

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

**Síntese de população estelar de galáxias
Starburst através de espectroscopia
no infravermelho próximo**

Natacha Zanon Dametto

Monografia realizada sob orientação do Prof. Dr. Rogério Riffel e apresentada ao curso de Graduação em Física da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em Física.

Porto Alegre, RS, Brasil

Junho de 2012

Somos apenas grãos de poeira de um vasto universo.

Agradecimentos

Este trabalho é fruto do apoio e da colaboração de pessoas que são muito importantes para mim e que, de uma forma ou de outra, me ajudaram a finalizar mais uma grande etapa da minha vida.

Agradeço a minha mãe, meu pai e meu irmão, pelo incentivo e apoio incondicional na minha escolha profissional, assim como pelo carinho e compreensão nas horas mais difíceis.

Agradeço ao meu amigo, namorado e colega de trabalho Guilherme Couto, pelo carinho, companheirismo e pelas inúmeras discussões fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho (e pelas torradas nas madrugadas de estudo).

Agradeço ao meu orientador professor Dr. Rogério Riffel, pelo incentivo desde o início, pelo companheirismo e compreensão durante essa importante etapa da minha vida.

Agradeço a minha família e todos os meus amigos, que de alguma maneira contribuíram para este trabalho.

Resumo

As Galáxias Starburst (SBs) são galáxias com intensa formação estelar, geralmente na região nuclear ($r = 100 - 1000pc$), e estão entre os melhores laboratórios para estudar a evolução de estrelas massivas, assim como os processos físicos que estão associados com os primeiros estágios de formação de galáxias. As taxas de formação estelar nesta região excedem as encontradas ao longo do restante da galáxia hospedeira. O espectro das SBs é caracterizado por linhas de emissão brilhantes, como as linhas de recombinação do hidrogênio e hélio e linhas de transições proibidas do enxofre, oxigênio e nitrogênio. Acredita-se que o infravermelho (IR) proporcione meios para detectar estrelas de idade jovem a intermediária ($\sim 0.2 - 2 \times 10^9$ anos). Um exemplo disto são as estrelas na fase dos pulsos térmicos do ramo assintótico das gigantes (TP-AGB), que contribuem principalmente na região do infravermelho próximo (NIR), sendo bons indicadores de surto de formação estelar recente neste intervalo espectral. Desta maneira, a inclusão desta fase em modelos semi-empíricos, a qual é feita através da inclusão de estrelas ricas em carbono e oxigênio, é de fundamental importância para modelar as populações estelares (SPs) no NIR. Ainda, estes modelos prevêem linhas de absorção características de populações de idade jovem a intermediária, as quais estão presentes nos espectros na região do NIR (e.g. CN em 1.1μ m). Usando estes modelos, investigamos a variação espacial da SP de quatro SBs (NGC 1614, NGC 34, NGC 3310 e NGC 7714), cujos espectros foram obtidos com o espectrógrafo SpeX, anexado ao telescópio da NASA, otimizado para o infravermelho (IRTF), localizado no Mauna Kea, Havaí. Utilizamos o código STARLIGHT, atualizado com os modelos descritos acima, para estudar as SPs das galáxias. Nossos principais resultados são: a região nuclear das galáxias é dominada por estrelas com idade intermediária, à exceção de NGC 34, cuja SP dominante é jovem. Encontramos evidências de anéis de SP intermediária no entorno do núcleo em três das galáxias estudadas. O objeto fora deste padrão é NGC 7714, cuja SP é dominada por população intermediária que cresce do centro para noroeste. Concluímos também que a metalicidade é um bom parâmetro para a análise do histórico de formação estelar nas SBs, uma vez que esta aumenta com a SP de idade intermediária na maioria das fontes, conforme o esperado. O avermelhamento é aproximadamente constante ao longo das galáxias.

Abstract

A galaxy that is undergoing an intense star formation, usually in the central region (radii of 100-1000pc), is called a Starburst galaxy (SB). The star-formation rates in this region exceed those found throughout the rest of the host galaxy. Also, the spectrum is characterized by unusually bright emission lines and is dominated by hydrogen and helium recombination lines and strong forbidden lines of sulphur, oxygen and nitrogen, among others. Through the analysis of the stellar content, we may get information on critical processes such as recent episodes of star formation and the evolutionary history of the galaxy. Thus, the study of galaxy stellar populations (SPs) is a critical step in the understanding of galaxy formation and evolution. Near-infrared (NIR) stellar absorption features allow to recognize red supergiants, prime indicators for tracing starburst in galaxies. Besides the short-lived red supergiants, the NIR includes the contribution of thermally pulsating asymptotic giant branch (TP-AGB) stars, enhanced in young to intermediate-age SPs ($\sim 0.2 - 2 \times 10^9$ anos). This population is usually missed in the optical, since the most prominent spectral features associated to it, the CN absorption bands (e.g. $1.1\mu\text{ m}$), fall in the NIR. With the new generations of Evolutionary Population Synthesis (EPS) models, which include a proper treatment of the TP-AGB phase, it is now possible to study the NIR SP of galaxies in an unprecedented depth. Here we employ Infrared Telescope Facility SpeX NIR (0.8-2.4 μm) spectra to investigate the spatial variation of the SPs in four SBs (NGC 34, NGC 1614, NGC 3310 and NGC 7714). We use the STARLIGHT code, updated with the most recent EPS models available in the literature. Our main results are that the central region of the galaxies is dominated by intermediate-age stars, except for NGC 34, which shows a predominance of a young age SP in the nuclear surroundings. We found evidence of circumnuclear rings of star formation with young to intermediate-ages in three galaxies. The only exception is NGC 7714, which has an intermediate-age SP dominating at northwest from the center, while no signs of a ring are found at the southeast. Also, we conclude that the metallicity is a good parameter to study the SBs star formation history, since the metallicity pattern follows the increase in the intermediate-age SP in most of the sources, as expected. The reddening is nearly constant along the whole galaxy.

Abreviaturas

AGN: Núcleo ativo de galáxias (*Active Galactic Nuclei*).

FIR: Infravermelho distante (*Far-Infrared*).

IV: Infravermelho (*Infrared*).

LIRG: Galáxia Luminosa no IV (*Luminous Infrared Galaxy*).

Modelos EPS: Modelos evolucionários de síntese de populações estelares (*Evolutionary Population Synthesis models*).

NIR: Infravermelho próximo (*Near Infrared*).

RSG: Supergigante vermelha (*Red Supergiant*).

SB: Galáxia *Starburst*.

SP: População estelar (*Stellar Population*).

SRF: Taxa de formação estelar (*Star Formation Rate*).

TP-AGB: Pulsos térmicos do ramo assintótico das gigantes (*Thermally Pulsating Asymptotic Giant Branch*).

Conteúdo

Conteúdo	VI
Lista de Figuras	1
1 Introdução	2
1.1 Galáxias <i>Starburst</i>	2
1.2 Estudos Anteriores da População Estelar da Amostra	5
1.3 Objetivos	7
2 Metodologia	8
2.1 Dados	8
2.2 A Base de Elementos	15
2.3 O Método de Síntese de População Estelar	15
3 Resultados e Discussão	17
3.1 NGC 34	18
3.2 NGC 1614	19
3.3 NGC 3310	20
3.4 NGC 7714	21
4 Considerações Finais	33
Bibliografia	34

Lista de Figuras

1.1	Espectros normalizados do núcleo das galáxias <i>Starburst</i>	3
2.1	Posição da fenda sobreposta à imagem do HST das galáxias NGC 34 e NGC 1614	9
2.2	Idem à Fig. 2.1 para as galáxias NGC 3310 e NGC 7714	10
2.3	Espectros da região nuclear e estendida para a galáxia NGC 34	11
2.4	Idem à Fig. 2.3 para a galáxia NGC 1614	12
2.5	Idem à Fig. 2.3 para a galáxia NGC 3310	13
2.6	Idem à Fig. 2.3 para a galáxia NGC 7714	14
3.1	Histogramas da distribuição da SP e da metalicidade das galáxias NGC 34 e NGC 1614	23
3.2	Idem à Fig. 3.1 para as galáxias NGC 3310 e NGC 7714	24
3.3	Resultado da síntese da região nuclear da galáxia NGC 34	25
3.4	Resultado da síntese da abertura subsequente ao núcleo da galáxia NGC 34	26
3.5	Idem à Fig. 3.3 para a galáxia NGC 1614	27
3.6	Idem à Fig. 3.4 para a galáxia NGC 1614	28
3.7	Idem à Fig. 3.3 para a galáxia NGC 3310	29
3.8	Idem à Fig. 3.4 para a galáxia NGC 3310	30
3.9	Idem à Fig. 3.3 para a galáxia NGC 7714	31
3.10	Idem à Fig. 3.4 para a galáxia NGC 7714	32

Capítulo 1

Introdução

A primeira evidência das galáxias com atividade do tipo *Starburst* foi descoberta por Morgan (1958), que identificou estruturas peculiares na região nuclear de algumas galáxias. Posteriormente, em um estudo sistemático de uma amostra contendo algumas destas galáxias classificadas por Morgan, 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 (SaB) e as dividiram em dois subgrupos: os núcleos do tipo *Hot Spots* e os do tipo *Núcleo Amorfo*. Em estudos subsequentes, Pastoriza (1967, 1975) demonstraram 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. A partir destes resultados pioneiros, seguiram-se inúmeros estudos na tentativa de compreender melhor a natureza dessas galáxias.

1.1 Galáxias *Starburst*

Uma definição bastante usual para as galáxias *Starburst* (SBs) nos diz que estas são objetos cuja energia total é dominada pela formação estelar, ou seja, por processos de fusão nuclear no interior estelar (Weedman, 1983). Essas galáxias apresentam intensa formação de estrelas, geralmente no entorno do núcleo (raio de 100-1000pc), região na qual as taxas de formação estelar (SFR, do inglês *Star Formation Rate*) excedem as encontradas ao longo do restante da galáxia (Weedman, 1983). Elas foram primeiramente identificadas pela presença de linhas de emissão intensas na região óptica do espectro eletromagnético, as quais podem ser usadas para obtenção de informações importantes como idade, metalicidade e SFR destes objetos. Essas

linhas proeminentes (e.g. linhas de recombinação do hidrogênio e hélio e linhas de transições proibidas do enxofre, oxigênio e nitrogênio) são características de galáxias espirais, principalmente por estas apresentarem grandes quantidades de gás. Além disso, elas são detectadas especialmente nos espectros de galáxias com alta SFR (atualmente conhecidas como SBs).

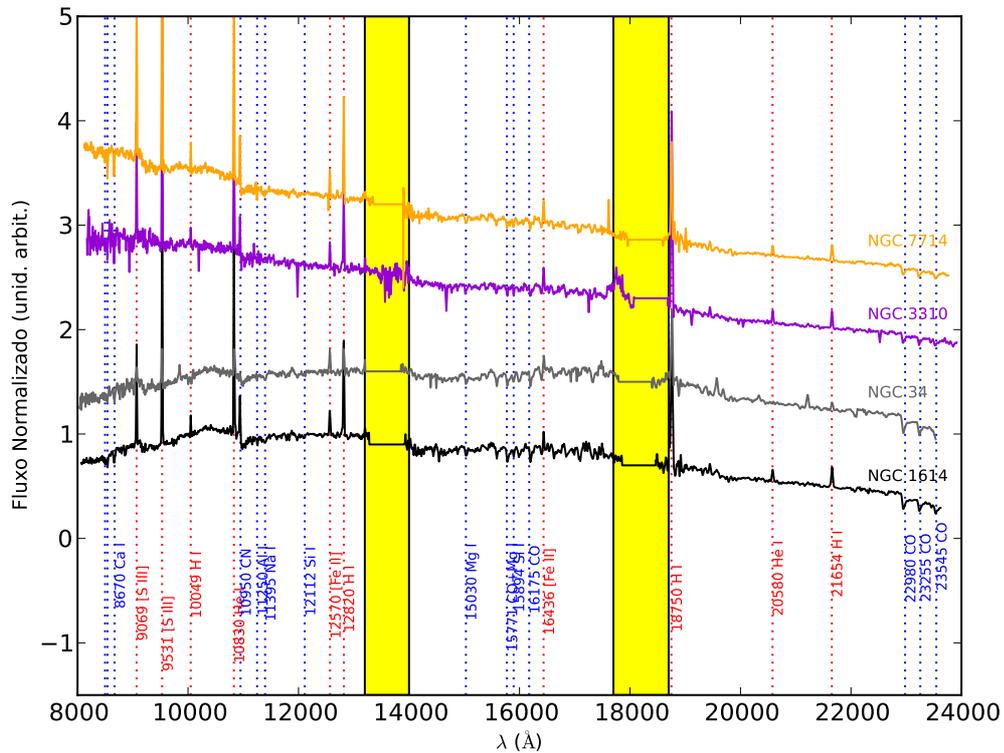


Figura 1.1: Espectros normalizados do núcleo das galáxias, ordenados de acordo com os seus formatos, do mais inclinado (*topo*), ao mais plano (*base*). Algumas linhas de absorção e emissão estão identificadas.

Galáxias do tipo SB estão entre os melhores laboratórios para 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 ($912 - 2000\text{\AA}$ - Heckman, 2000). Sendo, as SBs, ricas em poeira e gás interestelar, os grãos de poeira absorvem estes fótons, se aquecem e esfriam reemitindo essa radiação no infravermelho (IV, do inglês *Infrared*; Barvainis, 1987) e assim, produzindo as linhas proeminentes de emissão/absorção de gás molecular e

poeira (Riffel et al., 2006, 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, uma vez que 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, esgotando mais rapidamente os elementos mais leves em favorecimento da produção dos elementos mais pesados. Nesta fase, a maior parte da energia da estrela é emitida na região do infravermelho próximo (NIR, do inglês *Near Infrared*) do espectro (Maraston, 2005), razão pela qual as RSGs são bons indicadores de população estelar (SP, do inglês *Stellar Population*) jovem à intermediária, proporcionando meios de detectar surtos de formação estelar recente no NIR (Oliva et al., 1995).

Quando as RGBs entram na fase dos pulsos térmicos do ramo assintótico das gigantes (TP-AGB, do inglês *Thermally Pulsating Asymptotic Giant Branch*), elas contribuem de maneira significativa para a luz integrada observada no NIR, principalmente a associada com populações estelares de idade jovem à intermediária ($\sim 0.2 - 2 \times 10^9$ anos). As novas gerações de modelos evolucionários de síntese de populações estelares (EPS, do inglês *Evolutionary Population Synthesis*), por incluírem espectros empíricos de estrelas na fase TP-AGB (Maraston, 2005, Maraston & Strömbäck, 2011) e, portanto, ricas em carbono e oxigênio (Lançon & Wood, 2000), tornaram possível o estudo detalhado das populações estelares das SBs no NIR. A inclusão destes espectros empíricos aos modelos fez com que estes fossem capazes de prever bandas e linhas de absorção características da região espectral abrangida pelo 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 $1.6\mu\text{m}$). Vale ressaltar, que a detecção das bandas do CN pode ser tomada como uma evidência clara da presença de SPs de idade jovem à intermediária na galáxia (Riffel et al., 2007, Maraston, 2005).

Com o advento das novas gerações de detectores sensíveis a esta região espectral, tornou-se possível a obtenção de espectros de moderada resolução em fontes fracas e com emissão estendida, possibilitando, assim, o estudo detalhado das SPs na região do NIR. Além disso, é importante ressaltar que essas novas gerações de instrumentos permitem a realização de espectroscopia de dispersão cruzada, cobrindo uma grande faixa de comprimentos de onda ($0.8 - 2.4\mu\text{m}$) simultaneamente. Dessa forma, tornou-se possível o estudo da região do NIR evitando efeitos da atmosfera, os quais geralmente afetam a espectroscopia de fenda longa em bandas únicas como as bandas *J*, *H*, e *K*.

1.2 Estudos Anteriores da População Estelar da Amostra

Nesta seção, apresentaremos algumas informações a respeito das SPs das galáxias estudadas neste trabalho, que foram retiradas da literatura.

NGC 34

É uma galáxia de tipo morfológico Sc (de Vaucouleurs et al., 1991) e está a 78.4 Mpc de distância (assumindo $H_0=75 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ e $v_r=5881 \text{ kms}^{-1}$)¹. Sua classificação é controversa. De acordo com Gonçalves et al. (1999), o espectro nuclear dessa fonte na região óptica apresenta, tanto características intrínsecas de espectros de SBs, como de galáxias do tipo Seyfert 2 (Sy 2). Estudos mais recentes, baseados em espectroscopia no NIR, mostram que a emissão de contínuo de NGC 34 é dominada por linhas de absorção de origem estelar e também, que linhas de alta ionização estão ausentes no seu espectro nuclear, sugerindo, portanto, a classificação de SB para essa galáxia (Riffel et al., 2006). Em um estudo na região óptica, Schweizer & Seitzer (2007) concluíram que essa é uma galáxia rica em gás, resultante da fusão de duas galáxias disco, a qual apresentou comportamento moderado de galáxia com núcleo ativo (AGN, do inglês *Active Galactic Nuclei*) por algum tempo. Ainda, de acordo com esse estudo, um amplo surto de formação estelar teria ocorrido no remanescente da fusão, posteriormente encolhendo e se restringindo à região nuclear. Riffel et al. (2008) analisaram os 230 pc centrais dessa galáxia² no NIR e detectaram uma SP de idade jovem à intermediária, com metalicidade solar. Esse resultado está de acordo com o fato de que o espectro de NGC 34 apresenta a banda de absorção do CN (em $1.1\mu\text{m}$) bastante intensa (Riffel et al., 2007), característica de SPs com essas idades ($\sim 1 \times 10^9$ anos; Maraston, 2005).

NGC 1614

Com tipo morfológico SBc (de Vaucouleurs et al., 1991) e a uma distância de 63.7 Mpc (assumindo $H_0=75 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ e $v_r=4778 \text{ kms}^{-1}$), 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

¹As velocidades radiais heliocêntricas v_r das galáxias foram retiradas do *NASA Extragalactic Database* (NED).

²Vale ressaltar, que Riffel et al. (2008) analisaram apenas o espectro integrado nuclear das galáxias estudadas neste trabalho.

et al., 2001). Observações da Câmera do *Hubble Space Telescope/NIR* e do Espectrômetro Multi-Objeto (NICMOS) reportadas por Alonso-Herrero et al. (2001) mostram linhas de absorção de CO intensas traçando um surto de formação estelar intenso no núcleo de NGC 1614, com um diâmetro de aproximadamente 45 pc e rodeado por um anel de regiões H II supergigantes, com cerca de 600 pc de diâmetro. Essa galáxia é catalogada como uma Galáxia Luminosa no IV (LIRG, do inglês *Luminous Infrared Galaxy*) por Alonso-Herrero et al. (2002), os quais sugerem uma possível fusão/interação experimentada por NGC 1614 com uma outra galáxia num momento no passado. Esse autores também constataam a presença de um núcleo secundário, que pode ser interpretado como fragmentos da outra galáxia, menor que NGC 1614, a qual já teria sido destruída. Assim como para NGC 34, Riffel et al. (2008) encontraram uma SP dominante de $\sim 1 \times 10^9$ anos de idade nos 154 pc centrais de NGC 1614, concordando com o fato dos espectros dessas duas fontes serem bastante similares (ver Fig. 1.1).

NGC3310

É uma galáxia SAB(r)bc (de Vaucouleurs et al., 1991) próxima (13.2 Mpc - assumindo $H_0=75 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ e $v_r=993 \text{ kms}^{-1}$) com intensa atividade de formação estelar, apresentando quatro picos de formação de estrelas (Pastoriza et al., 1993). De acordo com Wehner & Gallagher (2005), essa fonte fundiu-se com uma companheira, o que possivelmente desencadeou a formação estelar ocorrida na galáxia nos últimos 10^8 anos (Balick & Heckman, 1981). De forma similar a NGC 1614, essa fonte abriga um anel circumnuclear com diâmetro angular de $8''$ à $12''$ (720 - 1080 pc), preenchido por regiões H II gigantes (Pastoriza et al., 1993). Em um estudo dos 56 pc centrais dessa galáxia na região espectral do NIR, Riffel et al. (2008) detectaram uma intensa formação estelar com SP dominante de 1×10^9 anos ($30 \pm 6\%$).

NGC7714

De tipo morfológico SBc (de Vaucouleurs et al., 1991) e à 37.3 Mpc de distância (assumindo $H_0=75 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ e $v_r=2798 \text{ kms}^{-1}$) é 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). Analisando as cores do contínuo no infravermelho distante (FIR, do inglês *Far-Infrared*), Bernloehr (1993) mostraram que a formação estelar nessa galáxia é consistente com uma taxa de formação estelar contínua durante os últimos 20 milhões de anos. Ainda, NGC 7714 foi bastante estudada, com

uma ampla quantidade de dados, nos intervalos espectrais do óptico e do NIR (e.g. Gonzalez-Delgado et al., 1995, e referências nele contidas). No estudo mencionado anteriormente, concluiu-se que os picos de formação estelar no núcleo da galáxia são um conjunto de regiões H II com idades entre 4 e 5 milhões de anos. Assim como para as outras galáxias da amostra, Riffel et al. (2008) encontraram uma SP dominante de 1×10^9 anos ($34 \pm 4\%$) para a região central deste objeto.

1.3 Objetivos

A região espectral do NIR permite um estudo mais detalhado das SPs nas SBs, uma vez que neste intervalo conseguimos penetrar mais fundo nas camadas de poeira, revelando fontes altamente obscurecidas em outros intervalos espectrais (Riffel et al., 2008). Sendo assim, propomos investigar a variação espacial das SPs que dominam a luz na região do NIR em quatro galáxias *Starburst* (NGC 1614, NGC 34, NGC 3310 e NGC 7714) consideradas protótipos deste tipo de objeto. Esta mesma amostra foi analisada por Riffel et al. (2008), porém eles estudaram somente o espectro integrado nuclear dessas quatro fontes e utilizaram algumas regiões do contínuo e larguras equivalentes para estimar a SP das galáxias. Até o momento, nenhum estudo detalhado das SPs no NIR foi apresentado para estes objetos. Neste trabalho, propomos uma análise da SP ao longo de toda a galáxia, utilizando todo o espectro, a fim de construirmos um cenário de formação estelar para cada uma das fontes.

Capítulo 2

Metodologia

2.1 Dados

Os dados utilizados neste trabalho são os mesmos usados por Riffel et al. (2008), uma amostra composta por quatro galáxias *Starburst* do universo local: NGC 1614, NGC 34, NGC 3310 e NGC 7714. Entretanto, neste trabalho estudamos a emissão estendida ao invés do espectro integrado das galáxias, no intuito de detalhar o histórico de formação estelar ao longo dessas fontes. Os espectros no NIR das galáxias foram obtidos no *Infrared Telescope Facility* (IRTF), telescópio de 3m otimizado para o IV da NASA, localizado no monte Mauna Kea, Havaí. O espectrógrafo utilizado foi o SpeX (Rayner et al., 2003) no modo de dispersão cruzada (SXD, 0.8-2.4 μ). O detector usado foi CCD ALADDIN 3 InSb de 1024 \times 1024 pixels, com uma escala espacial de 0,15"/pixel. Uma fenda de 0.8" \times 15" foi utilizada (Figs. 2.1 e 2.2), resultando em uma resolução espectral de 360 kms⁻¹. Este valor foi determinado a partir das linhas do céu e confirmado com as linhas das lâmpadas de comparação, sendo aproximadamente constante ao longo de todo o intervalo espectral, com uma pequena variação de \sim 3%. Durante as diferentes noites, o *seeing* variou entre 0.7" e 1". O tamanho da janela de extração dos núcleos das galáxias está listado na Tabela 2.1. Os espectros extra-nucleares foram extraídos com um raio de abertura igual à 0.2" e são identificados pelas letras a, b, c,..., j, conforme mostrado nas Figs. 2.3, 2.4, 2.5 e 2.6. A extração foi feita até que o sinal da galáxia se reduzisse a 1% da emissão do pico. A redução e extração dos dados, assim como os procedimentos de calibração de comprimento de onda e fluxo, foram feitos por Carvalho (2008).

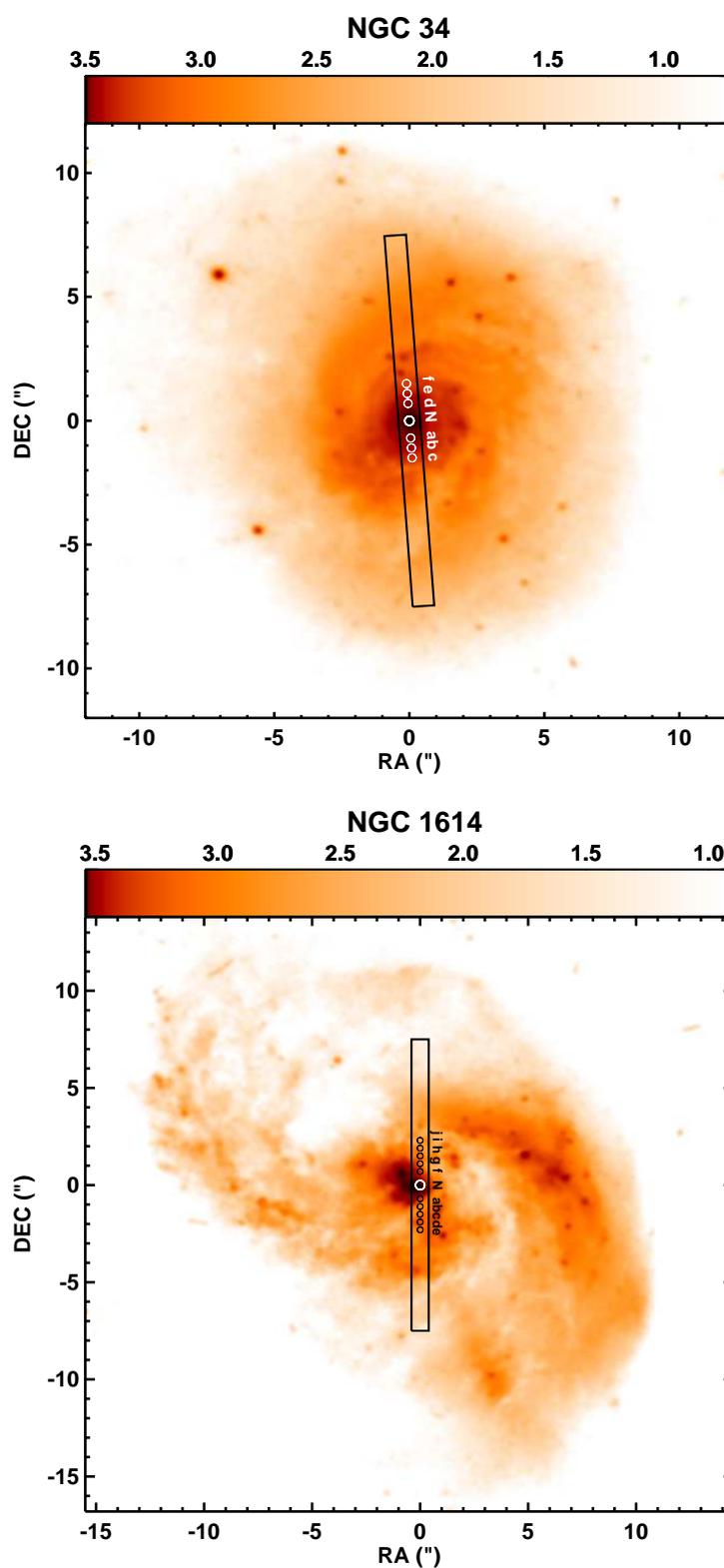


Figura 2.1: Posição da fenda sobreposta à imagem do HST (filtro 606W - câmera WFPC2) das galáxias NGC 34 e NGC 1614. Norte é para cima e leste é para esquerda. (Figura retirada de Carvalho, 2008).

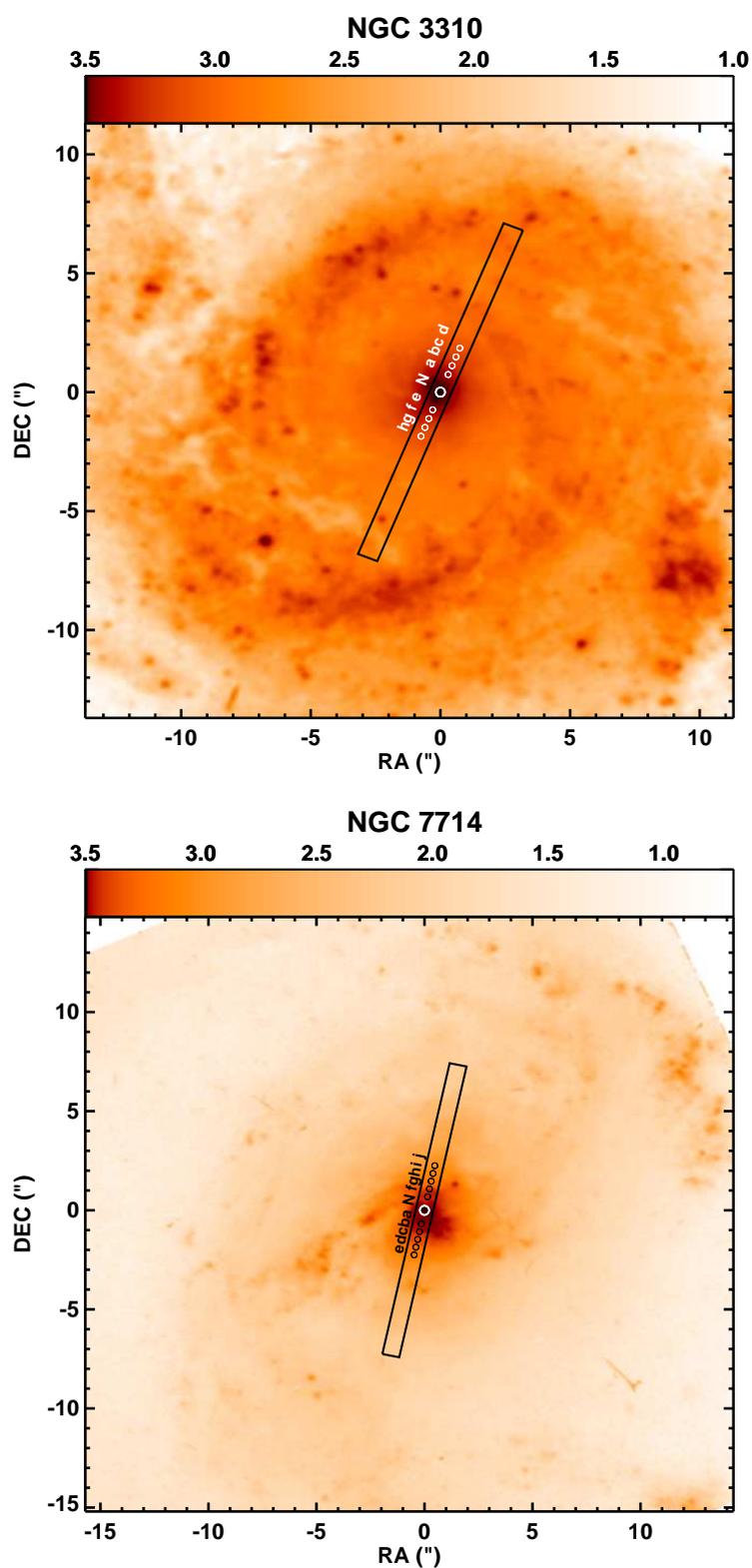


Figura 2.2: Posição da fenda sobreposta à imagem do HST (filtro 606W - câmera WFPC2) das galáxias NGC 3310 e NGC 7714. Norte é para cima e leste é para esquerda. (Figura retirada de Carvalho, 2008).

Galáxia	Núcleo (")	Escala (pc/")
NGC 34	0.5	383
NGC 1614	0.5	324
NGC 3310	0.7	71
NGC 7714	0.5	192

Tabela 2.1: Tamanho da janela de extração nuclear e escala espacial das SBs.

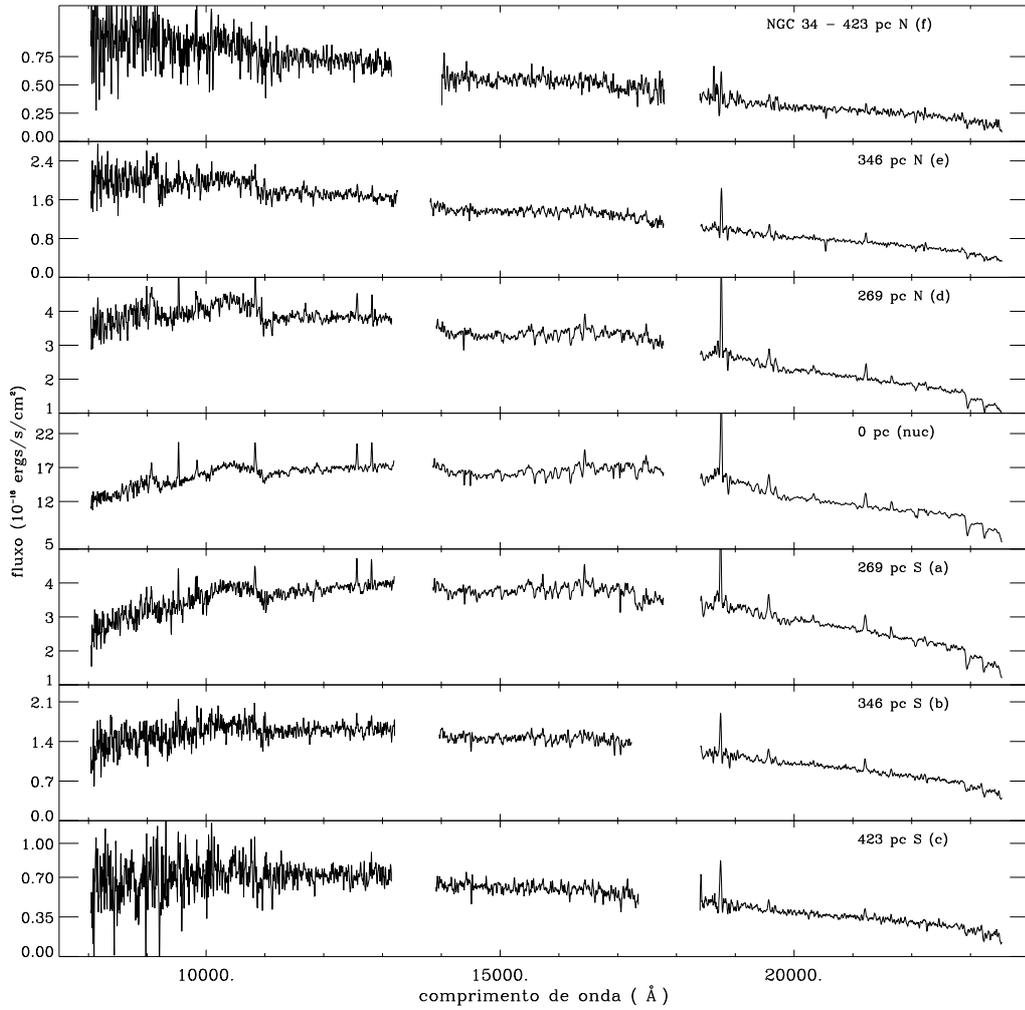


Figura 2.3: Espectros da região nuclear e estendida para a galáxia NGC 34 (N= norte, S= sul).

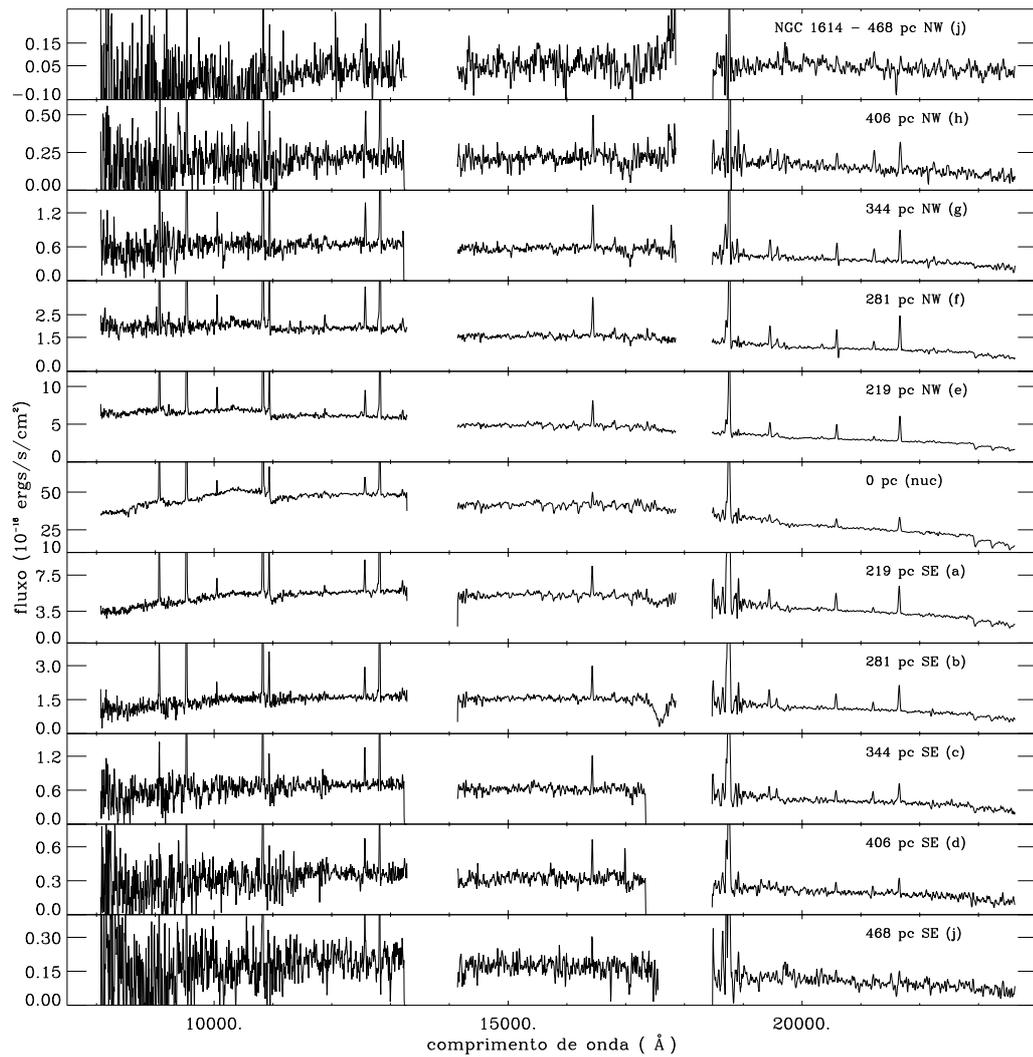


Figura 2.4: Espectros da região nuclear e estendida para a galáxia NGC 1614 (NW= noroeste, SE= sudeste).

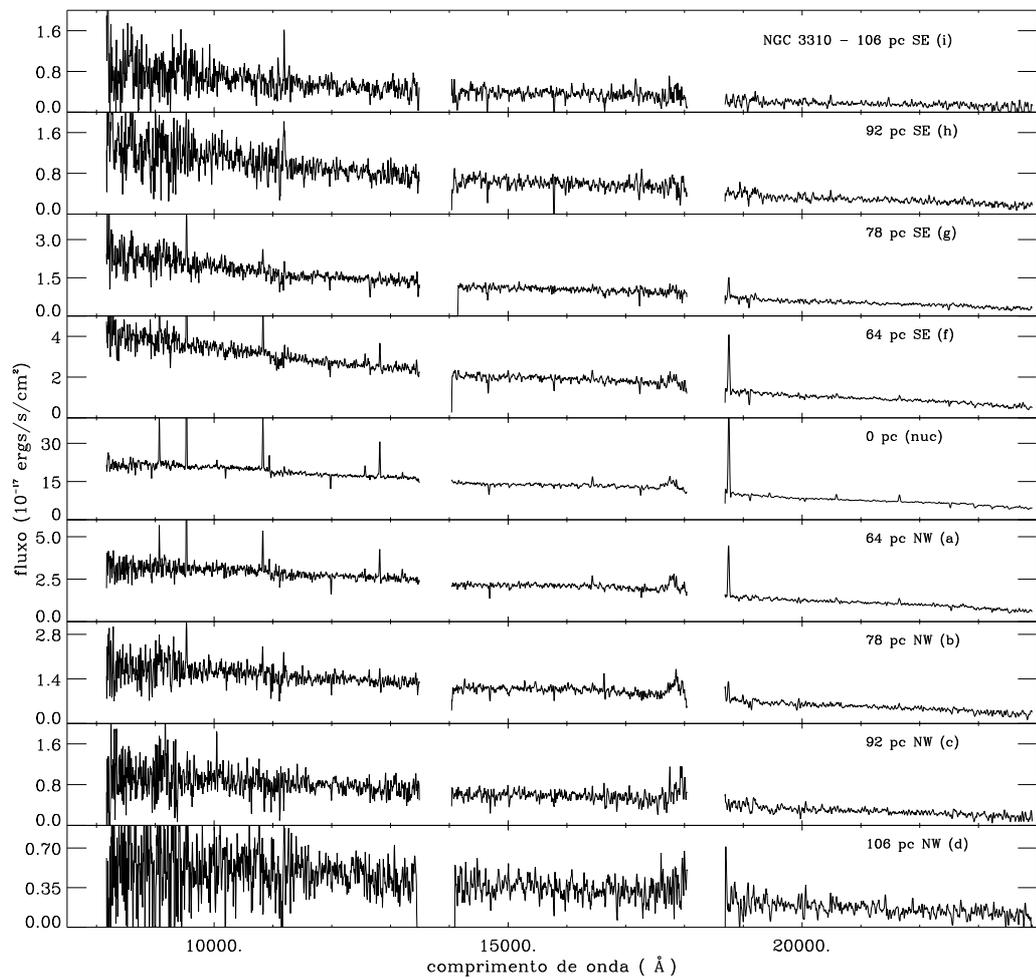


Figura 2.5: Espectros da região nuclear e estendida para a galáxia NGC 3310 (NW= noroeste, SE= sudeste).

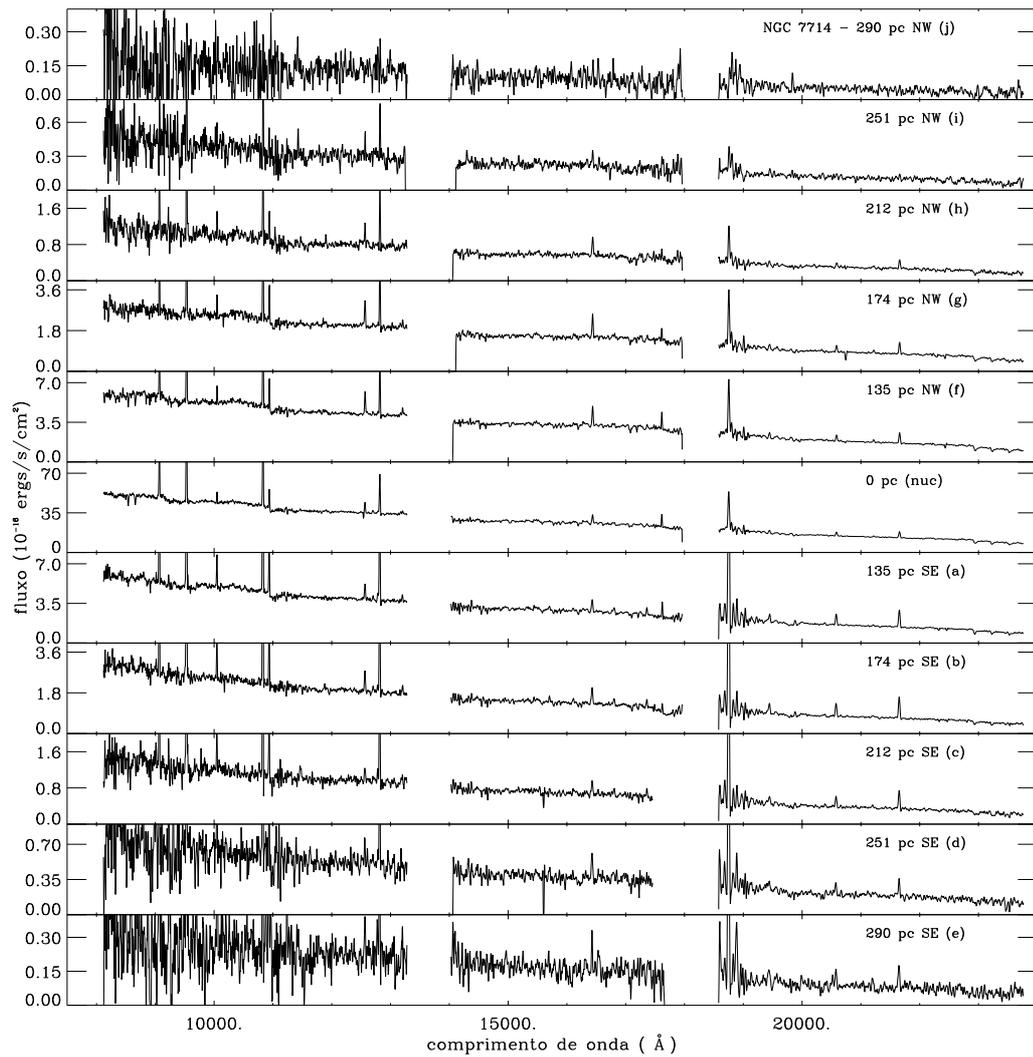


Figura 2.6: Espectros da região nuclear e estendida para a galáxia NGC 7714 (NW= noroeste, SE= sudeste).

2.2 A Base de Elementos

O ingrediente mais importante na síntese de SP é a Base de Elementos: $b_{j,\lambda}$. Um conjunto ideal de elementos deveria cobrir o intervalo de propriedades espectrais observadas na amostra de galáxias (Cid Fernandes et al., 2005a), propiciando resolução suficiente em idade e metalicidade para resolver a questão científica proposta. Neste trabalho, usamos os modelos de população estelar simples (SSP, do inglês *simple stellar population*) computados por Maraston (2005), cobrindo um intervalo de quatorze idades, $t=0.001, 0.005, 0.01, 0.03, 0.05, 0.1, 0.2, 0.5, 0.7, 1, 2, 5, 9$ e 13×10^9 anos e quatro metalicidades, $Z=0.02, 0.5, 1$ e $2 Z_{\odot}$. Esses modelos apresentam uma vantagem frente a outros modelos, a inclusão da fase evolutiva das TP-AGBs, a qual é fundamental para modelar as SPs no NIR, conforme mencionado anteriormente (Seção 1.1).

2.3 O Método de Síntese de População Estelar

Outro ingrediente fundamental na síntese de SP é o código, que mistura os componentes individuais da base para melhor ajustar o espectro observado. Neste trabalho, usaremos o código STARLIGHT (Cid Fernandes et al., 2004, 2005a, Mateus et al., 2006, Asari et al., 2007), o qual ajusta o espectro observado O_{λ} com uma combinação, em diferentes proporções, das N_* componentes da base de elementos. A extinção do fluxo devido a poeira é modelada pelo STARLIGHT e parametrizada pela extinção da banda V, A_v . A lei de extinção usada nesse trabalho é a lei de Cardelli et al. (1989). Essencialmente, o código resolve a seguinte equação para um espectro modelo M_{λ} :

$$M_{\lambda} = M_{\lambda_0} \left[\sum_{j=1}^{N_*} x_j b_{j,\lambda} r_{\lambda} \right] \otimes G(v_*, \sigma_*), \quad (2.1)$$

onde $b_{j,\lambda} r_{\lambda}$ é o espectro avermelhado da j -ésima **SSP** normalizada à unidade em λ_0 ; $r_{\lambda} = 10^{-0.4(A_{\lambda}-A_{\lambda_0})}$ é o termo de avermelhamento; M_{λ_0} é o fluxo sintético no comprimento de onda normalizado; \vec{x} é o vetor população; \otimes denota o operador convolução e $G(v_*, \sigma_*)$ é a distribuição gaussiana usada para modelar os movimentos estelares na linha de visada, centrados a uma velocidade v_* com dispersão σ_* . Finalmente, o código procura por um mínimo na equação:

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

As linhas de emissão e os dados espúrios são mascarados fazendo $w_{\lambda} = 0$.

Capítulo 3

Resultados e Discussão

Através de um estudo sistemático da variação das SPs ao longo da galáxia, construímos um cenário para a formação estelar nas quatro fontes estudadas neste trabalho. Primeiramente, no intuito de levarmos em conta os efeitos do ruído no espectro, os quais geram pequenas diferenças entre componentes espectrais similares, definimos um vetor de SP condensado, binando o \vec{x} nas componentes *jovem*: x_y ($t \leq 50 \times 10^6$ anos), *intermediária*: x_i ($1 \times 10^8 \leq t \leq 2 \times 10^9$ anos) e *velha*: x_o ($t > 2 \times 10^9$ anos), conforme foi feito por Riffel et al. (2009) e Cid Fernandes et al. (2005b). Para melhorar o entendimento dos nossos resultados, fizemos um grupo de histogramas para cada galáxia. A análise global de cada fonte foi feita graficando as diferentes frações dos vetores de população ao longo das aberturas das extrações (Figs. 3.1 e 3.2), sendo “0” pc a posição do núcleo (os espectros fora do núcleo foram extraídos com uma abertura de $0.2''$, conforme explicado na Seção 2.1).

No intuito de aprofundar o estudo da distribuição das SPs, construímos também um gráfico dos valores da metalicidade ao longo das aberturas na mesma figura. Com esses histogramas, podemos contruir o histórico de formação estelar de cada galáxia, revelando a SP dominante da fonte e indicando a possível presença de estruturas nucleares (e.g. anéis de formação estelar circumnucleares). Os histogramas apresentados nas Figs. 3.3 a 3.10 são exemplos da análise individual de cada abertura, feita antes de binarmos os vetores de população, nos quais apresentamos cinco informações:

- o resultado da síntese (em vermelho) sobreposto ao espectro observado (linha pontilhada);
- o resíduo;

- as contribuições das SPs separadas por idade e por metalicidade, pesadas em fluxo;
- as contribuições das SPs separadas por idade e por metalicidade, pesadas em massa;
- comparação das contribuições das SPs pesadas em fluxo e em massa, separadas somente por idade.

A fim de descrever o comportamento da metalicidade da mistura das SPs ao longo da galáxia, nós usamos a definição de metalicidade média pesada em fluxo (Eq. 3.1) e em massa (Eq. 3.2), descrita por Cid Fernandes et al. (2005a):

$$\langle Z_{\star} \rangle_F = \sum_{j=1}^{N_{\star}} x_j Z_j, \quad (3.1)$$

$$\langle Z_{\star} \rangle_M = \sum_{j=1}^{N_{\star}} m_j Z_j. \quad (3.2)$$

Ambas as definições estão restritas ao intervalo de $0.2Z_{\odot} - 2Z_{\odot}$. As metalicidades médias estimadas para cada galáxia são mostradas na parte inferior dos histogramas das Figs. 3.1 e 3.2. Nas seções seguintes, apresentaremos os resultados obtidos pela análise das SPs e os compararemos com os resultados da literatura.

3.1 NGC 34

Analisando a Fig. 3.1a, um histograma mostrando as diferentes frações dos vetores de SPs ao longo das aberturas das extrações da galáxia NGC 34, podemos ver que há um predomínio de SP de idade jovem nos entornos do núcleo, deslocado na direção sudoeste. A população de idade intermediária cresce em direção às bordas, enquanto a contribuição da SP velha começa a aparecer, porém não muito acentuada. Esses resultados concordam com os resultados da literatura. Por exemplo, estudando as propriedades ópticas de NGC 34 em uma escala maior (70 kpc centrais), Schweizer & Seitzer (2007) concluíram que esta fonte suporta um rico sistema de aglomerados estelares massivos, um disco azul exponencial e um *outflow* de gás bastante acentuado, todos assinaturas de uma fusão recente rica em gás, acompanhada por uma intensa formação estelar. A região central dessa galáxia também foi estudada por Riffel et al. (2008) na região espectral do NIR. Analisando os 230 pc centrais dessa

fonte, eles encontraram uma SP de idade jovem à intermediária ($\sim 1 \times 10^9$ anos) dominante.

Além disso, dois picos de SP de idade intermediária ($\sim 60\%$) são observados em ambas as direções, nordeste e sudoeste, centrados no núcleo, evidenciando um possível anel de SP de idade intermediária (raio ~ 400 pc). Na verdade, esses anéis (ou anéis parciais) parecem ser bastante comuns na região central de galáxias ativas (Riffel et al., 2010, 2011).

Na parte inferior da Fig. 3.1a, apresentamos os valores da metalicidade média pesada em fluxo e em massa ao longo da fenda da galáxia. Nossos resultados apontam para metalicidades médias pesadas em fluxo com valores iguais e abaixo do solar, enquanto que para as pesadas em massa nossos resultados apontam valores abaixo do solar. Tal discrepância pode estar associada a bem conhecida degenerescência idade-metalicidade, ou seja, 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. Ademais, esses resultados estão em concordância com o cenário de enriquecimento químico, no qual as populações mais jovens são enriquecidas através da evolução de estrelas massivas. Neste contexto, podemos inferir que a metalicidade média pesada em fluxo é mais sensível à componente jovem da SP, enquanto a metalicidade média pesada em massa é mais sensível à componente velha (Riffel et al., 2009), tal comportamento pode ser visto pela análise da Fig. 3.1a.

Os baixos valores de metalicidade média obtidos para essa galáxia sugerem que a fusão com outra galáxia disco ocorrida no passado (Schweizer & Seitzer, 2007) pode ter diluído o gás no remanescente da fusão, de forma que a SP formada no surto seja menos enriquecida.

3.2 NGC 1614

Pela análise da Fig. 3.1b, fica claro o predomínio de estrelas de idade intermediária na distribuição da SP dessa galáxia no NIR. Podemos ver um pico de SP intermediária centrado no núcleo que decresce em direção às bordas, enquanto a SP velha cresce do núcleo em direção às bordas, indicando que o surto de formação estelar se concentra ao redor do núcleo. Em concordância com os nossos resultados, Riffel et al. (2008) detectaram uma SP de 1×10^9 anos dominando os 154 pc internos dessa fonte. Modelando o surto de formação estelar no NIR dos kpc centrais dessa fonte, Alonso-Herrero et al. (2001) associaram a forte concentração de CO detec-

tada no núcleo com as primeiras estrelas formadas neste surto (10^9 anos ou mais), as quais apresentam o mesmo intervalo de idades encontrado no presente trabalho para a região nuclear dessa galáxia.

Achamos também evidências de um anel de SP intermediária com diâmetro de aproximadamente 600 pc, que está deslocado na direção norte. Encontramos indícios desse anel em resultados da literatura (Olsson et al., 2010, Alonso-Herrero et al., 2001), os quais detectaram uma estrutura similar a um anel, com raio de 300 - 310 pc, delineada pelo mapa da linha Pa α . O pico de SP intermediária à 350 pc a norte do núcleo pode ser interpretado como sendo o núcleo secundário, remanescente da fusão com uma outra galáxia menor, conforme citado anteriormente (Alonso-Herrero et al., 2001).

Podemos inferir a concordância dos nossos resultados para a distribuição das SPs com a metalicidade através da parte inferior da Fig. 3.1b. Nossos resultados apontam para uma metalicidade média (tanto pesada em fluxo como em massa) acima da solar nos entornos do núcleo e decrescendo em direção às bordas, concordando com o padrão seguido pela SP intermediária. A metalicidade pesada em fluxo apresenta valores menores do que a pesada em massa, indicando uma SP jovem menos rica em metais. Uma explicação para essa suposição é de que a galáxia pequena, a qual fundiu-se (*minor merger*) com NGC 1614 no passado (Alonso-Herrero et al., 2002), seria uma galáxia pobre em metais. Dessa maneira, o gás que formou as estrelas no surto estaria mais diluído, formando uma SP menos rica em metais do que a SP já presente na galáxia (componente velha da população). Ademais, isso também explica o fato de que a interação/fusão sofrida por esta galáxia não afeta de forma significativa a distribuição em idades das SPs, de forma que a sua distribuição não se diferencia muito daquela de galáxias isoladas, exceto pela já conhecida quebra do gradiente de metalicidades (Henry & Worthey, 1999, Krabbe et al., 2009).

3.3 NGC 3310

O predomínio de SP intermediária/velha nos entornos do núcleo pode ser visto pela análise da Fig. 3.2c. Em inúmeros trabalhos anteriores (Balick & Heckman, 1981, Telesco & Gatley, 1984, Schweizer & Seitzer, 1988, Pastoriza et al., 1993) a idade do surto de formação estelar ocorrido nessa galáxia foi estimado como sendo $10^7 - 10^8$ anos, um valor abaixo do estimado neste trabalho. Acreditamos que essa discrepância possa ser explicada pela grande quantidade de regiões H II englobadas pelo campo, mais amplo, utilizado nesses trabalhos. Entre o intervalo espectral de

3600 e 9600 Å, Pastoriza et al. (1993) estudaram o núcleo de seis dessas regiões H II, estando quatro delas a uma distância inferior a 400 pc do núcleo. Essas regiões H II são, na verdade, as responsáveis pela formação estelar caótica dessa fonte. Em outro trabalho, Riffel et al. (2008) estudaram os 56 pc centrais dessa galáxia no intervalo espectral do NIR. Uma intensa atividade *starburst* foi detectada, com uma SP dominante de 1×10^9 anos. Além disso, assim como para NGC 34 e para NGC 1614, encontramos dois picos de SP intermediária, um à 78 pc na direção sudeste do núcleo e outro à 106 pc à noroeste do núcleo, os quais podem ser interpretados como evidência de um anel de SP intermediária, deslocado na direção noroeste. Conforme mencionado anteriormente, Elmegreen et al. (2002) detectaram um anel circumnuclear envolvendo inúmeras regiões H II gigantes, com diâmetro angular entre 720 e 1080 pc, sendo bem mais externo do que o anel sugerido pelos nossos resultados.

A metalicidade cresce em conjunto com a SP intermediária, conforme análise da parte inferior da Fig. 3.2c. Nossos resultados apontam valores de metalicidade média (pesada em massa e em fluxo) solar e subsolar na direção noroeste e para sudeste encontramos valores mais altos (acima da metalicidade solar). Podemos perceber um aumento na diferença dos valores da metalicidade pesada em fluxo e em massa para mesma abertura, conforme aumentamos a contribuição das populações jovem e intermediária e diminuimos a da população velha, favorecendo o crescimento da metalicidade pesada em fluxo (mais sensível a populações mais jovens). Os baixos valores obtidos para essa metalicidade sugerem que a galáxia com a qual NGC 3310 fundiu-se no passado (Balick & Heckman, 1981) seria pobre em metais, o que teria engatilhado o último surto de formação estelar. Dessa forma, o gás que formou as estrelas mais jovens estaria mais diluído, formando assim, uma SP menos rica, de forma semelhante ao ocorrido com NGC 34 e NGC 1614.

3.4 NGC 7714

Analisando a Fig. 3.2d, vemos um pico de SP de idade intermediária deslocado do núcleo na direção noroeste, enquanto a contribuição da SP velha cresce na direção contrária (sudeste), porém menos acentuada. Em concordância com o nosso trabalho, Riffel et al. (2008) encontraram uma SP dominante de 1×10^9 anos estudando os 115 pc centrais dessa fonte. Vários outros estudos anteriores na região espectral do óptico e do ultravioleta (Gonzalez-Delgado et al., 1995, González Delgado et al., 1999, Lançon et al., 2001, Cid Fernandes et al., 2003) detectaram predominantemente SP de idade jovem nas centenas e milhares de parsecs centrais

da galáxia, em contraste com os nossos resultados. Uma possível explicação para essa discrepância é de que a região espectral do NIR realça as SPs mais velhas, uma vez que este intervalo é mais sensível a estrelas mais frias .

A metalicidade, conforme mostrada na parte inferior da Fig. 3.2d, segue o padrão de crescimento na direção noroeste da SP intermediária, indicando que os surtos de formação estelar se concentram nesse lado da galáxia. Conforme esperado, este é o lado no qual ocorreu interação com sua companheira, NGC 7715, no passado (González Delgado et al., 1999). Nossos resultados apontam para valores de metalicidade média (pesada em fluxo e em massa) sub solar, crescendo na direção noroeste e atingindo valores acima da metalicidade solar nos picos de formação estelar de população intermediária. Nota-se também um aumento da metalicidade pesada em fluxo com relação à pesada em massa nas aberturas em que a contribuição da SP jovem cresce, conforme esperado. Os valores de metalicidade média encontrados para essa fonte são significativamente mais baixos daqueles esperados para galáxias espirais do tipo *early type* (Gonzalez-Delgado et al., 1995). Por exemplo, para NGC 3310, a qual apresenta a mesma abundância de NGC 7714 na região do disco, Pastoriza et al. (1993) detectou valores próximos da metalicidade solar nos entornos do núcleo, enquanto nossos resultados e os de Gonzalez-Delgado et al. (1995) apontam para valores de metade da metalicidade solar no núcleo de NGC 7714.

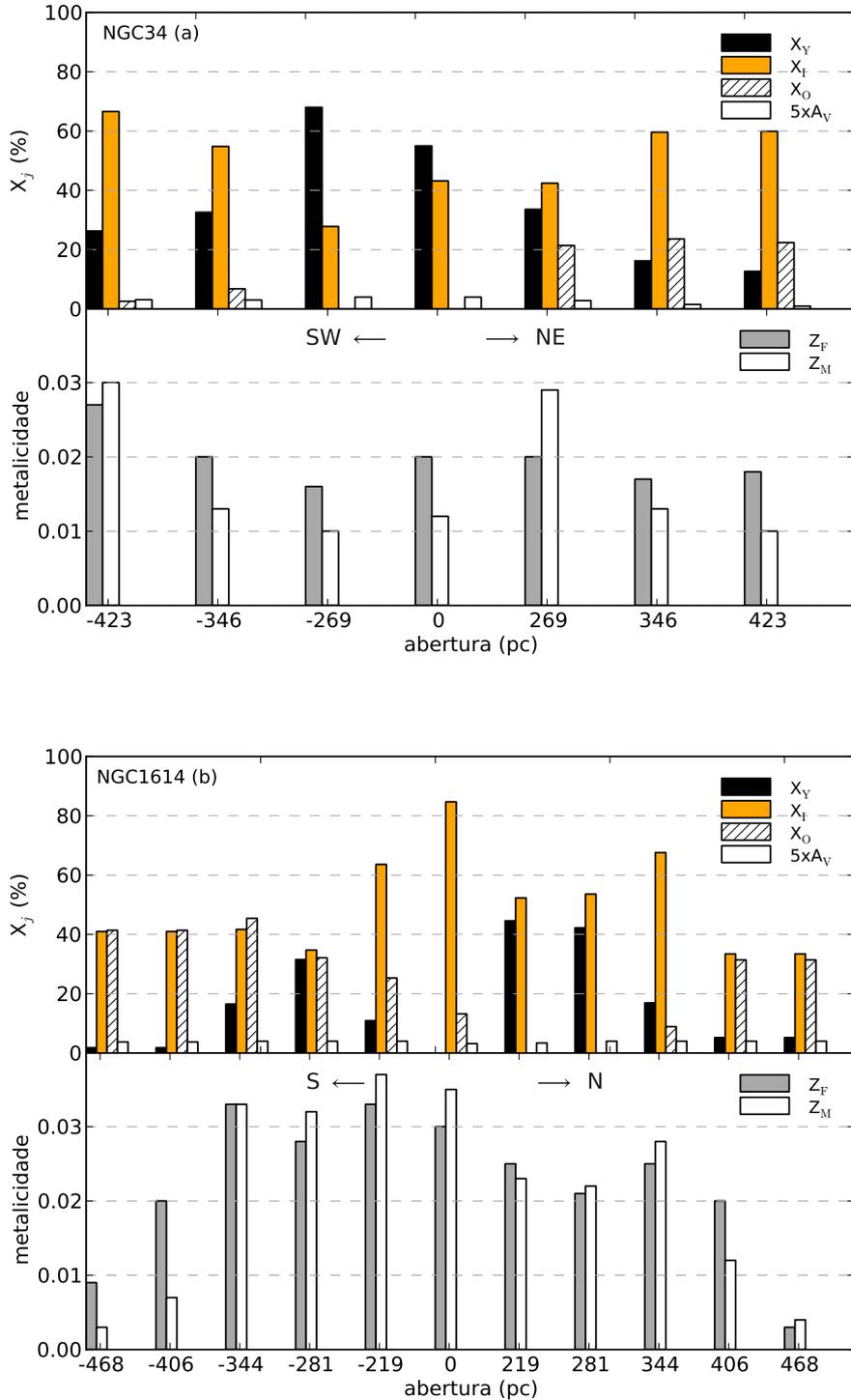


Figura 3.1: *Painel (a)*:*Topo*: Distribuição da população estelar da galáxia NGC 34 (X_Y : Jovem - $t \leq 50 \times 10^6$ anos; X_i : Intermediária - $1 \times 10^8 \leq t \leq 2 \times 10^9$ anos; X_o : Velha - $t > 2 \times 10^9$ anos), extinção multiplicada por um fator de 5 ($5 \times A_V$ - SW= sudoeste, NE= nordeste). *Base*: Histograma da metalicidade da galáxia NGC 34 (Z_F : metalicidade pesada em fluxo, Z_M : metalicidade pesada em massa). *Painel (b)*: O mesmo para a galáxia NGC 1614 (S= sul, N= norte).

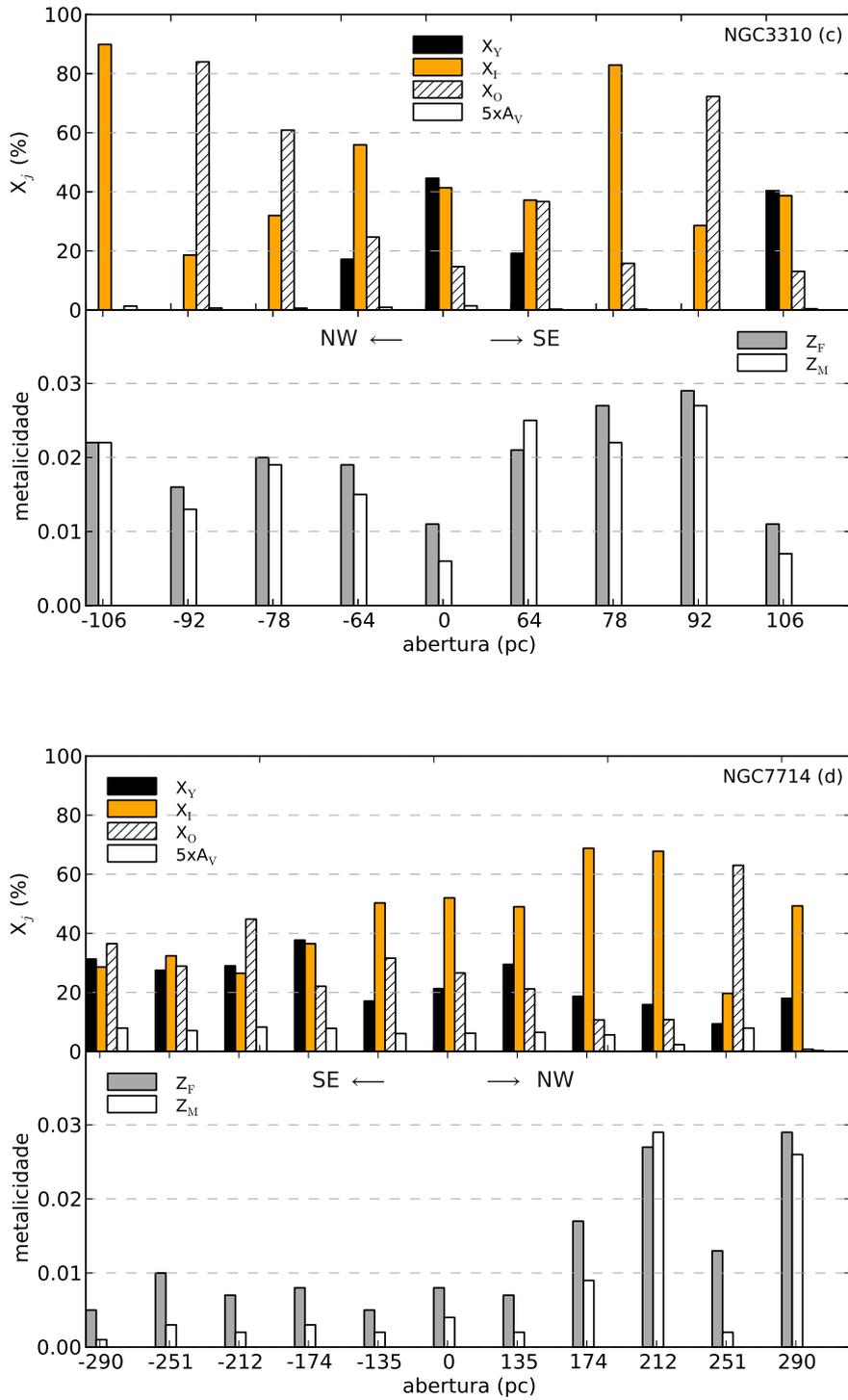


Figura 3.2: *Painel (c)*: O mesmo da Fig. 3.1 para a galáxia NGC 3310. *Painel (d)*: O mesmo para a galáxia NGC 7714. (SE= sudeste, NW= noroeste).

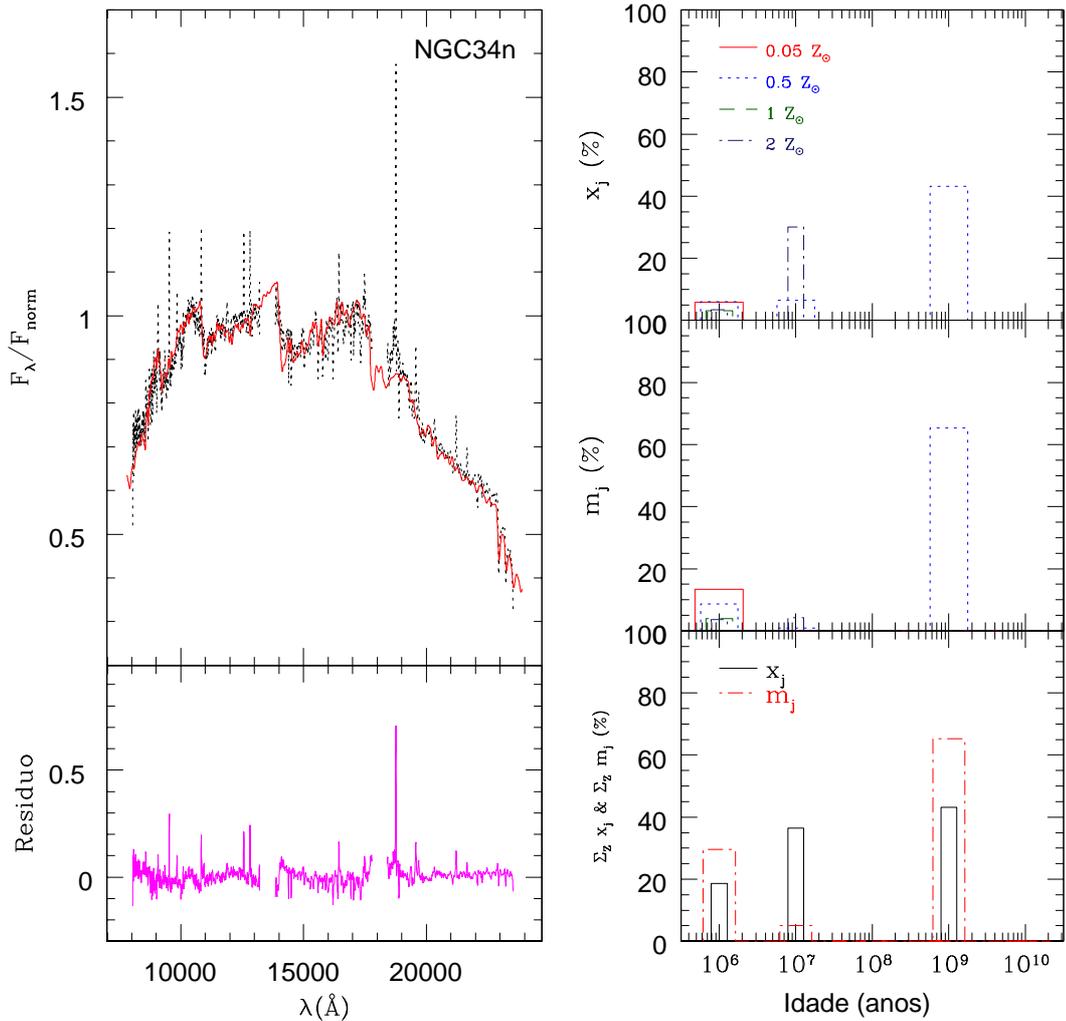


Figura 3.3: Resultado da síntese da região nuclear da galáxia NGC 34. **Painel Esquerdo**, *topo*: o resultado da síntese (vermelho) sobreposto ao espectro observado (linha pontilhada); *base*: o resíduo. **Painel Direito**, *topo*: histograma contendo as contribuições em fluxo das SPs separadas por idade e por metalicidade; *meio*: histograma contendo as contribuições em massa das SPs separadas por idade e metalicidade e *base*: histograma com a comparação das contribuições das SPs separadas somente por idade em fluxo e em massa.

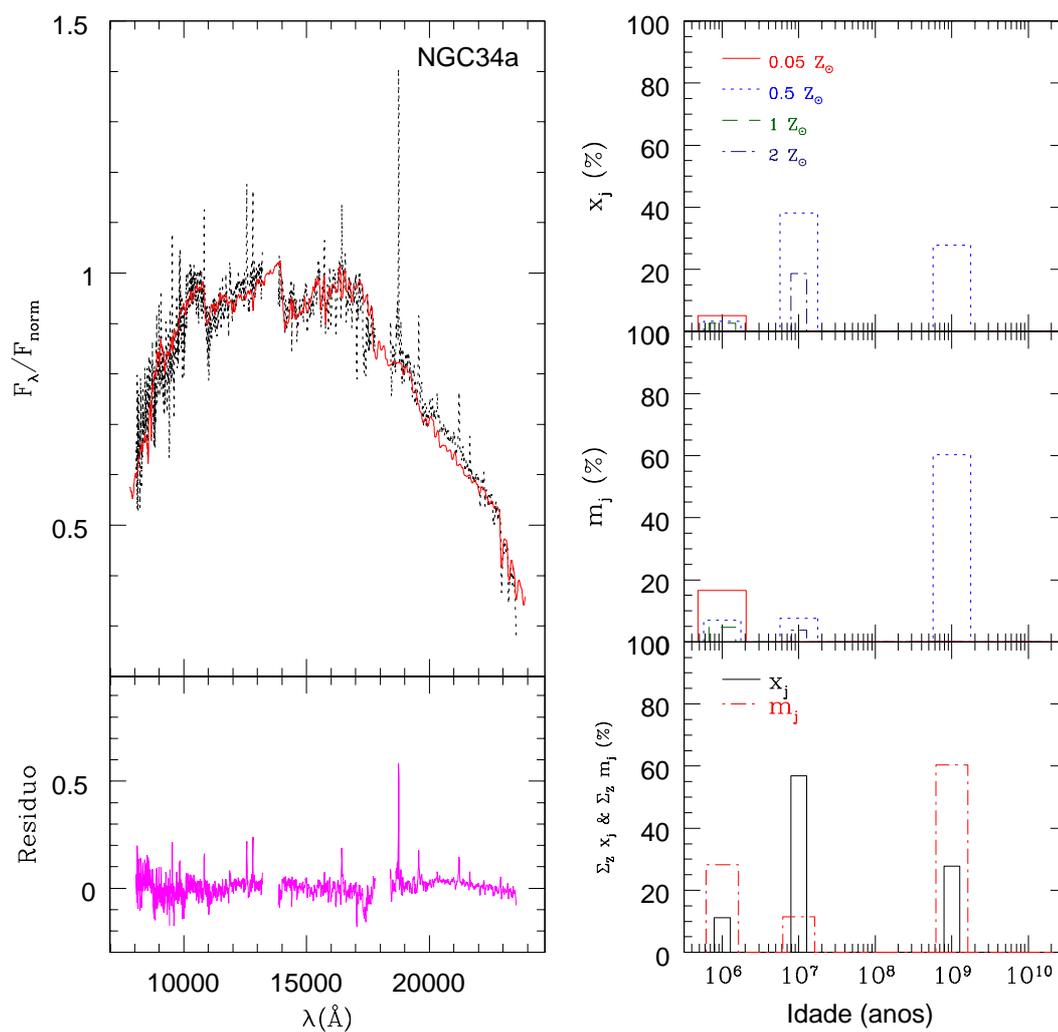


Figura 3.4: O mesmo da Fig. 3.3 para a abertura subsequente ao núcleo na direção Sul da galáxia NGC 34.

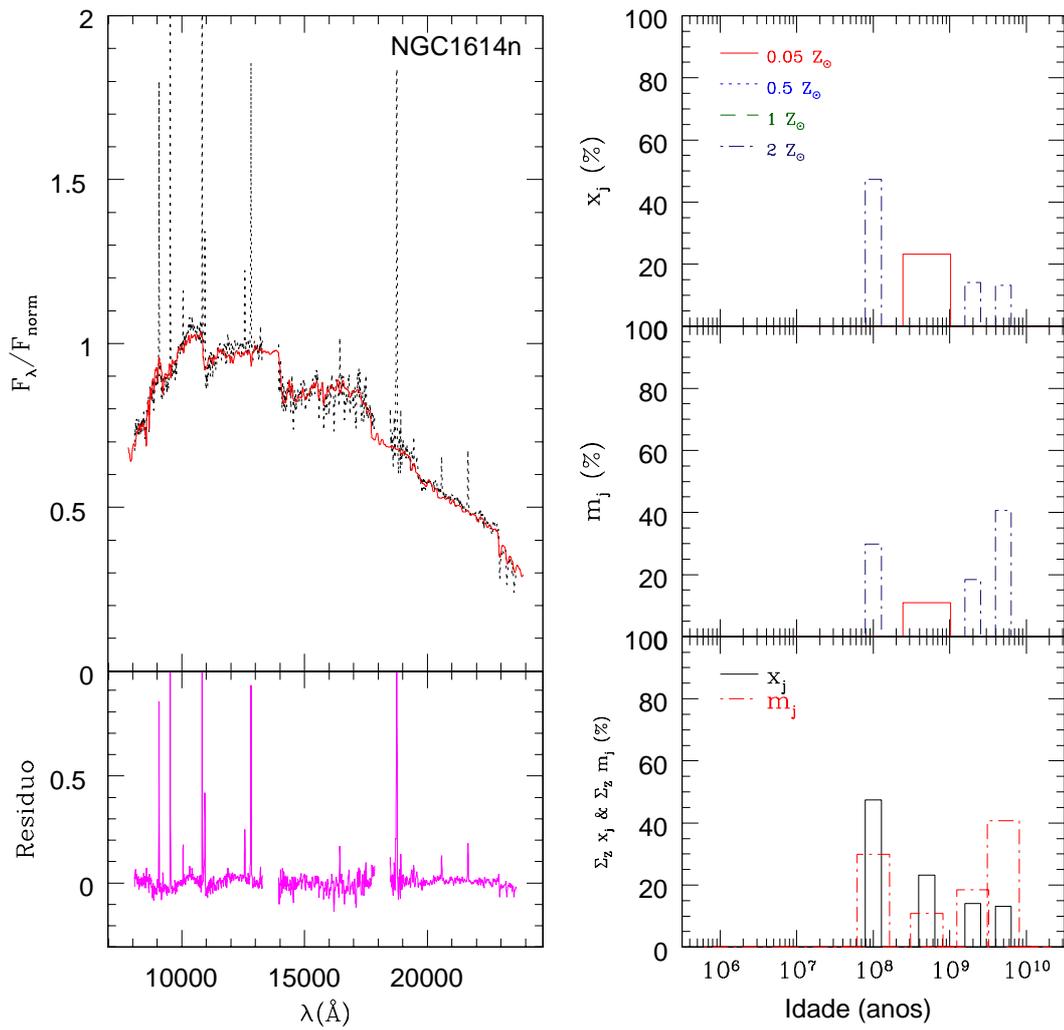


Figura 3.5: O mesmo da Fig. 3.3 para a abertura nuclear da galáxia NGC 1614.

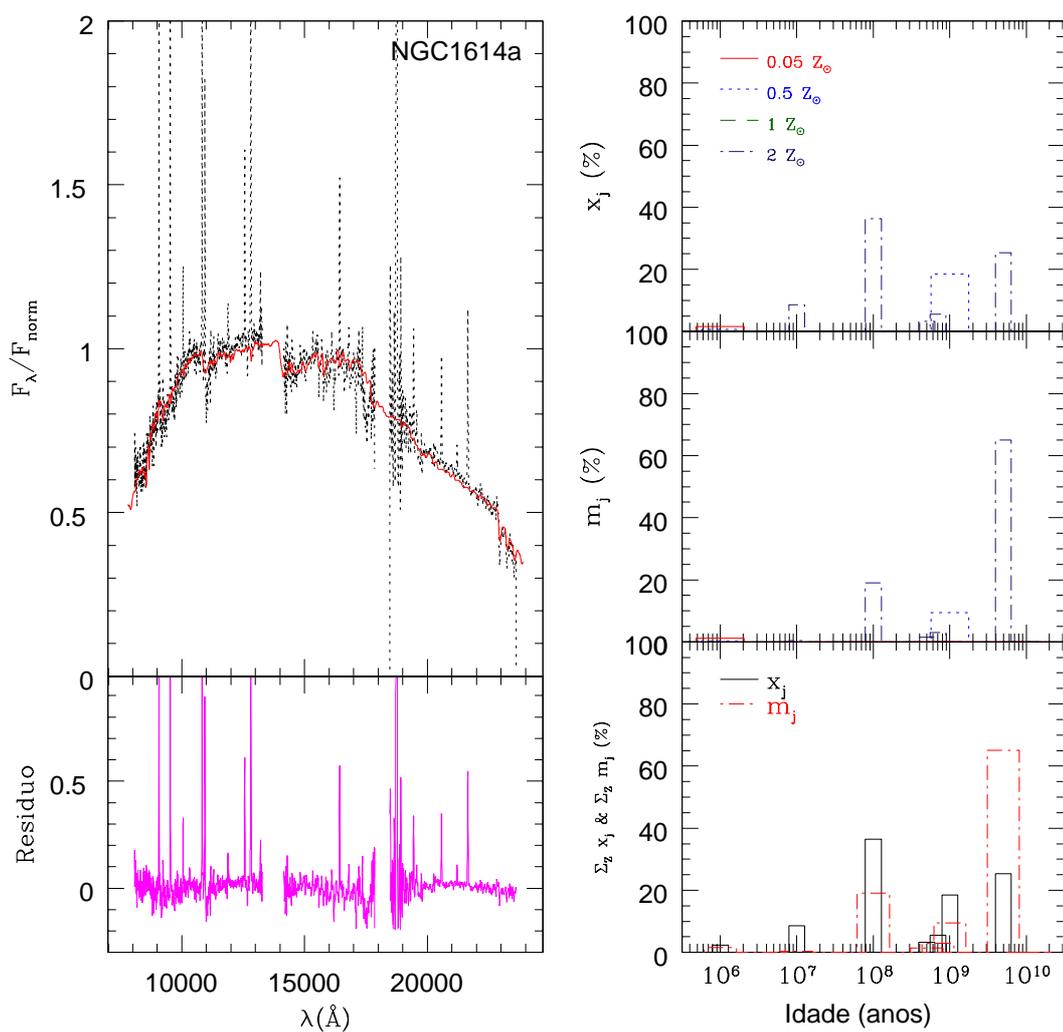


Figura 3.6: O mesmo da Fig. 3.3 para a abertura subsequente ao núcleo na direção Sul da galáxia NGC 1614.

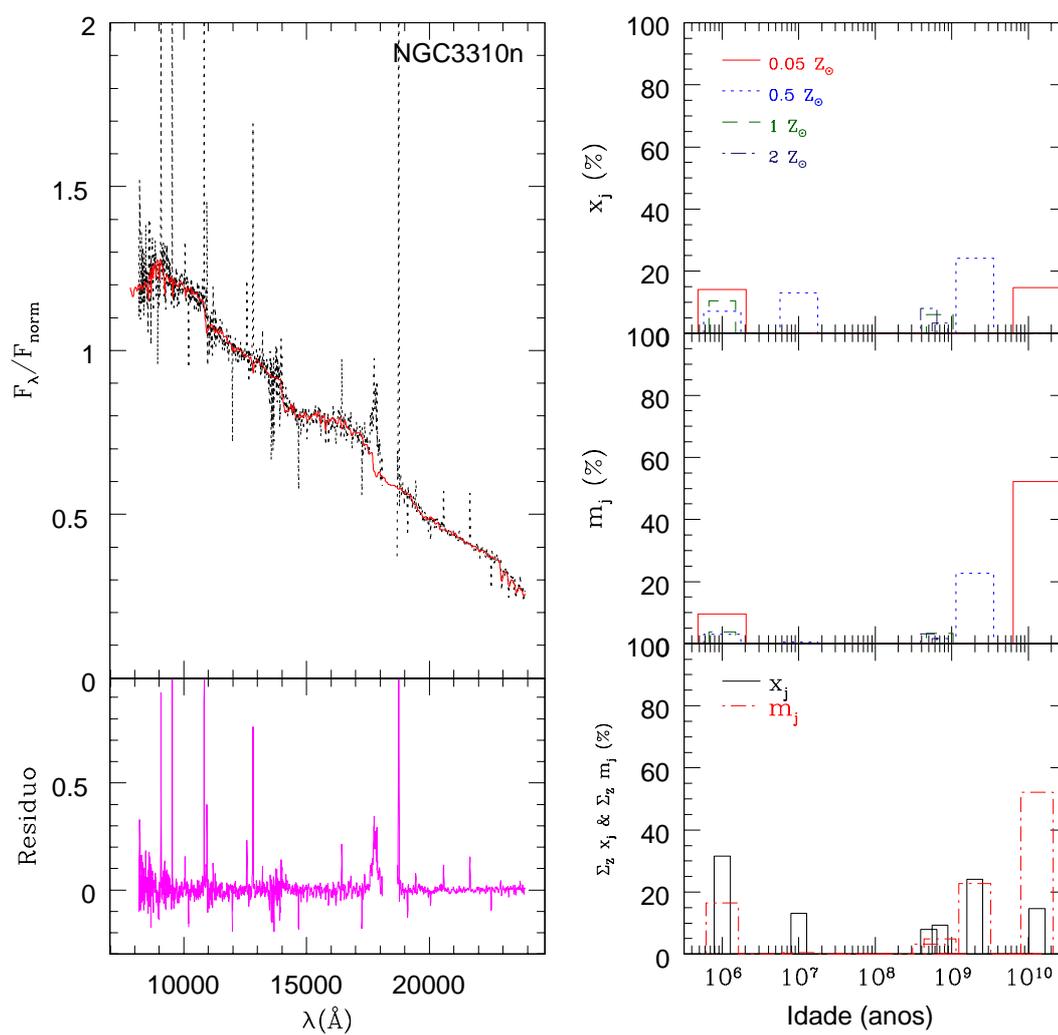


Figura 3.7: O mesmo da Fig. 3.3 para a abertura nuclear da galáxia NGC 3310.

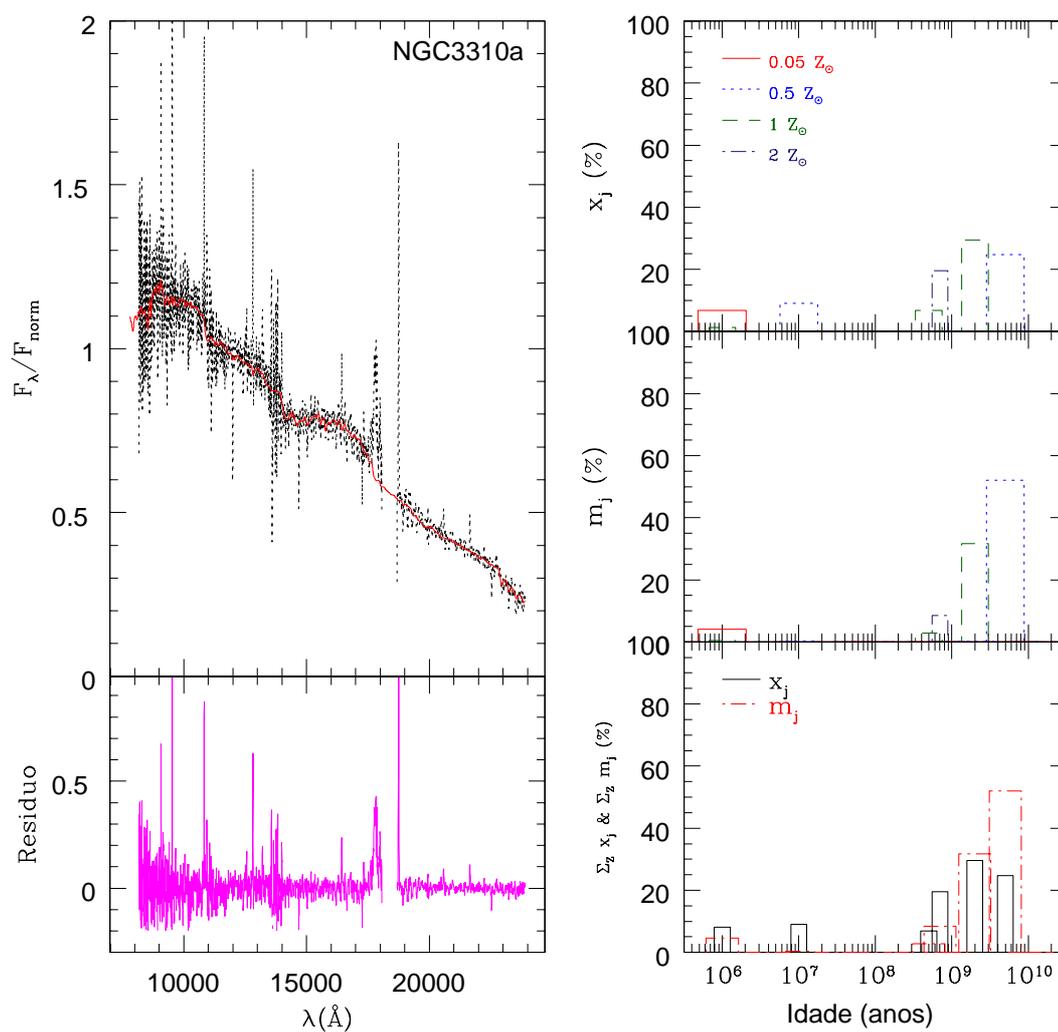


Figura 3.8: O mesmo da Fig. 3.3 para a abertura subsequente ao núcleo na direção Noroeste da galáxia NGC 3310.

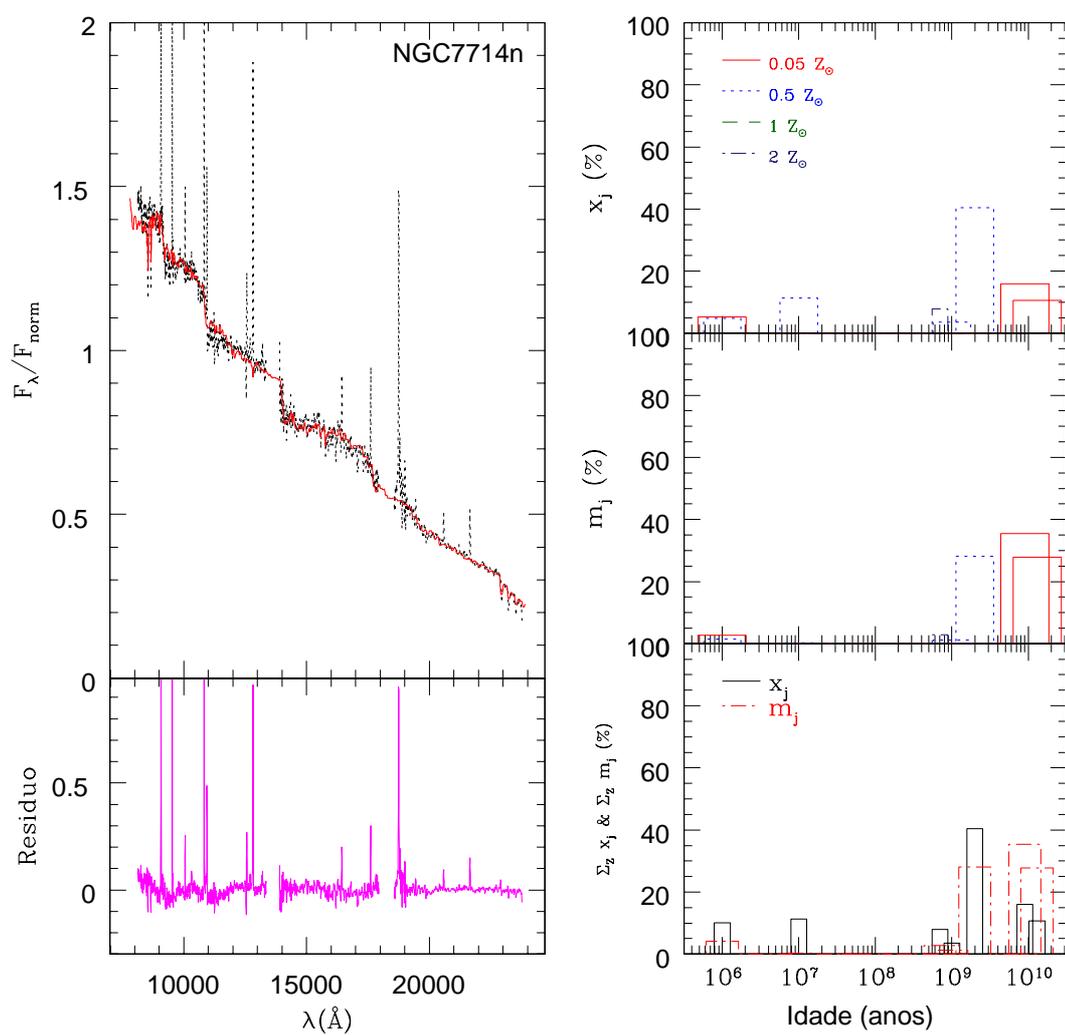


Figura 3.9: O mesmo da Fig. 3.3 para a abertura nuclear da galáxia NGC 7714.

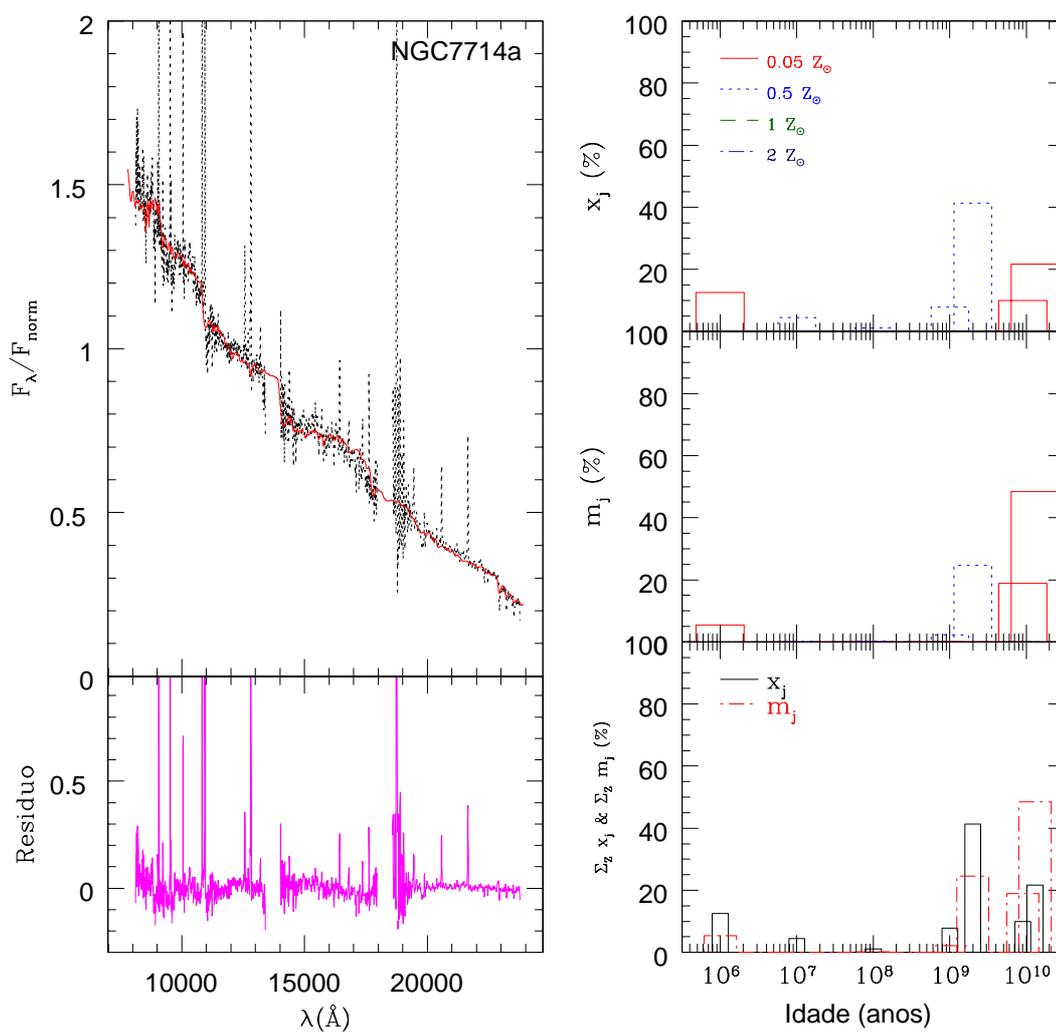


Figura 3.10: O mesmo da Fig. 3.3 para a abertura subsequente ao núcleo na direção Sudeste da galáxia NGC 7714.

Capítulo 4

Considerações Finais

Uma característica comum as quatro SBs estudadas neste trabalho é a interação/fusão com outra fonte, experimentada por todas as galáxias. Na verdade, a única que não passou por um processo de fusão foi NGC 7714, a qual continua em interação com sua companheira, NGC 7715. A assinatura da fusão/interação na distribuição de SPs pode ser vista na maioria das fontes, com exceção de NGC 1614. Nesta galáxia, o padrão de distribuição das SPs não se diferencia de maneira significativa daquela para galáxias “isoladas”, porém uma quebra no gradiente de metalicidades é observada.

Analisando os resultados da síntese, vemos o predomínio de SP de idade intermediária na região nuclear das galáxias, exceto para NGC 34, a qual apresenta uma SP dominante de idade jovem nos entornos do núcleo. Evidências de estruturas do tipo anéis de formação estelar foram detectadas em três dos quatro objetos estudados, NGC 34 (anel circumnuclear), NGC 1614 (anel deslocado para o norte) e NGC 3310 (anel deslocado na direção noroeste). Somente para esta última galáxia não encontramos outros resultados anteriores na literatura que apresentassem evidências de anéis (mesmo que em escalas diferentes das nossas).

Examinando os resultados de metalicidade média obtidos neste trabalho, concluimos que este é um bom parâmetro para analisar o histórico de formação estelar nas SBs, uma vez que esta aumenta com a SP de idade intermediária na maioria das fontes, conforme o esperado. O *major merger* experimentado por NGC 34 é capaz de explicar a discrepância nos valores de metalicidade obtidos para essa fonte, visto que o gás não processado da galáxia companheira canibalizada é carregado para o centro de NGC 34 e misturado com o gás da região central, antes de começar a formação estelar.

Bibliografia

- [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] ALONSO-HERRERO, A., RIEKE, G. H., RIEKE, M. J., SCOVILLE, N. Z. Massive Star Formation in Luminous Infrared Galaxies: Giant H II Regions and Their Relation to Super-Star Clusters. **Astronomical Journal**, v. 124, p. 166–182, July 2002.
- [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] BERNLOEHR, K. Models and observations of starbursts. II - Starbursts in interacting galaxies. **Astronomy and Astrophysics**, v. 268, p. 25–34, February 1993.
- [7] 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.

- [8] CARVALHO, E. A. **Estudo no infravermelho próximo da região de linhas estreitas de galáxias ativas**: Universidade Federal de Itajubá, 2008.
- [9] CID FERNANDES, R., GONZÁLEZ DELGADO, R. M., STORCHBERGMANN, 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.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] DE VAUCOULEURS, G., DE VAUCOULEURS, A., CORWIN, H. G., JR., BUTA, R. J., PATUREL, G., FOUQUE, P. **Third Reference Catalogue of Bright Galaxies**: 1991.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 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.

- [17] 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.
- [18] HECKMAN, T. **Starburst Galaxies**. November 2000.
- [19] HENRY, R. B. C., WORTHEY, G. The Distribution of Heavy Elements in Spiral and Elliptical Galaxies. **Publications of the Astronomical Society of the Pacific**, v. 111, p. 919–945, August 1999.
- [20] 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.
- [21] KRABBE, A. C., PASTORIZA, M. G., WINGE, C., RODRIGUES, I., FERREIRO, D. L. Kinematics and physical properties of Southern interacting galaxies: AM 2306-721. In: REVISTA MEXICANA DE ASTRONOMIA Y ASTROFISICA CONFERENCE SERIES, v. 35 of **Revista Mexicana de Astronomia y Astrofisica Conference Series**, p. 310, May 2009.
- [22] 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.
- [23] LANÇON, A., WOOD, P. R. A library of 0.5 to 2.5 μ m spectra of luminous cool stars. **Astronomy and Astrophysics Supplement Series**, v. 146, p. 217–249, October 2000.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] 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.

- [27] 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.
- [28] 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.
- [29] 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.
- [30] 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.
- [31] PASTORIZA, M. G. Spectra of peculiar nuclei in galaxies. **The Observatory**, v. 87, p. 225–228, October 1967.
- [32] PASTORIZA, M. G. Studies of galaxies with peculiar nuclei. **Astrophysics and Space Science**, v. 33, p. 173–188, March 1975.
- [33] 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.
- [34] 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.
- [35] 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.

- [36] 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.
- [37] 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.
- [38] 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 2011.
- [39] 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.
- [40] 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.
- [41] 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.
- [42] SCHWEIZER, F., SEITZER, P. Ripples in disk galaxies. **Astrophysical Journal**, v. 328, p. 88–92, May 1988.
- [43] 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.
- [44] SÉRSIC, J. L., PASTORIZA, M. Peculiar Nuclei of Galaxies. **Publications of the Astronomical Society of the Pacific**, v. 77, p. 287–+, August 1965.
- [45] TELESCO, C. M., GATLEY, I. Ongoing star formation in NGC 3310 - an infrared perspective. **Astrophysical Journal**, v. 284, p. 557–564, September 1984.

- [46] WEEDMAN, D. W. Toward explaining Seyfert galaxies. **Astrophysical Journal**, v. 266, p. 479–484, March 1983.
- [47] 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.
- [48] WEHNER, E. H., GALLAGHER, J. S., III. Tidal Debris in the Starburst Galaxy NGC 3310: A New Tidal Loop? **Astrophysical Journal Letters**, v. 618, p. L21–L24, January 2005.