

Ariel Werle

Galáxias Post-Starburst
No Universo Local

Florianópolis - SC
2014

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Werle, Ariel

Galáxias Post-Starburst No Universo Local / Ariel Werle
; orientador, Abílio Mateus - Florianópolis, SC, 2014.
68 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Catarina, Centro de Ciências Físicas e Matemáticas.
Programa de Pós-Graduação em Física.

Inclui referências

1. Física. 2. Galáxias Post-Starburst. 3. Evolução de
Galáxias. 4. Fusões. 5. Histórias de Formação Estelar. I.
Mateus, Abílio. II. Universidade Federal de Santa Catarina.
Programa de Pós-Graduação em Física. III. Título.

The Story So Far

“In the beginning the Universe was created. This has made a lot of people very angry and been widely regarded as a bad move.”

Douglas Adams.

Agradecimentos

Este trabalho não teria sido possível sem o apoio dos meus pais, Ari e Iria, que sempre colocaram minha educação como prioridade. Agradeço também aos meus demais familiares, em especial a minha irmã, Isabel, e a minha avó, Adelita.

Agradeço ao meu orientador, Abilio Mateus, por responder emails mesmo em madrugadas de sextas, sábados e domingos, por ter me ensinado a pensar de maneira científica e por ter se tornado um grande amigo. Agradeço também aos demais professores do grupo de astrofísica da UFSC, pelas disciplinas ministradas, conselhos acadêmicos e bom ambiente de trabalho.

Além dos professores, devo agradecer aos meus colegas e amigos do grupo de astrofísica, Germano, Rafael, André, Fábio e aos Eduardos, por todos os tutoriais, códigos, tirinhas do xkcd e conhecimento compartilhados.

Agradeço à administração do programa de pós-graduação em física, em especial ao secretário Antônio Carlos Machado, que sempre esteve disponível para sanar dúvidas e facilitar assuntos burocráticos com grande eficiência e agilidade.

Também agradeço a meus amigos fora do grupo de astrofísica que, mesmo sem saber, foram extremamente importantes para a manutenção da minha lucidez nos últimos anos.

Agradeço em especial a todos os envolvidos no *Sloan Digital Sky Survey*, ao professor Roberto Cid Fernandes, pela criação do STARLIGHT e aos 250 mil voluntários anônimos que participaram do projeto *Galaxy Zoo*. Este trabalho não seria possível sem os dados disponibilizados por estes indivíduos.

Resumo

Galáxias *post-starburst*(PSB) apresentam espectros com fortes linhas de absorção na série de Balmer e fracas linhas de emissão associadas a formação estelar, indicando uma predominância de populações estelares jovens e nenhum sinal de formação estelar atual. Combinando dados do *Sloan Digital Sky Survey* com os resultados da aplicação de um método de síntese espectral, selecionamos 427 galáxias PSB a partir de uma amostra limitada em volume de 162 538 objetos com *redshift* entre 0,04 e 0,095. Nossos resultados mostram que galáxias *post-starburst* têm um desenvolvimento extremamente tardio quando comparadas com outras galáxias. Suas massas estelares atuais são comparáveis às de galáxias *star-forming*. Por outro lado, enquanto galáxias *star-forming* formam sua massa de maneira contínua, galáxias PSB apresentam uma forte descontinuidade em sua taxa de formação estelar por volta de 3 Ganos atrás, formando até 40% de sua massa no período entre 3 bilhões e 150 milhões de anos atrás e cessando sua formação estelar em seguida. A alta quantidade de massa formada nos últimos 3 Ganos pode indicar que estas galáxias são remanescentes de fusões com galáxias de massa comparável, o que é verificado em *redshifts* mais altos. Dados morfológicos do *Galaxy Zoo* mostram que apenas 14,5% das galáxias PSB em nossa amostra apresentam vestígios de fusões e menos de 1% apresentam sinais evidentes de fusões. Uma justificativa para este resultado é que o tempo característico para que o espectro de uma galáxia apresente características PSB após uma fusão é maior do que o tempo necessário para o desaparecimento dos vestígios desta fusão. Esta hipótese é compatível com a baixa incidência de galáxias espirais em nossa amostra de galáxias PSB.

Palavras-chave: Galáxias Post-Starburst, Fusões, Histórias de Formação Estelar

Abstract

Post-starburst(PSB) galaxies are characterized by strong Balmer absorption lines and weak emission lines associated with star formation in their spectra. These characteristics indicate a predominance of young stellar populations and no ongoing star formation. Combining data from the *Sloan Digital Sky Survey* (SDSS) with results from a spectral synthesis code, we selected 427 PSB galaxies in a volume limited sample containing 162 538 objects from the SDSS DR7 with redshift between 0.04 and 0.095. From the spectral synthesis we recovered the star formation histories (SFH) of these galaxies, showing that they assembled stellar mass later than the average galaxy population (in a % basis). Stellar masses of PSB galaxies are comparable to those of *star-forming* galaxies, but while *star-forming* galaxies assemble their stellar mass in a continuous way, PSB galaxies show a strong slope in their SFH, forming up to 40% of their stellar mass in the period between 150 Myr and 3 Gyr ago. This strong slope can be associated to *major-mergers*, although these events are not detectable using *Galaxy Zoo* data. According to *Galaxy Zoo*, only 14.5% of PSB galaxies show traces of mergers and less than 1% show strong morphological evidences of mergers. We briefly discuss the timescales involved in merger induced star formation and the lifetime of merger features, showing that the PSB phenomena may in fact be merger related, but by the time we detect the PSB spectral features, the merger evidences are already undetectable in SDSS photometry. This idea is compatible with the low incidence of spiral galaxies in the PSB sample.

Keywords: Post-Starburst Galaxies, Mergers, Star Formation Histories

Lista de Figuras

2.1	Espectro de uma galáxia <i>early-type</i> do SDSS, espectro ajustado e espectro residual calculado pelo STARLIGHT.	12
2.2	Correlação entre as idades estelares médias ponderadas em fluxo e massa ($\langle \log t_{\star} \rangle_L$ e $\langle \log t_{\star} \rangle_M$) calculadas pelo STARLIGHT e $EW(H\delta)_a$	15
2.3	Correlação de f_y^L e f_y^M com a largura equivalente de H δ , $\langle \log t_{\star} \rangle_L$ e $\langle \log t_{\star} \rangle_L$	16
3.1	Diagrama WHAN (Cid Fernandes et al., 2011) para a amostra geral.	21
3.2	Histogramas de f_y^L e f_y^M em uma amostra de galáxias PSB selecionadas pelo método de Goto (2005).	24
3.3	Diagrama $EW([O II])$ vs $EW(H\delta)_a$	26
3.4	Histogramas comparando diferentes amostras de galáxias <i>post-starburst</i>	28
4.1	Diferentes classes de galáxias PSB no diagrama WHAN (Cid Fernandes et al., 2011).	30
4.2	Diferentes classes de galáxias PSB no diagrama BPT (Baldwin et al., 1981).	32
4.3	Histogramas normalizados de larguras equivalentes de linhas de emissão para diferentes classes espectrais de galáxias PSB.	33
4.4	Diagramas $[O II]$ vs H α e $[N II]$ vs H α para diferentes classes espectrais de galáxias PSB.	33
4.5	Diagrama cor-magnitude.	35

4.6	História de formação estelar cumulativa para galáxias PSB da amostra geral e da amostra de comparação comparadas com outras galáxias sem formação estelar e galáxias <i>star-forming</i>	37
4.7	Histórias de formação estelar para subclasses de galáxias PSB.	38
4.8	Histogramas de t_{70}	39
4.9	Histogramas de propriedades das populações estelares de galáxias PSB, comparadas com a amostra geral.	40
4.10	Histogramas de propriedades das populações estelares de galáxias PSB, comparadas com galáxias com e sem formação estelar.	41
4.11	Histogramas de propriedades das populações estelares de subclasses de galáxias PSB.	42
4.12	Frações de galáxias PSB em diferentes intervalos de Σ_5 , Σ_8 e Σ_{10}	43
4.13	Frações de galáxias PSB em diferentes intervalos de Σ_5 , Σ_8 e Σ_{10} comparadas com a amostra geral.	44
4.14	Histogramas de S_f e E_f para galáxias PSB.	45

Lista de Tabelas

- 2.1 Definição das larguras equivalentes, $\lambda_1 - \lambda_2$ representa o intervalo de comprimentos de onda correspondentes à linha espectral. 13
- 4.1 Tabela com as porcentagens de galáxias com $E_f > 0,5$, $E_f > 0,8$, $S_f > 0,5$ e $S_f > 0,8$ na amostra de galáxias PSB e em seus subgrupos. 46

Sumário

1	Introdução	1
1.1	O Universo Local	1
1.2	Evolução de Galáxias	2
1.3	Galáxias Post-Starburst	4
1.4	Este Trabalho	7
2	Bancos de Dados e Indicadores	9
2.1	O Sloan Digital Sky Survey	9
2.2	Síntese espectral de galáxias: o STARLIGHT	10
2.2.1	Principais produtos da síntese espectral	10
2.3	Medidas de índices espectrais	11
2.3.1	Larguras Equivalentes	11
2.3.2	Linhas de Emissão	13
2.4	Indicadores de populações jovens e formação estelar	14
2.5	Morfologia: o Galaxy Zoo	17
2.6	Ambiente: densidade local de galáxias	18
3	Classificação e seleção da amostra	19
3.1	Amostra geral	19
3.2	Classificação espectral	19
3.3	Classificações de Galáxias post-starburst	21
3.3.1	Classificações encontradas na literatura	21
3.3.2	Uma nova classificação	23

3.4	Amostras de galáxias post-starburst	25
3.4.1	Comparações Entre as Amostras	25
4	Propriedades de Galáxias Post-Starburst	29
4.1	Classificação Espectral de Galáxias PSB	30
4.1.1	Galáxias PSB no Diagrama WHAN	30
4.1.2	Núcleos ativos	30
4.1.3	Linhas de Emissão	32
4.2	Características Fotométricas	34
4.3	Síntese espectral	35
4.3.1	Histórias de Formação Estelar	35
4.3.2	Propriedades das populações estelares	37
4.4	Efeitos ambientais	43
4.5	Morfologia	45
5	Conclusões e Perspectivas	49
5.1	Conclusões	49
5.2	Perspectivas	51
	Referências Bibliográficas	52

Capítulo 1

Introdução

1.1 O Universo Local

Quando falamos em universo local, estamos nos referindo a um conjunto de galáxias próximas, localizadas em uma esfera imaginária com centro em nossa galáxia e raio de aproximadamente 1 bilhão de anos-luz. Esta distância corresponde a uma escala de tempo consideravelmente menor do que as envolvidas na evolução de galáxias. Dessa forma, o universo local poderia também ser chamado de “universo atual”.

No universo local, predominam galáxias com dois conjuntos de características: (i) galáxias elípticas vermelhas, predominantemente sem formação estelar e (ii) galáxias espirais azuis com formação estelar. Esta configuração é chamada de “bimodalidade da população de galáxias do universo local”.

A bimodalidade em morfologia é conhecida desde o início do século passado, quando Hubble propôs o primeiro esquema para classificação morfológica ([Hubble, 1926](#)). Também sabemos que, em geral, galáxias possuem a cor de suas estrelas. Logo, galáxias elípticas (que são vermelhas) devem possuir estrelas mais velhas do que as encontradas em galáxias espirais (azuis). Existem exceções para esta regra devidas à degenerescência idade-metalicidade ([Worthey, 1994](#)), que faz com que galáxias com estrelas jovens e formação estelar sejam mais avermelhadas quando suas estrelas são ricas em metais.

No diagrama cor-magnitude, galáxias vermelhas encontram-se em uma região estreita chamada “sequência vermelha”, enquanto galáxias azuis encontram-se em uma região mais dispersa, denominada “nuvem azul” (Baldry et al., 2004). A região entre estas duas distribuições é chamada de “vale verde”.

Nas últimas duas décadas, grandes levantamentos de dados como o *Sloan Digital Sky Survey* (SDSS; York et al. 2000) permitiram o estudo de observáveis em grandes amostras de galáxias, expandindo o conhecimento sobre o universo local. Estes estudos mostraram bimodalidades nas distribuições de diversas características de uma amostra de galáxias (e.g. Mateus et al., 2006).

Comparadas com galáxias da nuvem azul, galáxias da sequência vermelha são mais massivas e possuem maior metalicidade. Galáxias elípticas costumam ser encontradas em aglomerados de galáxias, enquanto galáxias espirais costumam estar em ambientes de menor densidade (e.g. Dressler, 1980). Em geral, galáxias da nuvem azul apresentam formação estelar, ao contrário de galáxias da sequência vermelha.

Em *redshifts* (z) elevados, o universo é composto basicamente por estrelas jovens e azuis, a sequência vermelha é observada pelo menos desde *redshifts* próximos a 1 (Cirasuolo et al., 2007; Williams et al., 2009) e o número de galáxias que a compõem tem aumentado (Bell et al., 2004).

1.2 Evolução de Galáxias

Sabemos que galáxias evoluem da nuvem azul para a sequência vermelha após o encerramento de sua formação estelar e que este processo é acompanhado por uma mudança em outras características, como a morfologia (Bamford et al., 2009). Também sabemos que este processo deve ser rápido, pois a quantidade de galáxias no vale verde é muito menor do que na nuvem azul e na sequência vermelha. No entanto, os mecanismos que contribuem para este processo evolutivo ainda não são totalmente compreendidos.

*Major mergers*¹ podem rapidamente transformar galáxias espirais em galáxias elípticas, provocando um surto de formação estelar durante o processo (Mendel et al., 2013; Ji et al., 2014), o que sugere que estes processos devem desempenhar um papel fundamental na evolução de galáxias. *Minor mergers*² também possuem seu papel, provocando instabilidades no disco de galáxias espirais e são frequentemente considerados tão importantes quanto *major mergers* na formação de galáxias elípticas (Conselice, 2012).

Estudos da história de fusões no Universo (Conselice et al., 2003; Jogee et al., 2008; Lotz et al., 2008; Bertone & Conselice, 2009; Lotz et al., 2011) mostram que a quantidade de galáxias sofrendo fusões atingiu um pico em *redshifts* próximos a 1,5 e tem diminuído desde então. A taxa de crescimento da sequência vermelha varia com o *redshift* de maneira semelhante, o que enfatiza a importância destes processos. Por exemplo, Gonçalves et al. (2012) mostram que galáxias no vale verde evoluem mais rapidamente em altos *redshifts* ($z \sim 0,8$) em comparação com galáxias em baixos *redshifts* ($z \sim 0,2$; Martin et al. 2007).

Interações gravitacionais com galáxias próximas, com o ambiente do aglomerado ou com o halo de matéria escura podem provocar “efeitos de maré” que levam a uma alta taxa de formação estelar no centro da galáxia. Essa influência sobre a formação estelar, tanto de *mergers* quanto de efeitos de maré, depende do ambiente em que a galáxia se encontra (e.g. Martig & Bournaud, 2008).

Tanto efeitos de maré quanto *mergers* podem fornecer combustível a um buraco negro supermassivo no centro da galáxia (núcleo), levando a uma conexão entre formação estelar e atividade do buraco negro (Taniguchi, 2003; Trouille et al., 2011). A atividade do núcleo pode gerar um *feedback*, cedendo energia ao gás e suavizando eficientemente a formação estelar de galáxias (Croton et al., 2006).

Resultados de Martin et al. (2007) mostram que núcleos ativos são mais comuns entre galáxias do vale verde.

¹Fusões entre galáxias de massa comparável.

²Fusões em que a diferença de massa entre as galáxias é considerável. Em geral são considerados *minor mergers*, fusões em que a galáxia menos massiva tem até 25% da massa da galáxia mais massiva.

Acresção de gás frio do meio intergalático também é um processo importante na formação de galáxias. Segundo [Conselice 2012](#), entre $1 < z < 3$ este efeito contribuiu tanto quanto fusões para a taxa de formação estelar.

A evolução de uma galáxia também varia de acordo com sua massa atual. Galáxias de alta massa são dominadas por populações estelares de idade maior do que 5 Ganos ([Trager et al., 2000](#)) e formam sua massa estelar mais rapidamente ([Thomas et al., 2005](#)). Este fenômeno, chamado de *downsizing*, é devido à aceleração da evolução de galáxias em ambientes densos, observada principalmente em altos *redshifts* ([Mateus et al., 2007](#)).

Comparando dados do *Sloan Digital Sky Survey* com a *Millenium Simulation*, [Mateus et al. \(2008\)](#) mostram que a história de acúmulo de massa de galáxias no universo local está fortemente relacionada com sua história de fusões. Neste contexto, o *downsizing* é uma consequência natural da evolução hierárquica do Universo.

Modelos semi-analíticos reproduzem algumas das características da população de galáxias no universo local, como funções de massa e luminosidade ([Bower et al., 2006](#)) e a bimodalidade no diagrama cor-magnitude ([Henriques et al., 2009](#)). No entanto, estes modelos preveem taxas de formação estelar ~ 4 vezes menores do que as observadas em $z < 1$, atribuem eficiência excessiva a efeitos ambientais, superestimando a quantidade de galáxias passivas de baixa massa em ambientes densos em até 50%, entre outros problemas ([Mendel et al., 2013](#)). Estas diferenças entre modelos e observações evidenciam a falta de um entendimento detalhado dos processos que afetam a evolução de galáxias.

1.3 Galáxias Post-Starburst

Uma maneira de estudar a evolução de galáxias é a investigação das propriedades de galáxias que encerraram sua formação estelar recentemente e estão atualmente transitando da nuvem azul para a sequência vermelha. Uma das classes de galáxias que apresentam esta característica é chamada de *post-starburst* ou PSB. Apesar de

raras no universo local, estes objetos podem representar um importante caminho para a sequência vermelha (Wong et al., 2012).

Galáxias *post-starburst* foram identificadas pela primeira vez por Dressler & Gunn (1983) em um catálogo de aglomerados de galáxias em alto *redshift*. Seus espectros ópticos apresentam proeminentes linhas de absorção na série de Balmer e a ausência de linhas de emissão associadas a formação estelar. Tais características são reproduzidas por modelos de síntese espectral como resultado de um curto período de formação estelar (*burst*) seguido por um truncamento há 1 ou 2 Ganos (Poggianti et al., 1999)³.

Dressler & Gunn (1983) definem estas galáxias como E+A, pois seus espectros assemelham-se à superposição de espectros de galáxias elípticas com os de estrelas do tipo A. Esta classificação foi posteriormente alterada para K+A (Dressler et al., 1999; Poggianti et al., 1999; Balogh et al., 1999) por estas galáxias serem compostas de estrelas velhas (tipo espectral K) e estrelas jovens (tipo espectral A).

Apesar de primeiramente encontradas em aglomerados de galáxias (Dressler & Gunn, 1983; Sharples et al., 1985), atualmente galáxias PSB são encontradas em uma grande variedade de ambientes (e.g. Poggianti et al., 2009).

Como galáxias PSB passam por um período de alta taxa de formação estelar seguido por um truncamento, é possível que estas tenham fortes correlações com seu ambiente e uma alta incidência de núcleos ativos, visto que, conforme mencionado na seção anterior, interações com o ambiente podem gerar uma alta taxa de formação estelar, e também fornecer uma grande quantidade de combustível para um buraco negro supermassivo central (Trouille et al., 2011). Esta hipótese é comprovada em alguns trabalhos (Zabludoff et al., 1996; Dressler et al., 1999; Poggianti et al., 1999, 2009; Vergani et al., 2009), e refutada em outros (Goto, 2005; Yan et al., 2008; Wild et al., 2009). Em geral, efeitos ambientais são observados para galáxias PSB em alto *redshift*, porém não no universo local.

³Estes valores variam de acordo com os critérios de seleção de galáxias PSB.

Resultados de [Goto \(2005\)](#) indicam que galáxias *post-starburst* entre $0,032 < z < 0,342$ possuem um número considerável de galáxias próximas apenas em escalas menores do que 100 kpc.

Analisando dados do zCOSMOS *survey* em *redshifts* intermediários ($0,5 < z < 0,8$), [Vergani et al. \(2009\)](#) encontram uma alta incidência percentual de galáxias *post-starburst* em ambientes densos. Segundo estes autores, galáxias PSB residem tipicamente em ambientes semelhantes ao de galáxias quiescentes e podem representar até 10% do aumento da massa da sequência vermelha na faixa de *redshifts* considerada.

Segundo [De Propris & Melnick \(2014\)](#) e [Mendel et al. \(2013\)](#), *feedbacks* de núcleos ativos (AGN) não devem ser importantes para o truncamento da formação estelar destas galáxias. Porém, traços de núcleos ativos são encontrados em alguns trabalhos, como o de [Yan et al. \(2008\)](#) e o de [Yesuf et al. \(2014\)](#).

Estudos de espectroscopia de campo integrado (IFU) de galáxias PSB ([Goto et al., 2008](#); [Storchi-bergmann & Brotherton, 2012](#)) mostram que estas possuem cores mais azuis em seu centro, sugerindo que suas populações estelares mais jovens concentram-se nesta região. Esta é a característica esperada para galáxias que tiveram sua formação estelar truncada após *major mergers* ou efeitos de maré.

Um recente estudo por [Zwaan et al. 2013](#) sugere que em torno de 50% das galáxias PSB em $z < 0,05$ possuem emissão em H I. Esta característica é evidência de que estas galáxias possuem gás frio, adequado para a formação de estrelas. A quantidade de gás frio medida em galáxias PSB vai de 1 a 10% de sua massa estelar, quantidade que é alta para galáxias elípticas, porém pequena para galáxias espirais.

Segundo [Wong et al. \(2012\)](#), galáxias PSB no universo local estão rapidamente evoluindo para compor a parte menos massiva da sequência vermelha e a sua morfologia lembra a de galáxias elípticas na mesma faixa de massa.

Os trabalhos citados indicam que as propriedades de galáxias PSB devem variar com seu *redshift*, assim como a ocorrência destes objetos, que, segundo [Wild et al. \(2009\)](#), é 230 vezes maior em $z = 0,7$ do que em $z = 0,07$.

O recente trabalho de [Yesuf et al. \(2014\)](#) combina dados do SDSS com a fotometria de infravermelho do WISE e a fotometria de ultra-violeta do GALEX para traçar a sequência evolutiva que leva galáxias de *star-forming*⁴ para *post-starburst*. Seus resultados mostram que galáxias em transição entre estas duas fases apresentam propriedades estelares previstas para galáxias que tiveram sua formação estelar encerrada rapidamente e apresentam morfologias semelhantes às esperadas para galáxias da sequência vermelha. Este trabalho também mostra que núcleos ativos são aproximadamente três vezes mais comuns em galáxias PSB do que em galáxias *star-forming* na mesma faixa de massa e classificam 15% das galáxias PSB no universo local como *dust-obscured galaxies* (DOGs)⁵ (para a amostra geral de galáxias, esta fração é de 0,8%).

Como [Yesuf et al. \(2014\)](#) encontram um atraso entre o pico de atividade do núcleo e o encerramento da formação estelar, os autores concluem que AGNs não devem possuir um papel primário na formação de galáxias *post-starburst*, porém, podem ser responsáveis por truncamentos subsequentes.

As propriedades observadas em galáxias PSB dependem sensivelmente da maneira como estas são classificadas. Pequenas diferenças em classificação podem introduzir poluições e descaracterizar a amostra. Por outro lado, critérios excessivamente restritivos podem introduzir efeitos de seleção, limitando a gama de efeitos que podem ser estudados, e levando a falsos resultados. Como galáxias PSB são raras, principalmente no universo local, a seleção de uma amostra estatisticamente completa destes objetos é um grande desafio.

1.4 Este Trabalho

Considerando os problemas levantados nas seções anteriores, levantamos algumas questões. Existe alguma maneira de identificar estes objetos melhor do que as encontradas na literatura? Por que galáxias PSB são tão incomuns em baixos

⁴Com formação estelar.

⁵Galáxias obscurecidas por poeira.

redshifts? Em quais ambientes se encontram estas galáxias? Estas galáxias possuem núcleos ativos? Podemos encontrar vestígios de fusões na morfologia destes objetos? Existem peculiaridades de galáxias PSB ainda não identificadas?

Através do uso de diferentes bancos de dados contendo informações fotométricas e espectroscópicas, além de características de suas populações estelares e morfologia, investigamos as propriedades de galáxias PSB no universo local a fim de identificar os mecanismos que geraram suas características espectrais peculiares. Para isso, aplicamos um novo método de identificação de galáxias *post-starburst*, desenvolvido com o objetivo específico de minimizar efeitos de seleção e produzir uma amostra estatisticamente completa.

O texto está organizado da seguinte maneira: o Capítulo 2 descreve os bancos de dados e indicadores usados neste trabalho; o Capítulo 3 discute a seleção da amostra, e o Capítulo 4 apresenta e discute as propriedades de galáxias PSB encontradas na amostra. Os resultados e conclusões são discutidos no Capítulo 5.

Capítulo 2

Bancos de Dados e Indicadores

2.1 O Sloan Digital Sky Survey

O *Sloan Digital Sky Survey* (SDSS; [York et al. 2000](#)) realizou observações de cerca de 1/4 do céu, obtendo imagens e espectros de galáxias, estrelas e quasares. Os dados obtidos são tornados públicos e distribuídos em *data releases*, atualmente o *survey* está em sua décima versão, denominada *data release 10*, ou DR10.

Os espectros do SDSS são obtidos em um telescópio dedicado de 2,5 metros localizado no *Apache Point Observatory*, nos Estados Unidos. Após o imageamento de um dado campo, objetos de interesse para espectroscopia são identificados via *software* e placas de alumínio são perfuradas nos pontos em que a luz destes objetos incide. A luz é então transmitida por fibra óptica até um espectrógrafo.

Os dados do SDSS são públicos e podem ser acessados em <http://www.sdss.org/>. Neste trabalho, são usados dados do sétimo *data release* (DR7) do SDSS.

É importante ressaltar que todas as análises presentes neste trabalho foram possíveis graças ao grande levantamento de dados do SDSS, visto todos os outros dados aqui utilizados são frutos de processamentos a partir dos espectros e das imagens do SDSS.

2.2 Síntese espectral de galáxias: o STARLIGHT

O STARLIGHT é um software de síntese espectral desenvolvido por [Cid Fernandes et al. \(2005\)](#). O código decompõe espectros de galáxias em uma base composta de populações estelares simples (SSP). Na versão utilizada neste trabalho, a base espectral é a de [Bruzual & Charlot \(2003\)](#), que contém 150 componentes, incluindo 25 idades e 6 metalicidades. A IMF utilizada é a de [Chabrier \(2003\)](#) e a lei de extinção é a de [Cardelli et al. \(1989\)](#) com $R_V = 3,1$ e parametrizada na banda V. Movimentos estelares ao longo da linha de visada são modelados por uma distribuição gaussiana de velocidades centrada em v_* e com dispersão σ_* .

O espectro sintético é calculado a partir da seguinte equação:

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

onde $\lambda_0 = 4020\text{\AA}$ é o comprimento de onda de normalização, $b_{j,\lambda}$ é o espectro da j -ésima SSP, $r_\lambda \equiv 10^{-0.4(A_\lambda - A_{\lambda_0})}$ é o termo de extinção, M_{λ_0} é o fluxo no comprimento de onda de normalização, x_j é a fração de fluxo correspondente à j -ésima população estelar e o símbolo \otimes representa o operador convolução. Um ajuste é feito procurando o espectro sintético possível que mais se assemelha ao espectro observado.

A partir da síntese espectral, são calculadas idades estelares médias, metalicidades, extinção, histórias de formação estelar, entre outros parâmetros.

Os produtos da síntese espectral do STARLIGHT para galáxias do SDSS estão disponíveis publicamente em <http://casjobs.starlight.ufsc.br/casjobs/>, juntamente com dados do GALEX e do próprio SDSS. A descrição do banco de dados consta em http://casjobs.starlight.ufsc.br/casjobs/field_list.html.

2.2.1 Principais produtos da síntese espectral

Neste trabalho, usaremos idades, metalicidades, extinções e massas calculadas pelo STARLIGHT para galáxias do SDSS.

Sendo x_j a fração da luz de uma galáxia proveniente de uma população estelar j com idade t_j e fração de massa μ_j , as idades estelares médias ponderadas em fluxo e massa são dadas, respectivamente, por:

$$\langle \log t_\star \rangle_L = \sum_{j=1}^{N_\star} x_j \log t_j \quad (2.2)$$

$$\langle \log t_\star \rangle_M = \sum_{j=1}^{N_\star} \mu_j \log t_j. \quad (2.3)$$

Sendo Z_j a metalicidade de uma população estelar j , as metalicidades estelares médias ponderadas em fluxo e massa são, respectivamente:

$$\langle Z_\star \rangle_L = \sum_{j=1}^{N_\star} x_j Z_j \quad (2.4)$$

$$\langle Z_\star \rangle_M = \sum_{j=1}^{N_\star} \mu_j Z_j. \quad (2.5)$$

As massas das galáxias são calculadas somando as massas em cada uma das populações estelares e as extinções são ajustadas na síntese, juntamente com μ e x .

A Figura 2.1 mostra o espectro de uma galáxia *early-type* do SDSS, seu espectro ajustado e seu espectro residual calculado pelo STARLIGHT. Os painéis à direita mostram distribuições de x e μ . Na parte superior direita da figura são mostrados alguns parâmetros de saída do STARLIGHT para esta galáxia.

2.3 Medidas de índices espectrais

2.3.1 Larguras Equivalentes

Largura equivalente de uma linha espectral é a largura de um retângulo de altura igual à emissão do contínuo de um espectro e área igual à área da linha espectral.

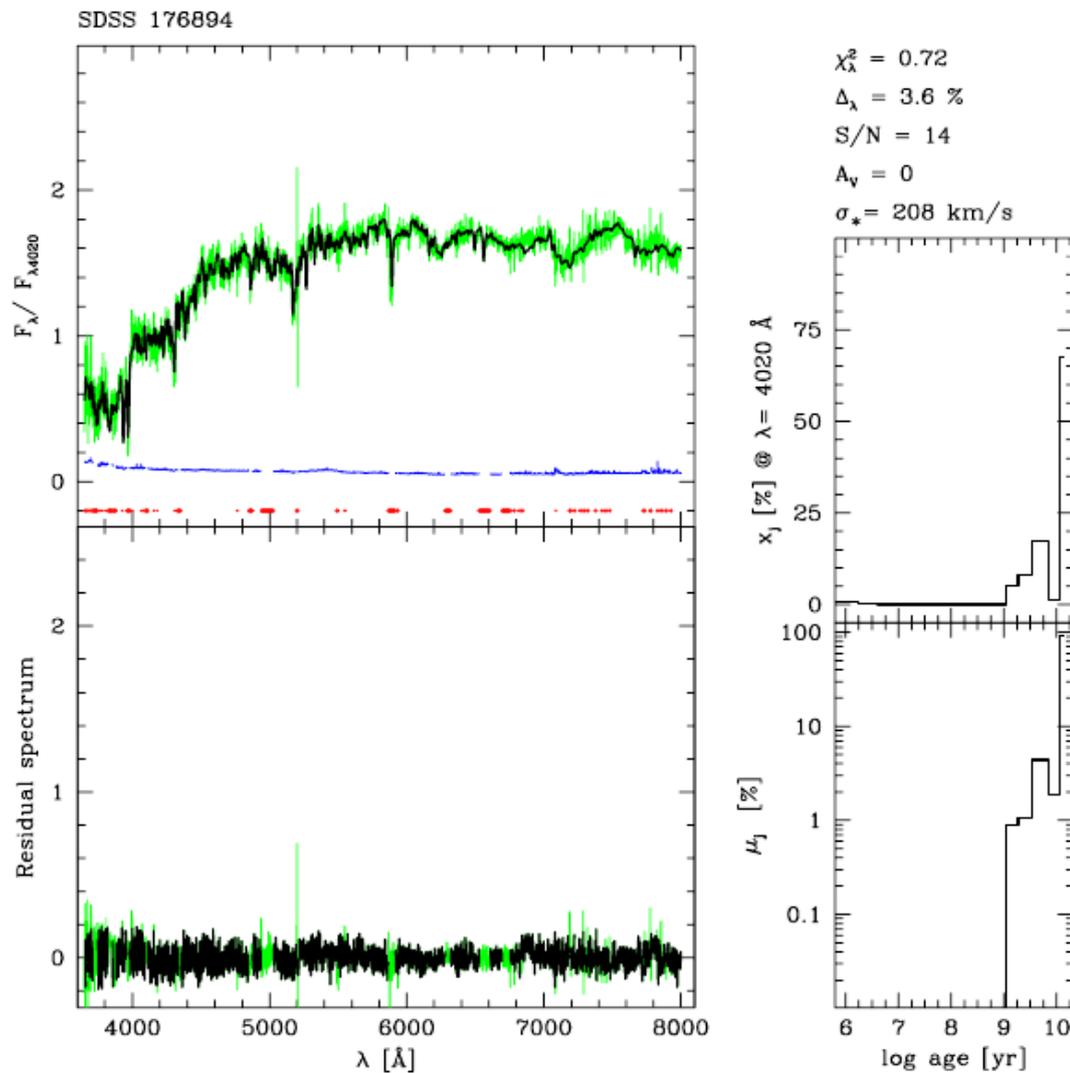


Figura 2.1: Figura retirada de [Cid Fernandes et al. \(2005\)](#), mostrando o espectro de uma galáxia *early-type* do SDSS (linha preta, painel superior esquerdo), seu espectro ajustado (linha verde, painel superior esquerdo) e seu espectro residual calculado pelo STARLIGHT (gráfico inferior direito). A linha azul no gráfico à esquerda é o erro no espectro, os pontos vermelhos mostram pixels ruins, que foram mascarados, as regiões mascaradas aparecem em verde no espectro residual. Os painéis à direita mostram distribuições de x e μ . Na parte superior direita da figura são mostrados alguns parâmetros de saída do STARLIGHT para esta galáxia.

Tabela 2.1: Definição das larguras equivalentes, $\lambda_1 - \lambda_2$ representa o intervalo de comprimentos de onda correspondentes à linha espectral.

Linha	Contínuo Azul	$\lambda_1 - \lambda_2$	Contínuo Vermelho
[O II] λ 3727	3653-3713Å	3713-3741Å	3741-3801Å
H δ	4030-4082Å	4082-4122Å	4122-4170Å
H α	6490-6537Å	6555-6575Å	6594-6640Å

Matematicamente, a largura equivalente de uma linha é dada por:

$$EW = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \left(1 - \frac{F_{I\lambda}}{F_{C\lambda}}\right) d\lambda. \quad (2.6)$$

onde $F_{I\lambda}$ e $F_{C\lambda}$ são os fluxos por unidade de comprimento de onda da linha e do contínuo, respectivamente. Utilizamos uma rotina automática para a medida das EW de uma dada linha espectral, que ajusta o contínuo definido em duas regiões nas vizinhanças da linha e mede o fluxo da linha normalizado por este contínuo. As definições destas regiões para cada linha (ou índice espectral) utilizada neste trabalho são mostradas na Tabela 2.1.

Neste trabalho, são usados dois tipos de larguras equivalentes. Larguras equivalentes calculadas usando o espectro residual¹ do STARLIGHT (Cid Fernandes et al., 2005) aliado a dados da emissão no contínuo são denotadas por EW seguido do nome da linha entre parênteses. Todas as larguras equivalentes deste tipo usadas neste trabalho são de emissão e possuem sinal positivo.

As demais larguras equivalentes encontradas neste texto foram calculadas diretamente dos espectros do SDSS DR7 e são denotadas com o subscrito “a”. Estas linhas possuem valores negativos quando em emissão, e positivos quando em absorção.

2.3.2 Linhas de Emissão

Linhas de emissão foram medidas para compor diagramas de diagnóstico. Os fluxos nestas linhas foram obtidos a partir do ajuste de uma gaussiana em torno do

¹Por espectro residual entende-se um espectro observado subtraído do espectro sintético, mantendo apenas as linhas de emissão, conforme esquematizado na Figura 2.1.

comprimento de onda central da linha em um espectro residual, eliminando assim contribuições do contínuo e da absorção estelar.

Assim como em [Mateus \(2006\)](#), as gaussianas são caracterizadas por largura, desvio com respeito ao comprimento de onda central no referencial de repouso e fluxo, considerando as seguintes razões teóricas: $[\text{O III}]\lambda 5007/[\text{O III}]\lambda 4959 = 2,97$ e $[\text{N II}]\lambda 6584/[\text{N II}]\lambda 6548 = 3,0$.

2.4 Indicadores de populações jovens e formação estelar

Esta seção tem o objetivo de rerepresentar alguns dos índices anteriormente definidos, contextualizando-os como indicadores de populações estelares jovens e formação estelar atual. Também serão definidos dois novos indicadores, f_y^L e f_y^M .

Os indicadores de idade estelar média mais usados na literatura são a largura equivalente de $H\delta$ em absorção, que possui valores altos em galáxias que tiveram um *burst* que cessou de 0,1 a 1 Gyr atrás ([Kauffmann et al., 2003](#)) e a quebra em 4000 Å, ou $D_n(4000)^2$. A correlação entre a largura equivalente de $H\delta$ e a idade estelar média ponderada em fluxo calculada pelo STARLIGHT é mostrada na Figura 2.2. Esta correlação deve-se à forte absorção em $H\delta$ presente nos espectros de estrelas do tipo A.

Neste trabalho, usaremos como indicadores de populações estelares jovens a largura equivalente de $H\delta$ e dois novos indicadores de populações jovens em galáxias, denotados por f_y^L e f_y^M . Estes dois novos indicadores correspondem às frações de luz e massa de uma dada galáxia correspondentes a estrelas com idades menores do que 1,5 Ganos. Estas variáveis são calculadas a partir de dados da síntese espectral

²Espectros de galáxias apresentam uma quebra na região ao redor de 4000 Å, que é fruto do acúmulo de linhas de absorção em uma estreita faixa de comprimentos de onda. A principal contribuição para a opacidade que gera este acúmulo de linhas vem de metais ionizados. Como em estrelas quentes estes metais serão multiplamente ionizados e a opacidade diminuirá, a quebra em 4000 Å será pequena para populações estelares jovens e grande para galáxias velhas e ricas em metais ([Kauffmann et al., 2003](#)).

do STARLIGHT e nos permitem selecionar galáxias com alta fração de estrelas jovens através de informações diretas sobre suas populações estelares.

Sendo k o índice de uma população estelar de idade 1,5 Ganos, definimos f_y^L e f_y^M como:

$$f_y^L = \sum_{j=1}^k x_j \quad (2.7)$$

$$f_y^M = \sum_{j=1}^k \mu_j \quad (2.8)$$

As relações de f_y^L e f_y^M com a largura equivalente de $H\delta$, $\langle \log t_\star \rangle_L$ e $\langle \log t_\star \rangle_M$ são mostradas na Figura 2.3.

A fração de luz f_y^L mostra-se diretamente proporcional a $EW(H\delta)_a$, inversamente proporcional a $\langle \log t_\star \rangle_L$ e pouco sensível a variações em $\langle \log t_\star \rangle_M$. A fração de massa f_y^M mostra o mesmo comportamento, porém, como são poucas as galáxias que formaram uma fração considerável de sua massa nos últimos 1,5 Ganos, os valores típicos desta variável são baixos e as relações são menos visíveis.

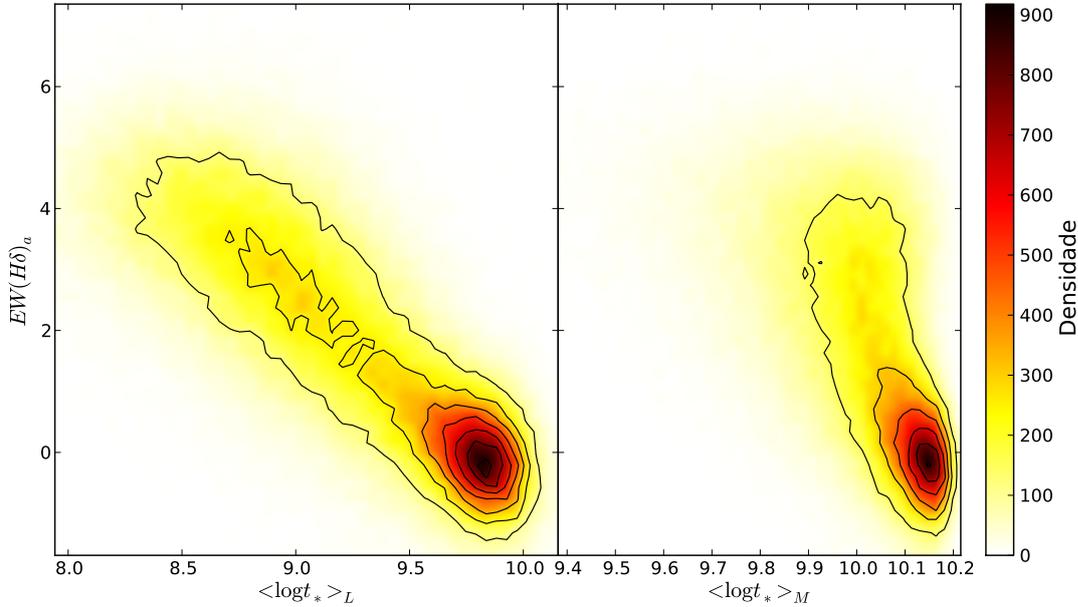


Figura 2.2: Correlação entre as idades estelares médias ponderadas em fluxo e massa ($\langle \log t_\star \rangle_L$ e $\langle \log t_\star \rangle_M$) calculadas pelo STARLIGHT e $EW(H\delta)_a$.

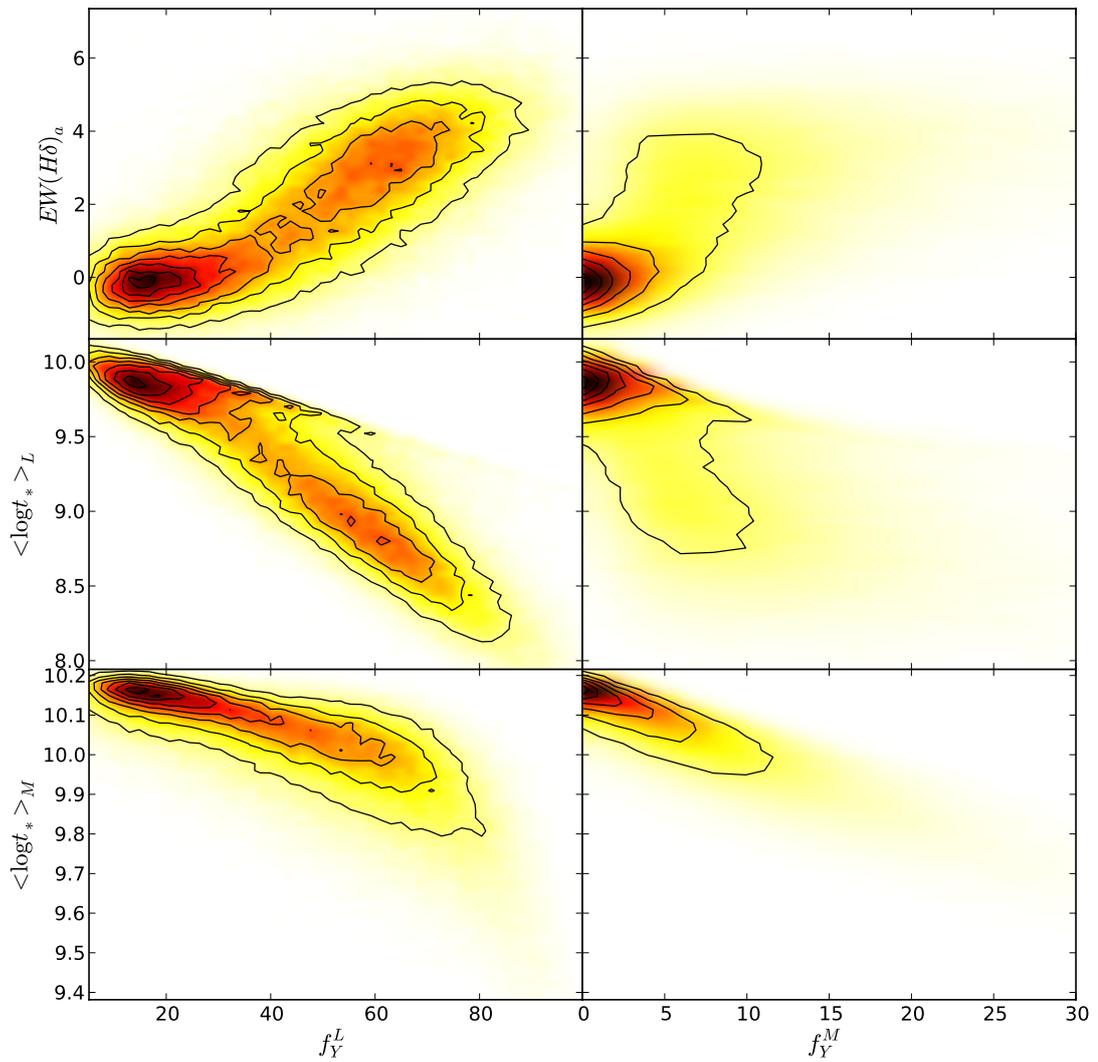


Figura 2.3: Correlação de f_Y^L e f_Y^M com a largura equivalente de $H\delta$ (painéis superiores), $\langle \log t_* \rangle_L$ (painéis centrais) e $\langle \log t_* \rangle_M$ (painéis inferiores).

Galáxias com formação estelar costumam apresentar forte emissão nas linhas $[\text{O II}]\lambda 3727$ e $\text{H}\alpha$. A linha de $[\text{O II}]\lambda 3727$ é mais usada para objetos em alto *redshift*, nos casos em que a linha de $\text{H}\alpha$ é deslocada para o infravermelho. Neste trabalho, usaremos a largura equivalente de $\text{H}\alpha$ como principal indicador de formação estelar atual.

Outro indicador de formação estelar usado neste trabalho é a razão de linhas $\log([\text{N II}]/\text{H}\alpha)$ ³, que deve assumir valores mais negativos do que $-0,4$ para galáxias com formação estelar (Cid Fernandes et al., 2011). Este critério será discutido com mais detalhes nas seções 3.2 e 3.3.2.

O critério usual para definir que não existe emissão em $[\text{O II}]$ ⁴ e $\text{H}\alpha$ nos espectros do SDSS é considerar uma largura equivalente em emissão menor do que $2,5 \text{ \AA}$.

2.5 Morfologia: o Galaxy Zoo

Utilizamos o banco de dados disponibilizado pelo projeto *Galaxy Zoo* para classificar a morfologia das galáxias. O *Galaxy Zoo* (Lintott et al., 2011, 2008) é um projeto *on-line* que convida voluntários a classificar a morfologia de mais de um milhão de galáxias. Os dados usados neste trabalho são provenientes do *Galaxy Zoo 1*, que possui classificações para mais de 900 mil galáxias.

Os usuários do *Galaxy Zoo* classificam morfologicamente as galáxias do SDSS respondendo a uma série de perguntas⁵. Os dados disponibilizados contêm a fração de usuários que responderam “sim” para uma dada alternativa, e também uma fração corrigida considerando o nível de experiência do usuário para classificar as galáxias, conforme descrito por Lintott et al. (2008).

Definimos S_f e E_f como as probabilidades de uma galáxia ser espiral ou elíptica. Assim como em Lintott et al. (2011), consideramos que uma galáxia é de um dado

³Neste texto, $[\text{N II}]$ refere-se a $[\text{N II}]\lambda 6584$.

⁴Neste texto, $[\text{O II}]$ refere-se a $[\text{O II}]\lambda 3727$.

⁵No caso do *Galaxy Zoo 1*, as galáxias são classificadas em elípticas, espirais e remanescentes de fusões, o questionário do *Galaxy Zoo 2* é mais complexo e gera mais classificações.

tipo morfológico quando a probabilidade é maior do que 0,5 (critério **greater**), ou quando uma galáxia possui uma probabilidade maior do que 0,8 (critério **clean**).

Na identificação de vestígios de fusões, foi adotado um critério menos rigoroso. Definimos que uma galáxia apresenta vestígios de fusões quando esta afirmativa é feita por, pelo menos, 30% dos usuários do *Galaxy Zoo*, e a fusão é considerada evidente quando é identificada por mais de 80% dos usuários. A probabilidade de uma galáxia apresentar sinais de fusão é denotada por M_f .

2.6 Ambiente: densidade local de galáxias

Utilizamos a densidade local projetada de galáxias para caracterizar o ambiente de uma galáxia. Adotamos um estimador de densidade baseado na distância ao k -ésimo vizinho mais próximo (k NN, *k-Nearest Neighbour*), onde limitamos espaço de velocidades em torno de uma dada galáxia no intervalo $\pm 1000 \text{ km s}^{-1}$ para determinar a densidade local projetada (e.g. [Mateus et al., 2007](#)).

Para estimar a densidade local de galáxias, utilizamos a expressão:

$$\Sigma_k = k/\pi r_k^2, \quad (2.9)$$

onde r_k é a distância projetada ao k -ésimo vizinho de uma dada galáxia. Para evitar uma estimativa incorreta da densidade devido a efeitos de borda excluimos as galáxias localizadas próximas dos limites do volume considerado, ou seja, galáxias cujos k -ésimos vizinhos poderiam estar fora do volume.

Determinamos nossas estimativas de densidade local de galáxias considerando os valores $k = 5$, $k = 8$ e $k = 10$, com o objetivo de investigar a influência da escolha deste parâmetro nos resultados.

Capítulo 3

Classificação e seleção da amostra

3.1 Amostra geral

Nossa amostra geral é limitada em volume e contém 162 538 objetos extraídos do SDSS DR7 com *redshift*, z , entre 0,04 e 0,095 e magnitude absoluta na banda r , $M(r)$ mais brilhante do que $-20,4$. O limite em magnitude aparente dessa amostra é $r = 17,77$.

A vantagem da utilização de uma amostra limitada em volume é que, neste tipo de amostra, a função de seleção radial é uniforme, fazendo com que as variações de densidade espacial de galáxias dentro de cada volume sejam devidas apenas a aglomerações (Mateus, 2006). Esta característica garante uma amostra adequada para estudos do ambiente das galáxias.

3.2 Classificação espectral

O esquema usual para a classificação de galáxias quanto à origem de suas linhas de emissão é baseado em diagramas de diagnóstico, como o proposto por Baldwin et al. (1981), chamado “diagrama BPT”, que utiliza as razões de linhas $[\text{O III}]\lambda 5007/\text{H}\beta$ versus $[\text{N II}]\lambda 6584/\text{H}\alpha$. Este tipo de diagrama basicamente classifica as galáxias em dois tipos de acordo com o mecanismo físico que produz as linhas de emissão: (i) galáxias com formação estelar intensa, povoadas por regiões H II nas quais o gás

é fotoionizado por estrelas jovens e quentes, e (ii) galáxias hospedeiras de núcleos ativos (AGN), os quais são responsáveis pela fotoionização do gás que emite as linhas.

Para utilização do diagrama BPT é necessário que as linhas de $[\text{N II}]\lambda 6584$, $\text{H}\alpha$, $\text{H}\beta$ e $[\text{O III}]\lambda 5007$ estejam presentes no espectro de uma galáxia com razão sinal-ruído boa suficiente (e.g. $S/N > 3,0$), o que reduz significativamente a quantidade de galáxias que podem ser classificadas. Além deste fator, o diagrama BPT não é adequado para identificar galáxias cujas linhas de emissão são originadas por estrelas pós-AGB, que geram razões de linhas semelhantes às de galáxias com núcleos ativos.

Um diagrama alternativo ao BPT é o diagrama WHAN, proposto por [Cid Fernandes et al. \(2011\)](#). Este diagrama requer apenas as linhas de $[\text{N II}]\lambda 6584$ e $\text{H}\alpha$ e é adequado para classificar galáxias com núcleos ativos, galáxias com formação estelar, além de galáxias com ionização provocada por estrelas velhas.

A classificação espectral usada neste trabalho segue o mesmo esquema proposto por [Cid Fernandes et al. \(2011\)](#), baseado no diagrama WHAN:

- Galáxias aposentadas (*retired*): $EW(\text{H}\alpha)$ entre $0,5\text{\AA}$ e 3\AA ;
- Galáxias passivas: $EW(\text{H}\alpha)$ ou $EW([\text{N II}])$ menores do que $0,5\text{\AA}$;
- Galáxias *star-forming*: $\log([\text{N II}]/\text{H}\alpha) < -0,4$ e $EW(\text{H}\alpha) > 3\text{\AA}$;
- AGN fraco (wAGN): $\log([\text{N II}]/\text{H}\alpha) > 0,4$ e $EW(\text{H}\alpha)$ entre 3\AA e 6\AA ;
- AGN forte (sAGN): $\log([\text{N II}]/\text{H}\alpha) > 0,4$ e $EW(\text{H}\alpha)$ maior do que 6\AA .

A Figura 3.1 apresenta o diagrama WHAN para nossa amostra. Na amostra geral, 37867(23,3%) galáxias são *star-forming*, 34089(21%) são sAGN, 13638(8,4%) são wAGN, 43532(26,8%) são aposentadas e 32968(20,3%) são passivas.

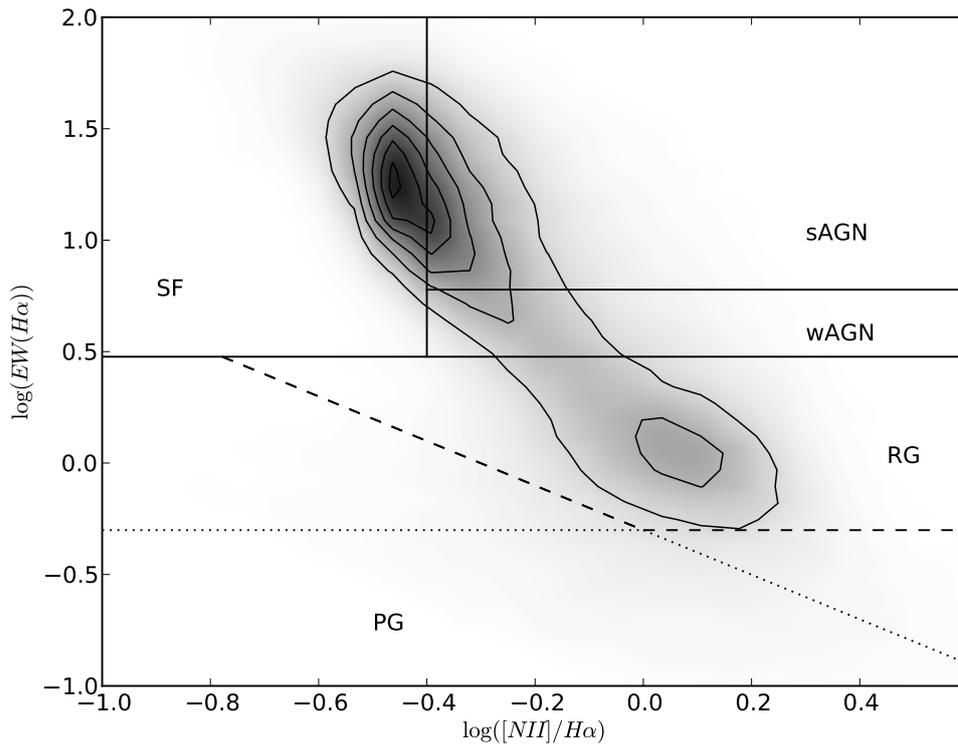


Figura 3.1: Diagrama WHAN (Cid Fernandes et al., 2011) para a amostra geral, são incluídas apenas galáxias com medidas de $H\alpha$ e $[N II]$.

3.3 Classificações de Galáxias post-starburst

3.3.1 Classificações encontradas na literatura

Esta seção tem por objetivo fazer uma breve revisão dos critérios que costumam ser usados para definir galáxias *post-starburst*.

Como galáxias *post-starburst* foram primeiramente encontradas em aglomerados de galáxias a *redshifts* moderados ($z \sim 0,3$) (Dressler & Gunn, 1983; Dressler et al., 1999; Poggianti et al., 1999; Balogh et al., 1999). Como a linha de $H\alpha$ é ausente em espectros ópticos para estes *redshifts*, as primeiras classificações de galáxias *post-starburst* usavam a largura equivalente de $[O II]$ como único indicador de formação estelar atual, e $EW(H\delta)_a$ ou $D_n(4000)$ como indicadores de idade estelar (Dressler et al., 1999; Poggianti et al., 1999; Balogh et al., 1999).

A largura equivalente de $[O II]$ manteve-se por muito tempo como o indicador de formação estelar recente mais usado em trabalhos sobre galáxias PSB, já que

o uso desta linha espectral permite que sejam feitas comparações entre resultados obtidos para amostras com diferentes intervalos de *redshift*.

A partir de dados de 10 aglomerados de galáxias distantes ($z \sim 0,3$), [Dressler et al. \(1999\)](#) definem as características espectrais de galáxias *post-starburst* (denominadas $k + a$ e $a + k$) como a ausência de [O II] ($EW([O II]) < 3 \text{ \AA}$) e largura equivalente de H δ em absorção entre 3 e 8 \AA (para as $k + a$) ou maior do que 8 \AA (para as $a + k$). Esta mesma classificação foi posteriormente adotada por [Poggianti et al. \(1999\)](#).

Usando os mesmos dados de [Dressler et al. \(1999\)](#), [Balogh et al. \(1999\)](#) definem uma amostra de galáxias PSB usando outros critérios, estes são: $EW([O II]) < 5 \text{ \AA}$ e $EW(H\delta) > 5 \text{ \AA}$. [Balogh et al. \(1999\)](#) fazem uma comparação entre a incidência de galáxias PSB em aglomerados e no campo, encontrando uma fração de 2,1% em aglomerados e 0,1% no campo. A fração de galáxias PSB em aglomerados de galáxias encontrada por [Poggianti et al. \(1999\)](#), a partir dos mesmos dados e com os critérios citados no parágrafo anterior, é de 20%, tal diferença mostra o quanto os resultados encontrados são dependentes dos critérios de seleção.

[Goto \(2005\)](#) seleciona 266 galáxias *post-starburst* (chamadas de $E + A$ em seu trabalho) do SDSS DR2 usando os seguintes critérios: $EW(H\delta)_a > 5,0 \text{ \AA}$, $EW(H\alpha)_a > -3,0 \text{ \AA}$, $EW([O II])_a > -2,5 \text{ \AA}$. Os resultados obtidos por [Goto \(2005\)](#) mostram que galáxias *post-starburst* não devem ter sua origem em interações com o meio denso dos aglomerados, mas em fusões e interações com galáxias próximas. Uma amostra selecionada com os mesmos critérios de [Goto \(2005\)](#) será usada neste trabalho como amostra de comparação.

[Yan et al. \(2008\)](#) chamam atenção para os efeitos de seleção gerados pelos critérios supracitados e para as limitações da largura equivalente de [O II] como indicador de formação estelar, geradas pela bimodalidade no diagrama $EW([O II])$ versus $EW(H\alpha)$. Seus resultados mostram que galáxias *post-starburst* aparecem no diagrama $EW([O II])$ versus $EW(H\alpha)$ como uma população diferenciada em H α , porém não necessariamente em [O II].

3.3.2 Uma nova classificação

Nesta seção, iremos nos basear no diagrama WHAN para introduzir um novo conjunto de critérios para a seleção de galáxias PSB.

Conforme citado anteriormente, amostras de galáxias *post-starburst* requerem dois tipos de critérios: limitantes de formação estelar atual e indicadores de incidência de populações estelares jovens. Os critérios usuais são baixas larguras equivalentes de [O II] e H α e para indicar ausência de formação estelar (e.g $EW([O II]) < 5\text{\AA}$ e $EW(H\alpha) < 5\text{\AA}$) e altas larguras equivalentes de H δ (em absorção) para indicar altas quantidades de estrelas jovens (e.g $EW(H\delta)_a > 5\text{\AA}$).

O uso das larguras equivalentes de [O II] ou H α como o únicos indicadores de formação estelar está associado a uma hipótese subjacente: a hipótese de que toda a ionização desta linha está associada com formação estelar (Yan et al., 2008). A linha de H α é um indicador mais confiável do que [O II], porém, seu uso como único indicador pode produzir amostras poluídas por galáxias *star-forming*, e com fortes efeitos de seleção.

A procura por novos indicadores de formação estelar faz-se necessária, pois uma alta ionização em H α e [O II] pode ser produzida por um AGN e não por formação estelar. Ao se limitar as larguras equivalentes destas linhas, estamos introduzindo efeitos de seleção nas amostras de galáxias *post-starburst* e excluindo a possibilidade do estudo do *feedback* de núcleos ativos como mecanismo de truncamento de formação estelar nestas galáxias.

Uma possível solução para o problema supracitado seria usar $\log([N II]/H\alpha) > -0,4$ para selecionar galáxias sem formação estelar, porém, este critério não garante galáxias sem formação estelar, seu uso garante apenas uma amostra em que a formação estelar não é o mecanismo de ionização predominante. Conforme esperado, uma tentativa de produzir uma amostra onde a ausência de formação estelar é completamente satisfeita usando-se apenas $\log([N II]/H\alpha) > -0,4$ e nenhum limite em $EW(H\alpha)$ resultou em uma amostra claramente poluída. Portanto, um critério

exigindo $EW(H\alpha) < 6\text{\AA}$ para galáxias *post-starburst* mostra-se necessário, apesar de excluir a possibilidade de encontrar galáxias sAGN na amostra.

Um limite inferior em $EW(H\alpha)$ mostrou-se necessário devido à ocorrência de galáxias onde a linha de $H\alpha$ não estava detectada, mas em que a ionização de [O II] mostrou-se típica de galáxias com formação estelar. Este mesmo tipo de poluição é eliminado por Goto (2005) através da adição de um limite em [O II].

A análise de uma amostra de galáxias *post-starburst* selecionada pelo método proposto por Goto (2005) (chamaremos esta amostra de amostra de comparação) indica que a maior parte das galáxias deste tipo possuem f_Y^L maior do que 70%. Baseando-se nesta análise, define-se um limite inferior de 70% em f_Y^L para nossa amostra de galáxias *post-starburst*. Os histogramas de f_Y^L e f_Y^M para a amostra de comparação constam na Figura 3.2.

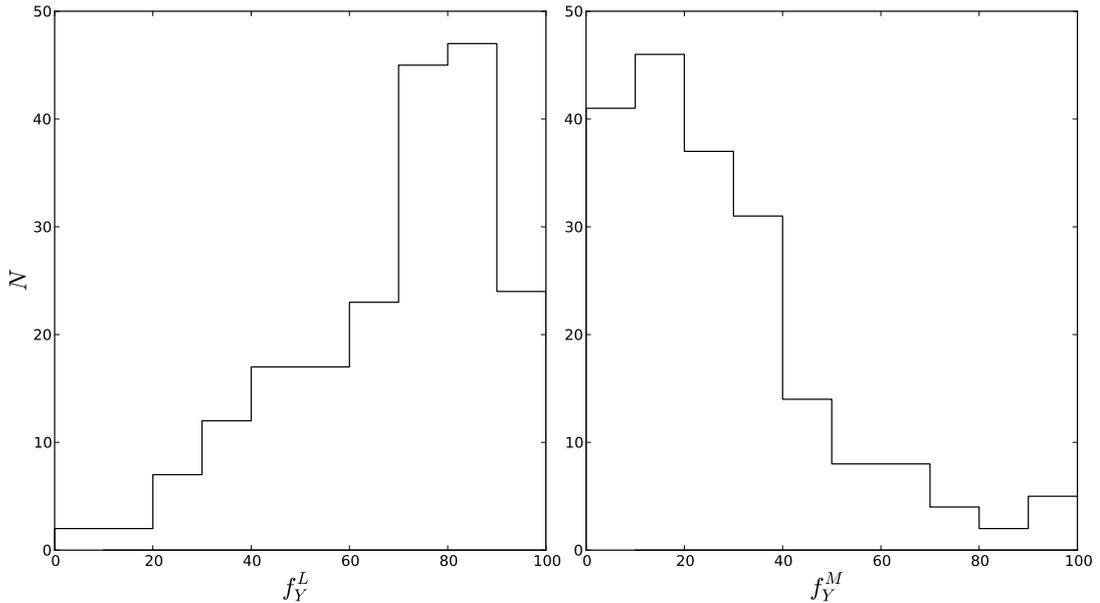


Figura 3.2: Histogramas de f_Y^L e f_Y^M em uma amostra de galáxias PSB selecionadas pelo método de Goto (2005), percebe-se a predominância de galáxias com $f_Y^L > 70\%$.

Algumas galáxias com $EW(H\delta)$ muito baixo aparecem na amostra selecionada com $f_Y^L > 70\%$. Estas foram eliminadas exigindo-se que o erro na medida da largura equivalente em absorção de $H\delta$ seja menor do que 10%.

Sendo assim, propomos os seguintes critérios para a seleção de galáxias *post-starburst*, baseados no diagrama WHAN: $f_y^L > 70\%$; $0\text{\AA} < EW(\text{H}\alpha) < 6\text{\AA}$, $\log([\text{N II}]/\text{H}\alpha) > -0,4$ e pelo menos 10% de precisão na medida de $EW(\text{H}\delta)_a$.

O limite na largura equivalente de $\text{H}\alpha$ produz naturalmente uma amostra limitada em $[\text{O II}]$, conforme indicado na Figura 3.4. Algumas galáxias com alto $[\text{O II}]$ permanecem na amostra, esta ionização pode ser devida a um núcleo ativo, visto que é maior para galáxias com $EW(\text{H}\alpha) > 3\text{\AA}$.

3.4 Amostras de galáxias post-starburst

Foram geradas três amostras de galáxias PSB. A primeira, que foi selecionada usando os critérios introduzidos neste trabalho, será chamada de “amostra principal”; a segunda, chamada de “amostra de comparação”, foi selecionada usando os critérios de Goto (2005) ($EW(\text{H}\delta)_a > 5,0\text{\AA}$, $EW(\text{H}\alpha)_a > -3,0\text{\AA}$, $EW([\text{O II}]_a > -2,5\text{\AA})$) e a terceira, que foi selecionada usando apenas $EW(\text{H}\delta)$ e $EW(\text{H}\alpha)$, será chamada de “amostra de comparação 2”.

A amostra de comparação 2 tem critérios parecidos com os de Goto (2005), porém, sem o uso de $EW([\text{O II}]_a)$, critério que foi considerado redundante, e com largura equivalente de $\text{H}\alpha$ calculada a partir do espectro residual gerado pelo STARLIGHT (Cid Fernandes et al., 2005), conforme descrito na seção 2.3.1. Os critérios desta amostra são: $EW(\text{H}\alpha) < 3\text{\AA}$ e $EW(\text{H}\delta)_a > 5\text{\AA}$.

A amostra principal contém 427 objetos, enquanto a amostra de comparação contém 196 e a amostra de comparação 2 contém 310.

3.4.1 Comparações Entre as Amostras

Nesta seção, iremos comparar nossas três amostras de galáxias PSB a fim de testar os critérios de seleção introduzidos neste trabalho, e também os encontrados na literatura.

Dos 196 objetos da amostra de comparação, 81 estão contidos na amostra principal, o que representa uma compatibilidade de 41,3%. Estes mesmos 81 objetos são encontrados na amostra de comparação 2.

A amostra principal contém 47% da amostra de comparação 2, e a amostra de comparação 2 contém 34% da amostra principal, o número total de objetos que encontram-se nas duas amostras é 146. Cerca de 143 objetos(63%) da amostra de comparação estão contidos na amostra de comparação 2.

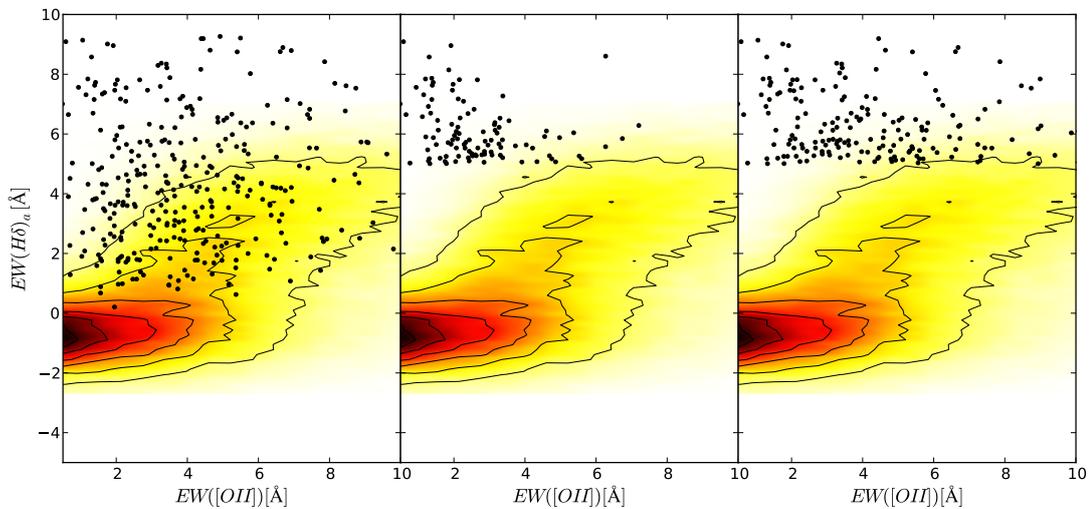


Figura 3.3: Diagrama $EW([O II])$ versus $EW(H\delta)_a$. Alguns autores (e.g. Balogh et al. 1999) usam este diagrama para selecionar galáxias PSB. Galáxias da amostra geral são plotadas como um histograma bidimensional. Os pontos pretos correspondem a galáxias PSB da amostra principal (painel à esquerda), amostra de comparação (painel central) e amostra de comparação 2 (painel à direita).

A Figura 3.3 compara as distribuições de $[O II]$ e $H\delta$ nas três amostras de galáxias PSB selecionadas. A amostra principal e a amostra de comparação 2 mostram-se mais dispersas em $EW([O II])$ do que a amostra selecionada pelos critérios de Goto (2005). Esta característica é esperada, já que $EW([O II])$ é um parâmetro livre nessas amostras. O mesmo efeito ocorre para $EW(H\delta)$ na amostra geral. Apesar desta dispersão, encontra-se na amostra principal uma predominância de galáxias com valores de $EW([O II])_a$ e $EW(H\delta)_a$ compatíveis com os critérios de Goto (2005).

A Figura 3.4 mostra histogramas dos indicadores usados na seleção das amostras, comparando as três amostras de galáxias PSB.

Apesar das diferenças em $H\delta$ mostradas na Figura 3.3, as três amostras apresentam distribuições de idade estelar média bastante parecidas, tanto ponderada em fluxo quanto ponderada em massa (Figura 3.4(a) e (b)). Esta semelhança entre as distribuições de idade estelar média é um indicador da credibilidade do STARLIGHT (Cid Fernandes et al., 2005), e também do método de identificação de galáxias *post-starburst* introduzido neste trabalho.

Ambas amostras de comparação apresentam galáxias com f_y^M consideravelmente baixas (Figura 3.4 (b) e (c)), que aparecem em menor quantidade na amostra principal.

O histograma (e) da Figura 3.4 mostra que, mesmo com um limite em $EW([O II])_a$, a amostra de comparação apresenta uma dispersão em $EW([O II])$ comparável com a das outras amostras. Este efeito pode estar associado a ruídos, principalmente na medida de $EW([O II])_a$. A presença de ruído na medida deste indicador pode ser inferida pelo fato de que, mesmo sendo $[O II]$ uma linha de emissão (largura equivalente de absorção negativa), $EW([O II])_a$ apresenta uma incidência considerável de valores positivos.

A dispersão nos valores de $EW(H\alpha)$ observada na amostra de comparação deve-se ao fato de que ela é gerada usando $EW(H\alpha)_a$ como indicador.

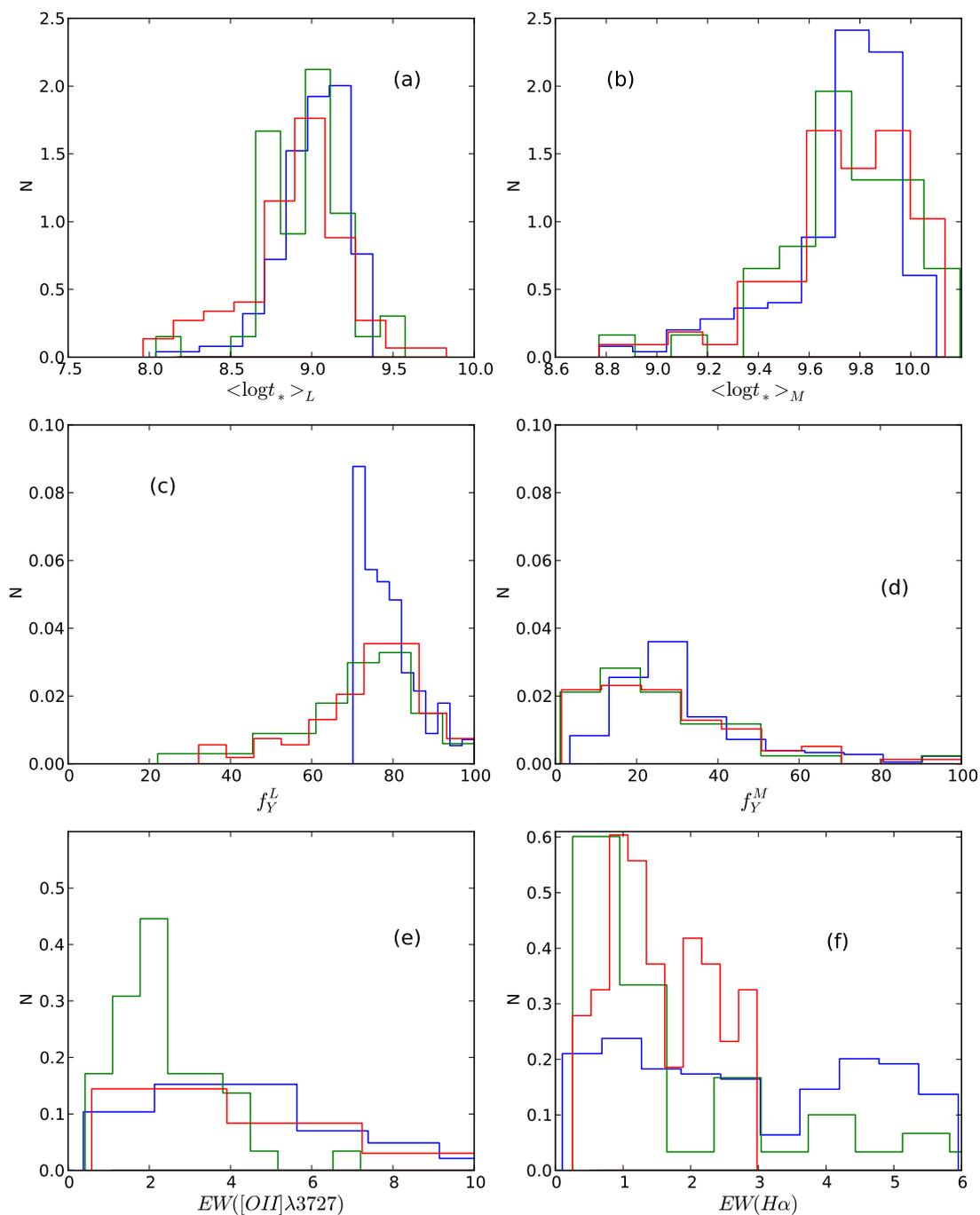


Figura 3.4: Histogramas normalizados de (a) Idade estelar média ponderada em fluxo (b) Idade estelar média ponderada em massa (c) f_Y^L , (d) f_Y^M , (e) $EW([O II] \lambda 3727)$, (f) $EW(H\alpha)$. As linhas azuis representam a amostra principal, as verdes representam a amostra de comparação e as vermelhas a amostra de comparação 2.

Capítulo 4

Propriedades de Galáxias

Post-Starburst

Este capítulo consiste em uma investigação das propriedades de galáxias PSB encontradas nas amostras descritas anteriormente.

O conteúdo está organizado da seguinte maneira: a seção 4.1 discute a classificação de galáxias PSB no diagrama WHAN e suas características espectrais; a seção 4.2 faz uma breve descrição das propriedades fotométricas de galáxias PSB encontradas no banco de dados do SDSS; a seção 4.3 refere-se ao banco de dados do STARLIGHT e nela são apresentadas propriedades de populações estelares e histórias de formação estelar para galáxias PSB, uma bimodalidade encontrada na população de galáxias PSB é discutida nesta seção; as seções 4.4 e 4.5 discutem, respectivamente, o ambiente e a morfologia destas galáxias.

Neste capítulo, o termo “galáxias PSB” refere-se a galáxias da amostra principal, a não ser que outra amostra seja especificada.

4.1 Classificação Espectral de Galáxias PSB

4.1.1 Galáxias PSB no Diagrama WHAN

No nosso esquema de classificação proposto no capítulo anterior, galáxias PSB possuem largura equivalente de $H\alpha$ menor do que 6 \AA , o que limita sua distinção em três possibilidades: galáxias passivas, aposentadas ou wAGN. Dos 427 objetos da nossa amostra, 82 (19,20%) são galáxias passivas, 249 (58,31%) são galáxias aposentadas e 96 (22,48%) são wAGN.

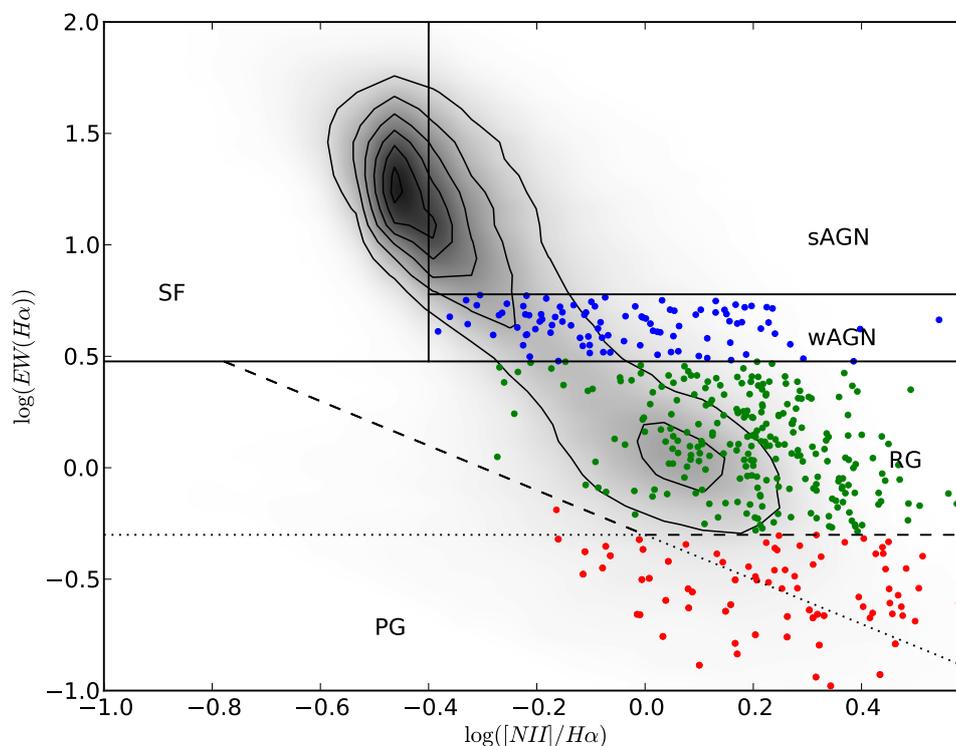


Figura 4.1: Diferentes classes de galáxias PSB no diagrama WHAN (Cid Fernandes et al., 2011). A amostra geral é plotada como um histograma 2D, galáxias PSB passivas são plotadas em vermelho, galáxias PSB aposentadas são plotadas em verde e galáxias PSB wAGN em azul, são incluídas apenas galáxias com medidas de $H\alpha$ e $[N II]$.

4.1.2 Núcleos ativos

Conforme mencionado anteriormente, o diagrama usual para a classificação de galáxias quanto ao mecanismo que produz suas linhas de emissão é o diagrama BPT.

Este diagrama tem $\log([\text{N II}]\lambda 6584/\text{H}\alpha)$ como abscissa e $\log([\text{O III}]\lambda 5007/\text{H}\beta)$ em sua ordenada. Existem várias linhas separando classes de galáxias neste diagrama (e.g. [Kewley et al. 2001](#), [Kauffmann et al. 2003](#), [Stasińska et al. 2006](#), [Kewley et al. 2006](#)), porém, as classificações oriundas deste podem ser sumarizadas da seguinte maneira: a forma do diagrama BPT para uma grande amostra de galáxias é semelhante às asas de uma gaivota, a asa esquerda sendo povoada por galáxias *star-forming*, e a asa direita por galáxias com linhas de emissão provenientes de núcleos ativos.

O diagrama WHAN é considerado o mais adequado para classificar galáxias de acordo com a origem da emissão pois este leva em conta as diferentes possibilidades para a origem de linhas de emissão, enquanto o diagrama BPT apresenta uma região de alta superposição de galáxias com núcleos ativos e galáxias com linhas de emissão ionizadas por estrelas velhas e quentes.

Usando uma classificação espectral baseada apenas no diagrama BPT, [Yan et al. \(2008\)](#) encontram em sua amostra de galáxias PSB uma alta incidência de LINERs (*low ionization nuclear emission line regions*), e uma quantidade considerável de *Seyferts*. Os equivalentes de LINERs e *Seyferts* na classificação usada neste trabalho ([Cid Fernandes et al., 2011](#)) são, respectivamente, wAGN e sAGN. Logo, considerando a Figura 4.1, o resultado de [Yan et al. \(2008\)](#) é incompatível com os encontrados neste trabalho.

Os valores de $\log([\text{N II}]/\text{H}\alpha)$ são tipicamente altos em galáxias PSB, como mostra a Figura 4.1, o que pode fazer com que suas posições no diagrama BPT coincidam com regiões ocupadas por galáxias com núcleos ativos, tendência que não é observada no diagrama WHAN.

A baixa incidência de galáxias wAGN encontrada usando a classificação de [Cid Fernandes et al. \(2011\)](#) é um indício de que galáxias PSB classificadas como hospedeiras de AGN na literatura podem ser, na verdade, AGNs falsos ([Stasińska et al., 2008](#)). Um resultado semelhante é encontrado por [Mendel et al. 2013](#), em um estudo sobre galáxias passivas jovens (*recently quenched galaxies*) no SDSS.

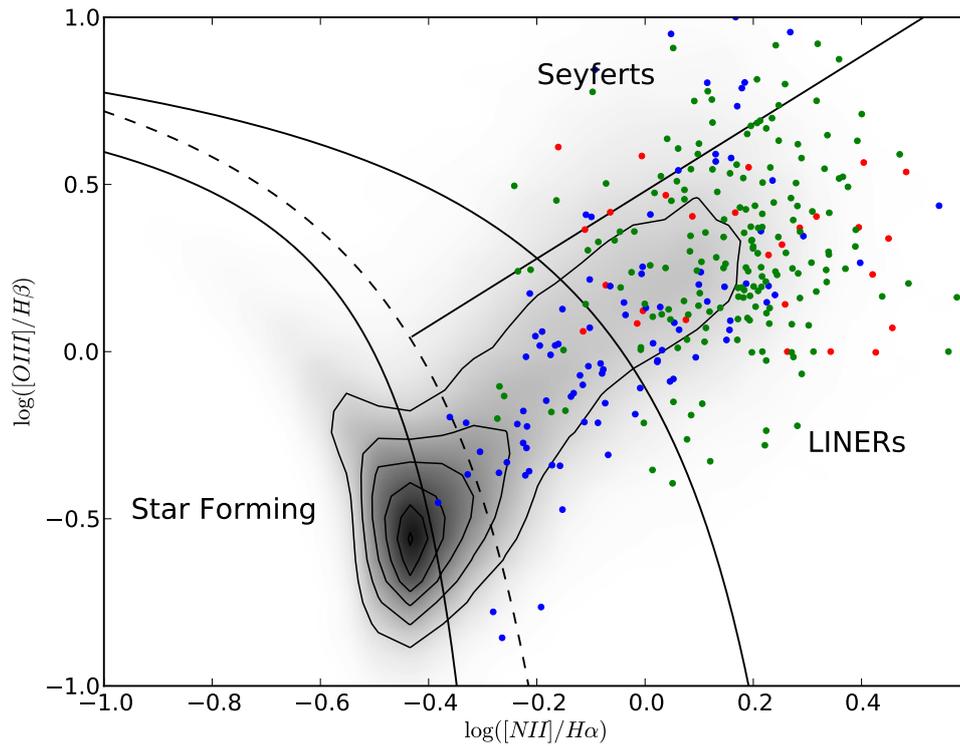


Figura 4.2: Diferentes classes de galáxias PSB no diagrama BPT (Baldwin et al., 1981). A amostra geral é plotada como um histograma 2D, galáxias PSB passivas são plotadas em vermelho, galáxias PSB aposentadas são plotadas em verde e galáxias PSB wAGN em azul. A linha sólida mais à esquerda representa o limite em que a ionização das linhas pode ser completamente explicada por formação estelar (Stasińska et al., 2006), a linha tracejada representa o mesmo efeito, porém foi definida empiricamente por Kauffmann et al. (2003), a linha mais à direita indica o limite a partir do qual não há mais formação estelar (Kewley et al., 2001) e a linha reta separa LINERs de Seyferts (Kewley et al., 2006). São incluídas apenas galáxias com medidas de $H\alpha$, $[N II]$, $[O III]\lambda 5007$ e $H\beta$, representando 69,7% da amostra de galáxias PSB.

4.1.3 Linhas de Emissão

A Figura 4.3 mostra histogramas de larguras equivalentes de $[N II]$ e $[O II]$ para diferentes classes espectrais de galáxias PSB. Escolhemos a linha de $[N II]$ por sua importância nas classificações espectrais adotadas e a linha de $[O II]$ por ser um critério tradicional para a identificação de galáxias PSB. As linhas de $H\beta$ e $[O III]$ possuem distribuições muito próximas a zero e não variam para diferentes classes de galáxias PSB.

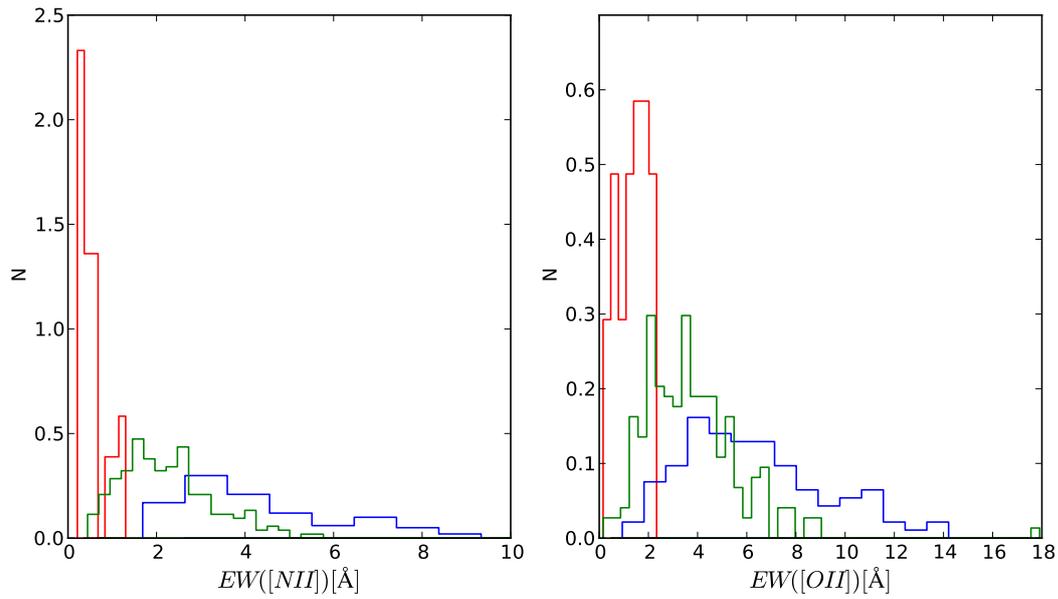


Figura 4.3: Histogramas normalizados de larguras equivalentes de linhas de emissão para diferentes classes espectrais de galáxias PSB. Seguindo o mesmo esquema de cores da Figura 4.1, galáxias PSB wAGN são plotadas em azul, galáxias PSB aposentadas em verde e galáxias PSB passivas em vermelho.

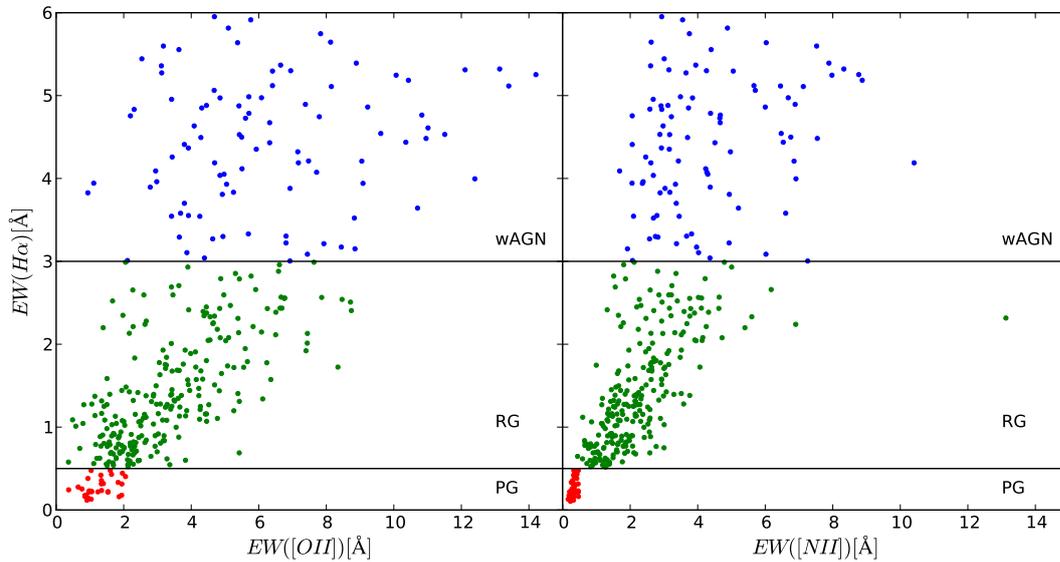


Figura 4.4: Diagramas $[N II] \times H\alpha$ e $[N II] \times H\alpha$ para diferentes classes espectrais de galáxias PSB. Galáxias PSB wAGN são plotadas em azul, galáxias PSB aposentadas em verde e galáxias PSB passivas em vermelho.

Entre as galáxias PSB em nossa amostra, 69,7% apresentam medidas de linhas de emissão tanto em $[O II]$ quanto em todas as linhas usadas na composição do diagrama BPT.

As emissões mais fortes são observadas em galáxias wAGN. Apesar de suas razões $[N II]/H\alpha$ serem as menores entre galáxias PSB, estas são as galáxias com maiores larguras equivalentes de $[N II]$. Galáxias PSB wAGN também são responsáveis pela maior parte da emissão em $[O II]$ observada na amostra principal, reforçando o argumento de que esta emissão é gerada por um AGN, e não representa poluição por galáxias com formação estelar na amostra.

Outra maneira de ilustrar estas distribuições está apresentada na Figura 4.4, que mostra a relação entre as larguras equivalentes de $[O II]$ e $[N II]$ com a largura equivalente de $H\alpha$. A maior parte das galáxias PSB apresenta larguras equivalentes de $[O II]$ e de $[N II]$ menores do que 6\AA .

Fica visível na figura 4.4 que galáxias PSB formam uma sequência nos dois diagramas, e que esta sequência se desfaz para valores altos de $H\alpha$. Tal característica deve ser consequência da superposição de mecanismos de ionização em galáxias com $EW(H\alpha)$ mais alto.

4.2 Características Fotométricas

O diagrama cor-magnitude de galáxias (Baldry et al., 2004) apresenta uma clara bimodalidade. Galáxias com cor azul formam a chamada nuvem azul, e são predominantemente espirais e ricas em populações estelares jovens e formação estelar. Galáxias elípticas e com populações estelares velhas formam a sequência vermelha. A região entre a sequência vermelha e a nuvem azul é chamada de “vale verde”.

Na Figura 4.5, compomos um diagrama cor-magnitude a partir dos dados do SDSS. A sequência vermelha aparece à direita e a nuvem azul à esquerda.

Conforme esperado, galáxias *post-starburst* residem predominantemente no vale verde e devem evoluir para entrar na sequência vermelha. Segundo Wild et al. (2009), galáxias *post-starburst* podem representar até 38% do fluxo de massa que compõe sequência vermelha em altos *redshifts* ($z \sim 1$).

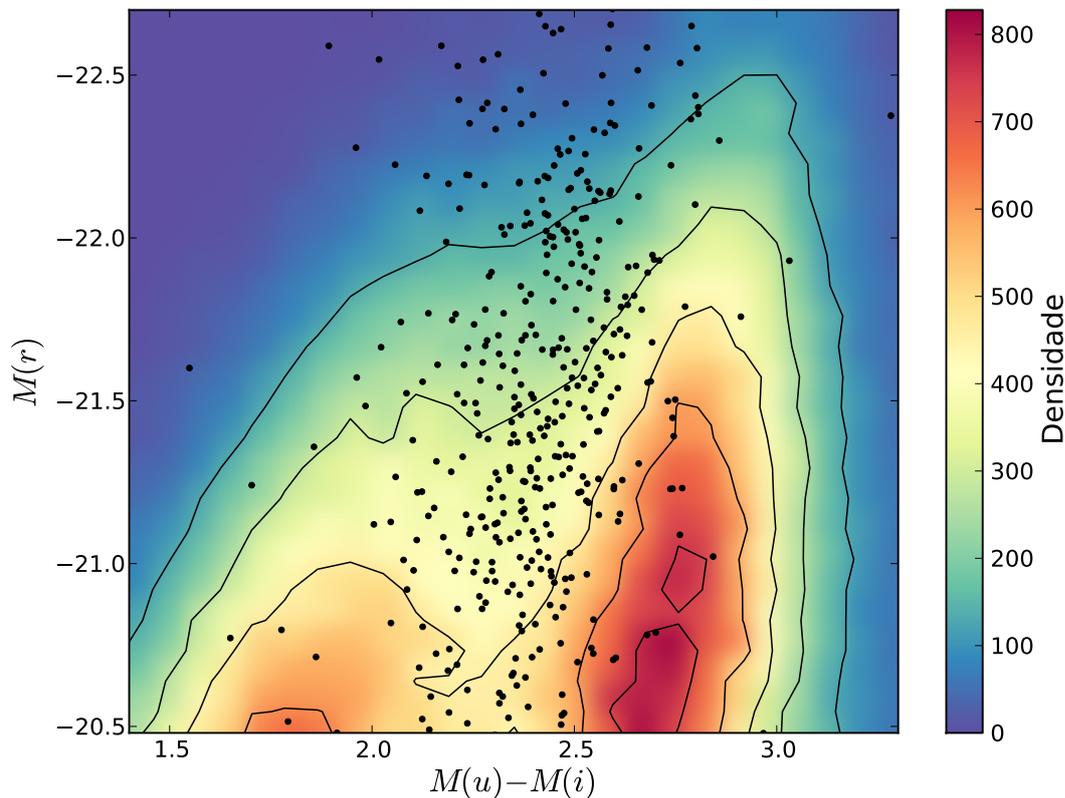


Figura 4.5: Diagrama cor-magnitude para galáxias do SDSS. Galáxias PSB são plotadas como pontos pretos. Utiliza-se o sistema fotométrico *ugriz*, onde *u* é o filtro mais azul e *z* é o filtro mais vermelho. $M(r)$ é a magnitude absoluta na banda *r*, $M(u)$ é a magnitude absoluta na banda *u* e $M(i)$ é a magnitude absoluta na banda *i*, assim, objetos à direita são mais vermelhos, e objetos à esquerda são mais azuis.

As distribuições de cores e magnitudes para galáxias PSB não dependem de sua classificação no diagrama WHAN.

4.3 Síntese espectral

4.3.1 Histórias de Formação Estelar

Através da síntese espectral do STARLIGHT, calculamos as histórias de formação estelar (SFH) para a amostra de galáxias PSB, de maneira semelhante a [Asari et al. \(2007\)](#).

As frações de massa μ_j de uma população estelar de idade t_j podem ser interpretadas como a fração de massa convertida em estrelas (μ_j^c) no *lookbacktime* t_j . A SFH é obtida interpolando a função $\mu_j^c(t_j)$.

Neste trabalho foram adotadas SFH cumulativas¹, definidas por:

$$\eta^c(t_\star) = \sum_{t_0}^{t_\star} \mu_j^c, \quad (4.1)$$

o que representa a soma das frações de massa convertidas em estrelas desde o big-bang (t_0) até um *lookbacktime* t_\star .

A Figura 4.6 mostra as SFH de galáxias PSB comparadas com galáxias *star-forming* ($EW(H\alpha) > 3\text{\AA}$ e $\log([\text{N II}]/H\alpha) < -0,4$) e não *star-forming* ($EW(H\alpha) < 3\text{\AA}$ e $\log([\text{N II}]/H\alpha) > -0,4$).

Galáxias PSB cessaram sua formação estelar há, em média, 150 milhões de anos. Este é o *lookbacktime* para o qual $\eta^c(t_\star)$ chega a 99,99% na Figura 4.6. Como os valores de $\eta^c(t_\star)$ nem sempre chegam a 100%, mas convergem assintoticamente a esse valor, adotamos o limite de 99,99%, e não 100%.

As massas estelares atuais de galáxias PSB são comparáveis às de galáxias *star-forming* (conforme será mostrado na Figura 4.10(e)), porém, enquanto galáxias *star-forming* formam sua massa de maneira contínua, galáxias *post-starburst* apresentam uma forte descontinuidade em sua taxa de formação estelar por volta de 2 Ganos atrás, formando até 40% de sua massa no período entre 2 bilhões e 150 milhões de anos atrás e cessando sua formação estelar em seguida.

Conforme mostrado na Figura 4.7, existe uma bimodalidade nas SFH de galáxias PSB. Galáxias PSB wAGN têm um desenvolvimento consideravelmente mais rápido do que galáxias PSB passivas e aposentadas, chegando a 60% de sua massa aproximadamente 5,1 Ganos mais cedo. Este comportamento é semelhante ao de galáxias PSB selecionadas pelo método de Goto (2005), mostrado na Figura 4.6.

Calculando o tempo (em *lookbacktime*) em que as galáxias chegaram a 70% de sua massa, denotado por t_{70} , podemos analisar esta bimodalidade com mais clareza.

¹Histórias de formação estelar desta forma também podem ser chamadas de *mass assembly histories*, ou "histórias de formação de massa".

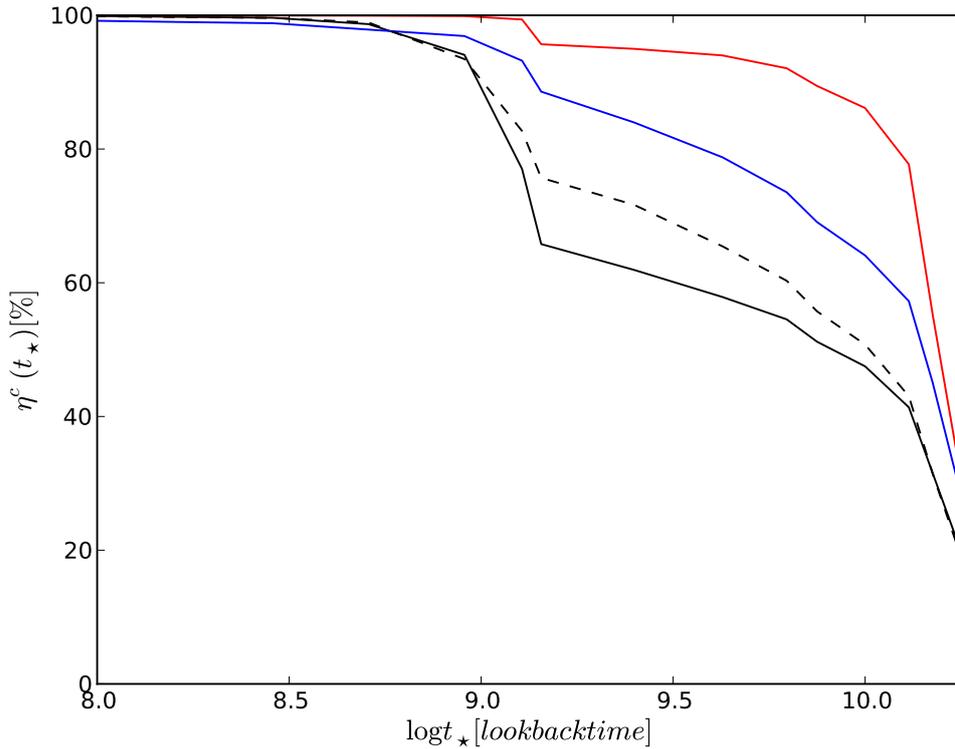


Figura 4.6: História de formação estelar cumulativa para galáxias PSB da amostra geral (linha preta sólida) e da amostra de comparação (linha preta tracejada) comparadas com outras galáxias sem formação estelar (vermelho) e galáxias *star-forming* (azul).

A Figura 4.8 mostra histogramas de t_{70} , onde percebe-se uma alta quantidade de galáxias com t_{70} em torno de 10^9 anos. Para galáxias wAGN esta distribuição é deslocada para a direita.

Entre as galáxias PSB wAGN, apenas 34% possuem $t_{70} < 2$ Ganos. Esta fração é de 60% para galáxias PSB aposentadas e de 57% para galáxias PSB passivas. Entre todas as galáxias PSB, 55,4% formaram 30% de sua massa nos últimos 2Ganos.

4.3.2 Propriedades das populações estelares

A Figura 4.9 mostra histogramas de alguns resultados da síntese espectral do STARLIGHT aplicada a galáxias do SDSS. Galáxias PSB (símbolos em preto) são comparadas com a amostra geral (símbolos em azul).

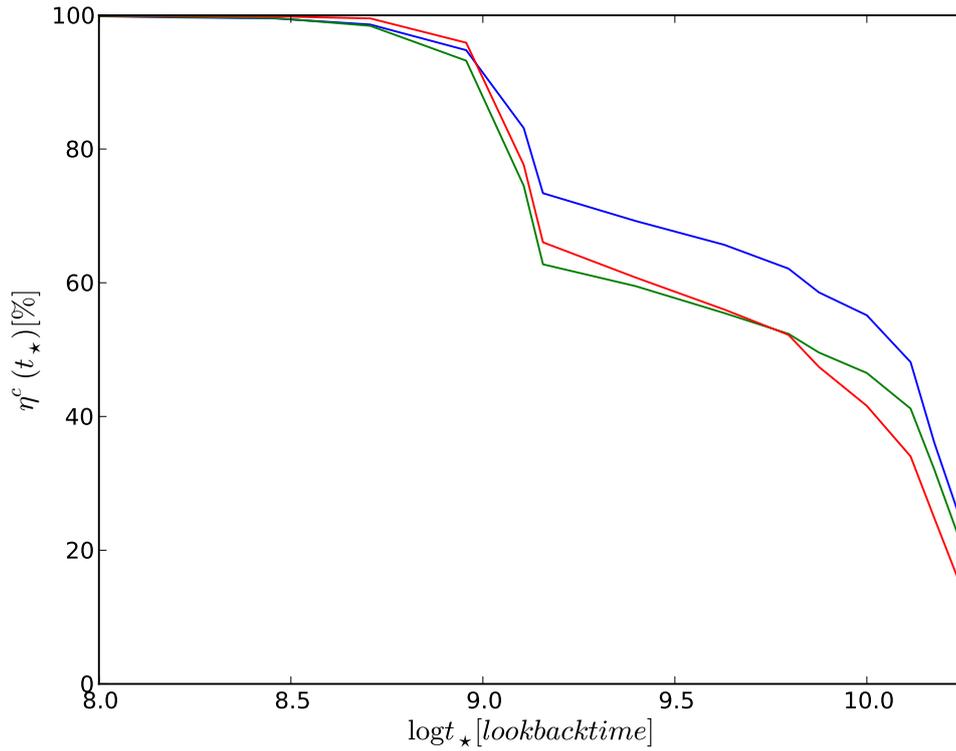


Figura 4.7: História de formação estelar cumulativa para subclasses de galáxias PSB. Galáxias wAGN são plotadas em azul, galáxias aposentadas em verde e galáxias passivas em vermelho.

Galáxias PSB possuem baixas massas e existem em todas as faixas de luminosidade (cf. Figura 4.5) resultando em uma baixa razão M/L . Comparadas com a amostra geral, seus valores de extinção são relativamente baixos e suas idades estelares médias são intermediárias quando ponderadas em fluxo e baixas quando ponderadas em massa.

A Figura 4.10 compara propriedades das populações estelares de galáxias PSB com as de galáxias com e sem formação estelar.

Galáxias PSB em nossa amostra são, em geral, galáxias de baixa massa e alta metalicidade. Suas massas são comparáveis às de galáxias *star-forming* (Figura 4.10(e)), e suas metalicidades próximas às de galáxias dominadas por populações estelares velhas (Figura 4.10(c) e (d)).

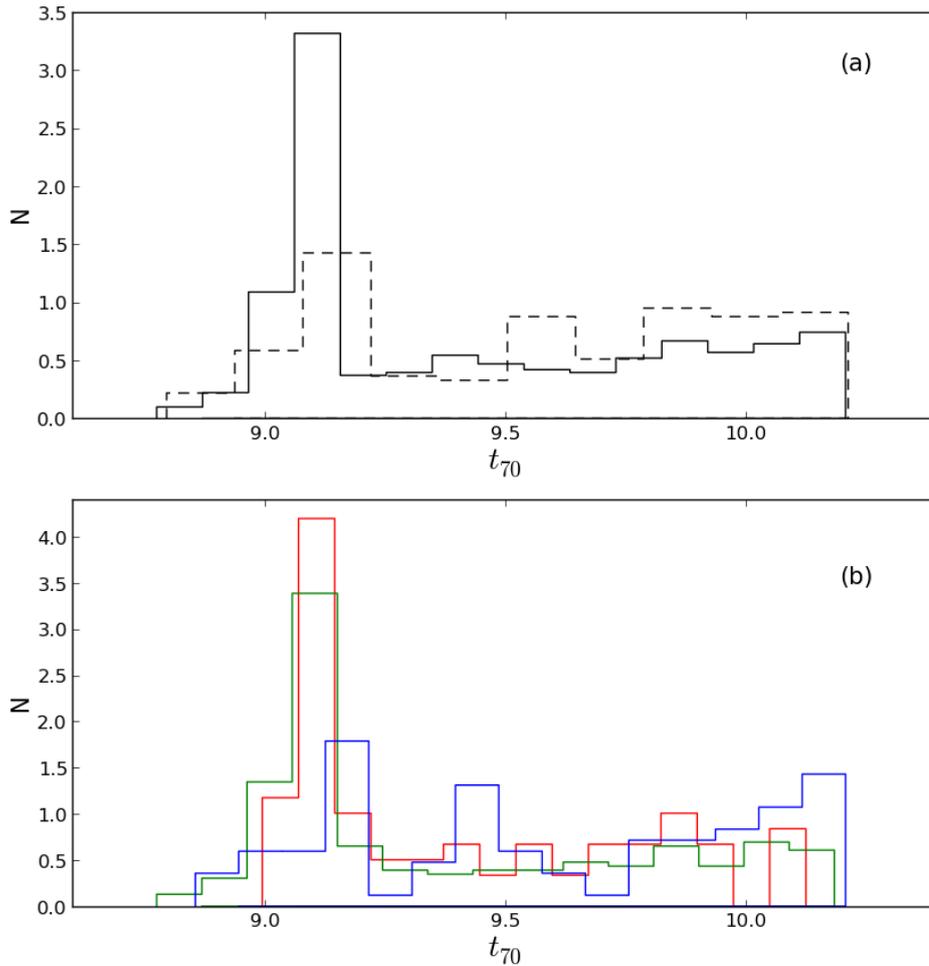


Figura 4.8: Histogramas de: (a) t_{70} para galáxias da amostra principal (linha sólida) e galáxias da amostra de comparação (linha tracejada). (b) t_{70} para galáxias PSB wAGN (linha azul), galáxias PSB aposentadas (linha verde) e galáxias PSB passivas (linha vermelha).

A baixa massa de galáxias PSB é compatível com o resultado de [Gonçalves et al. \(2012\)](#), que mostra que as massas de galáxias transitando da nuvem azul para a sequência vermelha diminui com *redshift*.

As extinções em galáxias PSB são menores do que as de galáxias *star-forming*, resultado que vai contra a hipótese de que galáxias *post-starburst* podem ser galáxias com formação estelar fortemente obscurecida por poeira ([Goto 2005](#)), característica que é observada para uma fração considerável de galáxias do vale verde com alta razão entre SFR atual e SFR passada ([Martin et al., 2007](#); [Gonçalves et al., 2012](#)), que é o caso de galáxias PSB.

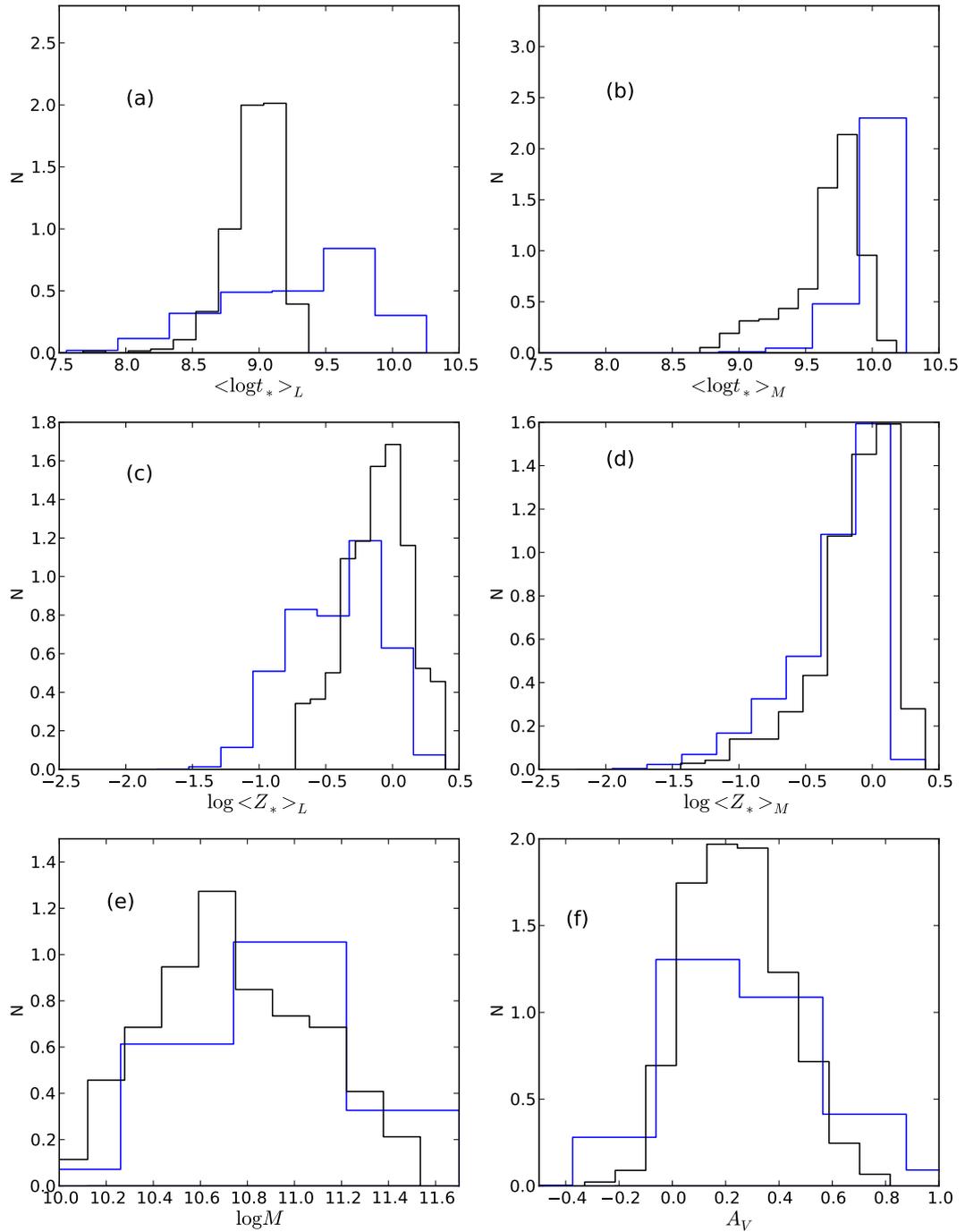


Figura 4.9: Histogramas normalizados de propriedades das populações estelares de galáxias PSB (em preto), comparadas com a amostra geral (em azul).

A Figura 4.11 mostra que a bimodalidade discutida anteriormente se apresenta em metalicidade, massa e extinção. Galáxias PSB wAGN possuem menor metalicidade, maior massa e maior extinção do que o restante da amostra.

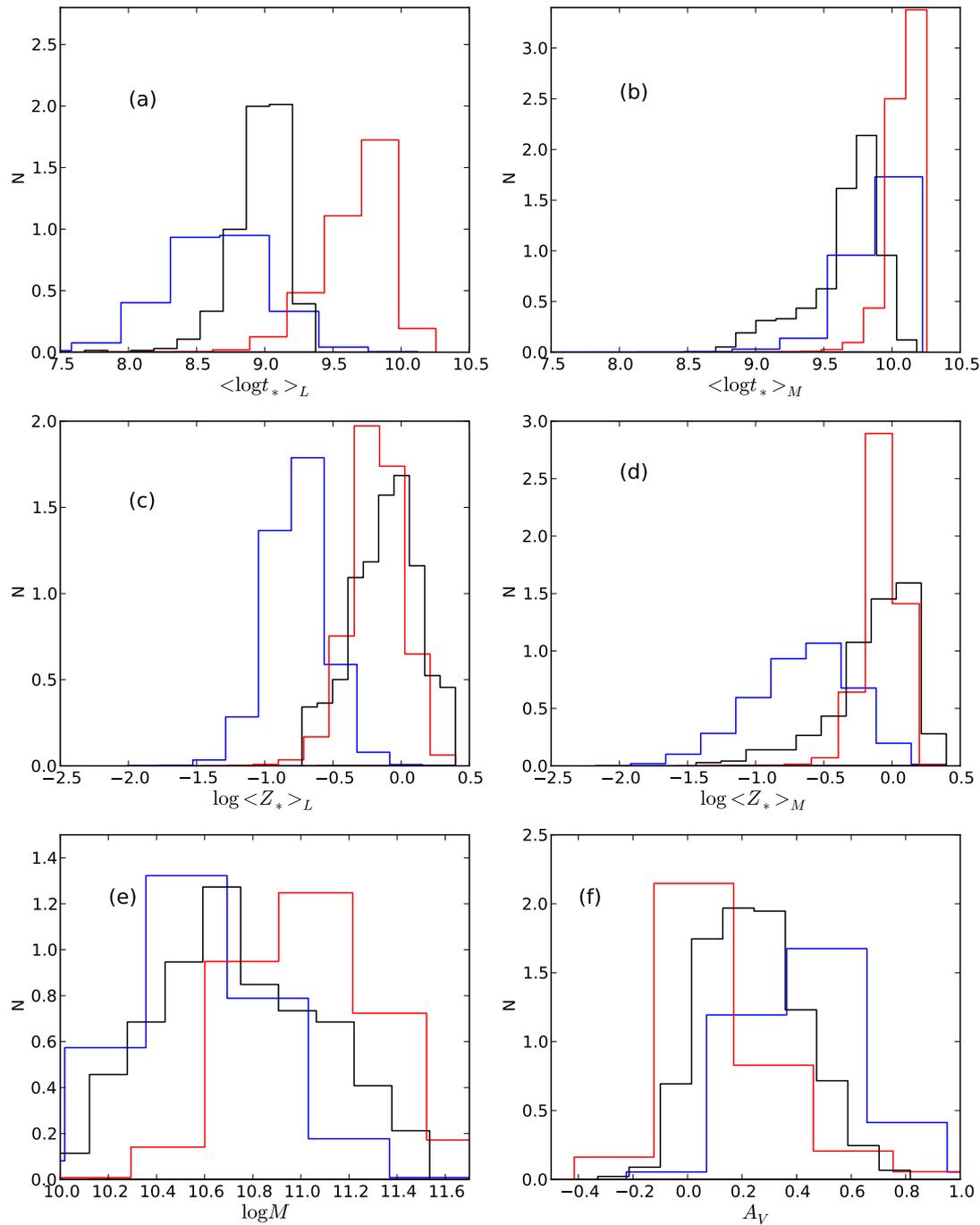


Figura 4.10: Histogramas normalizados de propriedades das populações estelares de galáxias PSB (em preto), comparadas com galáxias *star-forming* (em azul) e galáxias sem formação estelar (em vermelho).

A diferença em metalicidade entre os subgrupos aparece com mais evidência quando ponderada em fluxo, enfatizando que a alta metalicidade observada em galáxias PSB concentra-se em suas populações estelares jovens.

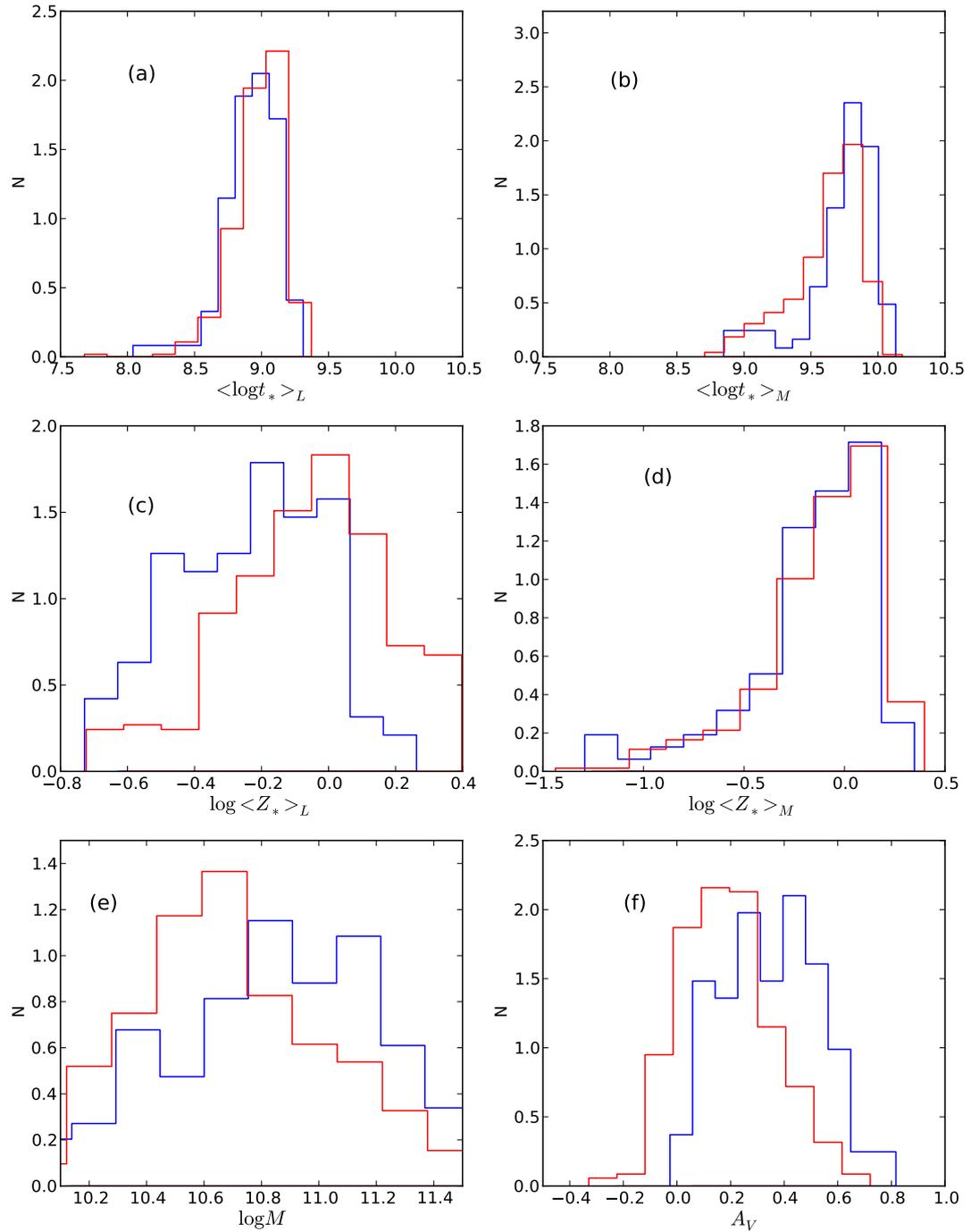


Figura 4.11: Histogramas normalizados de propriedades das populações estelares de galáxias PSB wAGN (azul) e galáxias PSB passivas e aposentadas (vermelho).

As massas de galáxias PSB wAGN (Figura 4.11(e)) são ligeiramente maiores do que as massas do restante da amostra. Este resultado é compatível com o conceito de *downsizing*, já que galáxias PSB wAGN formam sua massa mais rapidamente.

4.4 Efeitos ambientais

Nesta seção, iremos estudar as características do ambiente de galáxias PSB usando os indicadores descritos na seção 2.6 (Σ_5 , Σ_8 e Σ_{10}).

Conforme mencionado anteriormente, galáxias *post-starburst* foram encontradas pela primeira vez em ambientes densos (Dressler & Gunn, 1983). Por muito tempo, a origem destes objetos foi atribuída à interação de galáxias com o meio intra-aglomerado (Poggianti et al., 1999; Balogh et al., 1999) e, posteriormente, a interações com galáxias próximas (Goto, 2005). Em nossa amostra, a maior parte das galáxias PSB residem em ambientes de baixa densidade (campo).

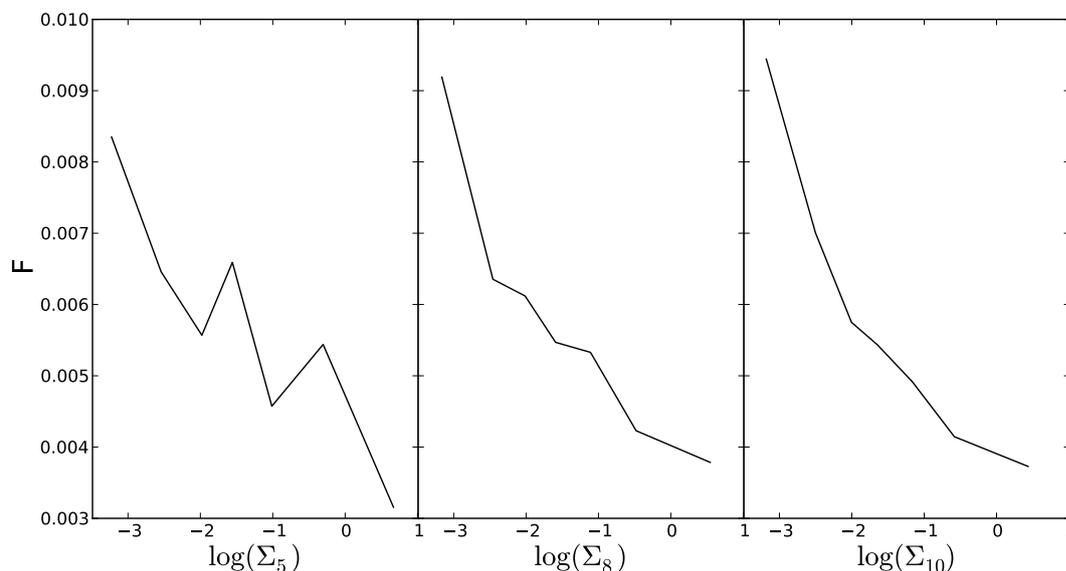


Figura 4.12: Frações de galáxias PSB em diferentes intervalos de (a) Σ_5 , (b) Σ_8 e (c) Σ_{10} . A linha preta representa a fração de galáxias PSB na faixa de densidade projetada correspondente.

Na amostra geral, 27141 (1,6%) galáxias possuem $\Sigma_5 > 1$, 23434 (1,4%) possuem $\Sigma_8 > 1$ e 21506 (1,32%) possuem $\Sigma_{10} > 1$. Já para a amostra de galáxias *post-starburst* estes valores são ainda menores: apenas 0,1% destas galáxias possuem Σ_5 , Σ_8 ou Σ_{10} maiores do que 1.

A Figura 4.12 mostra a fração de galáxias em uma certa faixa de densidade projetada que é classificada como PSB. A fração de galáxias PSB é decrescente em

todas as escalas de densidade projetada, mostrando que galáxias em nossa amostra residem em ambientes de baixa densidade.

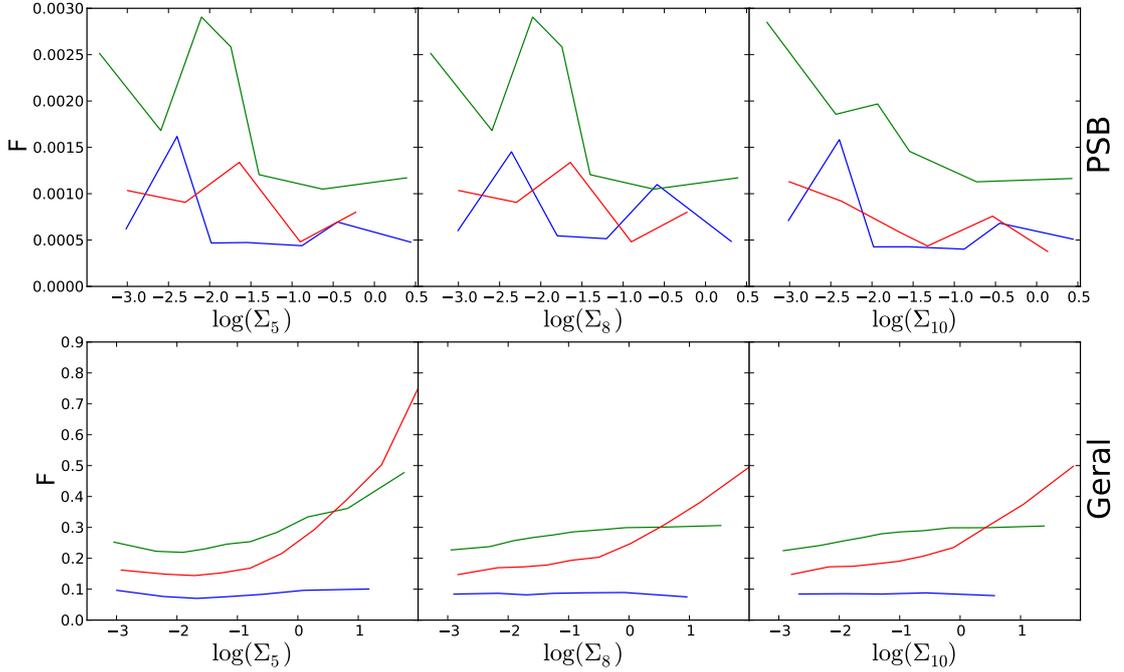


Figura 4.13: Frações de galáxias PSB em diferentes intervalos de (a) Σ_5 , (b) Σ_8 e (c) Σ_{10} comparadas com a amostra geral. A linha azul corresponde a galáxias wAGN, a linha verde a galáxias aposentadas e a vermelha a galáxias passivas.

A Figura 4.13 mostra que as características ambientais de galáxias PSB são as mesmas para os três subgrupos. As densidades projetadas são baixas mesmo para galáxias passivas que, na amostra geral, são a classe dominante para ambientes de alta densidade.

Esta análise não descarta a hipótese de que o ambiente pode levar uma galáxia a tornar-se *post-starburst*. Deve-se lembrar que nossa amostra é bastante limitada em *redshift* e a incidência de galáxias *post-starburst* aumenta sensivelmente com este parâmetro, podendo chegar a 20% das galáxias em $z \sim 1$ (Wild et al., 2009). Assim, inferimos que o ambiente pode ter um papel importante na criação destes objetos, porém não no universo local.

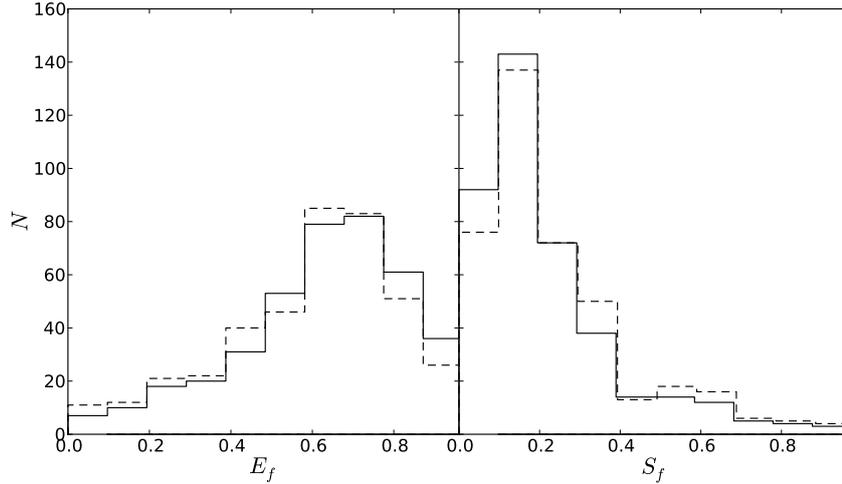


Figura 4.14: Histogramas de S_f e E_f para galáxias PSB. As linhas tracejadas representam as frações corrigidas

4.5 Morfologia

Nesta seção, serão analisados os dados do *Galaxy Zoo*, descritos no Capítulo 2, lembrando que E_f , S_f e M_f são, respectivamente, as probabilidades de uma galáxia ser elíptica, espiral ou remanescente de uma fusão.

Dentre as 427 galáxias PSB em nossa amostra, 420 constam no catálogo do *Galaxy Zoo*.

Galáxias PSB são, em geral, galáxias elípticas, como pode ser verificado na Figura 4.14. Apenas 8,3% possuem S_f maior do que 0,5, e 1,2% são espirais de acordo com o critério `clean`, com $S_f > 0,8$. Por outro lado, 76,5% possuem $E_f > 0,5$ e 19,6% apresentam $E_f > 0,8$. Assim como os efeitos ambientais, os tipos morfológicos de galáxias PSB não possuem relação significativa com suas classificações no diagrama WHAN, tampouco com suas histórias de formação estelar, conforme mostrado na Tabela 4.1.

Vestígios de fusões ($M_f > 0,3$) são encontrados em 14,5% das galáxias e fusões evidentes ($M_f > 0,8$) em apenas 1%. Estes números não descartam a possibilidade de que estas galáxias sejam remanescentes de fusões.

Num trabalho sobre simulações numéricas de fusões de galáxias e determinação de escalas de tempo associadas aos eventos de fusão, [Ji et al. \(2014\)](#) mostram que

Tabela 4.1: Tabela com as porcentagens de galáxias com $E_f > 0,5$, $E_f > 0,8$, $S_f > 0,5$ e $S_f > 0,8$ na amostra de galáxias PSB e em seus subgrupos.

	$E_f > 0,5$	$E_f > 0,8$	$S_f > 0,5$	$S_f > 0,8$
PSB	76,5%	19,6%	8,3%	1,2%
PSB wAGN	70,4%	25,3%	12,6%	4,2%
PSB aposentadas	75,5%	17,9%	8,5%	0,8%
PSB passivas	85,5%	2,6%	6,2%	0,0%
PSB com $t_{70} < 2\text{Ganos}$	76,7%	17,7%	5,4%	1,3%
PSB com $t_{70} > 2\text{Ganos}$	76,3%	22,5%	12,9%	1,1%

o tempo característico para o cessamento da formação estelar induzida por uma fusão é de $\approx 1,3$ Gano após o encerramento da fusão. O tempo de visibilidade dos vestígios de fusões, t_v , depende do ambiente da galáxia, da massa das galáxias envolvidas e da profundidade da fotometria (brilho superficial). Para galáxias isoladas de baixa massa, t_v vale aproximadamente $1,38 \pm 0,88$ Gano² para um brilho superficial de 25 Mag/arcsec² e aumenta por um fator 2 para um brilho superficial de 28 Mag/arcsec². O brilho superficial para galáxias do SDSS é ainda menor. Em nossa amostra de galáxias PSB, o brilho superficial médio interno a R_{50} ³, se distribui em torno de 19 Mag/arcsec². A galáxia com o máximo brilho superficial interno a R_{50} possui 21,5 Mag/arcsec².

Considerando o exposto no parágrafo anterior, podemos considerar a alta incidência de galáxias elípticas em nossa amostra como um indicativo de que as galáxias estudadas podem ter sofrido uma fusão. Considerando as SFH expostas nas Figuras 4.6 e 4.7, estas fusões podem ter iniciado nos últimos 3 Ganos e encerrado há pelo menos $\sim 1,45$ Ganos⁴, para que haja tempo suficiente para que a formação estelar proveniente da fusão encerre e as características espectrais de galáxias PSB se estabeleçam.

Logo, se galáxias *post-starburst* são produtos de fusões é possível que, no momento em que identificamos características *post-starburst* em seus espectros,

²Tempo contado a partir do encerramento da fusão.

³ R_{50} é o raio que contém 50% da luz da galáxia.

⁴Este número foi obtido somando o tempo necessário para o encerramento da formação estelar após um *major merger* (1,3 Gano, segundo Ji et al. 2014) com o tempo médio desde o encerramento da formação estelar em galáxias PSB em nossa amostra (150 milhões de anos).

os vestígios destas fusões já não estejam mais visíveis. Para testar esta hipótese de maneira robusta seriam necessárias simulações para galáxias com as mesmas características das encontradas em nossa amostra.

Capítulo 5

Conclusões e Perspectivas

5.1 Conclusões

Neste trabalho, nos baseamos na síntese espectral do STARLIGHT e no diagrama WHAN para desenvolver um novo método para a identificação de galáxias *post-starburst*. A amostra gerada a partir destes critérios apresenta características diferentes de amostras geradas com critérios usuais, porém, as características básicas de galáxias PSB são reproduzidas com sucesso.

Mostramos que galáxias *post-starburst* residem no *vale verde* do diagrama cor-magnitude. Como galáxias PSB representam 0,1% da amostra geral, é provável que a taxa de crescimento da sequência vermelha devida a efeitos relacionados a este tipo de objeto seja extremamente baixa no universo local.

Análises das propriedades das populações estelares destas galáxias revelam que suas metalicidades estelares são altas quando ponderadas em fluxo e intermediárias quando ponderadas em massa, sugerindo que a alta metalicidade estelar concentra-se em populações estelares jovens, que contribuem mais em fluxo do que em massa. Esta característica sugere que as populações jovens de galáxias PSB se formaram a partir de um gás quimicamente enriquecido.

Uma bimodalidade foi encontrada entre galáxias PSB wAGN e o restante da amostra. Estas galáxias possuem metalicidades mais baixas, menores massas, menores extinções e um desenvolvimento mais rápido quando comparadas a outras

galáxias PSB (Figura 4.7). Porém, suas propriedades ambientais (Figura 4.13) e morfológicas são as mesmas.

Comparando as posições de galáxias PSB no diagrama BPT com suas posições no diagrama WHAN, inferimos que grande parte das galáxias PSB classificadas como portadoras de núcleos ativos fortes são, na verdade, AGNs falsos. Galáxias com razões $[N II]/H\alpha$ maiores do que 1 são frequentemente classificadas como portadoras de núcleos ativos fortes no diagrama BPT, e este é o caso de galáxias PSB. Já no diagrama WHAN, estas galáxias são classificadas como passivas, aposentadas ou wAGN, devido a suas baixas larguras equivalentes de $H\alpha$.

Nossos resultados mostram que galáxias *post-starburst* têm um desenvolvimento extremamente peculiar quando comparadas com outras galáxias. Suas massas estelares atuais são comparáveis às de galáxias *star-forming*, porém, enquanto galáxias *star-forming* formam sua massa de maneira contínua, galáxias *post-starburst* apresentam uma forte descontinuidade em sua taxa de formação estelar por volta de 2 Ganos atrás, formando até 40% de sua massa no período entre 2 bilhões e 150 milhões de anos atrás e cessando sua formação estelar em seguida.

A alta quantidade de massa formada nos últimos 2 Ganos pode indicar que estas galáxias são remanescentes de fusões com galáxias de massa comparável, o que é verificado em *redshifts* mais altos. Dados do *Galaxy Zoo* mostram que 14,5% das galáxias PSB em nossa amostra apresentam vestígios de fusões e menos de 1% apresentam fusões evidentes. Estes números não são conclusivos, conforme discutido na Seção 4.5.

A partir dos resultados apresentados, sugerimos que galáxias *post-starburst* em baixo *redshift* são produtos de fusões que se encerraram há mais de 1,45 Ganos atrás. Estas fusões não podem ser detectadas diretamente pois o tempo característico para que o espectro de uma galáxia apresente características de *post-starburst* após uma fusão é maior do que o tempo necessário para o desaparecimento dos vestígios desta. A alta incidência de galáxias elípticas em nossa amostra é compatível com este cenário.

Neste paradigma, é natural que as galáxias estudadas estejam em ambientes de baixa densidade, já que em baixos *redshifts* as velocidades radiais de galáxias em ambientes densos fazem com que estas não sofram fusões. Além disso, galáxias em ambientes densos já são galáxias evoluídas (sequência vermelha) em *redshifts* baixos.

5.2 Perspectivas

A peculiaridade das SFH de galáxias post-starburst sugere novas maneiras de identificar tais galáxias. Por exemplo, poderia-se calcular o tempo que galáxias demoram para formar 30% e 80% de sua massa (t_{30} e t_{80}), e considerar PSB aquelas que possuem uma razão t_{80}/t_{30} maior do que um certo limite e SFR atual nula. Este conjunto de critérios geraria uma amostra livre de efeitos de seleção, porém, seria extremamente sensível à qualidade dos modelos de síntese espectral utilizados.

Os efeitos da metalicidade na classificação de galáxias em diferentes diagramas de diagnóstico observado neste trabalho podem ser investigados com mais clareza, já que não está claro se estes efeitos são uma peculiaridade de galáxias PSB ou se estes ocorrem para qualquer galáxia de alta metalicidade e, se ocorrem para um grande número de galáxias, qual é o impacto deste efeito na classificação de grandes amostras.

Este trabalho limitou-se à análise das propriedades de galáxias no óptico, seria interessante combinar os dados aqui analisados com a fotometria de infravermelho do WISE e com a fotometria ultravioleta do GALEX, a fim de verificar propriedades de galáxias PSB em outros comprimentos de onda.

Observações de algumas das galáxias da amostra permitiriam fotometria mais profunda do que as do SDSS e espectroscopia de campo integrado, facilitando a detecção de evidências de fusões e possibilitando o estudo da distribuição espacial das populações estelares.

Referências Bibliográficas

- Asari, N. V., Cid Fernandes, R., Stasińska, G., Torres-Papaqui, J. P., Mateus, A., Sodré, L., Schoenell, W., & Gomes, J. M. (2007). The history of star-forming galaxies in the Sloan Digital Sky Survey. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 381:263–279.
- Baldry, I. K., Glazebrook, K., Brinkmann, J., Ivezić, Ž., Lupton, R. H., Nichol, R. C., & Szalay, A. S. (2004). Quantifying the Bimodal Color-Magnitude Distribution of Galaxies. *The Astrophysical Journal*, 600:681–694.
- Baldwin, J. A., Phillips, M. M., & Terlevich, R. (1981). Classification parameters for the emission-line spectra of extragalactic objects. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 93:5–19.
- Balogh, M. L., Morris, S. L., Yee, H. K. C., Carlberg, R. G., & Ellingson, E. (1999). Differential Galaxy Evolution in Cluster and Field Galaxies at $z \sim 0.3$. *The Astrophysical Journal*, 527:54–79.
- Bamford, S. P., Nichol, R. C., Baldry, I. K., Land, K., Lintott, C. J., Schawinski, K., Slosar, A., Szalay, A. S., Thomas, D., Torri, M., Andreescu, D., Edmondson, E. M., Miller, C. J., Murray, P., Raddick, M. J., & Vandenberg, J. (2009). Galaxy Zoo: the dependence of morphology and colour on environment. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 393:1324–1352.
- Bell, E. F., Wolf, C., Meisenheimer, K., Rix, H.-W., Borch, A., Dye, S., Kleinheinrich, M., Wisotzki, L., & McIntosh, D. H. (2004). Nearly 5000 Distant Early-Type

- Galaxies in COMBO-17: A Red Sequence and Its Evolution since $z \sim 1$. *The Astrophysical Journal*, 608:752–767.
- Bertone, S. & Conselice, C. J. (2009). A comparison of galaxy merger history observations and predictions from semi-analytic models. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 396(4):2345–2358.
- Bower, R. G., Benson, A. J., Malbon, R., Helly, J. C., Frenk, C. S., Baugh, C. M., Cole, S., & Lacey, C. G. (2006). Breaking the hierarchy of galaxy formation. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 370:645–655.
- Bruzual, G. & Charlot, S. (2003). Stellar population synthesis at the resolution of 2003. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 344:1000–1028.
- Cardelli, J. A., Clayton, G. C., & Mathis, J. S. (1989). The relationship between infrared, optical, and ultraviolet extinction. *The Astrophysical Journal*, 345:245–256.
- Chabrier, G. (2003). Galactic Stellar and Substellar Initial Mass Function. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 115:763–795.
- Cid Fernandes, R., Mateus, A., Sodré, L., Stasińska, G., & Gomes, J. M. (2005). Semi-empirical analysis of Sloan Digital Sky Survey galaxies - I. Spectral synthesis method. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 358:363–378.
- Cid Fernandes, R., Stasińska, G., Mateus, a., & Vale Asari, N. (2011). A comprehensive classification of galaxies in the Sloan Digital Sky Survey: how to tell true from fake AGN? *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 413(3):1687–1699.
- Cirasuolo, M., McLure, R. J., Dunlop, J. S., Almaini, O., Foucaud, S., Smail, I., Sekiguchi, K., Simpson, C., Eales, S., Dye, S., Watson, M. G., Page, M. J., & Hirst, P. (2007). The evolution of the near-infrared galaxy luminosity function and colour bimodality up to $z \sim 2$ from the UKIDSS Ultra Deep Survey Early Data Release. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 380:585–595.

- Conselice, C. J. (2012). Galaxy Formation: Where Do We Stand? *ArXiv e-prints*.
- Conselice, C. J., Bershadsky, M. A., Dickinson, M., & Papovich, C. (2003). A Direct Measurement of Major Galaxy Mergers at $z \sim 3$. *Astronomical Journal*, 126:1183–1207.
- Croton, D. J., Springel, V., White, S. D. M., De Lucia, G., Frenk, C. S., Gao, L., Jenkins, A., Kauffmann, G., Navarro, J. F., & Yoshida, N. (2006). The many lives of active galactic nuclei: cooling flows, black holes and the luminosities and colours of galaxies. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 365:11–28.
- De Propriis, R. & Melnick, J. (2014). A panchromatic survey of post-starburst mergers: searching for feedback. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 439(3):2837–2847.
- Dressler, A. (1980). Galaxy morphology in rich clusters - Implications for the formation and evolution of galaxies. *The Astrophysical Journal*, 236:351–365.
- Dressler, A. & Gunn, J. E. (1983). Spectroscopy of galaxies in distant clusters. II - The population of the 3C 295 cluster. *The Astrophysical Journal*, 270:7–19.
- Dressler, A., Smail, I., Poggianti, B. M., Butcher, H., Couch, W. J., Ellis, R. S., & Oemler, A. J. (1999). Spectroscopic catalog of 10 rich galaxy clusters (Dressler+1999). *VizieR Online Data Catalog*, 212:20051.
- Gonçalves, T. S., Martin, D. C., Menéndez-Delmestre, K., Wyder, T. K., & Koekemoer, A. (2012). Quenching Star Formation at Intermediate Redshifts: Downsizing of the Mass Flux Density in the Green Valley. *The Astrophysical Journal*, 759:67.
- Goto, T. (2005). 266 E+A galaxies selected from the Sloan Digital Sky Survey Data Release 2: the origin of E+A galaxies. 944:937–944.

- Goto, T., Kawai, A., Shimono, A., Sugai, H., Yagi, M., & Hattori, T. (2008). Integrated field spectroscopy of E+A (post-starburst) galaxies with the Kyoto tridimensional spectrograph II. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 386:1355–1365.
- Henriques, B. M. B., Thomas, P. A., Oliver, S., & Roseboom, I. (2009). Monte Carlo Markov Chain parameter estimation in semi-analytic models of galaxy formation. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 396:535–547.
- Hubble, E. P. (1926). Extragalactic nebulae. *The Astrophysical Journal*, 64:321–369.
- Ji, I., Peirani, S., & Yi, S. K. (2014). On the lifetime of merger features of equal-mass disk mergers. *ArXiv e-prints*.
- Jogee, S., Miller, S., Penner, K., Bell, E. F., Conselice, C., Skelton, R. E., Somerville, R. S., Rix, H.-W., Barazza, F. D., Barden, M., Borch, A., Beckwith, S. V., Caldwell, J. A. R., Häussler, B., Heymans, C., Jahnke, K., McIntosh, D., Meisenheimer, K., Papovich, C., Peng, C. Y., Robaina, A., Sanchez, S., Wisotzki, L., & Wolf, C. (2008). Frequency and Impact of Galaxy Mergers and Interactions over the Last 7 Gyr. In Funes, J. G. & Corsini, E. M., editors, *Formation and Evolution of Galaxy Disks*, volume 396 of *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, page 337.
- Kauffmann, G., Heckman, T. M., White, S. D. M., Tremonti, C., Brinchmann, J., Bruzual, G., Peng, E. W., Seibert, M., Bernardi, M., Blanton, M., Brinkmann, J., Cs, I., Fukugita, M., Ivezić, Z., Munn, J. A., Nichol, R. C., Padmanabhan, N., Thakar, A. R., & David, H. (2003). Stellar masses and star formation histories for 10 5 galaxies from the Sloan Digital Sky Survey. 53:33–53.
- Kewley, L. J., Dopita, M. A., Sutherland, R. S., Heisler, C. A., & Trevena, J. (2001). Theoretical Modeling of Starburst Galaxies. *The Astrophysical Journal*, 556:121–140.

- Kewley, L. J., Groves, B., Kauffmann, G., & Heckman, T. (2006). The host galaxies and classification of active galactic nuclei. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 372:961–976.
- Lintott, C., Schawinski, K., Bamford, S., Slosar, A., Land, K., Thomas, D., Edmondson, E., Masters, K., Nichol, R. C., Raddick, M. J., Szalay, A., Andreescu, D., Murray, P., & Vandenberg, J. (2011). Galaxy Zoo 1: data release of morphological classifications for nearly 900 000 galaxies. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 410:166–178.
- Lintott, C. J., Schawinski, K., Slosar, A., Land, K., Bamford, S., Thomas, D., Raddick, M. J., Nichol, R. C., Szalay, A., Andreescu, D., Murray, P., & Vandenberg, J. (2008). Galaxy Zoo: morphologies derived from visual inspection of galaxies from the Sloan Digital Sky Survey. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 389:1179–1189.
- Lotz, J. M., Davis, M., Faber, S. M., Guhathakurta, P., Gwyn, S., Huang, J., Koo, D. C., Le Floch, E., Lin, L., Newman, J., Noeske, K., Papovich, C., Willmer, C. N. A., Coil, A., Conselice, C. J., Cooper, M., Hopkins, A. M., Metevier, A., Primack, J., Rieke, G., & Weiner, B. J. (2008). The Evolution of Galaxy Mergers and Morphology at $z \approx 1.2$ in the Extended Groth Strip. *The Astrophysical Journal*, 672:177–197.
- Lotz, J. M., Jonsson, P., Cox, T. J., Croton, D., Primack, J. R., Somerville, R. S., & Stewart, K. (2011). The Major and Minor Galaxy Merger Rates at $z \approx 1.5$. *The Astrophysical Journal*, 742:103.
- Martig, M. & Bournaud, F. (2008). Triggering of merger-induced starbursts by the tidal field of galaxy groups and clusters. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 385:L38–L42.
- Martin, D. C., Wyder, T. K., Schiminovich, D., Barlow, T. A., Forster, K., Friedman, P. G., Morrissey, P., Neff, S. G., Seibert, M., Small, T., Welsh, B. Y., Bianchi, L.,

- Donas, J., Heckman, T. M., Lee, Y.-W., Madore, B. F., Milliard, B., Rich, R. M., Szalay, A. S., & Yi, S. K. (2007). The UV-Optical Galaxy Color-Magnitude Diagram. III. Constraints on Evolution from the Blue to the Red Sequence. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 173:342–356.
- Mateus, A. (2006). *Análise Semi-Empírica de Espectros de Galáxias*. PhD thesis, Universidade de São Paulo.
- Mateus, A., Jimenez, R., & Gaztañaga, E. (2008). The Scale Dependence of Mass Assembly in Galaxies. *The Astrophysical Journal Letters*, 684:L61–L64.
- Mateus, A., Sodré, L., Cid Fernandes, R., & Stasińska, G. (2007). Semi-empirical analysis of Sloan Digital Sky Survey galaxies - IV. A nature via nurture scenario for galaxy evolution. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 374:1457–1472.
- Mateus, A., Sodré, L., Cid Fernandes, R., Stasińska, G., Schoenell, W., & Gomes, J. M. (2006). Semi-empirical analysis of sloan digital sky survey galaxies - ii. the bimodality of the galaxy population revisited. *MNRAS*, 370:721–737.
- Mendel, J. T., Simard, L., Ellison, S. L., & Patton, D. R. (2013). Towards a physical picture of star formation quenching: the photometric properties of recently quenched galaxies in the sloan digital sky survey. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 429:2212–2227.
- Poggianti, B. M., Aragón-Salamanca, A., Zaritsky, D., De Lucia, G., Milvang-Jensen, B., Desai, V., Jablonka, P., Halliday, C., Rudnick, G., Varela, J., Bamford, S., Best, P., Clowe, D., Noll, S., Saglia, R., Pelló, R., Simard, L., von der Linden, A., & White, S. (2009). THE ENVIRONMENTS OF STARBURST AND POST-STARBURST GALAXIES AT $z = 0.4-0.8$. *The Astrophysical Journal*, 693(1):112–131.

- Poggianti, B. M., Smail, I., Dressler, A., Couch, W. J., Barger, A. J., Butcher, H., Ellis, R. S., & Oemler Jr., A. (1999). The Star Formation Histories of Galaxies in Distant Clusters. *The Astrophysical Journal*, 518:576–593.
- Sharples, R. M., Ellis, R. S., Couch, W. J., & Gray, P. M. (1985). Multi-object spectroscopy of the distant cluster AC103. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 212:687–707.
- Stasińska, G., Cid Fernandes, R., Mateus, A., Sodré, L., & Asari, N. V. (2006). Semi-empirical analysis of Sloan Digital Sky Survey galaxies - III. How to distinguish AGN hosts. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 371:972–982.
- Stasińska, G., Vale Asari, N., Cid Fernandes, R., Gomes, J. M., Schlickmann, M., Mateus, A., Schoenell, W., Sodré, Jr., L., & Seagal Collaboration (2008). Can retired galaxies mimic active galaxies? Clues from the Sloan Digital Sky Survey. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 391:L29–L33.
- Storchi-Bergmann, T. & Brotherton, M. S. (2012). 2D stellar population and gas kinematics of the inner 1.5 kpc of the post-starburst quasar SDSS J0210-0903. 17(October):1–17.
- Taniguchi, Y. (2003). Starburst-agn connections from high redshift to the present day. In Ikeuchi, S., Hearnshaw, J., & Hanawa, T., editors, *The Proceedings of the IAU 8th Asian-Pacific Regional Meeting, Volume 1*, volume 289 of *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, pages 353–362.
- Thomas, D., Maraston, C., Bender, R., & Mendes de Oliveira, C. (2005). The Epochs of Early-Type Galaxy Formation as a Function of Environment. *The Astrophysical Journal*, 621:673–694.
- Trager, S. C., Faber, S. M., Worthey, G., & González, J. J. (2000). The Stellar Population Histories of Early-Type Galaxies. II. Controlling Parameters of the Stellar Populations. *Astronomical Journal*, 120:165–188.

- Trouille, L., Tremonti, C., & Hickox, R. (2011). Building Up the Red-Sequence: The AGN-Starburst Connection. In *American Astronomical Society Meeting Abstracts #218*, page #123.03.
- Vergani, D., Zamorani, G., Lilly, S., Lamareille, F., Halliday, C., Scodreggio, M., Vignali, C., Ciliegi, P., Bolzonella, M., Bondi, M., Kovač, K., Knobel, C., Zucca, E., Caputi, K., Pozzetti, L., Bardelli, S., Mignoli, M., Iovino, a., Carollo, C. M., Contini, T., Kneib, J.-P., Le Fèvre, O., Mainieri, V., Renzini, a., Bongiorno, a., Coppa, G., Cucciati, O., de la Torre, S., de Ravel, L., Franzetti, P., Garilli, B., Kampczyk, P., Le Borgne, J.-F., Le Brun, V., Maier, C., Pello, R., Peng, Y., Perez Montero, E., Ricciardelli, E., Silverman, J. D., Tanaka, M., Tasca, L., Tresse, L., Abbas, U., Bottini, D., Cappi, a., Cassata, P., Cimatti, a., Guzzo, L., Koekemoer, a. M., Leauthaud, a., Maccagni, D., Marinoni, C., McCracken, H. J., Memeo, P., Meneux, B., Oesch, P., Porciani, C., Scaramella, R., Capak, P., Sanders, D., Scoville, N., & Taniguchi, Y. (2009). K+a galaxies in the zCOSMOS survey. *Astronomy and Astrophysics*, 509:A42.
- Wild, V., Walcher, C. J., Johansson, P. H., Tresse, L., Charlot, S., Pollo, A., Le Fèvre, O., & de Ravel, L. (2009). Post-starburst galaxies: more than just an interesting curiosity. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 395:144–159.
- Williams, R. J., Quadri, R. F., Franx, M., van Dokkum, P., & Labbé, I. (2009). Detection of Quiescent Galaxies in a Bicolor Sequence from $Z = 0-2$. *The Astrophysical Journal*, 691:1879–1895.
- Wong, O. I., Schawinski, K., Kaviraj, S., Masters, K. L., Nichol, R. C., Lintott, C., Keel, W. C., Darg, D., Bamford, S. P., Andreescu, D., Murray, P., Raddick, M. J., Szalay, A., Thomas, D., & Vandenberg, J. (2012). Galaxy Zoo: building the low-mass end of the red sequence with local post-starburst galaxies. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 420:1684–1692.

- Worthey, G. (1994). Comprehensive stellar population models and the disentanglement of age and metallicity effects. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 95:107–149.
- Yan, R., Newman, J. A., Faber, S. M., Konidaris, N., Koo, D., & Davis, M. (2008). On the origin of [oii] emission in red sequence and post-starburst galaxies.
- Yesuf, H. M., Faber, S. M., Trump, J. R., Koo, D. C., Fang, J. J., Liu, F. S., Wild, V., & Hayward, C. C. (2014). From Starburst to Quiescence: Testing AGN feedback in Rapidly Quenching Post-Starburst Galaxies. *ArXiv e-prints*.
- York, D. G., Adelman, J., Anderson, Jr., J. E., Anderson, S. F., Annis, J., Bahcall, N. A., Bakken, J. A., Barkhouser, R., Bastian, S., Berman, E., Boroski, W. N., Bracker, S., Briegel, C., Briggs, J. W., Brinkmann, J., Brunner, R., Burles, S., Carey, L., Carr, M. A., Castander, F. J., Chen, B., Colestock, P. L., Connolly, A. J., Crocker, J. H., Csabai, I., Czarapata, P. C., Davis, J. E., Doi, M., Dombeck, T., Eisenstein, D., Ellman, N., Elms, B. R., Evans, M. L., Fan, X., Federwitz, G. R., Fiscelli, L., Friedman, S., Frieman, J. A., Fukugita, M., Gillespie, B., Gunn, J. E., Gurbani, V. K., de Haas, E., Haldeman, M., Harris, F. H., Hayes, J., Heckman, T. M., Hennessy, G. S., Hindsley, R. B., Holm, S., Holmgren, D. J., Huang, C.-h., Hull, C., Husby, D., Ichikawa, S.-I., Ichikawa, T., Ivezić, Ž., Kent, S., Kim, R. S. J., Kinney, E., Klaene, M., Kleinman, A. N., Kleinman, S., Knapp, G. R., Korienek, J., Kron, R. G., Kunszt, P. Z., Lamb, D. Q., Lee, B., Leger, R. F., Limmongkol, S., Lindenmeyer, C., Long, D. C., Loomis, C., Loveday, J., Lucinio, R., Lupton, R. H., MacKinnon, B., Mannery, E. J., Mantsch, P. M., Margon, B., McGehee, P., McKay, T. A., Meiksin, A., Merelli, A., Monet, D. G., Munn, J. A., Narayanan, V. K., Nash, T., Neilsen, E., Neswold, R., Newberg, H. J., Nichol, R. C., Nicinski, T., Nonino, M., Okada, N., Okamura, S., Ostriker, J. P., Owen, R., Pauls, A. G., Peoples, J., Peterson, R. L., Petravick, D., Pier, J. R., Pope, A., Pordes, R., Prosapio, A., Rechenmacher, R., Quinn, T. R., Richards, G. T., Richmond, M. W., Rivetta, C. H., Rockosi, C. M., Ruthmansdorfer, K., Sandford, D., Schlegel, D. J., Schneider, D. P., Sekiguchi, M., Sergey, G., Shimasaku, K.,

- Siegmund, W. A., Smee, S., Smith, J. A., Snedden, S., Stone, R., Stoughton, C., Strauss, M. A., Stubbs, C., SubbaRao, M., Szalay, A. S., Szapudi, I., Szokoly, G. P., Thakar, A. R., Tremonti, C., Tucker, D. L., Uomoto, A., Vanden Berk, D., Vogeley, M. S., Waddell, P., Wang, S.-i., Watanabe, M., Weinberg, D. H., Yanny, B., Yasuda, N., & SDSS Collaboration (2000). The Sloan Digital Sky Survey: Technical Summary. *Astronomical Journal*, 120:1579–1587.
- Zabludoff, A. I., Zaritsky, D., Lin, H., Tucker, D., Hashimoto, Y., Sheckman, S. A., Oemler, A., & Kirshner, R. P. (1996). The Environment of “E+A” Galaxies. *The Astrophysical Journal*, 466:104.
- Zwaan, M. A., Kuntschner, H., Pracy, M. B., & Couch, W. J. (2013). The cold gas content of post-starburst galaxies. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 432:492–499.