figura 6.25: Resultados para a abertura *a* de NGC 7714.

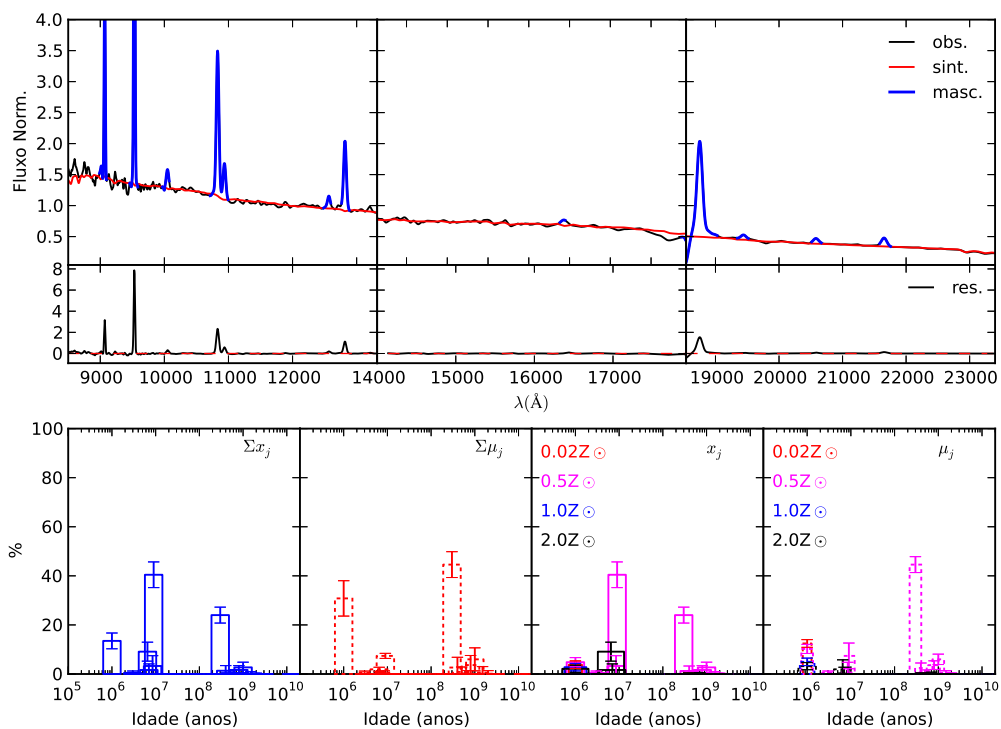


Figura 6.26: Resultados para a abertura *b* de NGC 7714.

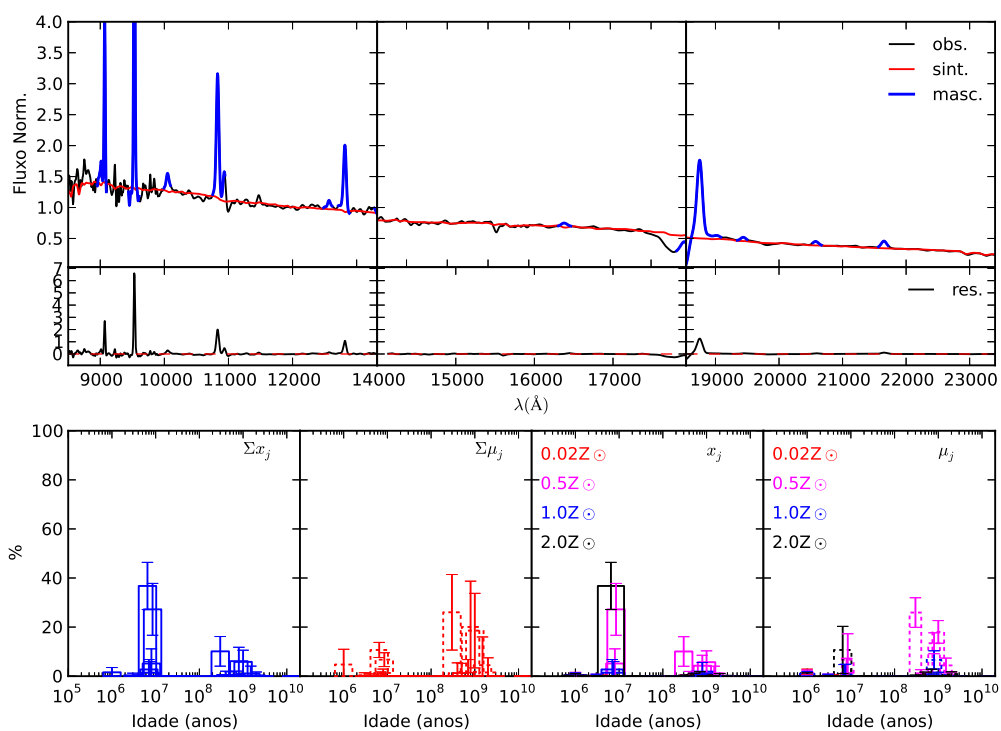


Figura 6.27: Resultados para a abertura  $c$  de NGC 7714.

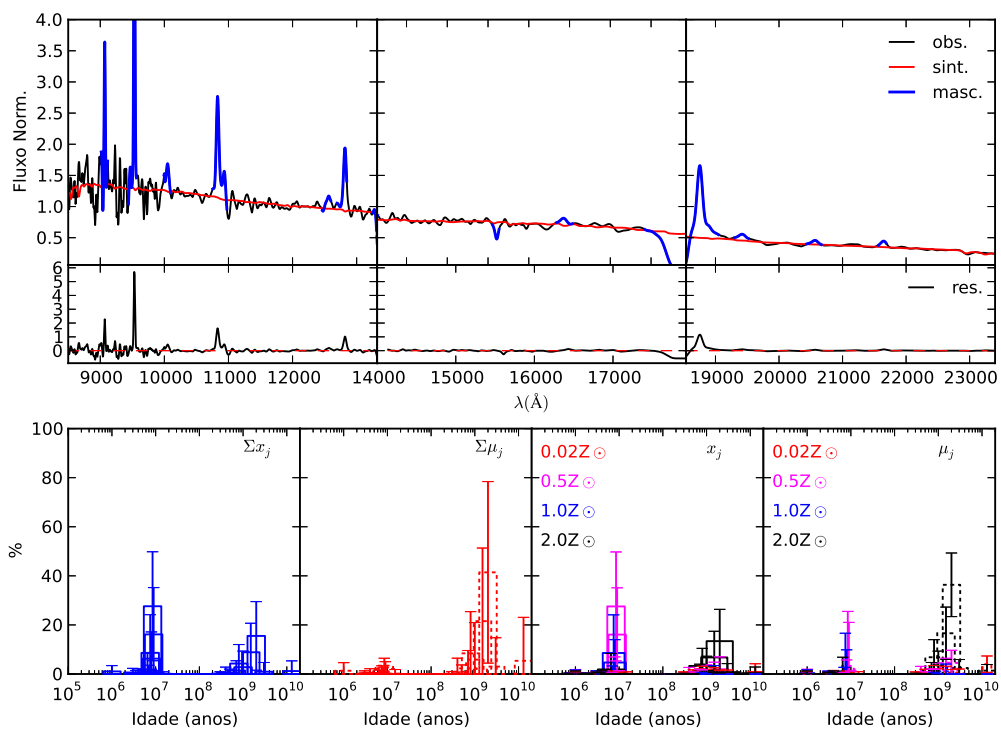


Figura 6.28: Resultados para a abertura  $d$  de NGC 7714.

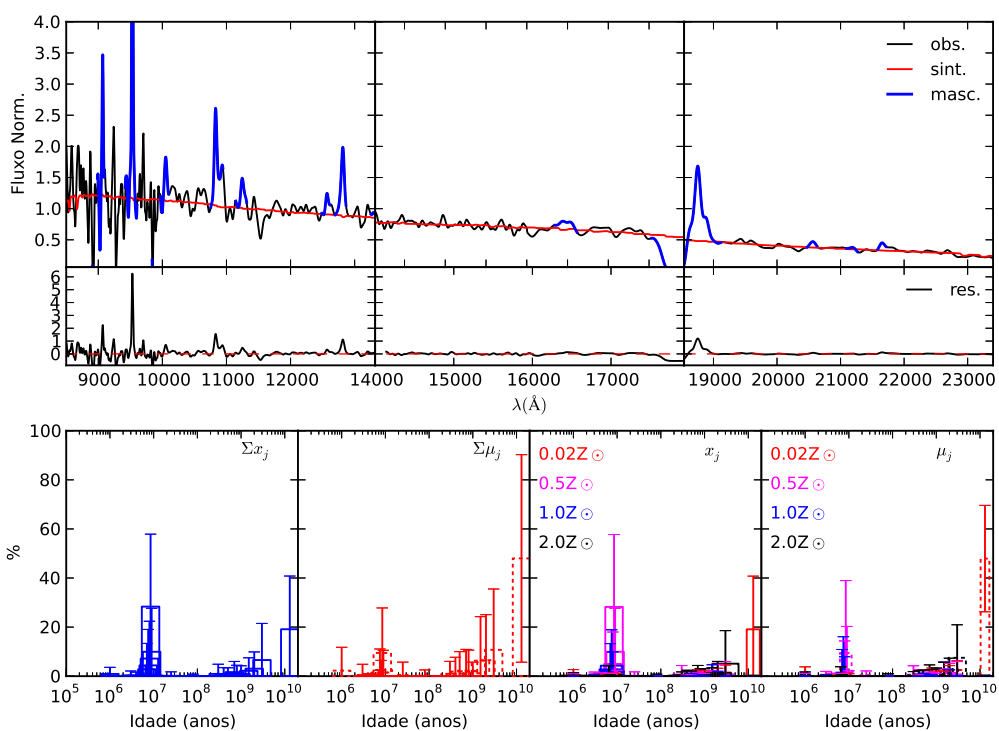


Figura 6.29: Resultados para a abertura  $e$  de NGC 7714.

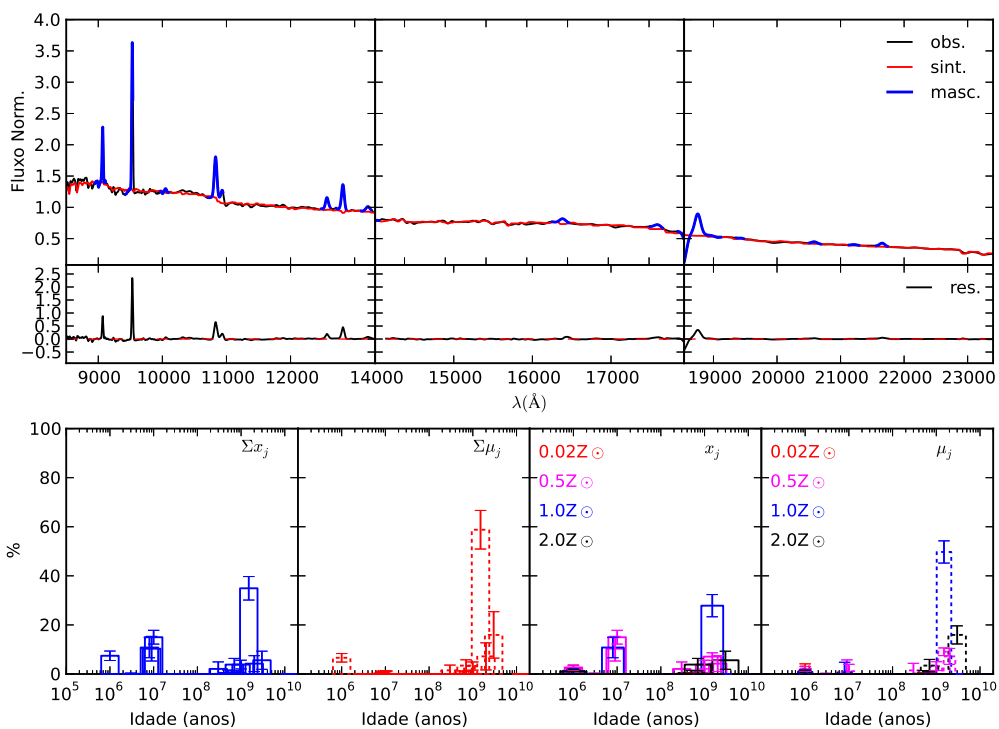


Figura 6.30: Resultados para a abertura  $f$  de NGC 7714.

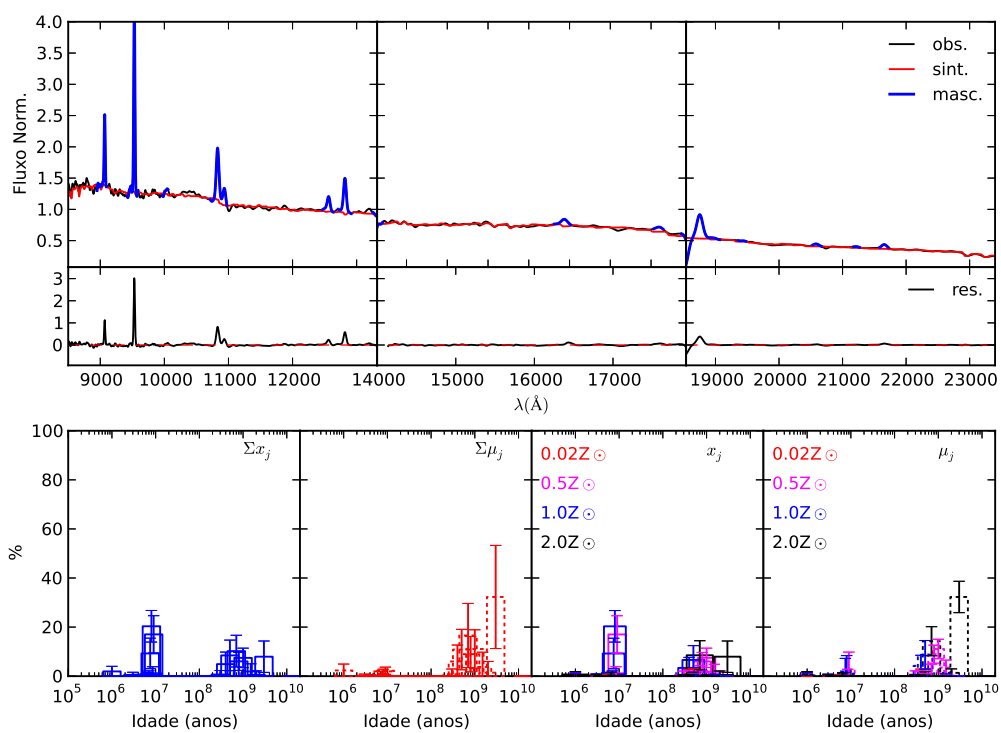


Figura 6.31: Resultados para a abertura  $g$  de NGC 7714.

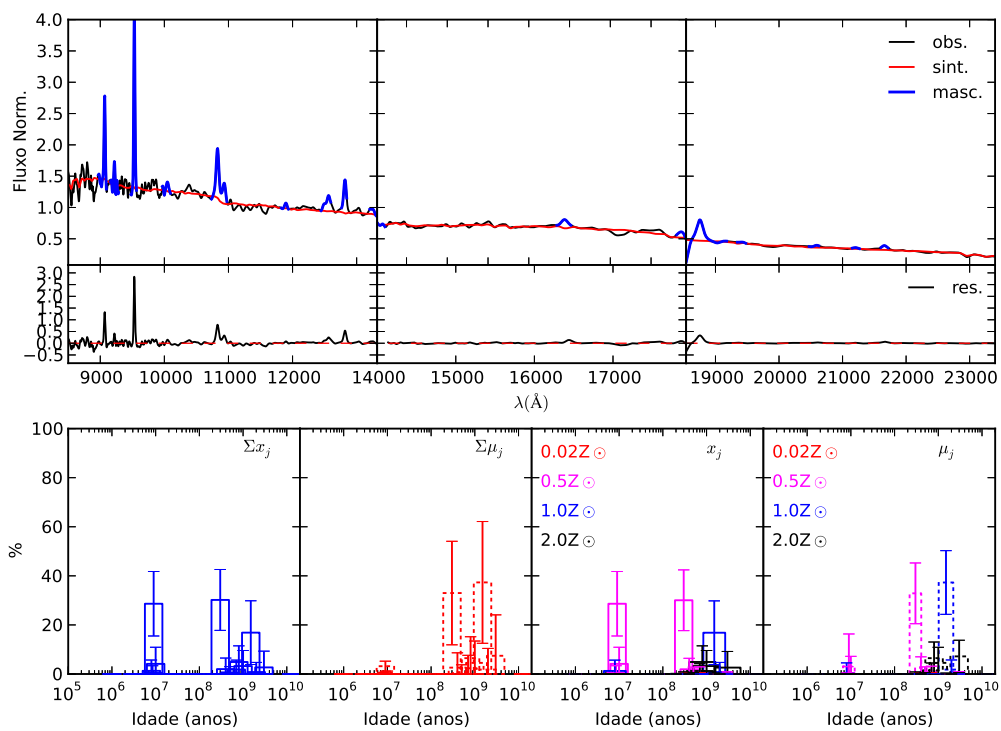


Figura 6.32: Resultados para a abertura  $h$  de NGC 7714.

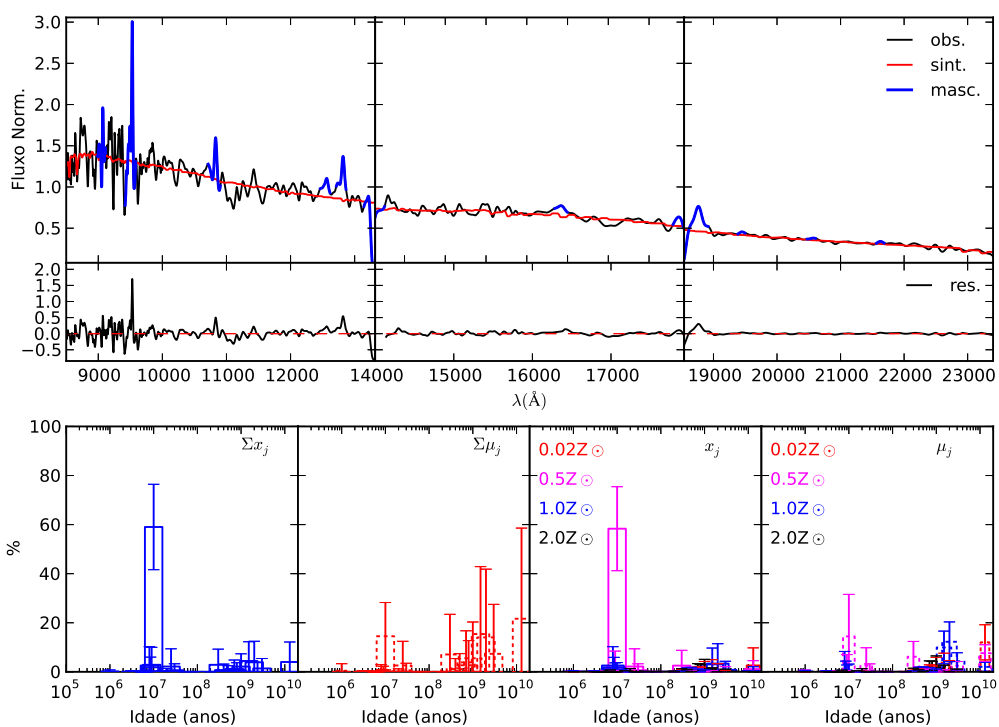


Figura 6.33: Resultados para a abertura  $i$  de NGC 7714.

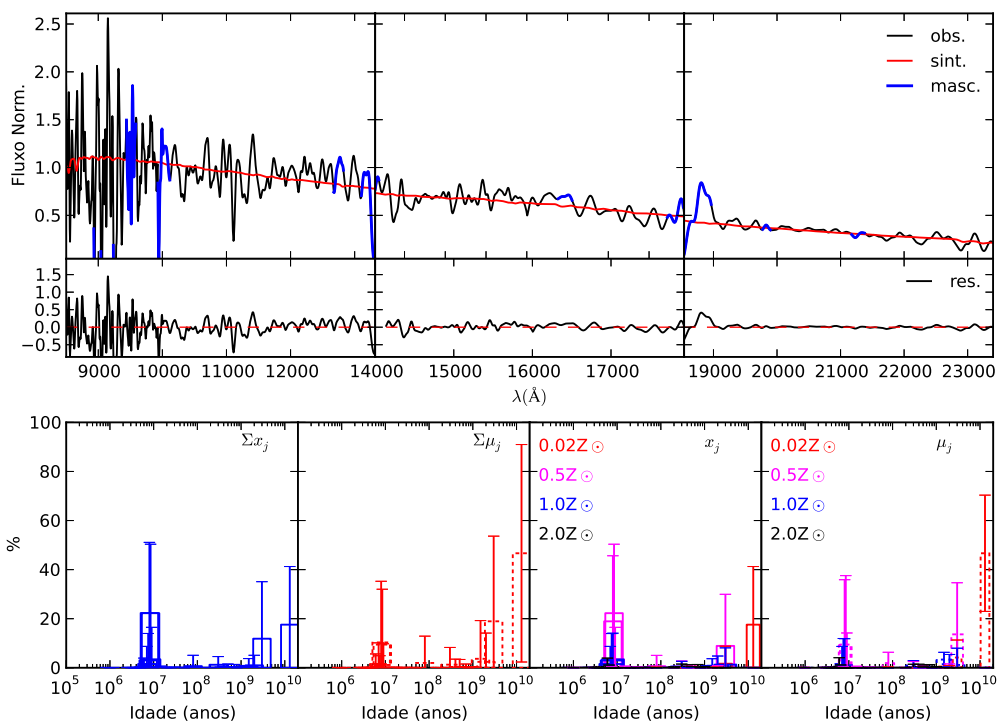


Figura 6.34: Resultados para a abertura  $j$  de NGC 7714.

# Apêndice B: Artigo

## Dametto et al. (2014)

1. **Probing the Circumnuclear Stellar Populations of Starburst Galaxies in the Near-infrared,**

N.Z. Dametto, R. Riffel, M. G. Pastoriza, A. Rodríguez-Ardila, J. A. Hernandez-Jimenez & E. A. Carvalho, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, v.443, p.1754-1778, September 2014.



# Referências Bibliográficas

- [1] ALONSO-HERRERO, A., ENGELBRACHT, C. W., RIEKE, M. J., RIEKE, G. H., QUILLEN, A. C. NGC 1614: A Laboratory for Starburst Evolution. **Astrophysical Journal**, v. 546, p. 952–965, January 2001.
- [2] ARP, H. **Atlas of peculiar galaxies**: 1966.
- [3] ASARI, N. V., CID FERNANDES, R., STASIŃSKA, G., TORRES-PAPAQUI, J. P., MATEUS, A., SODRÉ, L., SCHOENELL, W., GOMES, J. M. The history of star-forming galaxies in the Sloan Digital Sky Survey. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 381, p. 263–279, October 2007.
- [4] BALICK, B., HECKMAN, T. The inner regions of the spiral galaxy NGC 3310 - Evidence for galactic cannibalism. **Astronomy and Astrophysics**, v. 96, p. 271–277, March 1981.
- [5] BARVAINIS, R. Hot dust and the near-infrared bump in the continuum spectra of quasars and active galactic nuclei. **Astrophysical Journal**, v. 320, p. 537–544, September 1987.
- [6] BERNLÖHR, K. Models and observations of starbursts. II - Starbursts in interacting galaxies. **Astronomy and Astrophysics**, v. 268, p. 25–34, February 1993.
- [7] BEVINGTON, P. R., ROBINSON, D. K. **Data reduction and error analysis for the physical sciences**: 1992.
- [8] BICA, E., ALLOIN, D. A base of star clusters for stellar population synthesis. **Astronomy and Astrophysics**, v. 162, p. 21–31, July 1986.
- [9] BOLZONELLA, M., MIRALLES, J.-M., PELLÓ, R. Photometric redshifts based on standard SED fitting procedures. **Astronomy and Astrophysics**, v. 363, p. 476–492, November 2000.

- [10] BRANDL, B. R., DEVOST, D., HIGDON, S. J. U., CHARMANDARIS, V., WEEDMAN, D., SPOON, H. W. W., HERTER, T. L., HAO, L., BERNARD-SALAS, J., HOUCK, J. R., ARMUS, L., SOIFER, B. T., GRILLMAIR, C. J., APPLETON, P. N. Spitzer Infrared Spectrograph Spectroscopy of the Prototypical Starburst Galaxy NGC 7714. **Astrophysical Journal Supplement Series**, v. 154, p. 188–192, September 2004.
- [11] BUSHOUSE, H. A. Star-formation rates in the nuclei of violently interacting galaxies. **Astronomical Journal**, v. 91, p. 255–270, February 1986.
- [12] CALZETTI, D., ARMUS, L., BOHLIN, R. C., KINNEY, A. L., KOORNNEEF, J., STORCHI-BERGMANN, T. The Dust Content and Opacity of Actively Star-forming Galaxies. **Astrophysical Journal**, v. 533, p. 682–695, April 2000.
- [13] CALZETTI, D., KINNEY, A. L., STORCHI-BERGMANN, T. Dust extinction of the stellar continua in starburst galaxies: The ultraviolet and optical extinction law. **Astrophysical Journal**, v. 429, p. 582–601, July 1994.
- [14] CARDELLI, J. A., CLAYTON, G. C., MATHIS, J. S. The relationship between infrared, optical, and ultraviolet extinction. **Astrophysical Journal**, v. 345, p. 245–256, October 1989.
- [15] CARILLI, C. L., WALTER, F. Cool Gas in High-Redshift Galaxies. **Annual Review of Astronomy and Astrophysics**, v. 51, p. 105–161, August 2013.
- [16] CHARLOT, S., BRUZUAL, A. G. Stellar population synthesis revisited. **Astrophysical Journal**, v. 367, p. 126–140, January 1991.
- [17] CID FERNANDES, R., GONZÁLEZ DELGADO, R. M., STORCHI-BERGMANN, T., MARTINS, L. P., SCHMITT, H. The stellar populations of low-luminosity active galactic nuclei - III. Spatially resolved spectral properties. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 356, p. 270–294, January 2005a.
- [18] CID FERNANDES, R., GU, Q., MELNICK, J., TERLEVICH, E., TERLEVICH, R., KUNTH, D., RODRIGUES LACERDA, R., JOGUET, B. The star formation history of Seyfert 2 nuclei. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 355, p. 273–296, November 2004.

- [19] CID FERNANDES, R., LEÃO, J. R. S., LACERDA, R. R. The evolution of stars and gas in starburst galaxies. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 340, p. 29–42, March 2003.
- [20] CID FERNANDES, R., MATEUS, A., SODRÉ, L., STASIŃSKA, G., GOMES, J. M. Semi-empirical analysis of Sloan Digital Sky Survey galaxies - I. Spectral synthesis method. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 358, p. 363–378, April 2005b.
- [21] CID FERNANDES, R., PÉREZ, E., GARCÍA BENITO, R., GONZÁLEZ DELGADO, R. M., DE AMORIM, A. L., SÁNCHEZ, S. F., HUSEMANN, B., FALCÓN BARROSO, J., SÁNCHEZ-BLÁZQUEZ, P., WALCHER, C. J., MAST, D. Resolving galaxies in time and space. I. Applying STARLIGHT to CALIFA datacubes. **Astronomy and Astrophysics**, v. 557, p. A86, September 2013.
- [22] CID FERNANDES, R., SODRÉ, L., SCHMITT, H. R., LEÃO, J. R. S. A probabilistic formulation for empirical population synthesis: sampling methods and tests. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 325, p. 60–76, July 2001.
- [23] COLINA, L., ARRIBAS, S., MONREAL-IBERO, A. Kinematics of Low-z Ultraluminous Infrared Galaxies and Implications for Dynamical Mass Derivations in High-z Star-forming Galaxies. **Astrophysical Journal**, v. 621, p. 725–737, March 2005.
- [24] CUSHING, M. C., VACCA, W. D., RAYNER, J. T. Spextool: A Spectral Extraction Package for SpeX, a 0.8-5.5 Micron Cross-Dispersed Spectrograph. **Publications of the Astronomical Society of the Pacific**, v. 116, p. 362–376, April 2004.
- [25] DAMETTO, N. Z., RIFFEL, R., PASTORIZA, M. G., RODRÍGUEZ-ARDILA, A., HERNANDEZ-JIMENEZ, J. A., CARVALHO, E. A. Probing the circumnuclear stellar populations of starburst galaxies in the near-infrared. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 443, p. 1754–1778, September 2014.
- [26] DE VAUCOULEURS, G., DE VAUCOULEURS, A., CORWIN, H. G., JR., BUTA, R. J., PATUREL, G., FOUQUE, P. **Third Reference Catalogue of Bright Galaxies**: 1991.

- [27] DOYON, R., JOSEPH, R. D., WRIGHT, G. S. The strengths of the 2.3 micron CO band in luminous interacting and merging galaxies. In: **INFRARED SPECTROSCOPY IN ASTRONOMY**, Böhm-Vitense, E., editor, v. 290 of **ESA Special Publication**, p. 477–479, September 1989.
- [28] DUC, P.-A., RENAUD, F. Tides in Colliding Galaxies. In: **LECTURE NOTES IN PHYSICS**, BERLIN SPRINGER VERLAG, Souchay, J., Mathis, S., Tokieda, T., editores, v. 861 of **Lecture Notes in Physics, Berlin Springer Verlag**, p. 327, 2013.
- [29] ELMEGREEN, D. M., CHROMEY, F. R., MCGRATH, E. J., OSTENSON, J. M. Circumnuclear Star Formation in the Spiral Galaxy NGC 3310. **Astronomical Journal**, v. 123, p. 1381–1388, March 2002.
- [30] FERNÁNDEZ, X., VAN GORKOM, J. H., SCHWEIZER, F., BARNES, J. E. A Radio Perspective on the Wet Merger Remnant NGC 34. **Astronomical Journal**, v. 140, p. 1965–1974, December 2010.
- [31] FISCHERA, J., DOPITA, M. A., SUTHERLAND, R. S. Starburst Galaxies: Why the Calzetti Dust Extinction Law? **Astrophysical Journal Letters**, v. 599, p. L21–L24, December 2003.
- [32] FOSBURY, R. A. E., HAWARDEN, T. G. A0035 'the cartwheel' a large southern ring galaxy. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 178, p. 473–487, February 1977.
- [33] FRENCH, H. B. Galaxies with the spectra of giant H II regions. **Astrophysical Journal**, v. 240, p. 41–59, August 1980.
- [34] FROGEL, J. A., MOULD, J., BLANCO, V. M. The asymptotic giant branch of Magellanic Cloud clusters. **Astrophysical Journal**, v. 352, p. 96–122, March 1990.
- [35] GOLDADER, J. D., JOSEPH, R. D., DOYON, R., SANDERS, D. B. Spectroscopy of luminous infrared galaxies at 2 microns: 1. The ultraluminous galaxies ( $L_{IR}$  approximately greater than  $10^{12}$  solar luminosity). **Astrophysical Journal**, v. 444, p. 97–112, May 1995.
- [36] GOLDADER, J. D., JOSEPH, R. D., DOYON, R., SANDERS, D. B. Spectroscopy of Luminous Infrared Galaxies at 2 Microns. II. Data for Galaxies with

- 11.2  $\lesssim$  (L IR/L )  $\lesssim$  11.9. **Astrophysical Journal Supplement Series**, v. 108, p. 449, February 1997.
- [37] GONÇALVES, A. C., VÉRON-CETTY, M.-P., VÉRON, P. AGNs with composite spectra. II. Additional data. **Astronomy and Astrophysics Supplement Series**, v. 135, p. 437–466, March 1999.
- [38] GONZÁLEZ DELGADO, R. M., GARCÍA-VARGAS, M. L., GOLDADER, J., LEITHERER, C., PASQUALI, A. Multiwavelength Study of the Starburst Galaxy NGC 7714. I. Ultraviolet-Optical Spectroscopy. **Astrophysical Journal**, v. 513, p. 707–719, March 1999.
- [39] GONZALEZ-DELGADO, R. M., PEREZ, E., DIAZ, A. I., GARCIA-VARGAS, M. L., TERLEVICH, E., VILCHEZ, J. M. The starburst galaxy NGC 7714. **Astrophysical Journal**, v. 439, p. 604–622, February 1995.
- [40] GORDON, K. D., CLAYTON, G. C., MISSELT, K. A., LANDOLT, A. U., WOLFF, M. J. A Quantitative Comparison of the Small Magellanic Cloud, Large Magellanic Cloud, and Milky Way Ultraviolet to Near-Infrared Extinction Curves. **Astrophysical Journal**, v. 594, p. 279–293, September 2003.
- [41] GROTHUES, H. G., SCHMIDT-KALER, T. The nuclear H II gas in the starburst galaxy NGC 3310 - Extended radial motions or a merger? **Astronomy and Astrophysics**, v. 242, p. 357–370, February 1991.
- [42] GÜSTEN, R. Gas and Dust in the Inner Few Degrees of the Galaxy (review). In: THE CENTER OF THE GALAXY, Morris, M., editor, v. 136 of **IAU Symposium**, p. 89, 1989.
- [43] HASTINGS, W. K. Monte Carlo Sampling Methods Using Markov Chains and Their Applications. **Biometrika Trust**, v. 57, p. 97–109, April 1970.
- [44] HECKMAN, T. **Starburst Galaxies**. November 2000.
- [45] HECKMAN, T. M., ARMUS, L., MILEY, G. K. On the nature and implications of starburst-driven galactic superwinds. **Astrophysical Journal Supplement Series**, v. 74, p. 833–868, December 1990.
- [46] KENNICUTT, R. C., JR. Star Formation in Galaxies Along the Hubble Sequence. **Annual Review of Astronomy and Astrophysics**, v. 36, p. 189–232, 1998.

- [47] KINNEY, A. L., BOHLIN, R. C., CALZETTI, D., PANAGIA, N., WYSE, R. F. G. An atlas of ultraviolet spectra of star-forming galaxies. **Astrophysical Journal Supplement Series**, v. 86, p. 5–93, May 1993.
- [48] KIRKPATRICK, S., GELATT, C. D., VECCHI, M. P. Optimization by Simulated Annealing. **Science**, v. 220, p. 671–680, May 1983.
- [49] KOTILAINEN, J. K., REUNANEN, J., LAINE, S., RYDER, S. D. Near-infrared line imaging of the starburst galaxies NGC 520, NGC 1614 and NGC 7714. **Astronomy and Astrophysics**, v. 366, p. 439–450, February 2001.
- [50] KOTULLA, R., FRITZE, U., WEILBACHER, P., ANDERS, P. GALEV evolutionary synthesis models - I. Code, input physics and web interface. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 396, p. 462–484, June 2009.
- [51] LANÇON, A., GOLDADER, J. D., LEITHERER, C., GONZÁLEZ DELGADO, R. M. Multiwavelength Study of the Starburst Galaxy NGC 7714. II. The Balance between Young, Intermediate-Age, and Old Stars. **Astrophysical Journal**, v. 552, p. 150–167, May 2001.
- [52] LANÇON, A., WOOD, P. R. A library of 0.5 to 2.5  $\mu\text{m}$  spectra of luminous cool stars. **Astronomy and Astrophysics Supplement Series**, v. 146, p. 217–249, October 2000a.
- [53] LANÇON, A., WOOD, P. R. A library of 0.5 to 2.5  $\mu\text{m}$  spectra of luminous cool stars. **Astronomy and Astrophysics Supplement Series**, v. 146, p. 217–249, October 2000b.
- [54] LYNDS, R., TOOMRE, A. On the interpretation of ring galaxies: the binary ring system II Hz 4. **Astrophysical Journal**, v. 209, p. 382–388, October 1976.
- [55] MARASTON, C. Evolutionary population synthesis: models, analysis of the ingredients and application to high- $z$  galaxies. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 362, p. 799–825, September 2005.
- [56] MARASTON, C., STRÖMBÄCK, G. Stellar population models at high spectral resolution. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 418, p. 2785–2811, December 2011.

- [57] MARSTON, A. P., APPLETON, P. N. Multiwavelength observations of ring galaxies. 2: Global star formation in ring galaxies. **Astronomical Journal**, v. 109, p. 1002–1018, March 1995.
- [58] MARTINS, L. P., RIFFEL, R., RODRÍGUEZ-ARDILA, A., GRUENWALD, R., DE SOUZA, R. Nuclear and extended spectra of NGC 1068 - II. Near-infrared stellar population synthesis. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 406, p. 2185–2192, August 2010.
- [59] MARTINS, L. P., RODRÍGUEZ-ARDILA, A., DINIZ, S., RIFFEL, R., DE SOUZA, R. Spectral synthesis of star-forming galaxies in the near-infrared. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 435, p. 2861–2877, November 2013.
- [60] MATEUS, A., SODRÉ, L., CID FERNANDES, R., STASIŃSKA, G., SCHOENELL, W., GOMES, J. M. Semi-empirical analysis of Sloan Digital Sky Survey galaxies - II. The bimodality of the galaxy population revisited. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 370, p. 721–737, August 2006.
- [61] MATHIS, J. S. Interstellar dust and extinction. **Annual Review of Astronomy and Astrophysics**, v. 28, p. 37–70, 1990.
- [62] MAZZARELLA, J. M., BOTHUN, G. D., BOROSON, T. A. Far-infrared properties of Markarian galaxies with multiple nuclei - Warm dust emission in mergers. **Astronomical Journal**, v. 101, p. 2034–2055, June 1991.
- [63] METROPOLIS, N., ROSENBLUTH, A., TELLER, A., TELLER, E. Equation of State Calculations by Fast Computing Machines. **Journal of Chemical Physics**, v. 21, p. 1087, 1953.
- [64] MEURER, G. R., HECKMAN, T. M., LEITHERER, C., KINNEY, A., ROBERT, C., GARNETT, D. R. Starbursts and Star Clusters in the Ultraviolet. **Astronomical Journal**, v. 110, p. 2665, December 1995.
- [65] MIHOS, J. C., HERNQUIST, L. Gasdynamics and Starbursts in Major Mergers. **Astrophysical Journal**, v. 464, p. 641, June 1996.
- [66] MIRALLES-CABALLERO, D., DÍAZ, A. I., ROSALES-ORTEGA, F. F., PÉREZ-MONTERO, E., SÁNCHEZ, S. F. Ionizing stellar population in the

- disc of NGC 3310 - I. The impact of a minor merger on galaxy evolution. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 440, p. 2265–2289, May 2014.
- [67] MORGAN, W. W. A Preliminary Classification of the Forms of Galaxies According to Their Stellar Population. **Publications of the Astronomical Society of the Pacific**, v. 70, p. 364–+, August 1958.
- [68] NEFF, S. G., HUTCHINGS, J. B., STANDORD, S. A., UNGER, S. W. NGC 1614 - an IR-luminous merger but not (yet?) an active galaxy. **Astronomical Journal**, v. 99, p. 1088–1099, April 1990.
- [69] OLIVA, E., ORIGLIA, L., KOTILAINEN, J. K., MOORWOOD, A. F. M. Red supergiants as starburst tracers in galactic nuclei. **Astronomy and Astrophysics**, v. 301, p. 55, September 1995.
- [70] OLSSON, E., AALTO, S., THOMASSON, M., BESWICK, R. Star-formation in the central kpc of the starburst/LINER galaxy NGC 1614. **Astronomy and Astrophysics**, v. 513, p. A11, April 2010.
- [71] ORIGLIA, L., OLIVA, E. Starbursts in the IR. **New Astronomy Review**, v. 44, p. 257–262, July 2000.
- [72] OSMER, P. S., SMITH, M. G., WEEDMAN, D. W. The nuclei of peculiar emission-line galaxies. **Astrophysical Journal**, v. 192, p. 279–291, September 1974.
- [73] OSTERBROCK, D. E. **Astrophysics of gaseous nebulae and active galactic nuclei**: Research supported by the University of California, John Simon Guggenheim Memorial Foundation, University of Minnesota, et al. Mill Valley, CA, University Science Books, 1989, 422 p., 1989.
- [74] PANTER, B., JIMENEZ, R., HEAVENS, A. F., CHARLOT, S. The star formation histories of galaxies in the Sloan Digital Sky Survey. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 378, p. 1550–1564, July 2007.
- [75] PASTORIZA, M. G. Spectra of peculiar nuclei in galaxies. **The Observatory**, v. 87, p. 225–228, October 1967.
- [76] PASTORIZA, M. G. Studies of galaxies with peculiar nuclei. **Astrophysics and Space Science**, v. 33, p. 173–188, March 1975.



- [77] PASTORIZA, M. G., DOTTORI, H. A., TERLEVICH, E., TERLEVICH, R., DIAZ, A. I. Optical and near-IR spectrophotometry of the galaxy NGC 3310. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 260, p. 177–190, January 1993.
- [78] PICKLES, A. J. A Stellar Spectral Flux Library: 1150-25000 Å. **Publications of the Astronomical Society of the Pacific**, v. 110, p. 863–878, July 1998.
- [79] POPE, A., WAGG, J., FRAYER, D., ARMUS, L., CHARY, R.-R., DADDI, E., DESAI, V., DICKINSON, M. E., ELBAZ, D., GABOR, J., KIRKPATRICK, A. Probing the Interstellar Medium of  $z \sim 1$  Ultraluminous Infrared Galaxies through Interferometric Observations of CO and Spitzer Mid-infrared Spectroscopy. **Astrophysical Journal**, v. 772, p. 92, August 2013.
- [80] PROUTON, O. R., BRESSAN, A., CLEMENS, M., FRANCESCHINI, A., GRANATO, G. L., SILVA, L. Modelling the Spectral Energy Distribution of compact luminous infrared galaxies: Constraints from high frequency radio data. **Astronomy and Astrophysics**, v. 421, p. 115–127, July 2004.
- [81] PUXLEY, P. J., BRAND, P. W. J. L. Dust Extinction in Starburst Galaxies - NGC1614 and NGC7714. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 266, p. 431, January 1994.
- [82] RAMOS ALMEIDA, C., PÉREZ GARCÍA, A. M., ACOSTA-PULIDO, J. A. Near-Infrared Spectroscopy of Seyfert Galaxies. Nuclear Activity and Stellar Population. **Astrophysical Journal**, v. 694, p. 1379–1394, April 2009.
- [83] RAYNER, J. T., TOOMEY, D. W., ONAKA, P. M., DENAULT, A. J., STAHLBERGER, W. E., VACCA, W. D., CUSHING, M. C., WANG, S. SpeX: A Medium-Resolution 0.8-5.5 Micron Spectrograph and Imager for the NASA Infrared Telescope Facility. **Publications of the Astronomical Society of the Pacific**, v. 115, p. 362–382, March 2003.
- [84] RENZINI, A. In: GALAXY FORMATION, Silk, J., Vittorio, J., editores, Amsterdam: North Holland, p. 303, 1981.
- [85] RIEKE, G. H., LEBOFISKY, M. J., THOMPSON, R. I., LOW, F. J., TOKUNAGA, A. T. The nature of the nuclear sources in M82 and NGC 253. **Astrophysical Journal**, v. 238, p. 24–40, May 1980.

- [86] RIFFEL, R., PASTORIZA, M. G., RODRÍGUEZ-ARDILA, A., BONATTO, C. Probing the near-infrared stellar population of Seyfert galaxies. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 400, p. 273–290, November 2009.
- [87] RIFFEL, R., PASTORIZA, M. G., RODRÍGUEZ-ARDILA, A., MARASTON, C. The First Detection of Near-Infrared CN Bands in Active Galactic Nuclei: Signature of Star Formation. **Astrophysical Journal Letters**, v. 659, p. L103–L106, April 2007.
- [88] RIFFEL, R., PASTORIZA, M. G., RODRÍGUEZ-ARDILA, A., MARASTON, C. The stellar populations of starburst galaxies through near-infrared spectroscopy. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 388, p. 803–814, August 2008.
- [89] RIFFEL, R., RIFFEL, R. A., FERRARI, F., STORCHI-BERGMANN, T. Intermediate-age stars as the origin of low stellar velocity dispersion nuclear rings: the case of Mrk 1157. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 416, p. 493–500, September 2011a.
- [90] RIFFEL, R., RODRIGUEZ-ARDILA, A., PASTORIZA, M. G. A 0.8-2.4 microns spectral atlas of Active Galactic Nuclei. **Astronomy and Astrophysics/astro-ph/0605463**, May 2006.
- [91] RIFFEL, R., RUSCHEL-DUTRA, D., PASTORIZA, M. G., RODRÍGUEZ-ARDILA, A., SANTOS, J. F. C., JR., BONATTO, C. J., DUCATI, J. R. Near-infrared integrated spectra of Galactic globular clusters: testing simple stellar population models. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 410, p. 2714–2724, February 2011b.
- [92] RIFFEL, R. A., STORCHI-BERGMANN, T., RIFFEL, R., PASTORIZA, M. G. Intermediate-age Stars as Origin of the Low-velocity Dispersion Nuclear Ring in Mrk 1066. **Astrophysical Journal**, v. 713, p. 469–474, April 2010.
- [93] ROBERTS, W. W., JR., HUNTLEY, J. M., VAN ALBADA, G. D. Gas dynamics in barred spirals - Gaseous density waves and galactic shocks. **Astrophysical Journal**, v. 233, p. 67–84, October 1979.
- [94] RODRÍGUEZ-ARDILA, A., RIFFEL, R., PASTORIZA, M. G. Molecular hydrogen and [FeII] in active galactic nuclei - II. Results for Seyfert 2 galaxies.

- Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 364, p. 1041–1053, December 2005.
- [95] SALES, D. A., PASTORIZA, M. G., RIFFEL, R. Polycyclic Aromatic Hydrocarbon and Emission Line Ratios in Active Galactic Nuclei and Starburst Galaxies. **Astrophysical Journal**, v. 725, p. 605–614, December 2010.
- [96] SCHLEGEL, D. J., FINKBEINER, D. P., DAVIS, M. Maps of Dust Infrared Emission for Use in Estimation of Reddening and Cosmic Microwave Background Radiation Foregrounds. **Astrophysical Journal**, v. 500, p. 525–+, June 1998.
- [97] SCHMIDT, A. A., COPETTI, M. V. F., ALLOIN, D., JABLONKA, P. Population synthesis methods - Discussion and tests on the solution uniqueness. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 249, p. 766–778, April 1991.
- [98] SCHWEIZER, F., SEITZER, P. Ripples in disk galaxies. **Astrophysical Journal**, v. 328, p. 88–92, May 1988.
- [99] SCHWEIZER, F., SEITZER, P. Remnant of a “Wet” Merger: NGC 34 and Its Young Massive Clusters, Young Stellar Disk, and Strong Gaseous Outflow. **Astronomical Journal**, v. 133, p. 2132–2155, May 2007.
- [100] SÉRSIC, J. L., PASTORIZA, M. Peculiar Nuclei of Galaxies. **Publications of the Astronomical Society of the Pacific**, v. 77, p. 287–+, August 1965.
- [101] SHIER, L. M., RIEKE, M. J., RIEKE, G. H. Obscured Active Galactic Nuclei in Luminous Infrared Galaxies. **Astrophysical Journal**, v. 470, p. 222, October 1996.
- [102] SMITH, B. J., WALLIN, J. F. The evolutionary history of the interacting Galaxy system NGC 7714/7715 (Arp 284). **Astrophysical Journal**, v. 393, p. 544–558, July 1992.
- [103] SMITH, D. A., NEFF, S. G., BOTHUN, G. D., FANELLI, M. N., OFFENBERG, J. D., WALLER, W. H., BOHLIN, R. C., O’CONNELL, R. W., ROBERTS, M. S., SMITH, A. M., STECHER, T. P. Ultraviolet Imaging of NGC 3310: A Merger-driven Global Starburst. **Astrophysical Journal Letters**, v. 473, p. L21, December 1996.

- [104] SOIFER, B. T., SANDERS, D. B., MADORE, B. F., NEUGEBAUER, G., DANIELSON, G. E., ELIAS, J. H., LONSDALE, C. J., RICE, W. L. The IRAS bright galaxy sample. II - The sample and luminosity function. **Astrophysical Journal**, v. 320, p. 238–257, September 1987.
- [105] STORCHI-BERGMANN, T., RIFFEL, R. A., RIFFEL, R., DINIZ, M. R., BORGES VALE, T., MCGREGOR, P. J. Two-dimensional Mapping of Young Stars in the Inner 180 pc of NGC 1068: Correlation with Molecular Gas Ring and Stellar Kinematics. **Astrophysical Journal**, v. 755, p. 87, August 2012.
- [106] TELESCO, C. M., GATLEY, I. Ongoing star formation in NGC 3310 - an infrared perspective. **Astrophysical Journal**, v. 284, p. 557–564, September 1984.
- [107] TINSLEY, B. M. Galactic Evolution. **Astronomy and Astrophysics**, v. 20, p. 383, September 1972.
- [108] TINSLEY, B. M., GUNN, J. E. Evolutionary synthesis of the stellar population in elliptical galaxies. I - Ingredients, broad-band colors, and infrared features. **Astrophysical Journal**, v. 203, p. 52–62, January 1976.
- [109] TOOMRE, A., TOOMRE, J. Galactic Bridges and Tails. **Astrophysical Journal**, v. 178, p. 623–666, December 1972.
- [110] VACCA, W. D., CUSHING, M. C., RAYNER, J. T. A Method of Correcting Near-Infrared Spectra for Telluric Absorption. **Publications of the Astronomical Society of the Pacific**, v. 115, p. 389–409, March 2003.
- [111] VEILLEUX, S., KIM, D.-C., SANDERS, D. B., MAZZARELLA, J. M., SOIFER, B. T. Optical Spectroscopy of Luminous Infrared Galaxies. II. Analysis of the Nuclear and Long-Slit Data. **Astrophysical Journal Supplement Series**, v. 98, p. 171, May 1995.
- [112] VERON-CETTY, M.-P., VERON, P. Miscellaneous observations of active galactic nuclei. **Astronomy and Astrophysics Supplement Series**, v. 65, p. 241–258, August 1986.
- [113] VORONTSOV-VELYAMINOV, B. A. Atlas and catalog of interacting galaxies. 1959, Sternberg Institute, Moscow State University. In: **ATLAS AND CATALOG OF INTERACTING GALAXIES (1959)**, p. 0, 1959.

- [114] WALKER, M. F., CHINCARINI, G. Studies of Extragalactic Nebulae. II. Preliminary Observations of the Rotation Curve of NGC 3310. **Astrophysical Journal**, v. 147, p. 416, February 1967.
- [115] WEEDMAN, D. W. Toward explaining Seyfert galaxies. **Astrophysical Journal**, v. 266, p. 479–484, March 1983.
- [116] WEEDMAN, D. W., FELDMAN, F. R., BALZANO, V. A., RAMSEY, L. W., SRAMEK, R. A., WUU, C.-C. NGC 7714 - The prototype star-burst galactic nucleus. **Astrophysical Journal**, v. 248, p. 105–112, August 1981.
- [117] WERK, J. K., PUTMAN, M. E., MEURER, G. R., SANTIAGO-FIGUEROA, N. Metal Transport to the Gaseous Outskirts of Galaxies. **Astrophysical Journal**, v. 735, p. 71, July 2011.
- [118] WU, Y., CHARMANDARIS, V., HUANG, J., SPINOGLIO, L., TOMMASIN, S. Spitzer/IRS 5-35  $\mu\text{m}$  Low-resolution Spectroscopy of the 12  $\mu\text{m}$  Seyfert Sample. **Astrophysical Journal**, v. 701, p. 658–676, August 2009.
- [119] ZEAS, A. L., GEORGANTOPOULOS, I., WARD, M. J. ROSATASCA observations of X-ray luminous starburst galaxies: NGC 3310 and 3690. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 301, p. 915–925, December 1998.