Universidade Federal do Rio de Janeiro
Centro de Ciências Matemáticas e da Natureza
Observatório do Valongo
Programa de Pós Graduação em Astronomia

Quenching ou *Bursting?* Panoramas evolutivos de galáxias considerando aspectos morfológicos

Camila de Sá Freitas

Rio de Janeiro
Março de 2020

Quenching ou *Bursting?* Panoramas evolutivos de galáxias considerando aspectos morfológicos

Camila de Sá Freitas

Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós Graduação em Astronomia, Observatório do Valongo, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ciências (Astronomia).

Orientador: Thiago Signorini Gonçalves

Rio de Janeiro
Março de 2020

CIP - Catalogação na Publicação

FS111q

Freitas, Camila de Sá
Quenching ou Bursting? Panoramas evolutivos de galáxias considerando aspectos morfológicos / Camila de Sá Freitas. -- Rio de Janeiro, 2020.
114 f.

Orientador: Thiago Signorini Gonçalves.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Observatório do Valongo, Programa de Pós-Graduação em Astronomia, 2020.

1. Astrofísica extragaláctica. 2. evolução de galáxias. 3. morfologia. 4. quenching. 5. bursting. I. Signorini Gonçalves, Thiago, orient. II. Título.

Elaborado pelo Sistema de Geração Automática da UFRJ com os dados fornecidos pelo(a) autor(a), sob a responsabilidade de Miguel Romeu Amorim Neto - CRB-7/6283.

Quenching ou Bursting?
Panoramas evolutivos de galáxias considerando aspectos morfológicos

Camila de Sá Freitas

Dr. Thiago Signorini Gonçalves (Orientador)

Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Astronomia, Observatório do Valongo, da Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ciências - Astronomia.

Aprovada por:

Presidente, Dr.Thiago Signorini Gonçalves (Orientador) – OV/UFRJ

Drª. Arianna Cortesi – (Avaliador Externo) – OV/UFRJ

Dr. Ariel Werle – (Avaliador Externo – participação por videoconferência) – IAG/USP

Rio de Janeiro
Março de 2020

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – (Brasil) CAPES – Código de Financiamento 001.

Dedicado aos meus pais, às minhas irmãs e irmão e minha família...

Agradecimentos

Àqueles que se atrevem a ler meus agradecimentos, um aviso: tenho fama de ser emocionada demais e não sou boa com palavras.

Com a conclusão de mais um ciclo da minha vida, não posso deixar de agradecer por tudo tudo tudo aos meus queridos pais, que sempre me apoiaram e acreditaram nas minhas escolhas (por mais inusitadas que fossem). E com eles, os meus presentes que são minhas irmãs e meu irmão, que acabou de chegar pra essa história da nossa família. O que eu posso dizer é que essas meninas aturaram tanto minhas manias que não tem como não ser amor (Ravi, ainda é muito cedo pra ter te irritado). Nosso amor e carinho cresce junto com a saudade e distância. Absolutamente tudo que conquistei não seria possível sem vocês (para a versão completa da história, consultar os agradecimentos ultra-emocionados do TCC).

Também não posso deixar de agradecer ao meu orientador, Thiago Signorini Gonçalves, que nos últimos 4 anos pegou no meu pé corrigindo meu português e minha má escrita (e não teve oportunidade de corrigir esses agradecimentos, então relevem *typos* e coisas do gênero). Na verdade Thiago sempre foi incrível, tanto profissionalmente quanto pessoalmente, e sempre acreditou muito no meu potencial. Se eu consegui alcançar meus objetivos, definitivamente foi devido ao nosso trabalho em equipe. Agora essa boa relação orientador-orientanda abre espaço para o que acredito se tornar uma boa relação de amizade e mentoria (em alguns meses, porque você ainda vai me aturar por uns 6 meses porque temos que acabar o artigo).

Também gostaria de agradecer a toda minha família, meus tios e tias, meus primos e primas, que sempre tiveram um carinho enorme por mim e celebraram comigo todas minhas conquistas. Além disso, meus queridos amigos, os de vida e os que fiz no Rio de Janeiro nesses últimos 6 anos (até os que chegaram agora pra minha vida). Vocês representam absolutamente amor e apoio na minha vida, principalmente à base de café e chocolate.

Como eu já estou atrasada na entrega desse texto para a banca, não vou me prolongar mais. Todo mundo já conhece a versão prolongada à base de café e vinho do TCC.

Uma última coisa: P*@$!% M*$!%# EU VOU PRA ESO

(Ellen me aconselhou a não colocar palavrões nem nos agradecimentos da dissertação).

"Look, now you have a ladies room."

Vera Rubin, at The Palomar Observatory

Resumo

***Quenching* ou *Bursting?* Panoramas evolutivos de galáxias considerando aspectos morfológicos**

Camila de Sá Freitas

Orientador: Thiago Signorini Gonçalves

Resumo da Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós Graduação em Astronomia, Observatório do Valongo, da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ciências (Astronomia).

Neste projeto, usamos uma nova abordagem para entender quais processos físicos são os principais responsáveis pela interrupção da formação estelar nas galáxias e como esses processos podem estar relacionados com uma possível evolução morfológica. Nossa metodologia consiste na determinação e análise do *Star Formation Acceleration* - SFA - em função das morfologias, para diferentes faixas de cores. Brevemente, o SFA pode ser interpretado como a derivada temporal da taxa de formação estelar para os últimos 300 milhões de anos, permitindo a identificação em sua alteração, tanto para os casos de aumento ou diminuição. Nossa amostra principal vem do *Sloan Digital Sky Survey Data Release 12* combinado com e *Galaxy Evolution Explorer*, do qual temos informações fotométricas e espectroscópicas, para o Universo local ($0,020 \leq z \leq 0,120$). Para a classificação morfológica, dividimos nossa amostra em três: a primeira com base na classificação morfológica proveniente de *Galaxy Zoo citizen Project*, com 15.248 espirais e 3.329 elípticas; a segunda é uma combinação de classificação morfológica do *Galaxy Zoo* e um catálogo com classificação morfológica baseada na técnica de aprendizado de máquina supervisionado (daqui em diante, *Machine Learning*), com 21.143 espirais e 5.216 elípticas; a última é uma combinação de classificação morfológica do *Galaxy Zoo* e um catálogo com classificação morfológica baseada na técnica de aprendizado de máquina não supervisionado (daqui em diante, *Deep Learning*), com 22.757 espirais e 5.535 elípticas. Mostramos que, para as três amostras, espirais e elípticas têm diferentes valores médios de SFA na região do vale verde, com galáxias elípticas mostrando médias mais altas, e as distribuições de SFA como estatisticamente diferentes para espirais e elípticas. Este resultado está de acordo com o cenário em que *major mergers* desempenham um papel importante na evolução das galáxias, não apenas cessando a formação estelar em menores escalas de tempo, mas também desempenhando um papel na transformação morfológica.

palavras chave: *Astrofísica extragaláctica*, *evolução de galáxias*, *morfologia*, *quenching*, *bursting*

Rio de Janeiro

Março de 2020

Abstract

Quenching or Bursting? Evolutionary panoramas of galaxies considering morphological aspects

Camila de Sá Freitas

Advisor: Thiago Signorini Gonçalves

Abstract da Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós Graduação em Astronomia, Observatório do Valongo, da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ciências (Astronomia).

In this project, we used a new approach in order to understand which physical processes are the main responsible for quenching star formation in galaxies and how these processes can be related to galactic morphological evolution. Our methodology consists of the determination and analysis of *Star Formation Acceleration* – SFA – as a function morphology, for different color bins. Briefly, the SFA consists of the time derivative of the star formation rate, allowing for the identification of cases of bursting or quenching for the past 300 Myrs. Our main sample comes from *Sloan Digital Sky Survey Data Release 12* combined with and *Galaxy Evolution Explorer*, from which we have photometric and spectroscopic information for the local Universe ($0.020 \leq z \leq 0.120$). For morphological classification, we divided our sample in three: the first based on the morphological classification coming from *Galaxy Zoo citizen Project*, with $15,248$ spirals and $3,329$ ellipticals; the second is a combination of morphological classification from *Galaxy Zoo* and a catalog with morphological classification based on Machine Learning technique, with $21,143$ spirals and $5,216$ ellipticals; the last is a combination of morphological classification from *Galaxy Zoo* and a catalog with morphological classification based on Deep Learning technique, with $22,757$ spirals and $5,535$ ellipticals. We show that, for the three samples, spirals and ellipticals have different SFA average values in the green valley region, with elliptical galaxies showing higher averages for transitional color bins, and the SFA distributions as statistically different for spirals and ellipticals. This result conforms to the scenario where major merger plays an important role in galaxy evolution, not only quenching star formation in a smaller time scale but also playing a role in morphological transformation.

keywords: *Extragalactic astrophysics*, *galaxy evolution*, *morphology*, *quenching*, *bursting*

Rio de Janeiro

Março de 2020

Lista de Figuras

1.1 Esquema de fluxo para formação e evolução de galáxias, de Mo et al. (2010). 17
1.2 Taxa de foramação estelar específica (sSFR) vs. massa estelar ($M_\star$) 18
1.3 Esquema de processos evolutivos para galáxias, separando entre formação da galáxia, processos internos e processos externos 19
1.4 Figura 1 de Strateva et al. (2001), à **esquerda** temos a distribuição de galáxias (contornos) e estrelas (pontos) no diagrama de cor–cor 21
1.5 Ilustração da quebra de Balmer para diferentes populações estelares 21
1.6 Figuras 1 e 2 de Kauffmann et al. (2003a), mostrando a evolução de $D_n(4000)$ e $H\delta_A$ com o tempo, para diferentes metalicidades e considerando diferentes bibliotecas 22
1.7 Diagramas de cor–magnitude para amostra do SDSS, $z \sim 0.1$, e para amostra do DEEP2, $z \sim 1$. 23
1.8 Diagrama de cor–magnitude construído com a cor $(NUV - r)_{0.1}$ para uma amostra do SDSS com GALEX 24
1.9 Figura 12 de Wyder et al. (2007) para $M_{0.1,r} = -21.74$, onde os círculos são dados e a linha um ajuste para duas gaussianas 25
1.10 $H\delta_A$ *vs.* $D_n(4000)$ após o *quench* para 5 escalas de tempo 25
1.11 Valores de $\rho^{\cdot}$ em diferentes *redshifts* 26
1.12 Figura 8 de Nogueira-Cavalcante et al. (2018), mostrando diferentes índices de *quench* (γ) e escalas de tempo para diferentes morfologias em $z \sim 0.5 - 1$ 28
1.13 Diagrama sSFR–massa com o vetor fluxo de SFA para galáxias do SDSS, de Martin et al. (2017) 30
1.14 SFA com $(NUV - i)_0$ com recortes de massa. Figura 10 de Martin et al. (2017) 31
1.15 Figura 15 de Martin et al. (2017), ilustração de cenários evolutivos para os resultados apresentados nas Figuras 1.13 e 1.14. 31
1.16 Comportamento mediano da SFA com massa e com densidade de ambiente para todas as galáxias 32

2.1 *Field-of-view* de diferentes *surveys*, junto com a Lua e a galáxia Andrômeda (M31) para noção de escala. Figura 1 de Laher et al. (2017). 35
2.2 Amostra inicial, com 238.344 objetos, proveniente do SDDS-DR12 (Alam et al., 2015) 36
2.3 Figura 1 de Bianchi et al. (2017), mostrando a cobertura do GALEX GR6/7 em FUV e NUV, para os levantamentos AIS (azul) e MIS (verde) . 37
2.4 Representação do efeito de espalhamento da poeira nas luzes azul e vermelha. 38
2.5 Exemplo de espectro de emissão com linhas de Balmer 39
2.6 Distribuição de cor antes e depois da correção por avermelhamento 40

2.7 Representação de filtros de banda larga 41
2.8 Ilustração do desvio de espectro com *redshift* 41
2.9 Viés de Malmquist – Magnitude absoluta *vs. redshift* 43
2.10 *Galaxy Zoo* – Páginas inicial e para classificação morfológica 45
2.11 *Galaxy Zoo* – Diferentes critérios mínimos para classificação morfológica . 46
2.12 Figura 1 de Barchi et al. (2019) com ilustrativo da lógica por trás das abordagens de *Machine Learning* e *Deep Learning*. 47
2.13 Distribuições de $(NUV - r)_0$ para galáxias elípticas e espirais para os três casos de classificação morfológica considerados 48
2.14 Diagrama de cor-magnitude (CMD) para `GZ` 49
2.15 Diagrama de cor-magnitude (CMD) para `GZML` 50
2.16 Diagrama de cor-magnitude (CMD) para `GZDL` 51
2.18 Distribuição de número de votos e porcentagem de concordância na classificação morfológica de acordo com o *Galaxy Zoo* para as três amostras. . 52
2.19 Galáxias elípticas *"azuis"* 54
2.20 Galáxias espirais *"vermelhas"* 55

3.1 Representação esquemática de um *halo merger tree*, Figura 10 de Lacey and Cole (1993). 57
3.2 Exemplo de SED com diferentes componentes para ajustes separadas . . . 58
3.3 Exemplo de histórico de formação estelar simulado de Martin et al. (2017) 61
3.4 Figura 6 de Martin et al. (2017), painíes com parâmetros físicos recuperados com aplicação de nova metodologia 65

4.1 SFA *vs.* $(NUV - r)_0$ para espirais e elípticas comparando as três amostras 67
4.2 Distribuições de *SFA vs.* $(NUV - r)_0$ para `GZ` 69
4.3 Distribuições de *SFA vs.* $(NUV - r)_0$ para `GZML` 70
4.4 Distribuições de *SFA vs.* $(NUV - r)_0$ para `GZDL` 71
4.5 Distribuição de massa para galáxias espirais (azul) e elípticas (vermelho) . 73
4.6 Distribuições de *SFA vs.* $(NUV - r)_0$ para espirais em diferentes cortes de massa 74
4.7 Distribuições de *SFA vs.* $(NUV - r)_0$ para elípticas em diferentes cortes de massa 75
4.8 Relação entre os valores positivos de SFA e a escala de tempo τ em Gyr . 77

A.1 Exemplos de distribuição do vetor de *"diferença de média"* para dois casos, junto com o valor original (linha vertical, azul) 101
A.2 Exemplo ilustrativo de casos ideais para aplicação do teste KS, onde as linhas em negrito são 104
A.3 Testes estatísticos de permutação, KS e AD para as três amostras 108

B.1 Semanas temáticas abordadas pela #AstroMiniBR. 110
B.2 Início da campanha #EuPareçoCientista, que alcançou visibilidade nacional. 111
B.3 Tweet sobre o Dia Internacional de Mulheres e Meninas na Ciência. Acima, o retweet da página Quebrando o Tabu, com 1,5 milhões de seguidores. . . 112
B.4 Impacto da tag #ExistePesquisaNoBR para diferentes áreas do conhecimento. Astronomia está em roxo. Créditos Felipe Soares – doutorando UFRGS. 113
B.5 Capa do episódio sobre galáxias do Scicast. 114

Lista de Tabelas

A.1 Valores de *p-value* para o teste *Permutação* calculados em `R` para amostra do Galaxy Zoo (`GZ`) 102
A.2 Valores de *p-value* para o teste *Permutação* calculados em `R` para amostra do Galaxy Zoo + Machine Learning (`GZ+ML`) 103
A.3 Valores de *p-value* para o teste *Permutação* calculados em `R` para amostra do Galaxy Zoo + Deep Learning (`GZ+DL`) 103
A.4 Valores de *p-value* para os testes KS e AD calculados em `Python` para amostra do Galaxy Zoo (`GZ`) 106
A.5 Valores de *p-value* para os testes KS e AD calculados em `Python` para amostra do Galaxy Zoo + Machine Learning (`GZ+ML`) 107
A.6 Valores de *p-value* para os testes KS e AD calculados em `Python` para amostra do Galaxy Zoo + Deep Learning (`GZ+DL`) 107

Abreviações

CDM	**C**old **D**ark **M**atter
CMD	**C**olor-**M**agnitude **D**iagram
ULIRG	**U**ltra**L**uminous **I**nfra**R**ed **G**alaxies
SFR	**S**tar **F**ormation **R**ate
SFH	**S**tar **F**ormation **H**istory
SFA	**S**tar **F**ormation **A**cceleration
SFJ	**S**tar **F**ormation **J**erk
SFMS	**S**tar **F**ormation **M**ain **S**equence
EW	**E**quivalent **W**idth
MLR	**M**ulti-**L**inear **R**egression
KS	**K**olmogorov-**S**mirnov
AD	**A**nderson-**D**arling

Sumário

1 Introdução

1.1 Formação e evolução de galáxias 16
1.2 Diagrama de cor–magnitude como ferramenta de investigação 21
1.3 *Star Formation Acceleration* – SFA 28
1.4 Este trabalho 33

2 Amostra

2.1 Seleção de Dados 35
2.2 Tratamento de Dados 38
2.2.1 Avermelhamento Intrínseco 38
2.2.2 Correção-k 41
2.2.3 Viés de Malmquist 43
2.3 Classificação Morfológica 44
2.3.1 Galaxy Zoo Project 44
2.3.2 Catálogos de *Machine* e *Deep Learning* 46
2.4 Diagramas de cor-magnitude 48

3 Metodologia

3.1 Catálogo simulado 56
3.1.1 Construindo SEDs (*Spectral Energy Distributions*) e observáveis . . 58
3.2 Regressão linear como tradutor 62
3.3 *Star Formation Acceleration* – SFA 63

4 Resultados e Discussão
4.1 Tendências de SFA *vs.* $(NUV - r)_0$ 66
4.2 Comportamento para diferentes cortes de massa 72
4.3 Implicações no cenário evolutivo de galáxias elípticas e espirais 76

5 Conclusões 82

Referências Bibliográficas 85

A Testes estatísticos 100

A.1 *Permutação estimado por Monte Carlo* 101
A.2 Testes estatísticos complementares 103
A.2.1 *Kolmogorov-Smirnov* 104
A.2.2 *Anderson-Darling* 105

B Atividades de Divulgação Científica 109

Capítulo 1

Introdução

Desde a confirmação da natureza extragaláctica das chamadas *"nebulosas espirais"*, por Edwin Hubble (Hubble, 1925 – 1926), marcando o nascimento da Astrofísica Extragaláctica, houve um esforço para compreender como esses objetos se formam e evoluem. Desde o início, tratando-se de morfologias, notou-se que galáxias se dividiam principalmente em dois grandes grupos principais, apesar de existirem outros. O próprio Hubble foi um pioneiro em classificá-las, dividindo galáxias entre tipos *tardio* e *anterior*[1] (Hubble, 1927), e foi seguido por muitos autores que buscavam maneiras diferentes de classificar galáxias de acordo com suas estruturas (e.g. Sandage, 1961, 1995; De Vaucouleurs, 1959; Morgan, 1958, 1970; van den Bergh, 1960, 1976).

Por ser um campo relativamente novo, com menos de cem anos, ainda existem muitas perguntas em aberto acerca destes objetos, principalmente na questão de cenários evolutivos. Nesse trabalho, visamos contribuir para responder grandes perguntas, especialmente acerca do aspecto evolutivo do ponto de vista morfológico.

1.1 Formação e evolução de galáxias

Atualmente, o paradigma mais aceito para formação e evolução de galáxias é o proveniente da cosmologia de ΛCDM, junto com o cenário de *merger trees*. Brevemente, o ΛCDM entende que o Universo é principalmente composto por matéria escura fria

[1] Em inglês *late-* e *early-type*, respectivamente.

(*Cold Dark Matter*, em inglês) em um contexto de expansão acelerada devido à energia escura (representado pela constante Λ – e.g. Lacey and Cole, 1993).

Junto a isso, este cenário prevê que a formação das grandes estruturas, observadas hoje, foram iniciadas através de pequenas perturbações durante os primeiros anos após o *Big Bang* (Zel'Dovich, 1970).

De forma resumida, após o colapso do gás primordial em halos de matéria escura, e os conseguintes agrupamentos hierárquicos, as galáxias alcançaram massas, formas e características que observamos hoje. Concomitantemente, existem diversos processos evolutivos pelos quais estas podem passar, como pode ser visto na Figura 1.1.

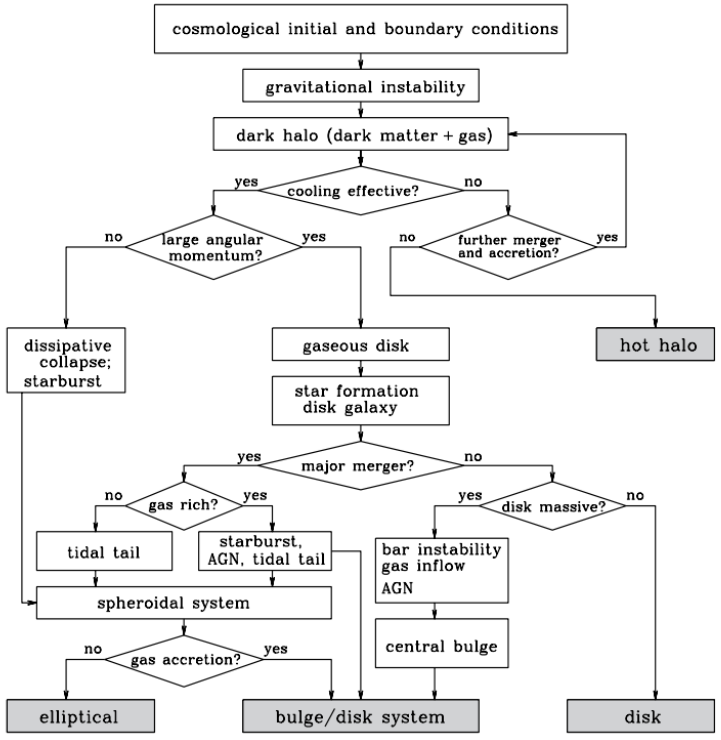


FIGURA 1.1. Esquema de fluxo para formação e evolução de galáxias, de Mo et al. (2010).

Esses processos são responsáveis por alterar ou conservar algumas propriedades físicas, como massa, metalicidade do gás e presença de gás molecular e, simultaneamente, a taxa de formação estelar das galáxias (*Star Formation Rate* em inglês – SFR), entre outras. No aspecto da SFR, classificamos galáxias de acordo com um comportamento médio conhecido como sequência principal de formação estelar (*Star Formation Main Sequence* em inglês – SFMS). A SFMS é uma relação bem estabelecida entre SFR e a massa estelar, aproximadamente linear, presente em diferentes *redshifts* (e.g. Brinchmann et al., 2004; Salim et al., 2007; Daddi et al., 2007; Whitaker et al., 2012) e que apresenta baixa dispersão. Com essas características, ela pode ser amplamente utilizada para classificar galáxias, especialmente entre ativa e passivas (e outros grupos), como pode ser visto na Figura 1.2.

Como mencionado, diferentes processos físicos podem afetar o estado de formação estelar da galáxia, principalmente no sentido de retirá-la da SFMS para um estado passivo. Essa migração do estado ativo para o passivo é conhecida como *quenching*, isto é, o ato de diminuir a taxa de formação estelar. Tanto o comportamento bimodal (i.e formadoras de estrelas ou passivas) quanto os processos evolutivos relacionados com o estado da galáxia, são amplamente investigados hoje, tanto para o Universo Local quanto para *redshifts* mais altos (e.g. Martin et al., 2007; Gonçalves et al., 2012; Nogueira-Cavalcante et al., 2019).

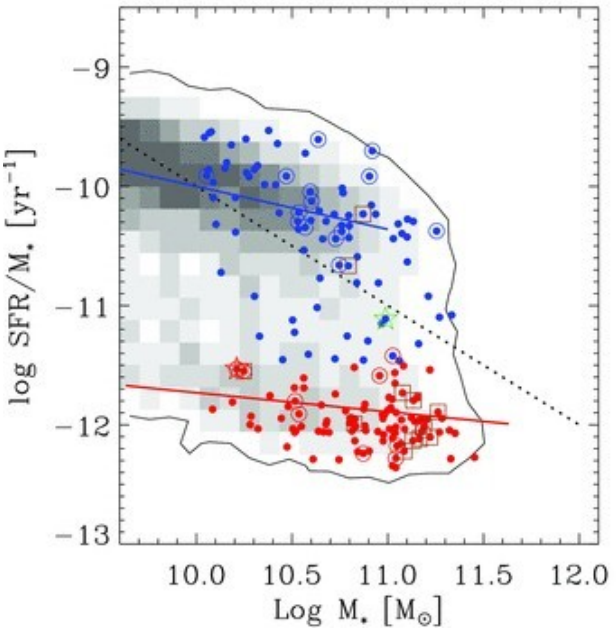


FIGURA 1.2. Taxa de foramação estelar específica (sSFR) vs. massa estelar ($M_\star$) para galáxias do Universo Local. Escala de cinza representa distribuição de $SFR/M_\star$ e pontos azuis e vermelhos representam galáxias formadoras de estrelas e passivas, respectivamente. Para mais informações, Figura 8 de Schiminovich et al. (2010).

Podemos separar esses processos de evolução em dois grupos (Figura 1.3): (*i*) processos devido a estruturas internas da galáxia e sua própria dinâmica; e (*ii*) processos externos, que envolvem interações com outras galáxias ou com o ambiente. A forma que esses processos podem afetar propriedades físicas das galáxias (e.g. a formação estelar, a estrutura das galáxias, a manutenção do gás molecular), varia para cada cenário evolutivo, distinguindo-se também pelas escalas de tempo que esses processos levam para acontecer, principalmente cessando a formação estelar.

Com o advento de grandes levantamentos observacionais (e.g. *Sloan Digital Sky Survey* – Gunn et al., 2006; *Galaxy Evolution Explorer – Martin et al., 2005*, *Vera Rubin Observatory*[3]) podemos analisar, em comportamentos médios, quais processos são os principais responsáveis por alterações nas galáxias, apesar das mesmas passarem por diversos processos simultaneamente.

[3]https://www.lsst.org/
[4]https://chandra.as.utexas.edu/secular-secular.html

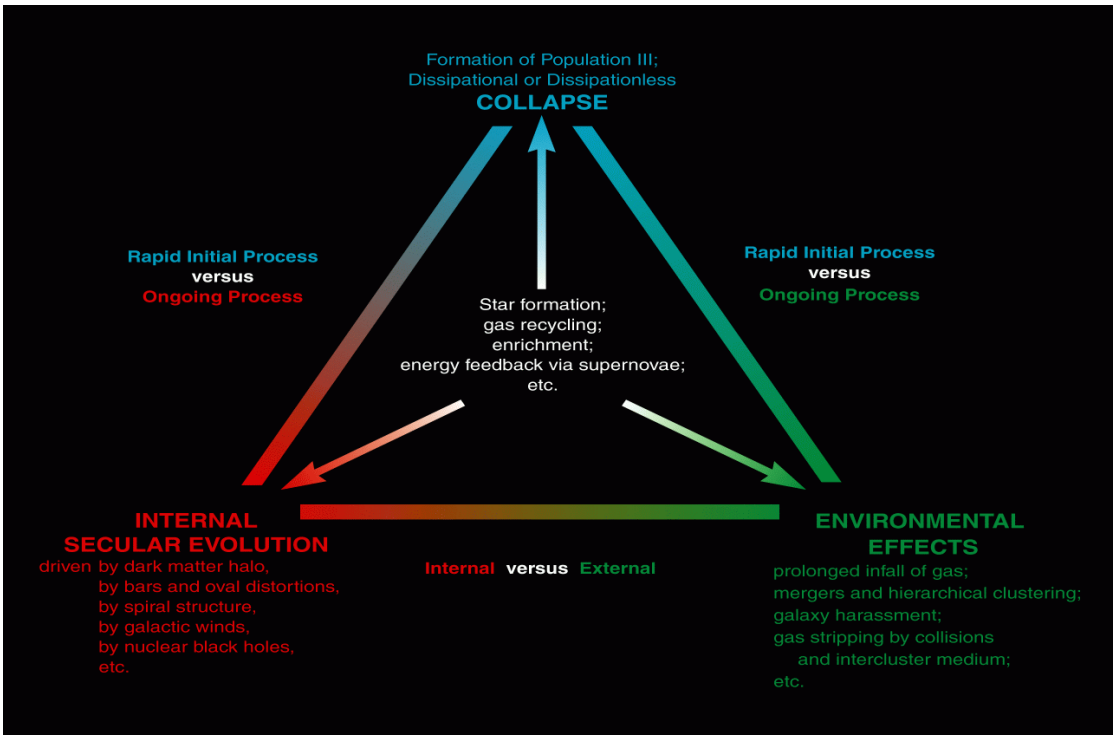


FIGURA 1.3. Esquema[4] de processos evolutivos para galáxias, separando entre formação da galáxia (em azul), processos de evolução internos (em vermelho) e processos evolução externos (em verde). Escrito ao centro do esquema temos processos que a galáxia geralmente passa durante sua vida: formação estelar, enriquecimento químico do gás, *feedbacks* de supernovas, entre outros.

Galáxias em grupos e aglomerados são mais suscetíveis a processos que envolvem interações com outras galáxias e com ambiente, como *major/minor mergers*, *feedback* de AGN desencadeado pela interação, assédio galáctico, pressão de arraste e estrangulamento (e.g. Boselli and Gavazzi, 2014; Schawinski et al., 2014; Bluck et al., 2014; Nogueira-Cavalcante et al., 2018). Por outro lado, galáxias isoladas são mais suscetíveis a processos seculares, como instabilidades no disco, *halo quenching*, *feedback* estelar, entre outros (e.g. Sheth et al., 2005; Fabian, 2012; Fang et al., 2013; Hopkins et al., 2014; Hopkins et al., 2014).

Além disso, podemos diferenciar também os processos de *quenching* entre lentos/-seculares ($>\sim$ 1 Gyrs), e rápidos ($\sim$ 300 Myrs – e.g. Gonçalves et al., 2012; Schawinski et al., 2014, Martin et al., 2017), sendo que estes se diferenciam principalmente pela forma de consumo do gás molecular. Para processos lentos, temos uma interrupção do abastecimento de gás molecular frio (e.g. Schawinski et al., 2014), e um consumo normal do gás molecular restante da galáxia, isto é, a SFR não é abruptamente alterada. Em contrapartida, quando se trata de processos evolutivos rápidos, além da interrupção do fornecimento do gás molecular, podemos ter também uma alteração significativa na SFR.

Isto é, temos ou um aumento repentino (i.e. *burst*) e/ou uma diminuição repentina (i.e. *quench*) na taxa de formação estelar. Exemplificando, podemos ter um consumo acelerado do gás restante, sendo o caso de um aumento da SFR, ou podemos ter a expulsão e/, ou aquecimento do mesmo, impossibilitando a continuidade da formação estelar de forma abrupta e sendo um caso de diminuição da mesma.

Um bom exemplo de caminho evolutivo é o *major merger* de galáxias espirais ricas em gás, mais comum para ambientes de grupos. Entre diversos fatores, esse processo é capaz de explicar uma rápida transição pelo vale verde junto com uma transformação morfológica dos objetos. O processo inteiro, desde as primeiras interações até o resultado final, pode levar cerca de 1-2 Gyrs (e.g. Springel et al., 2005a), mas possui diferentes fases. Em um primeiro momento, podemos ter um *burst* de formação estelar, em que o gás é consumido e transformado em estrelas (e.g. Di Matteo et al., 2005). Junto a isso podemos ter a expulsão do gás por conservação de momento angular e o re-direcionamento do mesmo para regiões centrais, possivelmente alimentando um buraco negro central supermassivo e desencadeando *feedbacks* de AGN (e.g. van der Hulst et al., 1990). Estudos mostram, através da investigação de galáxias ultraluminosas no infravermelho (*Ultraluminous Infrared Galaxies* – ULIRGs, em inglês), o papel de interações fortes e *mergers* como agentes responsáveis por desencadear o estágio de *quasar* em buracos negros centrais de galáxias (e.g. Sanders et al., 1990; Schweitzer et al., 2006; Veilleux et al., 2006). ULIRGs são galáxias com fortes indícios de interações, com perturbações em suas morfologias, e entende-se que representam o estágio inicial de *trigger* do AGN, dando origem a *quasares*. Sua forte emissão no IR é explicada pelo obscurecimento pela presença de poeira (e.g. Soifer et al., 1984). Springel et al. (2005a) mostraram em simulações que *feedbacks* de AGN em *major mergers* são essenciais para cessar completamente a formação estelar, principalmente no caso de espirais ricas em gás. Este último pode aquecer o gás do meio interestelar e/ou expulsá-lo, acarretando uma queda abrupta na SFR (e.g. Di Matteo et al., 2005; Cattaneo et al., 2005; Schawinski et al., 2009; Fabian, 2012) e sendo responsável por uma rápida evolução. O objeto remanescente, após passar por todas essas fases, é uma galáxia elíptica passiva e vermelha, pobre em gás molecular (e.g. Sanders et al., 1990; Springel et al., 2005a; Hopkins et al., 2006; Schawinski et al., 2014; Nogueira-Cavalcante et al., 2019).

1.2 Diagrama de cor–magnitude como ferramenta de investigação

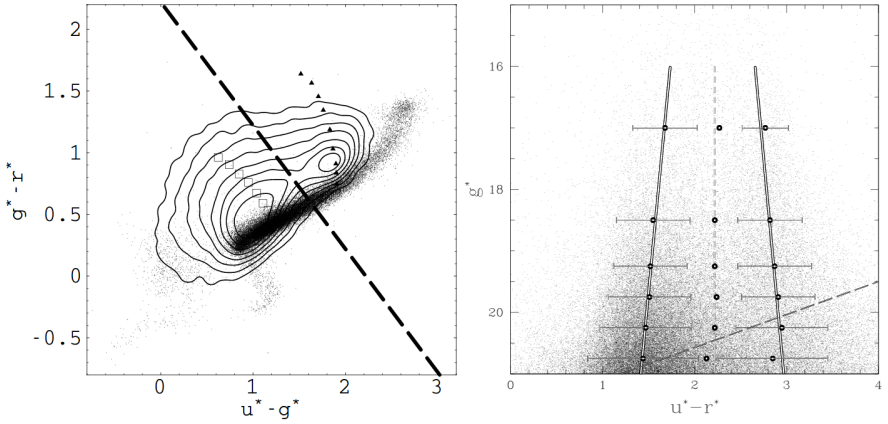


FIGURA 1.4. Figura 1 de Strateva et al. (2001), à **esquerda** temos a distribuição de galáxias (contornos) e estrelas (pontos) no diagrama cor–cor, onde a linha tracejada corresponde a $u^* - r^* = 2.22$. Os quadrados e triângulos representam a evolução teórica para galáxias espirais e elípticas, entre $0 < z < 0.4$, com *bins* de $z = 0.05$. À **direita** temos o diagrama de cor–magnitude $u^* - r^*$ *vs.* g^*, onde os círculos marcam os picos no azul e no vermelho.

Existem muitas ferramentas para se estudar o cenário evolutivo de galáxias, e uma delas é o diagrama de cor–magnitude (*color–magnitude diagram* – CMD). Enquanto o CMD para estrelas (também conhecido como diagrama Hertzsprung-Russell) hoje é bem compreendido e um bom diagnóstico para sua evolução, o caso para galáxias é mais complicado, dado que esses objetos são mais complexos e envolvem mais variáveis, como histórico de formação estelar (SFH), função de massa inicial (IMF), evolução química e atenuação por presença de poeira.

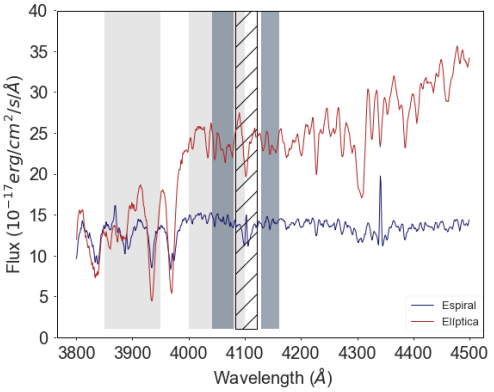


FIGURA 1.5. Exemplo ilustrativo para quebra de Balmer onde o espectro vermelho corresponde a uma galáxia elíptica passiva e o espectro azul uma galáxia espiral ativa. As áreas sombreadas de cinza claro são correspondentes às áreas para medida do $D_n(4000)$ de acordo com Kauffmann et al. (2003a).

Há muito se sabe que a cor das galáxias é um indicativo de sua população estelar predominante e, além disso, que existe uma relação com sua morfologia (Hubble and Rosseland, 1936; Humason, 1936; De Vaucouleurs, 1961; Buta et al., 1994). Entretanto, o primeiro trabalho que realmente analisou a distribuição de cor de uma grande amostra, e detectou um comportamento dicotômico, foi Strateva et al. (2001). Neste trabalho, os

autores analisaram cores ópticas de 147.920 galáxias do *Sloan Digital Sky Survey* (York et al., 2000), investigando o diagrama cor–cor $g^* - r^*$ *vs.* $u^* - g^*$, identificando um mínimo em $u^* - r^* = 2.22$ (Figura 1.4).

Strateva et al. (2001) também consideraram dois subgrupos com classificações morfológicas baseadas em análises visuais (287 galáxias) e espectroscópicas (500 galáxias), reforçando a correspondência dos dois picos com o tipo de galáxias, onde galáxias do tipo tardio (Sb, Sc e Irr) são majoritariamente azuis, e do tipo anterior (E, S0 e Sa) são majoritariamente vermelhas, apesar de existirem casos menos comuns (e.g. elípticas azuis).

Posteriormente, Baldry et al. (2004) analisaram a bimodalidade presente no diagrama de cor–magnitude ($u - r$ vs. M_r) para uma amostra local ($0.004 < z < 0.08$, $-23.5 < M_r < -15.5$). Os autores mostraram que era possível ajustar às distribuições de cores duas gaussianas, uma que ficou conhecida como sequência vermelha e outra como nuvem azul, que separavam galáxias passivas e formadoras de estrelas, respectivamente. A diferença entre os nomes (*"sequência"vs. "nuvem"*) se dá principalmente devido a correlação entre cor e magnitude absoluta, onde a primeira possui uma maior correlação (ou seja, uma menor dispersão) que a segunda. Também analisaram a relação com morfologia para uma amostra proveniente do SDSS. Além disso, os autores ressaltaram que a cor média varia com magnitude absoluta, de forma que, as galáxias mais massivas são mais vermelhas, com uma transição mais abrupta em uma luminosidade correspondente a uma massa de $M \sim 2 \times 10^{10}$. O fato de galáxias mais massivas serem passivas está de acordo com o cenário de *downsizing*, onde a formação estelar se concentra cada vez mais em galáxias de menores massas (e.g. Bell et al., 2004; Bundy et al., 2006; Faber et al., 2007).

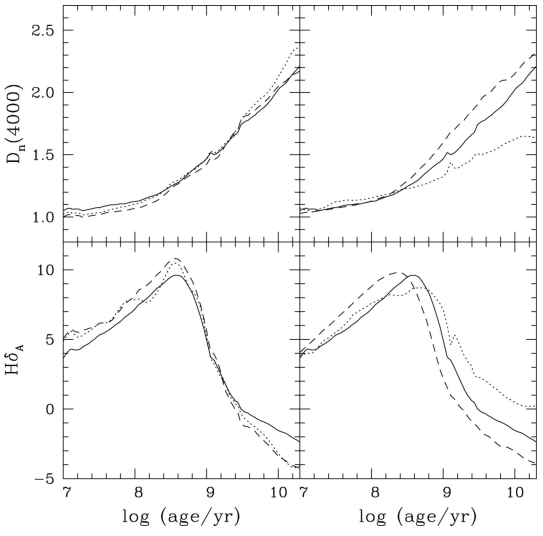


FIGURA 1.6. Figuras 1 e 2 de Kauffmann et al. (2003a), mostrando a evolução de $D_n(4000)$ (painel superior) e $H\delta_A$ (painel inferior) com o tempo, para diferentes metalicidades (diferentes linhas no **painel direito**) e considerando diferentes bibliotecas (diferentes linhas no painel **esquerdo**), para um surto de formação estelar.

Ademais da dependência com a massa, também foi notado que o comportamento do CMD depende do ambiente. Apesar da razão entre galáxias azuis e vermelhas variar com a densidade do ambiente (Oemler, 1974), as cores médias para a nuvem azul e para a sequência vermelha são quase independentes de ambiente, como demonstrado por Balogh et al. (2004). Entretanto, enquanto a luminosidade das galáxias azuis quase não varia com o ambiente, galáxias vermelhas de luminosidade intermediárias são, em média, menos encontradas em ambientes densos (Hogg et al., 2003).

A essa altura, o esboço para evolução de galáxias no CMD estava começando a ficar mais claro: galáxias com população estelar jovem estavam localizadas na nuvem azul, indicando formação estelar, e galáxias sem formação estelar habitavam a sequência vermelha. Junto com isso, a dependência com a morfologia sugeria um cenário em que galáxias passam por *major merger*, como levantado em trabalhos como Baugh et al. (1996), Kauffmann (1996), Kauffmann and Charlot (1998) e Baldry et al. (2004).

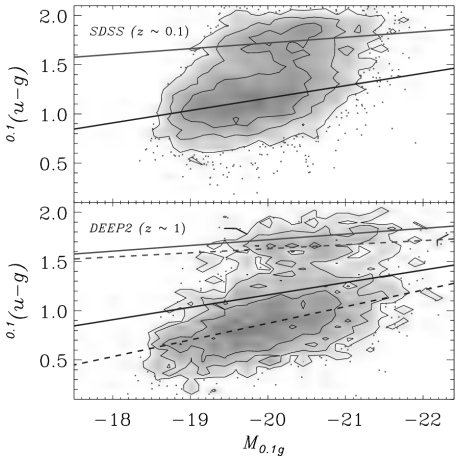


FIGURA 1.7. Diagramas de cor–magnitude para amostra do SDSS (painel superior), $z \sim 0.1$, e para amostra do DEEP2 (painel inferior), $z \sim 1$. Linhas sólidas indicam a nuvem azul e a sequência vermelha, onde no segundo painel é possível comparar a diferença entre as amostras com a linha tracejada mostrando os valores para amostra do SDSS. Figura 3 de Blanton (2006).

Tratando-se de estudar modelos de evolução de galáxias e diferentes cenários evolutivos, novas metodologias começaram a ser aplicadas, sendo uma delas a de Kauffmann et al. (2003a), que posteriormente foi amplamente utilizada. Essa metodologia se baseia nos índices espectrais $H\delta_A$ (Worthey and Ottaviani, 1997) e $D_n(4000)$ (Balogh et al., 1999), e tem como objetivo modelar os históricos de formação estelar, atenuação de poeira e massa estelar. A absorção do $H\delta$ está associada à presença de estrelas do tipo A, e é mais expressivo em galáxias que sofreram surto de formação estelar nos últimos 0.1 - 1 Gyrs, quando estrelas do tipo O e B evoluíram e saíram da sequência principal. Já o $D_n(4000)$ é uma descontinuidade do espectro e é devido à presença de metais, que absorvem em comprimentos de onda menores que 4000 Å, rebaixando essa região do continuo. Na presença de estrelas massivas, que são fontes eficazes de ionização desses metais, a radiação dessa parte do espectro não é completamente absorvida, suavizando

o rebaixamento do contínuo nessa região e, consequentemente, o próprio $D_n(4000)$. Temos na Figura 1.5 dois exemplos de SED dessa região para duas populações estelares: em vermelho, uma população estelar velha e em azul uma população estelar jovem. As regiões cinza claro indicam onde o $D_n(4000)$ é medido, isto é, é feita uma razão das médias de fluxo das duas regiões. No caso da população jovem, notamos que a razão será próxima de um, enquanto para a população velha, a razão será maior que um, já que a descontinuidade é mais acentuada.

O sub-índice n vem da palavra *"narrow"*, pois é uma versão mais estreita das regiões cinzas, comparando com trabalhos anteriores (Bruzual et al., 1983). Já na Figura 1.6 (figura 2 de Kauffmann et al., 2003a), podemos ver a evolução dos índices espectrais (para diferentes metalicidades e diferentes modelos de populações estelares) com o tempo. A tendência para o $D_n(4000)$ (painel superior) é aumentar com o tempo, uma vez que estrelas mais massivas morrem primeiro e os metais tornam a absorver essa região do espectro. Já a absorção de $H\delta$ possui um pico associado à presença dominante de estrelas do tipo A, que predominam a luminosidade em $\lambda \lesssim 4000$ Å após a saída da sequência principal de estrelas do tipo O e B.

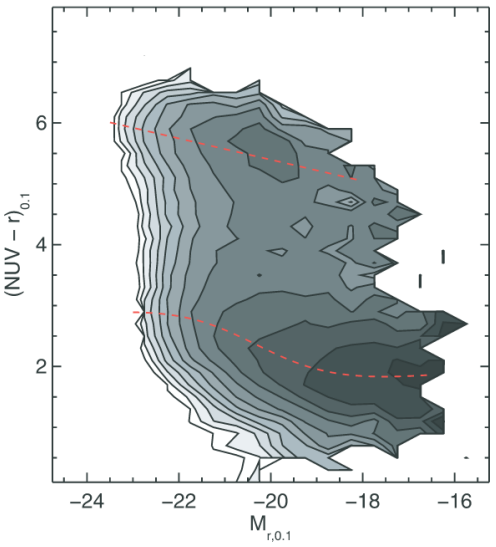


FIGURA 1.8. Diagrama de cor–magnitude construído com a cor $(NUV-r)_{0.1}$, figura 9 de Wyder et al. (2007), para uma amostra do SDSS com GALEX.

Aplicando esses parâmetros, Kauffmann et al. (2003b) demonstraram que galáxias tendem a se dividir em dois grupos distintos em torno de $M_* = 3 \times 10^{10} M_\odot$, em que galáxias com massas superiores a esse valor tendem a ser passivas, e galáxias com massas inferiores tendem a possuir formação estelar, valor semelhante ao encontrado posteriormente por Baldry et al. (2004).

Por fim, o diagrama cor–magnitude também foi investigado para *redshifts* mais altos, mostrando que a bimodalidade já estava presente em pelo menos $z \sim 1$, mas as cores para sequência vermelha e nuvem azul eram mais azuis, e as funções de luminosidade

indicavam galáxias mais luminosas (Figura 1.7; e.g. Blanton 2006; Willmer et al., 2006; Faber et al., 2007).

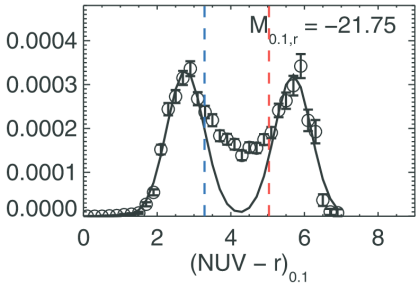


FIGURA 1.9. Figura 12 de Wyder et al. (2007) para $M_{0.1,r} = -21.74$, onde os círculos são dados e a linha um ajuste para duas gaussianas, representando a sequência vermelha e a nuvem azul, separadamente. As linhas verticais tracejadas mostram os limites onde o ajuste das gaussianas são representativas.

Com o lançamento do *Galaxy Explorer Survey* (GALEX; Martin et al., 2005), um telescópio espacial que observou a região espectral do ultra-violeta (FUV – $\lambda_{eff} \sim 1528$ Å; e NUV – $\lambda_{eff} \sim 2310$ Å), foi possível investigar o CMD construído com cores UV-óptico (Wyder et al., 2007; Martin et al., 2017; Salim et al., 2007 – Figura 1.8). A emissão no ultra-violeta é majoritariamente associada a estrelas massivas com tempo de vida até $\sim 10^8$ anos. Mesmo podendo também estar associada a estrelas de baixa massa evoluídas (e.g. Yi et al., 2005), o UV é sensível à formação estelar recente (e.g. Kennicutt Jr, 1998), e tem uma capacidade de selecionar objetos da nuvem azul melhor que a banda u^* do SDSS.

Além disso, comparando o CMD utilizando $NUV - r$ (Figura 1.8) e o CMD utilizando $u-r$ (Figura 1.7), podemos notar que $(NUV - r)_{0.1} \sim 0 - 7.0$ enquanto $(u - r)_{0.1} \sim 0 - 2.0$, ou seja, temos uma faixa dinâmica para analisar as estruturas do CMD quando consideramos o UV. De fato, Wyder et al. (2007) demonstraram que a distribuição de cor para galáxias, quando consideramos a resolução do $NUV - r$, não pode ser ajustada por uma soma de duas gaussianas (Figura 1.9), e que existe uma população de transição entre a nuvem azul e a sequência vermelha, denominada vale verde (e.g. Salim et al., 2007; Wyder et al., 2007; Martin et al., 2007; Cirasuolo et al., 2007).

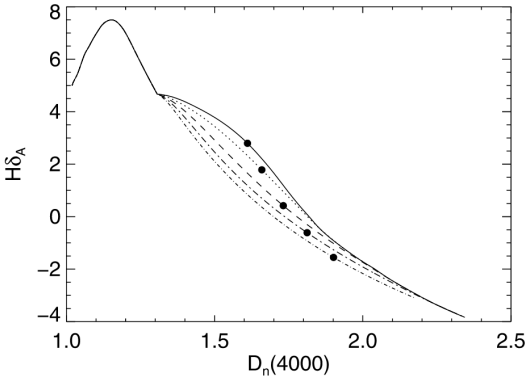


FIGURA 1.10. $H\delta_A$ *vs.* $D_n(4000)$ após o *quench* para 5 escalas de tempo $\gamma = 20$ Gyr^{-1} (linha sólida); $\gamma = 5$ Gyr^{-1} (linha pontilhada); $\gamma = 2$ Gyr^{-1} (linha tracejada); $\gamma = 1$ Gyr^{-1} (linha ponto-tracejada longo); $\gamma = 0.5$ Gyr^{-1} (linha ponto-tracejada curto). Os pontos maiores indicam valores para cor de $NUV - r = 4.25$ para cada γ. Figura 9 de Martin et al. (2007)

Em um cenário simples, galáxias deixariam de formar estrelas, passando por um *quench* e migrando da nuvem azul para a sequência vermelha. Essa transição, entretanto, não pode ser explicada devido ao simples consumo do gás presente na galáxia, pois as escalas de tempo de consumo de gás de $\sim$ 2 Gyrs para o Universo Local (e. g. Bigiel et al., 2008) e, $\sim$ 0.75 Gyrs para $z = 1 - 3$ (e.g. Tacconi et al., 2013), não são consistentes com a escassez de galáxias no vale verde e com o crescimento observado da sequência vermelha (e.g. Faber et al., 2007).

Junto a isso, Martin et al. (2007) utilizaram os índices espectrais de Kauffmann et al. (2003a), $H\delta_A$ e $D_n(4000)$, junto com a cor $NUV - r$ e históricos de formação estelar modelados com decaimento exponencial (SFH $\sim$ SFR $\times e^{-\gamma t}$), visando estudar a escala de tempo de *quench* através do índice γ, em Gyr^{-1}. Na Figura 1.10 temos modelos de evolução após o *quench*, no diagrama de $H\delta_A$ *vs.* $D_n(4000)$ para 5 cenários: $\gamma = 20$ Gyr^{-1} (linha sólida); $\gamma = 5$ Gyr^{-1} (linha pontilhada); $\gamma = 2$ Gyr^{-1} (linha tracejada); $\gamma = 1$ Gyr^{-1} (linha ponto-tracejada longo); $\gamma = 0.5$ Gyr^{-1} (linha ponto-tracejada curto). Os pontos maiores indicam valores de γ para cor de $NUV - r = 4.25$. Nesse trabalho, os autores também definiram uma nova variável para medir a quantidade de massa que atravessa um bin no CMD por unidade de volume no universo por unidade de tempo, a *densidade do fluxo de massa* das galáxias que evoluem da nuvem azul para a sequência vermelha, encontrando $\dot{\rho}_T = 0.033$ M$_\odot$ yr$^-$1 Mpc^{-3} (limite superior).

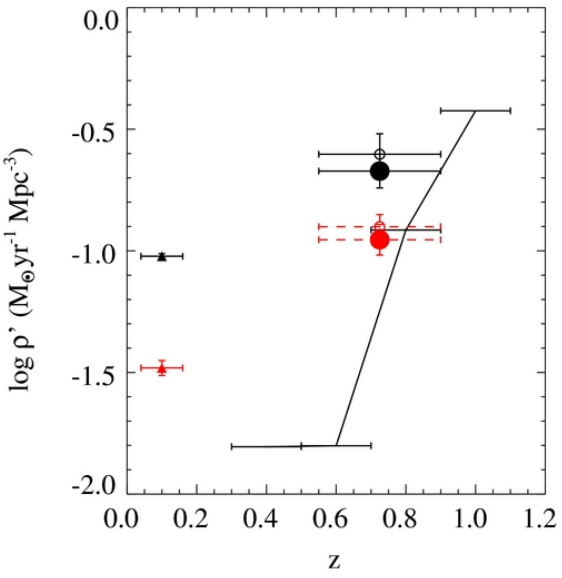


FIGURA 1.11. Valores de $\dot{\rho}$ em diferentes *redshifts*. Os círculos são dados de Gonçalves et al. (2012) e os triângulos de Martin et al. (2007), onde as cores indicam com (vermelho) e sem (preto) correção da extinção. A linha sólida é a taxa de crescimento da densidade da sequência vermelha, de acordo com Faber et al. (2007). Figura 11 de Gonçalves et al. (2012).

Expandindo a análise de Martin et al. (2007), Gonçalves et al. (2012) analisaram a *densidade do fluxo de massa* para galáxias em *redshifts* intermediários ($z \sim 0.8$).

Os autores encontraram que, no passado, as galáxias evoluíam mais rapidamente

pelo vale verde (Figura 1.11) e os objetos em transição eram mais massivos, em um cenário *top-down* em que a parte mais massiva da sequência vermelha teria se formado antes. Esses resultados estão de acordo com o cenário de *downsizing*, e com a taxa de crescimento da densidade da sequência vermelha (Faber et al., 2007).

Embora a maioria das classificações morfológicas considere apenas parâmetros estruturais, existem muitos estudos mostrando que existem correlações entre morfologia e propriedades físicas (e.g. Roberts and Haynes, 1994; Blanton and Moustakas, 2009, Nair and Abraham, 2010). Quanto ao estudo de morfologia no vale verde para o Universo Local, Schawinski et al. (2014) fizeram uma análise para uma amostra do SDSS com a classificação morfológica proveniente do *Galaxy Zoo Project* (Lintott et al., 2010). Os autores também encontraram que o caminho evolutivo de galáxias dentro do CMD não é único, variando com morfologia, afirmando que apenas galáxias que passam por um *merger* possuem uma transição rápida, enquanto galáxias espirais experienciam processos que envolvem o corte do fornecimento de gás, mantendo sua morfologia de disco até cores mais vermelhas.

Levando isso em consideração e dando prosseguimento a análise de Martin et al. (2007) e Gonçalves et al. (2012), Nogueira-Cavalcante et al. (2018) calcularam a escala de tempo de *quench* em *redshifts* intermediários ($z \sim 0.5 - 1$) para diferentes tipos morfológicos: esferoidal, com disco, irregular e merger, separando as com disco de acordo com a proeminência da barra. Os autores encontraram diferentes escalas de tempo para diferentes morfologias (Figura 1.12), reforçando o cenário em que processos de *quench* afetam a estrutura das galáxias. Nogueira-Cavalcante et al. (2018) também associam a rápida transição no vale verde principalmente à interação entre galáxias, associada às morfologias elípticas, irregulares e de *mergers* (com menores escalas de tempo). Além disso, argumentam que isso explica porque a densidade de fluxo é mais alta para maiores *redshifts* (Gonçalves et al., 2012), já que o número de *mergers* era maior no passado (e.g. Conselice, 2006; Lin et al., 2008). Por fim, Nogueira-Cavalcante et al. (2018) também mostram que o efeito de *downsizing* ocorre para todas as morfologias (e.g. Asari et al., 2007), dado que mesmo galáxias com disco mostram uma evolução mais rápida no vale verde para *redshifts* mais altos, não apenas galáxias elípticas.

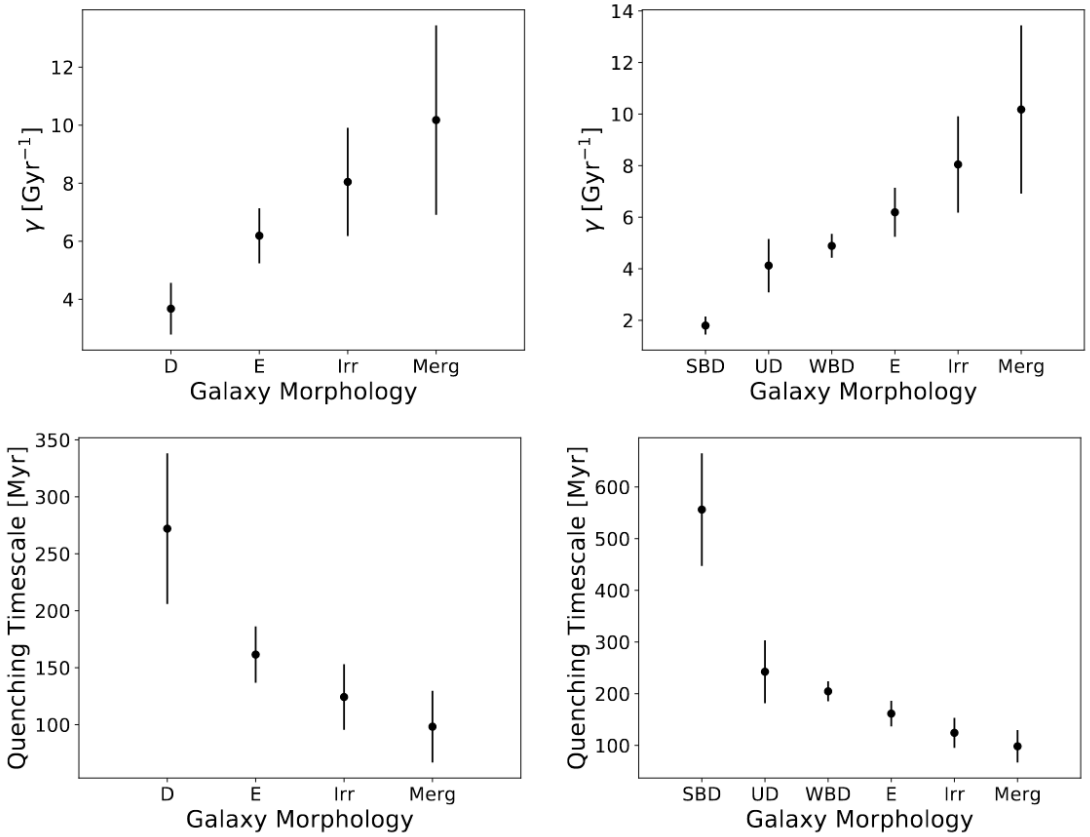


FIGURA 1.12. Figura 8 de Nogueira-Cavalcante et al. (2018), mostrando diferentes índices de *quench* (γ; painel superior) e escalas de tempo (painel inferior) para diferentes morfologias em $z \sim 0.5 - 1$. As morfologias são: Com disco (D), elípticas (E), irregulares (Irr), merging (merg), fortemente barradas (SBD), sem barra (UD) fracamente barradas (WBD).

1.3 *Star Formation Acceleration* – SFA

Os trabalhos mencionados até aqui proporcionaram grandes avanços na compreensão dos cenários evolutivos para galáxias, especialmente através da investigação do CMD. Entretanto, a maioria destes faz duas hipóteses limitantes que não correspondem a um cenário evolutivo realista, sendo elas:

1. No diagrama cor-magnitude, galáxias se movem apenas na direção de cores mais vermelhas;

2. Um modelo de histórico de formação estelar (*Star Formation History* - SFH) com uma taxa constante, até t_0, seguida por um decaimento exponencial, como parametrizada em 1.3.1.

$$SFR(t) = \begin{cases} SFR(t=0), & \text{se } t < t_0 \\ SFR(t=0)e^{-\gamma t}, & \text{se } t > t_0 \end{cases} \tag{1.3.1}$$

Hoje sabemos que, mesmo após se tornarem passivas, galáxias podem passar por processos de rejuvenescimento, ao receber abastecimento de gás molecular através de algum mecanismo (e.g. Pawlik et al., 2018). Uma possibilidade seria o gás de galáxias satélites ser transferido para a galáxia hospedeira (e.g. Martin et al., 2017), que voltaria a formar estrelas (e.g. Rampazzo et al., 2007; Martin et al., 2017; Pandya et al., 2017). Com isso, a hipótese 1 se torna inválida. Outro fator é a simplicidade com que se modela a região de transição do vale verde com um decaimento exponencial (hipótese 2). Apesar de ter se mostrado uma metodologia razoavelmente eficaz, principalmente para explicação da construção da sequência vermelha, sabe-se que processos de *quench* são mais complexos e pedem por um histórico de formação estelar menos simplista.

Com essas considerações, Martin et al. (2017) introduziram uma nova metodologia não paramétrica para entender como as galáxias evoluem. Brevemente, os autores introduziram uma metodologia capaz de traduzir propriedades observáveis (e.g. índices espectrais, magnitudes e cores) em parâmetros físicos das galáxias (e.g. SFR e massa estelar). Além disso, eles introduziram o *Star Formation Acceleration*, que pode ser interpretado como a derivada temporal instantânea da taxa de formação estelar (SFR) nos últimos 300Myrs. A ideia por trás da metodologia pode ser resumida nos seguintes passos:

1. Usando o modelo semi-analítico (`SAM`) de De Lucia et al. (2006) acoplado à simulação cosmológica de N-corpos *Millennium* (Springel et al., 2005b), os autores puderam construir um catálogo com um grande número de galáxias simuladas, com histórico de formação estelar (SFH) e suas propriedades físicas conhecidos.

2. Em seguida, visando simular os observáveis dessas galáxias a partir dos históricos de formação estelar, usaram modelos de atenuação e síntese de populações estelares, obtendo os fluxos em filtros de banda larga e índices espectrais.

3. Como a principal fonte de variação entre os espectros (*Spectral Energy Distributions* – SED) é a idade da população estelar, os autores dividiram a amostra em *bins* de $D_n(4000)$ para isolá-la, já que este é um bom proxy.

4. Em cada *bin*, foi realizada uma regressão linear entre os observáveis e os parâmetros físicos para toda a amostra de galáxias.

5. A matriz de coeficientes pode então ser usada como tradutor para dados reais, traduzindo os observáveis em parâmetros físicos.

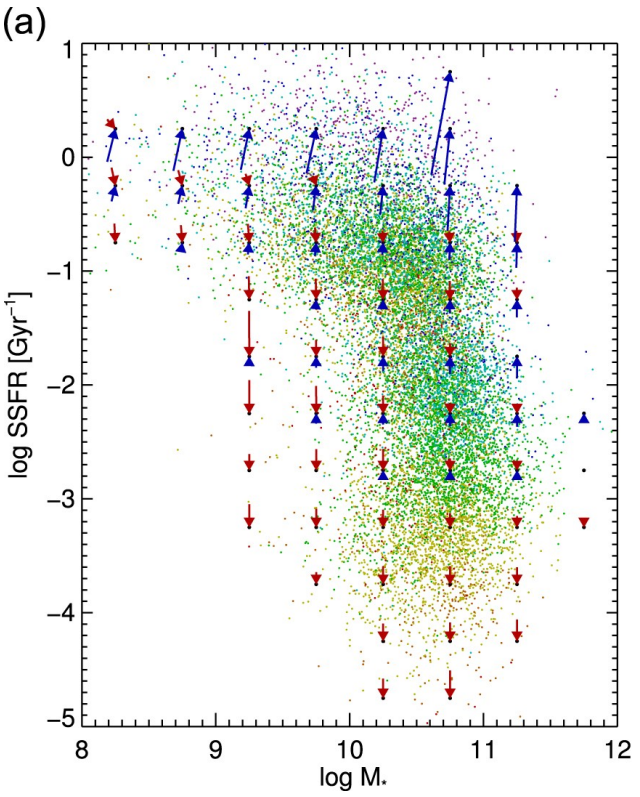


FIGURA 1.13. Figura 12 (a) de Martin et al. (2017) onde temos o diagrama sSFR–massa com o vetor fluxo de SFA para galáxias do SDSS. As setas têm como objetivo mostrar a evolução média dentro do diagrama de cor–magnitude, sendo o tamanho delas $1.5\sigma_{SFA}$, a ponta o bin de massa e sSFR atuais e a base o bin de massa e sSFR de aproximadamente 100 Myrs atrás. Dessa forma, as setas azuis e vermelhas dão uma sensação da amplitude de bursting e quenching, respectivamente. Os pontos são galáxias individuais com a codificação de cor entre vermelho (SFA = 5) e roxo (SFA = -5).

Ao não impor ou assumir um histórico de formação estelar com decaimento exponencial, ou que galáxias evoluem apenas em direção a cores mais vermelhas, os autores permitiram a reprodução de casos de *bursts* também, e não apenas *quench*. Visando *detectar* esses casos, Martin et al. (2017) introduziram dois novos parâmetros: *Star Formation Acceleration* – SFA, e *Star Formation Jerk* – SFJ[5], que são capazes de identificar alterações na taxa de formação estelar, sendo para aumento ou diminuição, em um intervalo de 300 Myrs. Mais detalhes sobre a metodologia apresentada em Martin et al. (2017) e esses parâmetros serão discutidos na Seção 3.

Com esses parâmetros capazes de detectar casos de *quench* e *burst*, Martin et al. (2017) foram capazes de demonstrar que uma fração de galáxias no vale verde está passando por processos de *bursts* de formação estelar (de acordo com Rampazzo et al., 2007; Thilker et al., 2010; Thomas et al., 2010; Fang et al., 2013; Salim et al., 2012) embora o fluxo total seja na direção da sequência vermelha.

[5]Por serem termos novos que ainda não são amplamente difundidos, decidimos não traduzí-los, mantendo a versão original em inglês.

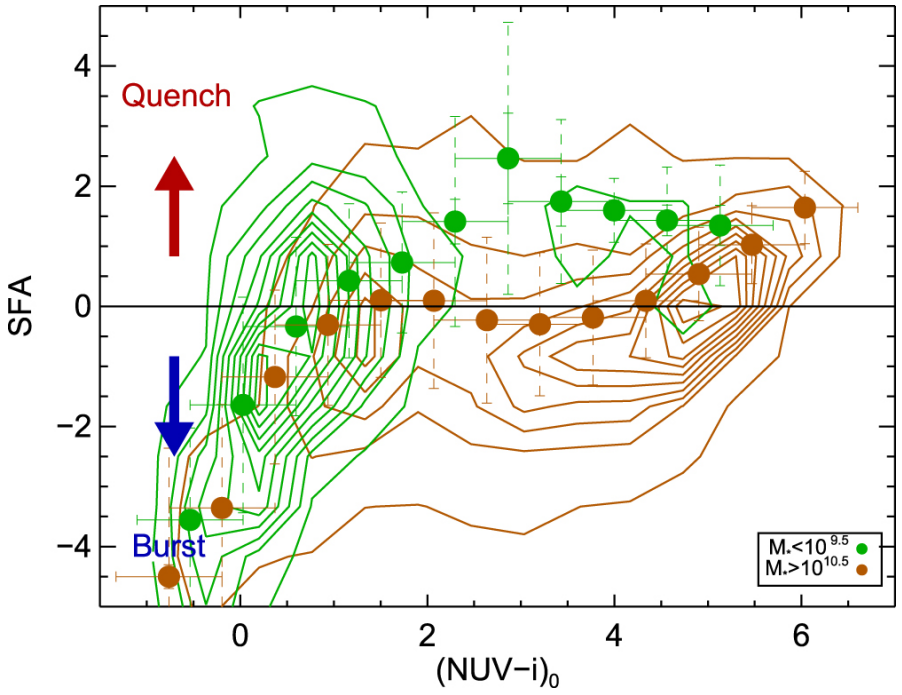


FIGURA 1.14. Figura 10 de Martin et al. (2017) mostrando o comportamento de SFA com $(NUV-i)_0$ para galáxias do SDSS em diferentes recortes de massa: $M_* < 10^{9,5}$ (verde) e $M_* > 10^{10.5}$ (laranja). Pela definição, SFA < 0 indica um caso de *burst*, enquanto o SFA > 0 indica um caso de *quench*, como ilustrado na imagem. Os contornos, seguindo a codificação de cor, são as distribuições para os dois *bins* de massa, os pontos são os valores médios de SFA e as barras são as dispersões de 1σ em cada *bin* de cor.

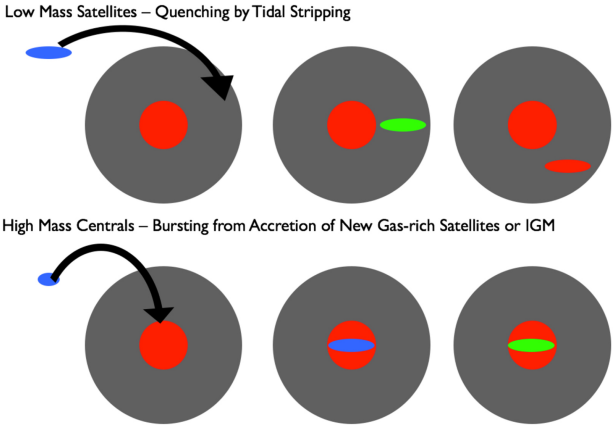


FIGURA 1.15. Figura 15 de Martin et al. (2017), ilustração de cenários evolutivos para os resultados apresentados nas Figuras 1.13 e 1.14.

Esse fluxo pode ser visto na Figura 1.13, na qual os autores optaram por um análogo do diagrama de cor–magnitude, o diagrama de taxa de formação estelar específica (sSFR) *vs.* massa estelar (M_*). Neste diagrama, em cada *bin* de sSFR–massa, as setas vermelhas representam o *quench* médio, enquanto as setas azuis, o *burst* médio. O tamanho das setas é proporcional à raiz quadrada média do SFA. A ponta da seta indica as massas e a sSFRs atuais enquanto sua base a localização anterior há $\sim$ 100 Myrs atrás.

Dividindo a amostra por massa, eles encontraram que a maior parte dos *bursts* está ocorrendo em galáxias massivas e a maior parte dos *quenchs* em galáxias de baixa massa (Figura 1.14), na região do vale verde. Os possíveis cenários podem ser vistos na Figura

1.15, em que galáxias de baixa massa passariam por processos de *stripping* ao entrar em halos de galáxias mais massivas, seja por *ram-pressure* ou forças de maré. Por outro lado, galáxias de alta massa, geralmente centrais em halos massivos, poderiam acretar material de galáxias satélites, passando por processos de *bursts* e rejuvenescimento.

Ampliando a análise para ambientes, Darvish et al. (2018) mostraram que a maior parte do *quench* de formação estelar ocorre em galáxias de baixa massa estelar, em particular aquelas localizadas em ambientes mais densos e com baixa sSFR, enquanto a maior parte do *burst* ocorre em galáxias de alta massa localizadas em ambientes menos densos (campo e grupos), com altas sSFR, mais galáxias satélites que centrais, indicando os efeitos combinados de massa e ambiente na *quench*/*burst* de galáxias desde $z \sim 1$.

Na Figura 1.16 podemos ver esse comportamento de SFA das galáxias centrais (azul) e satélites (vermelhas) com massa (painel superior – $\log M_*/M_\odot$) e com ambiente (painel inferior – $\log\sum$).

Vale ressaltar que Martin et al. (2017) e Darvish et al. (2018) usaram diferentes definições para *galáxias centrais*, sendo que no primeiro não se fez uma definição formal, apenas utilizaram do senso em que galáxias mais massivas costumam ser centrais em halos de matéria escura massivos, seguindo o modelo cosmológico do ΛCDM e *merger tree*; já o segundo fez

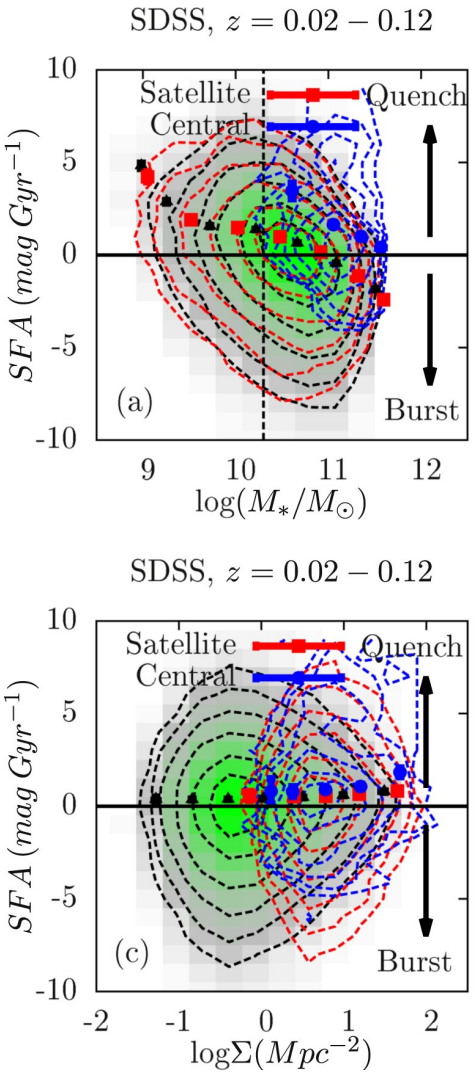


FIGURA 1.16. Figura 3 de Darvish et al. (2018) com comportamento mediano da SFA com massa (painel superior – $\log M_*/M_\odot$) e com densidade de ambiente (painel inferior – $\log\sum$) para todas as galáxias, triângulos pretos, separando galáxias centrais e satélites, em azul e vermelho respectivamente. A distribuição geral de SFA com massa ou densidade está ao fundo, com mapa de cor; níveis de contorno correspondem a 3/4, 1/2, 1/4, 1/8, 1/16 e 1/32 do pico de densidade. A linha vertical preta indica o limite de completeza da amostra em massa estelar.

uma seleção matemática e formal, sendo esta para galáxias de campo, em grupos e em aglomerados:

- galáxias isoladas são consideradas ou como centrais com satélites muito fracas, ou satélites ejetadas além do raio de virial do seu halo original (Wetzel et al., 2014);
- para galáxias em grupos, os autores reconhecem a galáxia mais brilhante e usam algoritmo de *friends-of-friends* (Huchra and Geller, 1982) para determinar ambiente, em que duas galáxias estão ligadas gravitacionalmente caso cumpram alguns requisitos que consideram separação angular, projeção e linha de visada;

dessa forma, os trabalhos não discordam quanto ao comportamento médio das "galáxias centrais", apenas na definição do que é uma galáxia central, estando plenamente de acordo em relação ao comportamento de galáxias de alta *vs.* de baixa massa.

1.4 Este trabalho

Apesar de trazer grandes avanços no cenário evolutivo para galáxias, a diferença de caminhos evolutivos em função de morfologia, mencionado em trabalhos anteriores, não é abordada nos trabalhos de Martin et al. (2017) e Darvish et al. (2018). Como amplamente discutido aqui, espera-se diferentes evoluções para elípticas e espirais, especificamente no vale verde, onde a primeira teria uma evolução mais rápida associada a *major mergers*. Entretanto, as novas descobertas feitas utilizando o SFA traz novas perguntas: qual comportamento do SFA em relação a diferentes morfologias? *Bursts* no vale verde seriam característicos de alguma morfologia específica? A relação com a massa se manteria? Indo além do vale verde, os processos de rejuvenescimento mencionados seriam mais presentes em diferentes morfologias?

Visando responder essas e outras perguntas sobre o aspecto morfológico para evolução de galáxias, aplicamos a metodologia apresentada por Martin et al. (2017) em uma amostra do Universo Local, junto de classificação morfológica. Utilizamos uma amostra SDSS + GALEX do universo local ($0,020 \leq z \leq 0,120$, $M_r < -20.40$) considerando diferentes classificações morfológicas provenientes do Galaxy Zoo (Lintott et al., 2010) e catálogos Machine and Deep Learning (Barchi et al., 2019). No Capítulo 2, descrevemos

nossas amostras, os processos de tratamento de dados e as diferenças entre as classificações morfológicas; no Capítulo 3, detalhamos a metodologia aplicada; no Capítulo 4, mostramos nossos resultados e suas implicações para diferentes cenários evolutivos; e no Capítulo 5 resumimos nossas descobertas. Este trabalho usa cosmologia padrão em todo o artigo, com $\Omega_M = 0,3$, $\Omega_\Lambda = 0,7$ e $h = 0,7$.

Capítulo 2

Amostra

2.1 Seleção de Dados

O Sloan Digital Sky Survey (SDSS - York et al., 2000) é um dos maiores levantamentos da astronomia e começou a operar em abril de 2000. Em meados de 2014, tinha realizado imageamento e espectroscopia de aproximadamente 1/3 do céu, com um telescópio exclusivo de 2.5m, localizado no Novo México (Gunn et al., 2006).

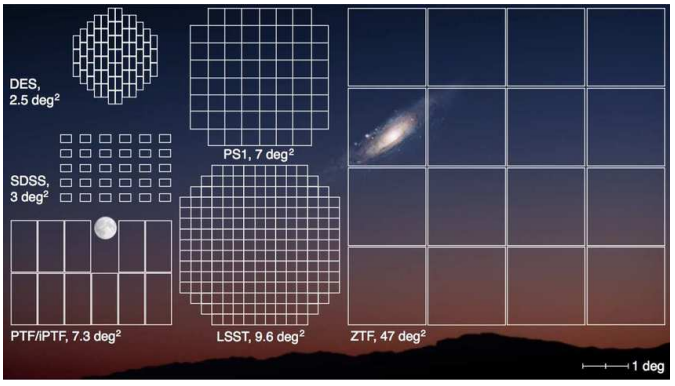


FIGURA 2.1. *Field-of-view* de diferentes *surveys*, junto com a Lua e a galáxia Andrômeda (M31) para noção de escala. Figura 1 de Laher et al. (2017).

Passando por diferentes fases, atualmente o *survey* se encontra na quarta versão, SDSS-IV. Para este projeto, utilizamos o *Data Release 12*, que é a última parte da fase SDSS-III (Eisenstein et al., 2011), e inclui todas as observações feitas até Julho de 2014 (SDSS-DR12; Alam et al., 2015). Na Figura 2.1 temos o *Field-of-view* do SDSS, com 3 graus^2, junto com outros *surveys* para comparação e a Lua e a galáxia Andrômeda (M31) para noção de escala.

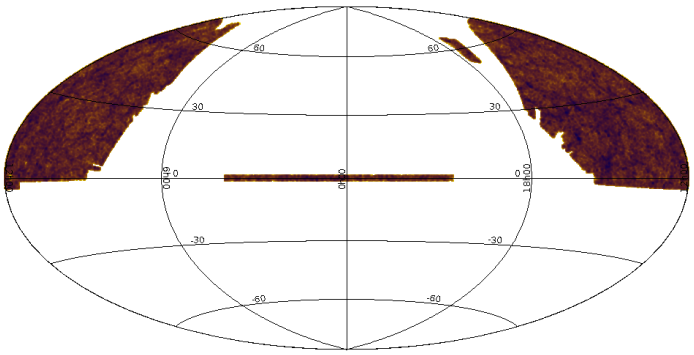


FIGURA 2.2. Amostra inicial, com 238.344 objetos, proveniente do SDDS-DR12 (Alam et al., 2015)

A amostra para esse projeto foi obtida das tabelas *SpecPhotoAll*, *galSpecLine*, *Photoz* e *Zoo2MainSpecz*, e os seguintes dados foram obtidos:

- RA e DEC em coordenadas J2000;
- *petroMags*[1] nas bandas u, g, r, i e z (Petrosian, 1976);
- extinção[2] devido à poeira presente na Via Láctea nas bandas u, g, r, i e z (Schlegel et al., 1998);
- magnitudes absolutas[3], nas bandas u, g, r, i e z, fornecido pelo SDSS (*absMags/tabela Photoz* - Beck et al., 2016);
- o redshift espectroscópico (*tabela SpecPhotoAll*), com erros de medida associados;
- fluxos e larguras equivalentes (EW) de Hα e Hβ, com os respectivos erros (*tabela galSpecLine*);

também selecionamos a identificação espectroscópica do *Data Release 12* (*tabela galSpecLine*) e a identificação fotométrica do *Data Release 7* (*tabela zoo2MainSpecz*) para posteriormente realizarmos o *match* com o *Galaxy Zoo project*, objeto a objeto, que será explicado mais adiante, procurando evitar possíveis erros associados às medidas de RA e DEC.

Por fim, realizamos os cortes em redshift $0 \leq z \leq 0.2$ para garantir uma amostra apenas do Universo Local. Essa amostra inicial possui aproximadamente 240.000 objetos, dispostos espacialmente na Figura 2.2

Posteriormente, visando construir um diagrama de cor-magnitude utilizando a cor $NUV - r$, nós selecionamos uma amostra do *Galaxy Explorer Survey – General Release*

[1] https://www.sdss.org/dr12/algorithms/magnitudes/#mag_petro
[2] https://www.sdss.org/dr16/algorithms/magnitudes/#ExtinctionCorrection
[3] http://skyserver.sdss.org/dr12/en/help/cooking/general/getdata5.aspx

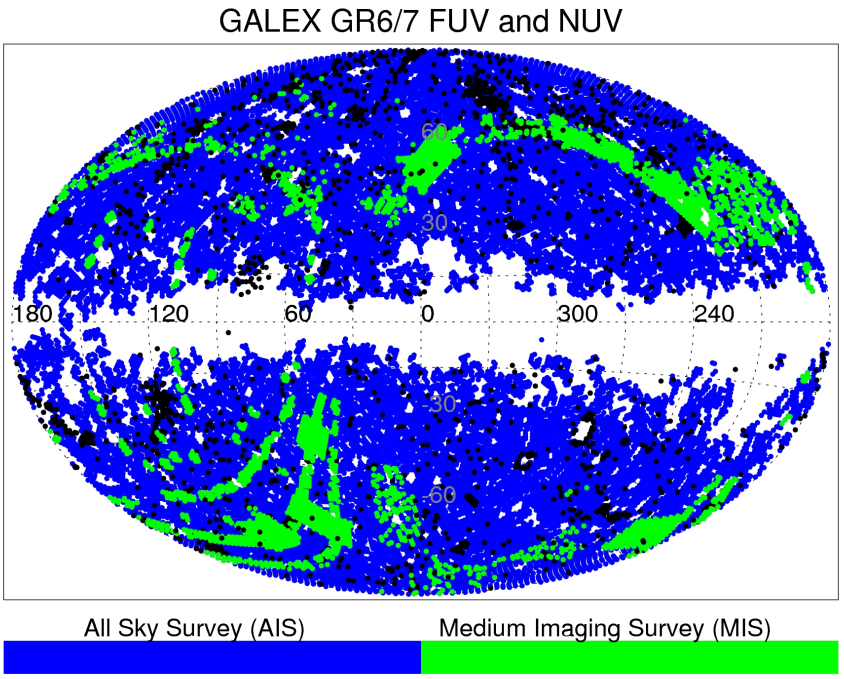


FIGURA 2.3. Figura 1 de Bianchi et al. (2017), mostrando a cobertura do GALEX GR6/7 em FUV e NUV, para os levantamentos AIS (azul) e MIS (verde)

6 (GALEX – GR6; Martin et al., 2005). O GALEX foi um telescópio espacial lançado pela *NASA*, liderado pelo Instituto de Tecnologia da Califórnia (*California Institute of Technology – CalTech*) e operou entre Julho de 2003 e Fevereiro de 2012, cobrindo a faixa do espectro do ultra-violeta, separado entre distante (FUV, $\lambda_{eff} \sim 1528$ Å) e próximo (NUV, $\lambda_{eff} \sim 2310$ Å). Sua missão principal era entender como a formação estelar de galáxias evoluiu desde o Universo Primordial até o Universo Local. A missão teve diferentes levantamentos, sendo os principais o *All-Sky* (AIS), *Medium* (MIS) e *Deep Imaging surveys* (DIS), diferenciados principalmente em profundidade e àrea de cobertura. Na Figura 2.3 temos a cobertura em FUV e NUV do *General Release 6/7* dos levantamentos AIS e MIS, em azul e verde, respectivamente.

Utilizando a ferramenta `xmatch` do *SciServer User*[4], um ambiente colaborativo para pesquisas com grandes quantidades de dados, foi possível selecionar uma amostra do GALEX baseada nas coordenadas da nossa amostra inicial, com um erro de astrometria sugerido de 0.1 e 0.2 graus, para o SDSS e GALEX, respectivamente. Essa ferramenta também viabiliza que selecionemos a OBJID desses objetos. A amostra do GALEX possui aproximadamente 185.000 objetos, que seguem a disposição espacial da Figura 2.2

[4]http://www.sciserver.org/

como *proxy*. Utilizando a ferramenta `Topcat` para realizar o *match* através do ObjID, ficamos com uma amostra de aproximadamente 122.000 galáxias.

2.2 Tratamento de Dados

Antes de consideramos as classificações morfológicas das nossas galáxias e começar a aplicação da metodologia, foram realizadas duas correções, devido ao avermelhamento intrínsico e correção-k, e um corte em magnitude e *redshift* para levar em conta o viés de Malmquist.

2.2.1 Avermelhamento Intrínseco

A primeira correção que fizemos foi devido ao avermelhamento intrínseco das galáxias, ou seja, devido à presença de poeira *in situ*. Essa poeira afeta a intensidade do fluxo de duas formas, através da (*i*) atenuação e/ou absorção e do (*ii*) espalhamento, sendo que ambas afetam mais eficientemente comprimentos de onda mais azuis (Figura 2.4). Considerando que a formação estelar está associada com a presença de poeira, galáxias com formação estelar normal e/ou acentuada não apresentarão suas cores observadas azuis, como esperado (e.g., Sodré et al., 2013; Gonçalves et al., 2012) e sim mais avermelhadas. Dessa forma, esses objetos podem povoar a região do vale verde artificialmente, não representando galáxias em transição.

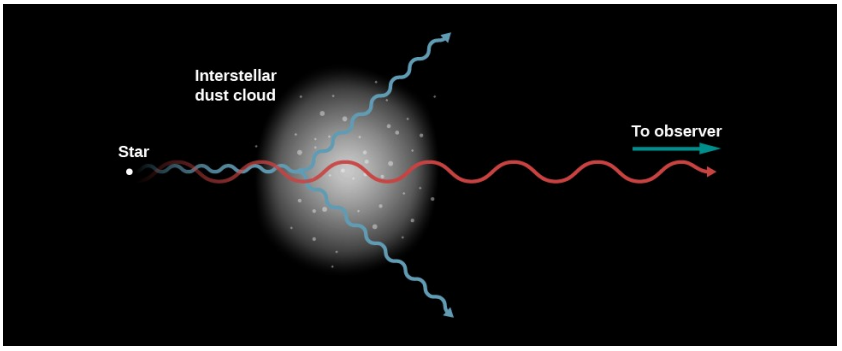


Figura 2.4. Representação do efeito de espalhamento da poeira nas luzes azul e vermelha.

Com objetivo de corrigir esse avermelhamento intrínseco, seguimos o modelo de poeira de Calzetti et al. (1994), que se baseia no decremento de Balmer: H_α/H_β. O decremento de Balmer se baseia no fato de que a fração entre as linhas H_α e H_β deve ser constante na ausencia de poeira e com valor de 2.88 (Osterbrock and Ferland, 2006).

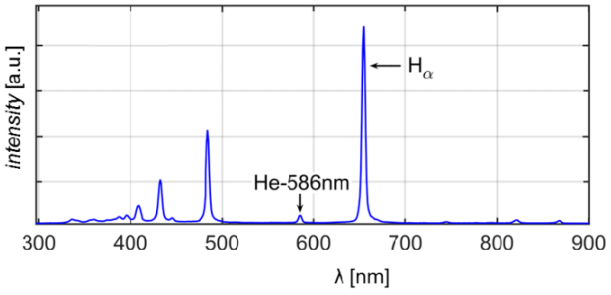


FIGURA 2.5. Exemplo de espectro de emissão de um plasma com mistura de Hélio e Hidrogênio. As linhas de H_α e He estão indicadas. A segunda linha mais intensa é a emissão de H_β. Para o eixo y, `a.u.` significa unidade arbitrária (*arbitrary unit*, em inglês).

Entretanto, com a presença de poeira, essas linhas serão afetadas de forma diferente. Como mencionado, a poeira afeta mais comprimentos de onda mais azuis, no caso, $H_\alpha = 6563$Å e $H_\beta = 4861$Å (Figura 2.5). Assim, as linhas de H_β sofrerão mais com a presença de poeira, e o decremento de Balmer terá um valor maior que 2.88.

Em Calzetti et al. (1994), os autores consideram o modelos simples de uma camada de poeira entre o observador e a emissão das estrelas. Dessa forma, a atenuação da intensidade pode ser modelada como a Equação 2.2.1, onde I_λ é a intensidade observada, I^0_λ a intensidade original e $\tau(\lambda)$ a profundidade óptica.

$$I_\lambda = I^0_\lambda e^{-\tau(\lambda)} \tag{2.2.1}$$

Os autores também definem a *profundidade óptica de Balmer* (τ^l_B), que é a diferença entre as profundidades ópticas das linhas de emissão λ_{H_α} e λ_{H_β}, que pode ser visto na Equação 2.2.2.

$$\tau^l_B = \tau_\beta - \tau_\alpha = ln\left(\frac{H_\alpha/H_\beta}{2.88}\right), \tag{2.2.2}$$

onde o sobrescrito l indica que τ_B foi calculado com base nas linhas de emissão e o valor de referência 2,88 é a previsão teórica para a razão H_α/H_β sem presença de poeira (Osterbrock and Ferland, 2006). Por fim, a partir disso, os autores conseguiram calcular a relação entre τ^l_B e o excesso de cor $E(B-V)_i$:

$$E(B-V)_i \simeq 0.935\tau^l_B \tag{2.2.3}$$

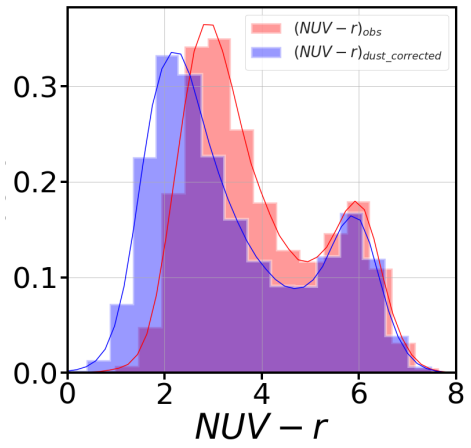


FIGURA 2.6. Em vermelho a distribuição de cor para a amostra antes da correção devido ao avermelhamento intrínseco ($(NUV-r)_{obs}$); em azul, a distribuição de cor para a amostra corrigida devido à poeira ($(NUV-r)_{dust_corrected}$) seguindo a descrição apresentação na Subseção 2.2 (Groves et al., 2011).

Para utilizarmos esse método com confiança, é necessária uma espectroscopia com alta resolução, devido à presença de metais e estruturas de absorção de Balmer, características do contínuo das estrelas (e.g. Groves et al., 2011). Tal resolução nem sempre é possível com o SDSS. Em vista disso, seguimos a calibração apresentada por Groves et al. (2011) com base nas medidas de largura equivalentes (*equivalent width*, em ingles – EW) das linhas de H_α e H_β. Usando uma grande amostra do SDSS-DR7, os autores separaram sua amostra em duas: com EW(Hα) $\gtrsim$ 30 Å e com EW(Hα) $<$ 30 Å e re-determinaram o decréscimo do Balmer através de calibrações, como nas Equações 2.2.4 e 2.2.5.

$$\log(\mathrm{H}_\alpha/\mathrm{H}_\beta) = \log\left(\frac{\mathrm{EW(H}\alpha)+4.1}{\mathrm{EW(H}\beta)+4.4}\right) + [-0.26+0.39(g-r)]; \tag{2.2.4}$$

para galáxias com EW(Hα) $\gtrsim$ 30 Å. E para galáxias com EW(Hα) $<$ 30 Å, a Equação 2.2.4 fica da seguinte forma:

$$\log(\mathrm{H}_\alpha/\mathrm{H}_\beta) = \log\left(\frac{\mathrm{EW(H}\alpha)+3.5}{\mathrm{EW(H}\beta)+3.8}\right) + [-0.26+0.39(g-r)]; \tag{2.2.5}$$

Com o $\log(\mathrm{H}_\alpha/\mathrm{H}_\beta)$ e as equações 2.2.2 e 2.2.3, podemos calcular a cor intrínseca de $NUV - r$ na Equação 2.2.6. O efeito da correção do avermelhamento intrínseco pode ser visto na Figura 2.6.

$$(NUV-r)_0 = (NUV-r)_{obs} - E(B-V)_i \tag{2.2.6}$$

2.2.2 Correção-k

A correção-k é uma forma de transformar a magnitude observada do objeto para a magnitude que esse objeto teria em determinada banda em um determinado *redshift* de escolha (e.g. Oke and Sandage, 1968; Hogg et al., 2002; Blanton and Roweis, 2007). Dessa forma, corrigindo todos os objetos para o mesmo *redshift*, podemos comparar objetos diferentes.

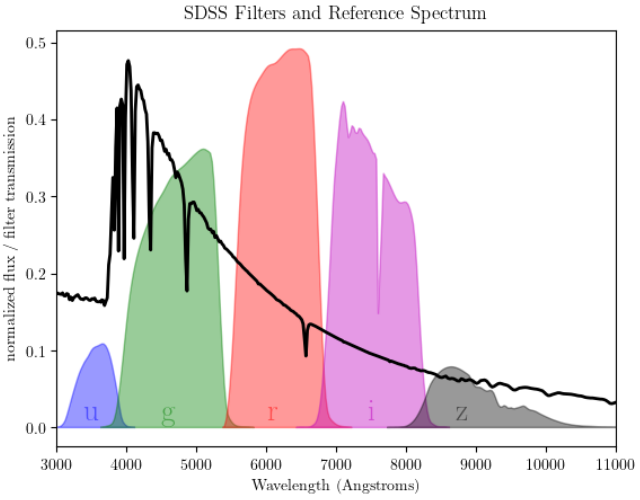


FIGURA 2.7. Filtros do SDSS em cores (ugriz) junto com o espectro de VEGA, linha preta sólida, código baseado em Vanderplas et al. (2012)

Essa correção faz necessária por dois fatores: *(i)* medimos o fluxo de fótons dos objetos em regiões limitadas de comprimento de onda; *(ii)* espectros de objetos mais afastados sofrem um desvio para comprimentos de onda mais vermelhos devido à expansão do Universo.

Como podemos ver no exemplo da Figura 2.7, cada filtro permite a captação de fótons de uma região específica do espectro, ou seja, em determinados comprimentos de onda, bloqueando todo o restante.

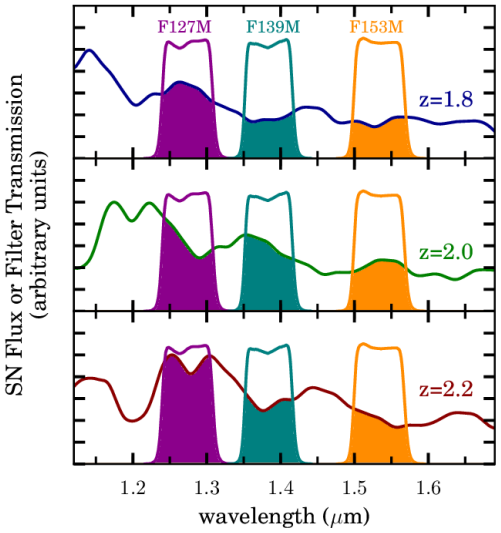


FIGURA 2.8. Exemplo de espectros de supernovas sendo desviados para vermelho com redshift, ressaltando diferentes partes que os filtros captam (Figura 1 de Rodney et al., 2015).

Isso se torna um problema quando o objeto está distante, pois o seu espectro será deslocado para comprimentos de onda mais vermelhos, como o exemplo da Figura 2.8. Nesse exemplo, o filtro `F127M` em $z = 2.0$ coincide com uma região de mínimo do espectro, enquanto para $z = 2.2$ coincide com uma região de máximo. Dessa forma, a região do espectro que os filtros atuam se torna dependente do *redshift*, isto é, filtros medem regiões diferentes do *restframe* para galáxias a diferentes *redshifts*.

Como cada região do espectro corresponde a uma diferente propriedade física do objeto de estudo, claramente não podemos comparar esses objetos, pois não estaríamos comparando o mesmo evento físico para ambos. Daí surge a necessidade da correção-k.

Depois de determinado o valor da correção-k, corrigimos cada magnitude de acordo com a Equação 2.2.7, onde M é a magnitude absoluta, m a magnitude observada, D_L a distância de luminosidade e K_{Corr} a correção-k para aquela magnitude.

$$M = m - 5(\log_{10} D_L - 1) - K_{Corr} \tag{2.2.7}$$

Para calcular a correção-k, usamos o *open code calculator*, que se baseia em redshift e em cor, de Chilingarian et al. (2010) e Chilingarian and Zolotukhin (2011)[5]. O método adotado pelos autores garante detectar a sensibilidade das bandas no ultra-violeta, que são sensíveis a surtos de formação estelar. Para calcular a correção-k, os autores realizaram dois passos: (i) escolheram uma subamostra com 25.000 galáxias com alto sinal ruído nas bandas UV. Para essa subamostra, ajustaram as SEDs usando uma combinação linear não negativa de 5 *templates* baseados em modelos de síntese populacional estelar (Blanton and Roweis, 2007), considerando a lei de extinção de Cardelli et al. (1989) e deixando o excesso de cor $E(B-V)$ como um parâmetro livre; (ii) com a correção-k calculada, investigaram sua dependência para diferentes *redshifts* e diferentes cores observadas. Os autores concluíram que a correção-k poderia ser aproximada com precisão por funções polinomiais de baixa ordem do *redshift* e determinadas cores, sendo as melhores combinações de filtro $NUV - g$ e $FUV - u$, com desvios padrão residual de ~ 0.08 e ~ 0.15.

[5] http://kcor.sai.msu.ru/getthecode/#python

A partir de agora, todas as cores $(NUV - r)_0$ consideradas em análise estarão corrigidas devido à poeira e à correção-k.

2.2.3 Viés de Malmquist

O Viés de Malmquist é um efeito observacional devido ao fato de ser mais fácil observar objetos intrinsicamente mais brilhantes. Todo levantamento astronômico possui limitações práticas, e uma delas é a magnitude máxima observada. Para *redshifts* maiores, somos cada vez mais restritos a objetos intrinsecamente mais brilhantes. No caso de galáxias, podemos traduzir objetos mais brilhantes como galáxias mais massivas. Se não levado em conta, o Viés de Malmquist pode criar um viés de seleção, onde objetos mais brilhantes são privilegiados a maiores distâncias.

Dessa forma, visando garantir a completeza da amostra e levando em consideração os limites de magnitude do SDSS, realizamos um corte em magnitude absoluta ($M_r \leqslant -20.40$) e em *redshift* ($0.020 \leqslant z \leqslant 0.120$) que pode ser visto na Figura 2.9. Para comparação, também mostramos a massa estelar característica dada pela função de luminosidade de Blanton et al. (2001), $M^* = -20,67$, para o Universo Local. Dessa forma, garantimos que em nossa amostra não temos apenas as galáxias mais massivas do Universo Local. Após o novo corte, nossa amostra foi reduzida para $\sim$ 66.000 galáxias.

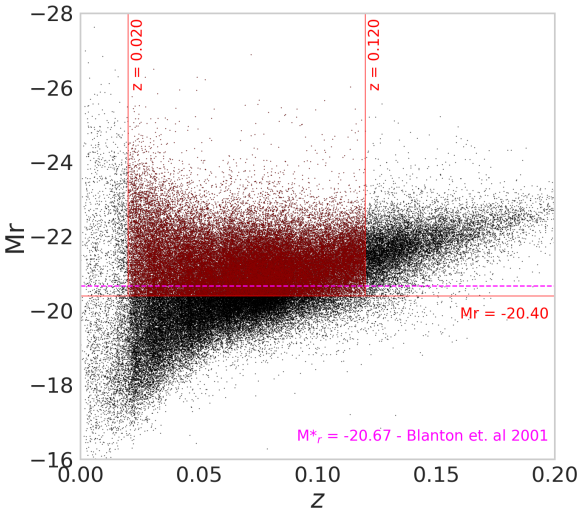


FIGURA 2.9. Magnitude absoluta *vs.* *redshift* espectroscópico da nossa amostra com $\sim$ 120.000 galáxias (pontos pretos). As linhas sólidas vermelhas indicam os cortes para evitar o viés de Malmquist ($M_r \leqslant -20.40$, $0.020 \leqslant z \leqslant 0.120$) e a linha tracejada magenta indica o valor de M^* de Blanton et al. (2001). Os pontos vermelhos escuros indicam nossa amostra com $\sim$ 66.000 galáxias.

Por fim, obtemos os valores de *Star Formation Acceleration* - SFA (discutido adiante, na Seção 3.3) de acordo com Martin et al. (2017). Como a amostra deles é restrita ao GALEX MIS, nossa amostra final foi reduzida para $\sim$ 32.000 galáxias.

2.3 Classificação Morfológica

Nesta seção, descrevemos os diferentes métodos de classificação morfológica utilizados em nossa análise.

2.3.1 Galaxy Zoo Project

O *Galaxy Zoo Project* é um projeto que conta com a participação voluntária de cientistas cidadãos para classificação morfológica de uma grande quantidade de galáxias. Mais especificamente, o *Galaxy Zoo 1*, o projeto pioneiro e usado nessa pesquisa, contou com a colaboração de milhões de voluntários e alcançou a classificação de aproximadamente 900.000 galáxias, com imagens fornecidas pelo SDSS (Lintott et al., 2010), com diferentes níves de confiança. O projeto original começou em Julho de 2007 e foi até Fevereiro de 2009, onde cada voluntário poderia escolher entre as seguintes opções de classificação: galáxia elíptica; galáxia espiral em sentido horário; galáxia espiral em sentido anti-horário; galáxia *edge on*; estrela/não sei; ou *merger*, como pode ser visto na Figura 2.10.

Como o *Galaxy Zoo 1* usou imagens do SDSS, tomou-se o cuidado de garantir a identificação dessas galáxias. Assim, usando a identificação fotométrica do SDSSDR12, realizamos um *cross-match* de nossa amostra com *Galaxy Zoo 1 data release*[6] (Lintott et al., 2008; Lintott et al., 2010), objeto a objeto. Da classificação morfológica do *Galaxy Zoo*, escolhemos o critério de classificação denominado como *"clean"* (Figura 2.11), que exige um critério mínimo de 80% de confiança na classificação final dos objetos.

Vale ressaltar que a classificação final de objeto não se deve apenas à fração de concordância entre os eleitores, como descrito em Bamford et al. (2009). Entende-se que alguns erros podem causar alto índice de concordância entre os votos e ainda sim ser uma

[6] https://data.galaxyzoo.org/

classificação errada. Um exemplo é o caso de espirais distantes, que podem aparentar ser elípticas e assim terão uma grande fração de concordância entre os eleitores.

Class	Button	Description
1		Elliptical galaxy
2		Clockwise/Z-wise spiral galaxy
3		Anticlockwise/S-wise spiral galaxy
4		Spiral galaxy other (e.g. edge-on)
5		Star or don't know (e.g. artefact)
6		Merger

FIGURA 2.10. Figura 1 e Tabela 1 de Lintott et al. (2008), mostrando como era a página inicial e a página para classificação morfológica junto com a tabela de opções para o *Galaxy Zoo 1*.

Para este caso existe um procedimento de *debiasing* que procura manter a fração entre espirais e elípticas para determinados *redshifts* (para obter mais detalhes, consulte Bamford et al., 2009 e Lintott et al., 2008).

Por fim, as galáxias são separadas entre `elípticas` e `espirais` (galáxia espiral em sentido horário + galáxia espiral em sentido anti-horário + galáxia *edge on*) dependendo da fração de concordância após o *debiasing*. Aquelas que não alcançam o critério mínimo *clean* são classificadas como `indefinidas`. Para mais informações, o leitor pode consultar Lintott et al. (2008) e Lintott et al. (2010).

Nesta amostra do projeto que leva em consideração apenas a classificação morfológica do *Galaxy Zoo* (que daqui para frente chamaremos de `GZ`), temos 15.248 galáxias espirais, 3.329 galáxias elípticas e 13.214 objetos indefinidos. Como estamos usando o critério de 80% para classificação morfológica, esperamos pouca contaminação na separação entre espirais e elípticas. Por outro lado, perdemos aproximadamente 40% da nossa amostra devido ao mesmo critério. Para aumentar nossa amostra de espirais e elípticas, também usamos catálogos considerando a técnica de aprendizado de máquina supervisionado (chamaremos de *Machine Learning*) e não supervisionado (chamaremos de *Deep Learning*) para classificar galáxias entre espirais e elípticas, conforme discutido na Subseção 2.3.2 adiante.

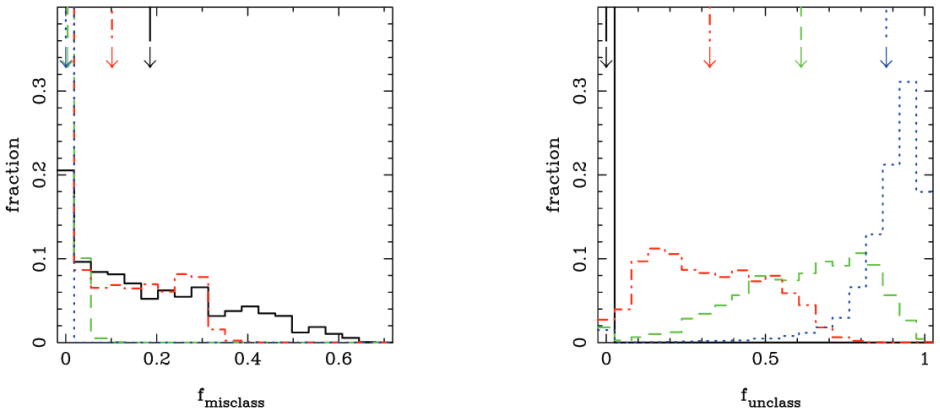


FIGURA 2.11. Figura 5 de Lintott et al. (2010), demonstrando diferentes critérios de classificação: *greater*, linha sólida preta com critério mínimo de 50%; *cleanish*, linha vermelha ponto-tracejada, com critério mínimo de 60%; *clean*, linha verde tracejada, com critério mínimo de 80%; *superclean*, linha azul pontilhada, com critério mínimo de 95%. O histograma à esquerda mostra a fração de galáxias mal-classificadas, enquanto o histograma à direita mostra a fração de galáxias que não alcançam determinado critério de classificação, sendo classificadas como indefinidas.

2.3.2 Catálogos de *Machine* e *Deep Learning*

Como o objetivo principal do trabalho não se passa em torno da discussão de técnicas de técnica de aprendizado de máquina supervisionado e não supervisionado, seremos breves na explicação das técnicas por trás dos catálogos utilizados aqui. Para mais detalhes e informações mais completas acerca destes métodos, referenciamos o leitor ao trabalho de Barchi et al. (2019).

Como mencionado, buscando aumentar nossa amostra, também usamos os catálogos de Barchi et al. (2019), baseados em algoritmos de aprendizado de máquina supervisionado (chamaremos de *Machine Learning*) e não supervisionado (chamaremos de *Deep Learning*) para classificação morfológica. Para o primeiro, utiliza-se como input de aprendizado 5 parâmetros calculados com o sistema de classificação `CyMorph` (Rosa et al., 2018). `CyMorph` realiza uma análise morfológica não paramétrica que determina `Concentração (C)`, `Assimetria (A)`, `Suavidade (S)`, `Entropia (H)` e *`Gradient Pattern Analysis (GPA)`*.

- `Concentração`: $C = log_{10}(R_{75\%}/R_{35\%})$, onde $R_{75\%}$ e $R_{35\%}$ são os raios que concentram 75% e 35% porcento da luz;
- `Assimetria`: $A = 1 - s(I^0, I^\pi)$, onde I^0 e I^π são as imagens originais e e rotacionadas por um fator de 180º. A função $s()$ é a correlação de *Spearman*;

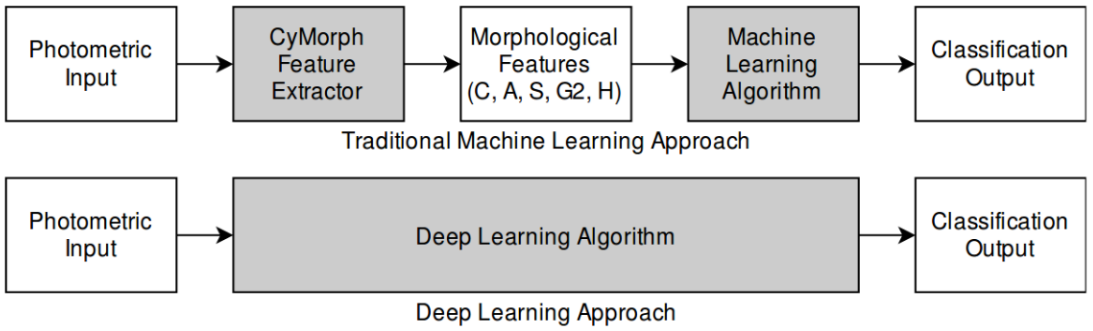


FIGURA 2.12. Figura 1 de Barchi et al. (2019) com ilustrativo da lógica por trás das abordagens de *Machine Learning* e *Deep Learning*.

- `Suavidade`: $S = 1 - s(I^0, I^s)$, onde I^0 e I^s é o fluxo da imagem original e da contraparte suavizada;
- ***`Gradient Pattern Analysis (GPA)`***: estima gradiente de propriedades locais;
- `Entropia`: medida através da distribuição de valores na imagem. Espera-se valores altos de H para galáxias com nódulos de formação estelar e valores baixos para galáxias suaves.

No caso do *Machine Learning*, os autores classificaram apenas as galáxias que não alcançaram o critério de classificação do *Galaxy Zoo* e eram classificadas como indefinidas. Já para o *Deep Learning*, os autores usaram uma abordagem de rede neural profunda convolucional, com uma rede de vinte e duas camadas para classificar todas as galáxias, não apenas as consideradas como incertas pelo *Galaxy Zoo*. Um esquema de ambas as abordagens pode ser visto na Figura 2.12.

Em seguida, procedemos da seguinte forma:

- Abordagem *Machine Learning*:

  - consideramos a classificação proveniente do *Galaxy Zoo 1* (espirais ou elípticas);

  - incluímos galáxias classificadas como incertas, usando denominações do catálogo de *Machine Learning*;

  - esta amostra (daqui em diante denominada `GZ+ML`) contém 21.143 espirais e 5.216 elípticas.

- Abordagem *Deep Learning*:

  - para a abordagem da técnica de *Deep Learning*, repetimos as etapas mencionadas na amostra `GZ+ML`, com uma diferença. Este catálogo é fornecido com probabilidades de classificação morfológica e, para ser consistente com a amostra *Galaxy Zoo*, consideramos a classificação morfológica para aqueles com percentual de classificação acima de 80%

  - esta amostra (a partir de agora denominada `GZ+DL`) contém 22.757 espirais e 5.535 elípticas.

2.4 Diagramas de cor-magnitude

Como mencionado no Capítulo 1, o diagrama de cor–magnitude (CMD) é uma boa ferramenta para investigarmos diferentes estágios e caminhos evolutivos para diferentes grupos de galáxias. Nessa Seção, pretendemos mostrar as distribuições de $(NUV-r)_0$ com M_r para cada abordagem (`GZ, GZ+ML e GZ+DL`) e realçar as diferenças entre elas, considerando as classificações morfológicas de espirais e elípticas.

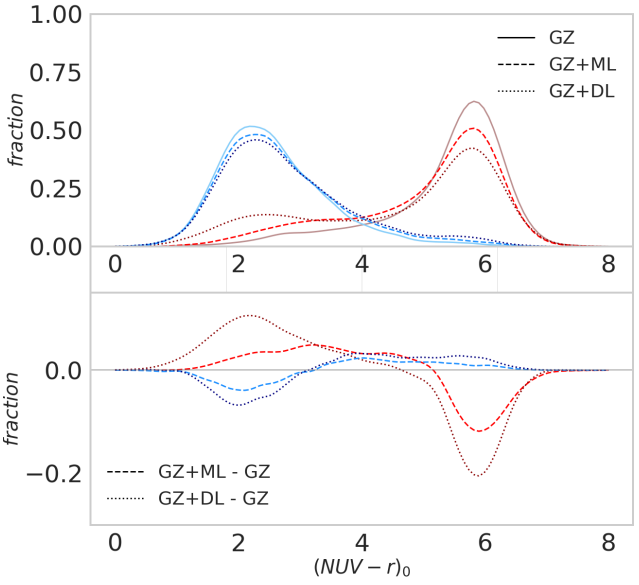


FIGURA 2.13. **Painel superior:** Distribuições de $(NUV - r)_0$ para galáxias elípticas (em vermelho) e espirais (em azul), codificados por cores, para os três casos (`GZ` - linha sólida; `GZ + ML` - linha tracejada; e `GZ + DL` - linha pontilhada). No eixo y, temos a fração de cada caso, entre 0 e 1. No **painel inferior**, temos a diferença entre as amostras `GZ + ML` (linha tracejada) ou `GZ + DL` (linha pontilhada) e `GZ`, com uma linha preta horizontal em zero para comparação. Utilizamos o *Kernel Density Estimator* de gaussiana, com tamanho de $(NUV - r)_0 = 0.08$.

Para ressaltar o quanto as amostras podem diferir quanto à distribuição de $(NUV - r)_0$ para cada morfologia, mostramos na Figura

2.13 a distribuição de cores de cada uma delas (painel superior), juntamente com a diferença entre `GZ` e `GZ + ML` ou `GZ + DL` (painel inferior). Tanto para elípticas quanto para espirais, temos uma redistribuição de objetos, aumentando a amostra do vale verde e os casos "não tradicionais", como espirais vermelhas e elípticas azuis, sendo este último muito mais evidente.

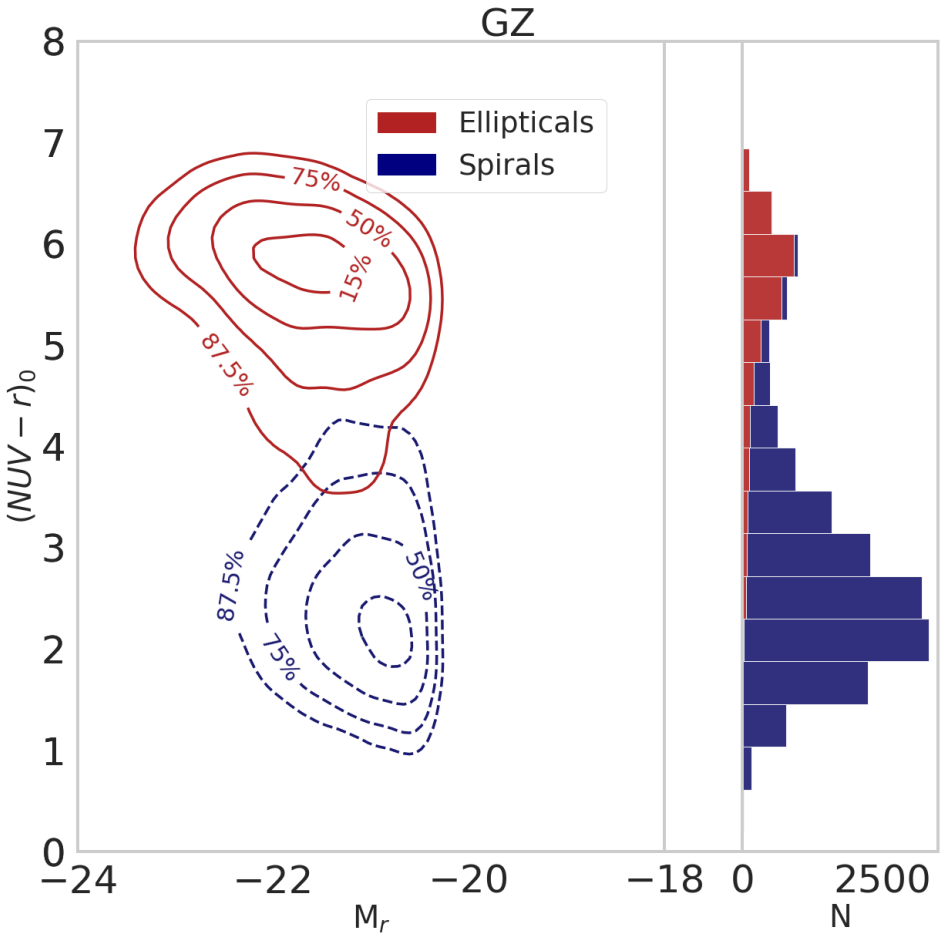


Figura 2.14. Diagrama de cor-magnitude para a amostra com a classificação morfológica proveniente de *Galaxy Zoo* com 80% de confiança (`GZ`). Separamos espirais (linha tracejada azul) e elíptica (linha vermelha - sólida), em que as curvas de nível de contorno indicam a fração da amostra em: 15%, 50%, 75% e 87,5%. E, para todos os casos, também mostramos o histograma de $(NUV-r)_0$ (ao lado direito do CMD) seguindo a codificação de cor para elípticas e espirais.

Nas Figuras 2.14, 2.15 e 2.16, mostramos os CMDs para os três casos: Galaxy Zoo - `GZ` - com 15.248 espirais e 3.329 elípticas; Galaxy Zoo mais Machine Learning - `GZ + ML` - com 21.143 espirais e 5.216 elípticas; e Galaxy Zoo mais Deep Learning - `GZ + DL` - com 22.757 espirais e 5.535 elípticas, conforme discutido na Seção 2.3. Para cada CMD,

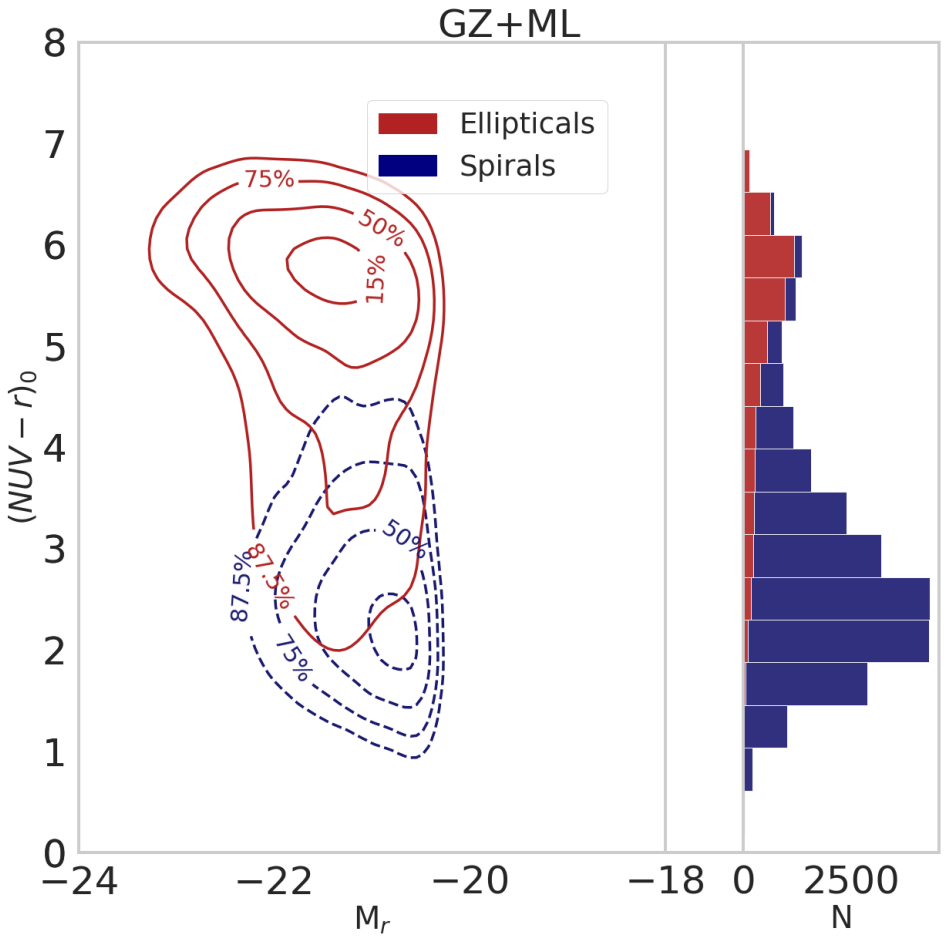


FIGURA 2.15. Diagrama de cor-magnitude para a amostra com a classificação morfológica proveniente de *Galaxy Zoo* e classificação morfológica de Machine Learning (`GZ+ML`). Separamos espirais (linha tracejada azul) e elíptica (linha vermelha - sólida), em que as curvas de nível de contorno indicam a fração da amostra em: 15%, 50%, 75% e 87,5%. E, para todos os casos, também mostramos o histograma de $(NUV - r)_0$ (ao lado direito do CMD) seguindo a codificação de cor para elípticas e espirais.

separamos galáxias espirais (linha tracejada em azul) e elípticas (linha vermelha - sólida), onde as curvas de contorno indicam a porcentagem da amostra dentro dela (15%, 50%, 75% e 87,5%).

Considerando os níveis de contorno de 50% de cada amostra, notamos um comportamento constante para elípticas e espirais, em que é possível identificar a sequência vermelha e a nuvem azul nos três casos, com pouca dependência da amostra em questão. Por outro lado, a diferença entre elas se torna clara quando atingimos curvas de contornos mais externas, especialmente para elípticas, que começam a preencher tanto

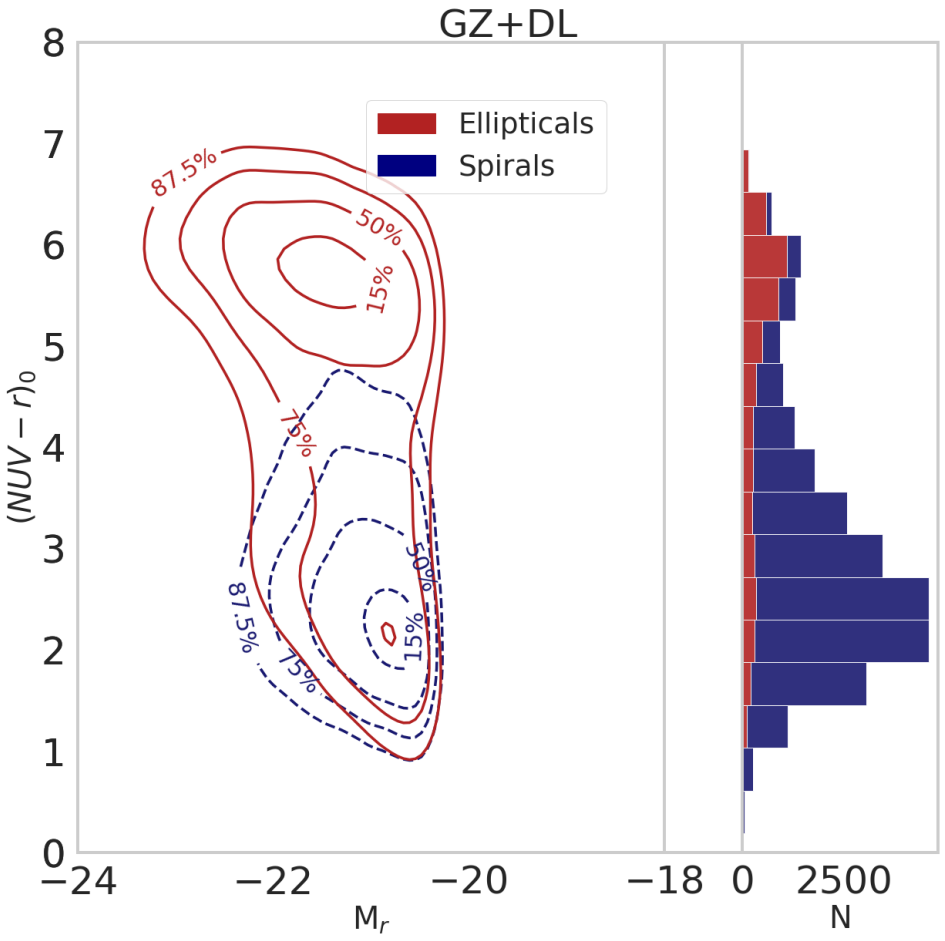


FIGURA 2.16. Diagrama de cor-magnitude para a amostra classificação morfológica proveniente de *Galaxy Zoo* e classificação morfológica de Deep Learning (`GZ+DL`). Separamos espirais (linha tracejada azul) e elíptica (linha vermelha - sólida), em que as curvas de nível de contorno indicam a fração da amostra em: 15%, 50%, 75% e 87,5%. E, para todos os casos, também mostramos o histograma de $(NUV-r)_0$ (ao lado direito do CMD) seguindo a codificação de cor para elípticas e espirais.

o vale verde (`GZ + ML`) quanto a nuvem azul (`GZ + DL`). Visando investigar os casos de elípticas azuis da última amostra e o quão confiáveis são essas cores, analisamos a distribuição de sinal-ruído (S/N) de todas as elípticas dessa amostra. Os resultados podem ser vistos na Figura 2.17, na qual temos a relação entre S/N e a diferença de magnitude para elípticas azuis ($(NUV-r)_0 < 4$) e vermelhas ($(NUV-r)_0 > 4$) que passaram pela correção de avermelhamento discutida na Seção 2.2.1. O S/N é medido pela razão entre a largura equivalente de H_β e seu erro, e a diferença $\Delta(NUV-r)$ se refere à diferença entre as cores antes e depois da correção devido ao avermelhamento da poeira, apenas. Como podemos ver, o S/N para as elípticas azuis possui um comportamento confiável.

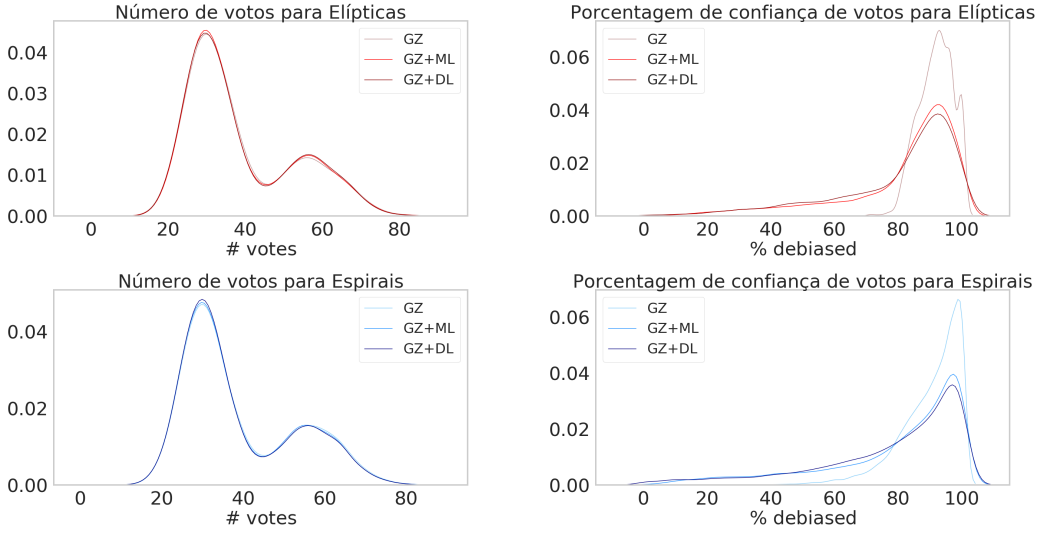


FIGURA 2.18. Distribuição de número de votos (**esquerda**) e porcentagem de concordância na classificação morfológica (após o *debiasing* – **direita**) de acordo com o *Galaxy Zoo* para as três amostras: `GZ, GZ+ML e GZ+DL`. Elípticas em tons de vermelho (painel **superior**) e espirais em tons de azul (painel **inferior**).

A razão pela qual, ao considerarmos as classificações morfológicas provenientes de *Machine* e *Deep Learning* aumentamos esses casos, ainda é incerta. Dois dos critérios principais para classificação da galáxia pelo *Galaxy Zoo* são a porcentagem de concordância entre os votos (após o *debiasing*) e o número de votos (Lintott et al., 2010).

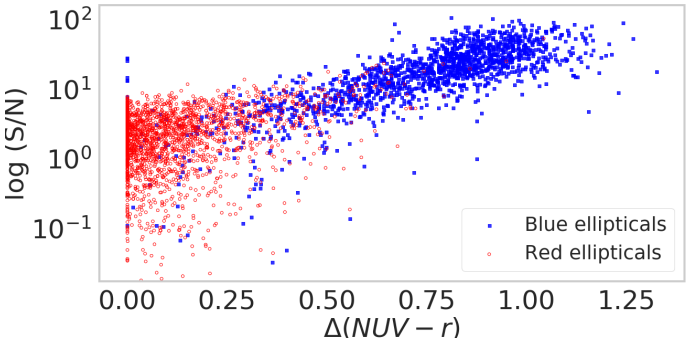


FIGURA 2.17. Distribuição de S/N com $\Delta(NUV-r)$ para galáxias elípticas azuis ($(NUV-r)_0 < 4$ – quadrados azuis) e vermelhas ($(NUV-r)_0 > 4$ – círculos vermelhos) da amostra `GZ+DL`. O S/N é medido pela razão entre a largura equivalente de H_β e seu erro, e a diferença $\Delta(NUV-r)$ se refere à diferença entre as cores antes e depois da correção devido ao avermelhamento da poeira.

Analisando as distribuições dos dois critérios para os três casos (Figura 2.18) fica claro que a divergência se encontra na concordância entre os votos. Ou seja, os algorítimos de *Machine* e *Deep Learning* estão sendo efetivos em recuperar a classificação das galáxias com menos concordância entre os voluntários do *Galaxy Zoo*, e não apenas aquelas que receberam poucos votos.

Para nos certificarmos da classificação dessas galáxias, olhamos 10 imagens de cada catálogo (`GZ+ML e GZ+DL`) para os casos "não tradicionais", sendo 5 espirais vermelhas, $(NUV-r)_0 > 5$) – e 5 elípticas azuis, $(NUV-r)_0 < 3$) – que podem ser vistas na Figuras

2.19 (elípticas) e 2.20 (espirais). Vale ressaltar que estamos usando *"azul"* e *"vermelho"* baseando-nos na cor $NUV - r$, o que pode não ser refletido no óptico. Analisando as Figuras 2.19 e 2.20, fica claro que os algorítimos de *Machine* e *Deep Learning* fazem um bom trabalho separando galáxias com e sem braços espirais. Entretanto, como podemos visualizar, existem alguns casos de elípticas que podem ser questionados como lenticulares, o que é esperado já que essa classificação não é levada em consideração nem pelo próprio *Galaxy Zoo*, nem pelos algorítimos.

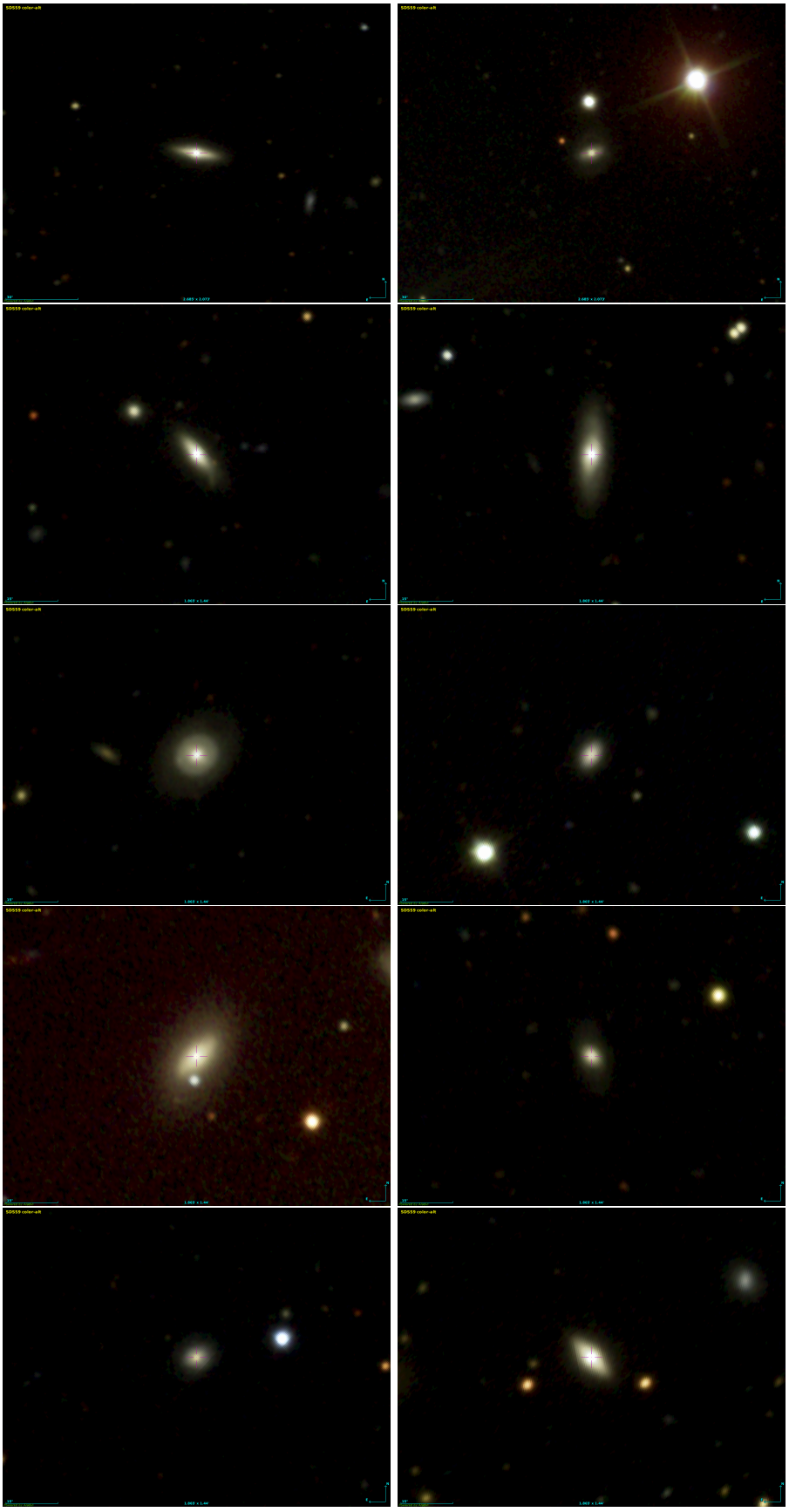


FIGURA 2.19. Galáxias elípticas *"azuis"* ($NUV - r < 3$) das amostras `GZ+ML` (5 primeiras) e `GZ+DL` (5 últimas)

FIGURA 2.20. Galáxias espirais *"vermelhas"* ($NUV - r > 5$) das amostras `GZ+ML` (5 primeiras) e `GZ+DL` (5 últimas)

Capítulo 3

Metodologia

Para investigar caminhos evolutivos para diferentes morfologias e quantificar se uma galáxia está passando por um *quench* ou um *burst*, nós usamos um parâmetro conhecido como *Star Formation Acceleration* – *SFA*[1] (Martin et al., 2017 – explicado adiante na Seção 3.3). Como mencionado no Capítulo 1, os autores introduziram uma metodologia capaz de traduzir propriedades observáveis (e.g. índices espectrais, magnitudes e cores) em parâmetros físicos das galáxias (e.g. SFR e massa estelar). Os detalhes de cada passo serão explicitados a seguir.

3.1 Catálogo simulado

A simulação cosmológica Millennium (Springel et al., 2005b) é uma simulação de N-corpos com 2160^3 partículas, desde *redshift* $z = 127$, em um volume de $500h^{-1}$ que assume o modelo cosmológico ΛCDM, ou seja, Universo com matéria escura fria e em expansão acelerada.

Nesta simulação, é possível acompanhar cada uma das partículas e a formação dos halos de matéria escura e de estruturas de largas escalas. Aproveitando dessa capacidade da simulação, De Lucia et al. (2006) aplicaram modelos semi-analíticos (`SAM`) no qual se assume uma lei para formação estelar (Equação 3.1.1) que depende da massa de gás frio e está relacionada com a densidade superficial (Kennicutt Jr, 1998) através do seu valor

[1] Por ser um termo novo que ainda não é amplamente difundido, decidimos não traduzí-lo, mantendo a versão original em inglês.

crítico mínimo (e.g. Schmidt, 1959), onde estrelas só se formam acima deste, seguindo Kauffmann (1996) e Croton et al. (2006).

$$\psi = \alpha(M_{cold} - M_{crit})/t_{dyn}, \tag{3.1.1}$$

onde M_{cold} e $t_{dyn} = R_{disc}/V_{vir}$ são a massa de gás fria e o tempo dinâmico da galáxia. O parâmetro α é adimensional e serve para regular a eficiência da conversão do gás. M_{crit} é a massa associada com a densidade superficial mínima para formação estelar, calculada a partir da Equação 3.1.2

$$\sum_{crit} = 1.2 \times 10^7 \left(\frac{V_{vir}}{200km\ s^{-1}}\right) \left(\frac{R}{10kpc}\right)^{-1} \mathrm{M}_\odot\ kpc^{-2}. \tag{3.1.2}$$

Além disso, os modelos também incluem feedback de AGN, que se provaram essenciais para conseguir reproduzir a escala de tempo curta para formação de galáxias elípticas massivas (e.g. Thomas et al., 2005; Schawinski et al., 2014; Rodriguez-Gomez et al., 2017).

Em seu trabalho, Martin et al. (2017) usaram 24.000 galáxias simuladas em $z = 0$, produzidas através de `SAM` por De Lucia et al. (2006), com 63 intervalos de tempo de ~ 300 Myr, entre $0 < z < 6$. O modelo ΛCDM assume o modelo de *halo merger tree* (Figura 3.1), onde halos de matéria escura menores se fundem em halos cada vez maiores, até se formarem grandes estruturas. Cada uma dessas galáxias em $z = 0$ é a base de uma árvore e todos seus antecessores estão disponíveis, fornecendo um total de 900.000 galáxias simuladas entre $0 < z < 6$. É interessante ressaltar que a regressão linear será aplicada posteriormente em todas as 900.000 galáxias, subdividas apenas em *bins* de $D_n(4000)$ e *redshift*,

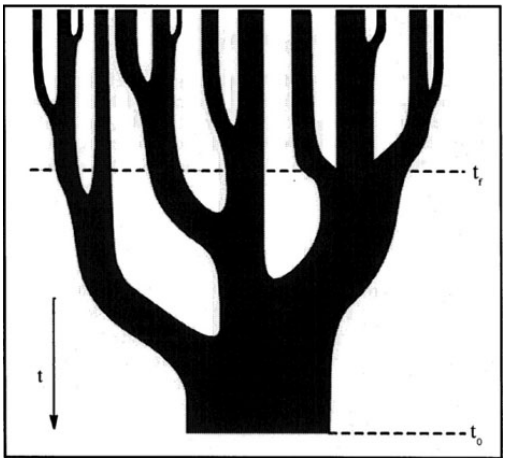


Figura 3.1. Representação esquemática de um *halo merger tree*, Figura 10 de Lacey and Cole (1993).

para observáveis em *restframe*. Dessa forma, os coeficientes resultantes do trabalho de Martin et al. (2017) podem ser aplicados como tradutor para qualquer *redshift*, desde que sejam utilizados observáveis que passaram pela correção-k.

3.1.1 Construindo SEDs (*Spectral Energy Distributions*) e observáveis

No trabalho de criar observáveis para galáxias simuladas é necessário primeiro entender como seria a sua distribuição espectral de energia (*Spectral Energy Distributions* – SED) para posteriormente simular os observáveis correspondentes. Cada componente de uma SED está associado a um parâmetro físico diferente da galáxia, como pode ser visto na Figura 3.2, onde temos dados observados de diferentes telescópios (pontos) e os modelos de contribuição de diferentes componentes em linhas. Na imagem fica claro que diferentes componentes irão contribuir em determinadas regiões do espectro com diferentes formas. Por exemplo, a emissão estelar (linha cinza claro sólida) é mais azul que a componente de poeira (linha cinza claro pontilhada), e esta por sua vez segue um espectro de corpo negro enquanto a primeira não.

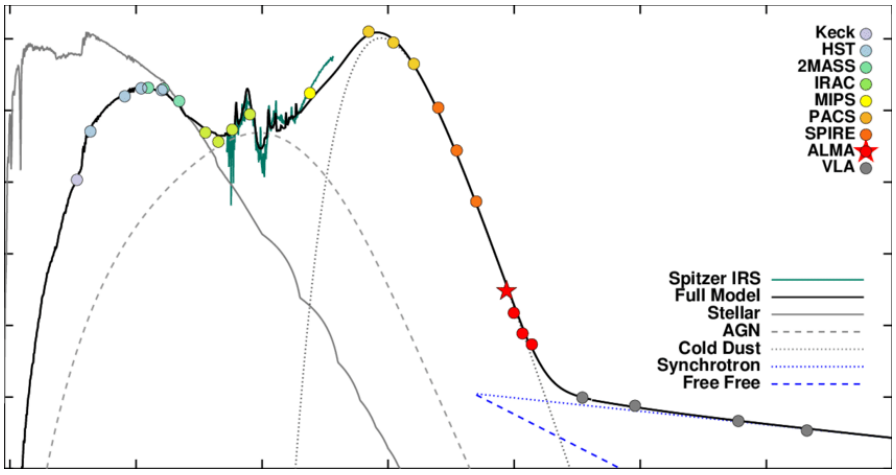


Figura 3.2. Figura 7 de Alatalo et al. (2014) com ajuste de SED de NGC 1266 considerando regiões de formação estelar, emissão estelar, emissão de AGN e emissão de poeira fria. Os pontos representam dados vindos dos telescópios Keck, HST, 2MASS, IRAC, MIPS, PACS, SPIRE, ALMA e VLA, codificados pela cor. E as linhas representam modelos para o Spitzer IRS (verde, sólida), para o modelo final completo (preta, sólida), para componente estelar (cinza escura, sólida), componente de emissão de AGN (cinza, tracejado), componente de poeira fria (cinza claro, pontilhado), emissão Synchrotron (azul, pontilhado) e interções free-free (azul, tracejado).

Para isso, Martin et al. (2017) usaram a taxa de formação estelar (SFR) para cada galáxia calculada pelo `SAM`, e para construir o histórico de formação estelar (SFH) eles consideraram o SFR de cada galáxia da árvore antecessora desta. Para população estelar, eles consideraram modelos de síntese de população estelar de Bruzual and Charlot (2003),

usando populações estelares simples (SSP) para calcular as luminosidades de banda larga e índices espectrais em cada intervalo de tempo, onde os parâmetros de entrada foram as SFH calculadas, a função de massa inicial (IMF) de Salpeter e a metalicidade fornecida pelo `SAM`. Uma SSP considera que todas as estrelas foram formadas de um mesmo *burst* de formação estelar, logo possuem a mesma idade e metalicidade.

Outra consideração importante a se fazer é a atenuação devido à poeira presente nas galáxias, como explicado na correção descrita na Seção 2.2.1. Como essa poeira afeta observação das galáxias, também é necessário incluir esse efeito nos espectros simulados. Para isso, os autores consideraram um modelo para extinção de poeira com geometria simples, onde o gás e a poeira estão distribuidos em uma camada uniforme e a extinção E_{B-V} é dada pela Equação 3.1.3.

$$E_{B-V} = C_0 \mu Z_{gas} M_{gas} r_{gal}^{-2} (cos\ i)^{-1}, \tag{3.1.3}$$

onde C_0 é constante e baseado em valores da Via Láctea, i é a inclinação da galáxia em relação a nossa linha de visada, Z_{gas}, M_{gas} e r_{gal} são a metalicidade do gás, a massa do gás e o tamanho da galáxia previstos pelo `SAM`. Por último, μ é uma constante que permite variar a absorção de acordo com o tipo de estrela (Calzetti et al. 1994), onde $\mu = 1$ para estrelas mais jovens que 10Myr e $\mu = 0.5$ para estrelas mais velhas.

Para lei de extinção, os autores consideram uma mistura de dois modelos: (1) a lei de atenuação para *starbursts* de Calzetti et al. (2000) e (2) a lei de extinção da própria Via Láctea de Cardelli et al. (1989). A mistura das duas leis de extinção é dada por uma fração que segue a lei da Via Láctea, f_M, e uma fração que segue a extinção para surto de formação estelar, 1 - f_M, onde f_M é escolhido aleatoriamente entre $0 < f_" M < f_{M,max}$. Para $f_{M,max} = 0.5$, o erro do ajuste é de 0.3 mag e vai até 0.5 mag para $f_{M,max} = 1.0$. Por último, Martin et al. (2017) não consideram contribuições de linhas de emissão.

Na Figura 3.3 temos um exemplo de histórico de formação estelar para uma galáxia passando por um *quench* rápido, começando em $z \sim 0.5$. Em 5 painéis temos (a) o diagrama de cor-magnitude com $(NUV - i)_0$ *vs.* M_i com o caminho evolutivo da galáxia, onde cada ponto representa um intervalo de tempo, a cor é codificada para a taxa de formação estelar específica (sSFR) e o tamanho do círculo representa $\log(M_*)$; (b) é a

taxa de formação estelar específica (sSFR) *vs. redshift*; (c) SFR *vs. redshift*; (d) NUV-i *vs. redshift*; e (e) *Star Formation Acceleration vs. redshift.*

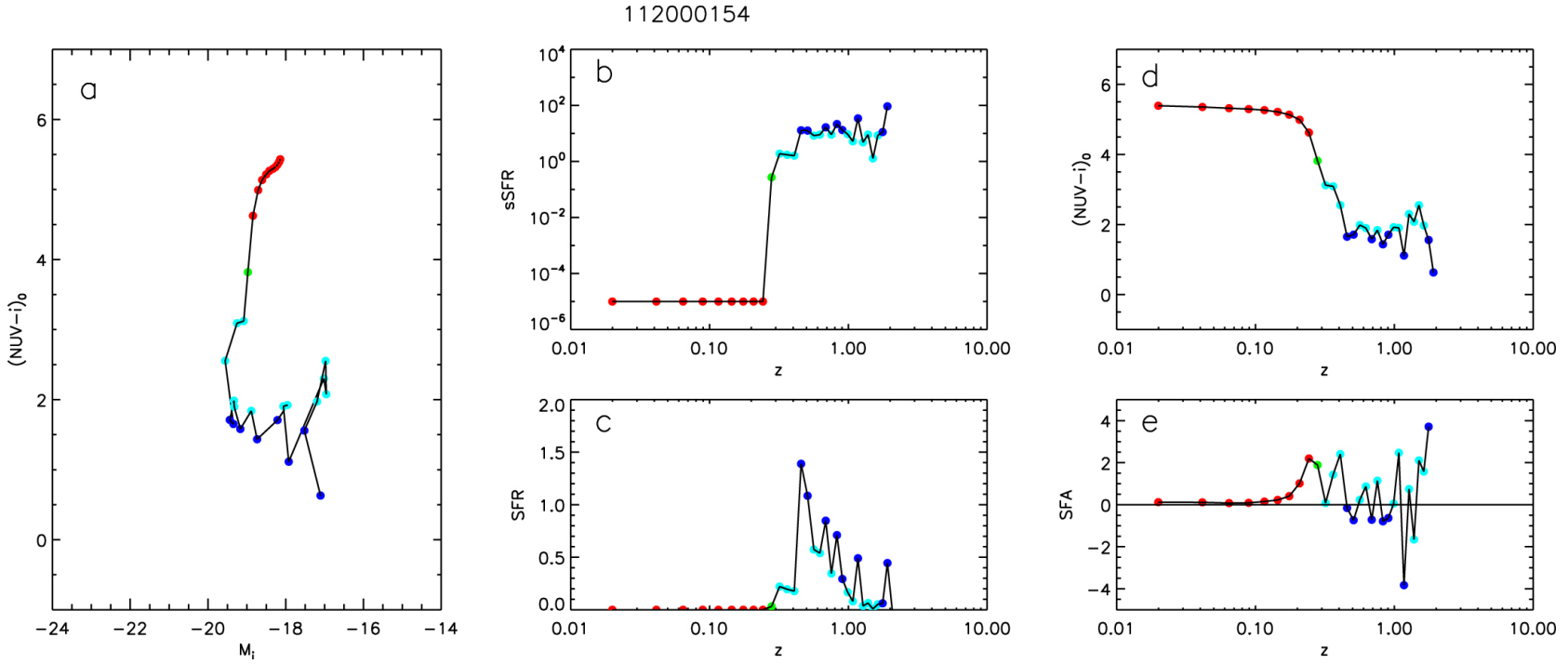


FIGURA 3.3. Figura 4 de Martin et al. (2017) exemplificando o histórico de formação estelar para uma galáxia passando por um *quench* rápido que se iniciou em $z \sim 0.5$. Temos em (a) o diagrama de cor-magnitude com $(NUV-i)_0$ *vs.* M_i com o caminho evolutivo da galáxia, onde cada ponto representa um intervalo de tempo, a cor é codificada para a taxa de formação estelar específica (sSFR) e o tamanho do círculo representa $\log(M_*)$; (b) é a taxa de formação estelar específica (sSFR) *vs. redshift*; (c) SFR *vs. redshift*; (d) NUV-i *vs. redshift*; e (e) *Star Formation Acceleration vs. redshift*

3.2 Regressão linear como tradutor

Uma vez que temos em mãos as propriedades físicas para a amostra simulada e os parâmetros observados foram calculados, torna-se possível aplicar o método para construir uma matriz de coeficientes lineares que atua como tradutor. A técnica apresentada em Martin et al. (2017) se baseia em uma expansão de Taylor até o termo linear. Entretanto, a relação entre observáveis e parâmetros físico pode ser extramente complexa e não linear. Como a construção dos espectros para a amostra simulada se baseia em SSPs para cada intervalo de tempo e, para cada SSP, a maior fonte de variação é devido à população estelar, foi-se feita uma binagem em $D_n(4000)$.

O $D_n(4000)$ é um índice espectral que mede uma descontinuidade no fluxo próximo de 4000Åe é considerado um bom proxy para medir população estelar (e.g. Poggianti and Barbaro, 1997; Kauffmann et al., 2003a). Isso é devido ao fato de que o espectro para comprimentos de onda menores que 4000Å é dominado pela absorção de metais presentes na atmosferas de estrelas. Na ausência de uma fonte ionizante eficaz, o contínuo nessa parte da SED é rebaixado, representando uma quebra de 4000Å forte. Entretanto, estrelas mais massivas são capazes de ionizar esses metais, tornando suas atmosferas menos opaca e, com isso, a quebra de 4000Å é suavizada. Dado um surto de formação estelar, à medida que o tempo passa as estrelas massivas são as primeiras a morrer e assim a quebra de 4000Å vai se tornando mais abrupta. Embora a poeira e metalicidade também afetem esse índice, o $D_n(4000)$ ainda é considerado um bom indicativo da idade da população estelar, como discutido em Martin et al. (2017). Um exemplo pode ser visto na Figura 1.5.

Uma vez que o $D_n(4000)$ é fixado, a relação entre as métricas de formação estelar com os observáveis podem ser assumidas como lineares dentro do espaço logarítmico. Para essa versão do método, o $\Delta D_n(4000) = 0.05$ e os observáveis utilizados são: as cores FUV-NUV, NUV-*u*, *u*-*g*, *g*-*r*, *r*-*i*; o índice espectral $H\delta_A$ e a magnitude absoluta M_i. FUV e NUV são bandas provenientes do *GALEX* e as bandas *u, g, r, i e z* são provenientes do SDSS. Então, é realizada uma regressão linear múltipla padrão (MLR, em inglês) entre estes observáveis e os seguintes parâmetros físicos: massa estelar ($\log M_*$), taxa de formação estelar (logSFR), extinção em FUV (A_{FUV}), correção da extinção para NUV-*i* (Δ(NUV-*i*) = (NUV-*i*)$_0$ - (NUV-*i*)$_{obs}$), idade estelar ponderada pela massa ($\log t_*$), massa do gás ($\log M_{gas}$), metalicidade do gás (Z_{gas}) e metalicidade estelar (Z_*).

O poder de recuperar as propriedades físicas da amostra está demonstrado na Figura 3.4. Além desses parâmetros físicos, foram introduzidos dois novos que estão relacionados a momentos do histórico de formação estelar: *Star Formation Acceleration* e *Star Formation Jerk*, que serão explicados na Seção 3.3

3.3 *Star Formation Acceleration* – SFA

A derivada temporal da cor $(NUV - i)_0$ é denominada como "aceleração da taxa de formação estelar" (*Star Formation Rate* – Equação 3.3.1)[2] e usa os valores de dois intervalos de tempo consecutivos, com $\Delta t = 300$Myr. Para o *redshift* mais baixo, isso representa $0 < z < 0.3$.

$$SFA \equiv \frac{d(NUV - i)_0}{dt} \tag{3.3.1}$$

Apesar de existirem outras opções para se definir como *Star Formation Acceleration*, $d(NUV-i)_0/dt$ se tornou a mais eficiente quando se diz respeito detectar variações da taxa de formação estelar. Entre os motivos, os principais são:

1. d (SFR)$/dt$ não é normalizado pela massa, o que causaria um viés e tornaria a comparação entre *bins* de massa pouco informativa.

2. d log(sSFR)$/dt$ é eficaz e um bom traçador no CMD, mas pode corresponder a valores muito altos ou muitos baixos quando o *quench* acontece de forma muito rápida. Além disso, a dispersão para o ajuste é menor utilizando a cor $(NUV - i)_0$ ($2.5\sigma(\mathrm{SFA_{sSFR}}) = 4.4$ em comparação a $2.5\sigma(\mathrm{SFA_{NUV-}}_i) = 1.5$).

3. A definição adotada é logarítmica e a cor $(NUV - i)_0$ correlaciona bem com log(sSFR), onde $(NUV - i)_0 \simeq \text{const.} - 2.5\ \log(sSFR)$ para $1 < (NUV - i)_0 < 5$. Além disso, a função se comporta bem mesmo mudanças repentinas na SFR e sSFR.

Além do SFA, os autores também calcularam o SFJ (*Star Formation Jerk*), que é como um SFA "passado", onde o Δt é entre 300Myr e 600Myr. Pela definição, o

[2] É válido ressaltar que a diferença entre as cores $(NUV - i)_0$ e $(NUV - r)_0$ é de apenas 1% (Martin et al., 2017).

SFA e o SFJ podem ser negativos ou positivos, onde um SFA negativo representa um *burst* recente, de forma paralela, um valor positivo representa um *quench* em percurso. Combinando um SFA e um SFJ positivos, conseguimos definir um *quench* com tempo de escala longo.

Como resultado da metodologia, temos uma matriz que relaciona oito observáveis com 10 parâmetros físicos em cada um dos 20 *bins* de $D_n(4000)$ e nove *bins* de *redshift*, representada nas Equações 3.3.2 e 3.3.3. Cada elemento da matriz está denotado como $M_{p,o,d,z}$, onde p é o parâmetro físico; o, o observável; d, o bin $D_n(4000)$; e z, o bin de *redshift*.

$$P_p(est) = \sum_{O=1}^{O=8} M_{o,p,d,z} O_o, \tag{3.3.2}$$

onde, para os observáveis utilizados, se transforma para:

$$\begin{aligned} P_p(est) = M_{1,p,d,z}(FUV - NUV) + M_{2,p,d,z}(NUV - u) + M_{3,p,d,z}(u - g) \\ + M_{4,p,d,z}(g - r) + M_{5,p,d,z}(r - i) + M_{6,p,d,z} D_n(4000) + M_{7,p,d,z} H_{\delta A} \\ + M_{8,p,d,z} M_i + constant \end{aligned} \tag{3.3.3}$$

Analisando a Figura 3.4, é fácil notar que o ajuste do SFA possui uma dispersão maior ao se comparar com os outros parâmetros físicos. Entretanto, funciona razoavelmente bem quando se trata de recuperar o valor médio. Visto isso, para nossa análise nós iremos considerar os comportamentos de valores médios para o SFA para *bins* de cor $\Delta(NUV - r)_0 = 0.5$, e não seu valor para cada objeto individualmente, dado que isso carregaria erros significativos.

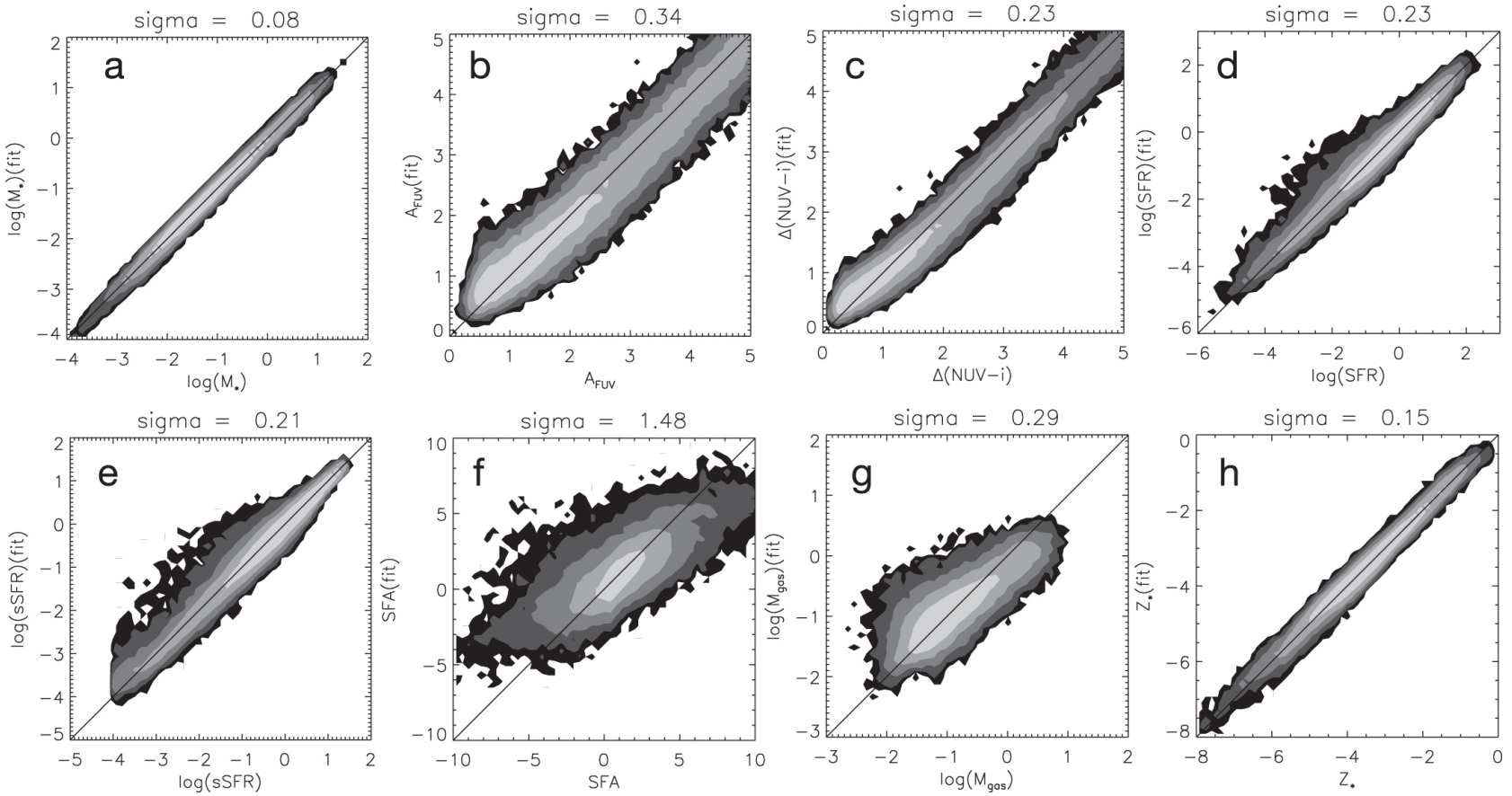


FIGURA 3.4. Figura 6 de Martin et al. (2017). Cada painel representa um parâmetro físico recuperado onde, na abscissa se encontra o valor do modelo e na ordinada o valor recuperado (*fit*) através do método apresentado na Seção 3.2. Estão plotados os valores para todos os *bins* de $D_n(4000)$ e todos os *redshifts*, e o valor de dispersão está apresentado em cima de cada painel: (a) massa estelar – M_*, (b) extinção A_{FUV}, (c) Δ(NUV-i), (d) taxa de formação estelar – SFR, (e) taxa de formação estelar específica – sSFR, (f) ***Star Formation Acceleration*** – SFA, ou d(NUV – i)/dt, (g) massa do gás – M_{gas} e (h) metalicidade estelar – Z_*.

Capítulo 4

Resultados e Discussão

Nesse capítulo iremos mostrar os resultados do comportamento de SFA em função da cor para espirais e elípticas de cada amostra (`GZ, GZ+ML e GZ+DL`) realçando as diferenças e similaridades entre as morfologias (Seção 4.1); em seguida faremos a mesma análise para diferentes recortes de massa (Seção 4.2); e por fim discutiremos as implicações dos resultados com o cenário evolutivo de galáxias (Seção 4.3).

A fim de facilitar a familiaridade com os resultados, também gostaríamos de lembrar o leitor que, pela definição do SFA, temos:

- SFA $> 0 \rightarrow$ *quenching*
- SFA $< 0 \rightarrow$ *bursting*

4.1 Tendências de SFA *vs.* $(NUV - r)_0$

É importante relembrar que, como mencionado no Capítulo 3 (Figura 3.4 - painel f), a recuperação dos valores médios de SFA a partir de observáveis é eficiente para grandes amostras e, em nossa análise, calculamos os valores médios de SFA para *bins* de $\Delta(NUV - r)_0 = 0.5$. Logo, é importante termos cautela em alguns casos onde as amostras se tornam pequenas, principalmente nas extremidades das cores, como para elípticas azuis e espirais vermelhas. A quantidade de objetos em cada *bin* de cor pode ser encontrada nas tabelas do Apêndice A. Com isso em mente, podemos seguir para a análise dos resultados.

A primeira abordagem que faremos tem como objetivo enfatizar como o comportamento do SFA *vs.* $(NUV - r)_0$ pode variar dependendo da amostra (`GZ`, `GZ+ML` e `GZ+DL`). Para isso, comparamos esse comportamento médio de cada amostra na Figura 4.1, separando entre espirais (painel superior) e elípticas (painel inferior). Na mesma imagem podemos ver a distribuição das amostras em cor, com objetivo de compararmos a quantidade de objetos em cada amostra. De forma geral, os três casos mostram a mesma tendência global para SFA, que aumenta com $(NUV - r)_0$, tanto para espirais quanto elípticas, sem grandes diferenças entre as amostras. A exceção é para o caso das elípticas azuis da `GZ`, mas isso fica claro ao notarmos que, para $(NUV - r)_0 < 3$, temos menos de 50 galáxias em cada *bin* (conferir Tabela A.4, coluna ell_len[a]), principalmente ao se comparar com as outras amostras. Logo, atribuímos essa divergência à estatística de pequenos números envolvida.

Visto que os resultados para cada morfologia não dependem da amostra em questão, podemos passar para nossa análise principal, que consiste na comparação do comportamento da SFA com $(NUV - r)_0$ para elípticas e espirais, que pode ser visto nas Figuras 4.2, 4.3 e 4.4.

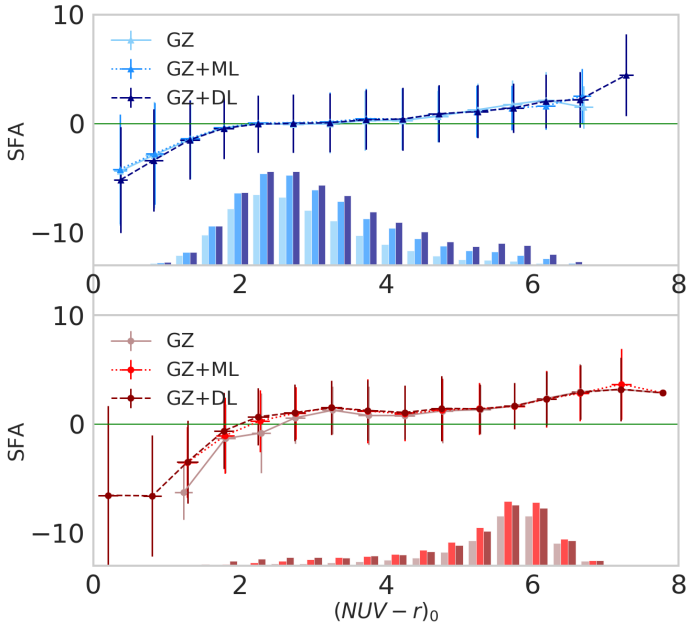


FIGURA 4.1. SFA *vs.* $(NUV - r)_0$ para espirais (painel superior) e elípticas (painel inferior). Os pontos e triângulos são o valor médio do SFA para cada bin de cor e as barras apresentam um desvio estatisticamente de 1σ. Em cada painel, temos as três amostras mencionadas anteriormente: GZ, GZ + ML e GZ + DL.

Encontramos que elípticas apresentam valores médios maiores de SFA que espirais na região do vale verde. Junto de cada valor médio, também mostramos as barras de desvio padrão de SFA em cada *bin* de $(NUV - r)_0$, e as distribuições ao

fundo, com curvas de contorno seguindo o código de cores para morfologia e a lógica das Figuras 2.14, 2.15 e 2.16.

Como as barras de desvio padrão se sobrepõem para espirais e elípticas, realizamos três testes estatísticos para verificar se nosso resultado é válido: *Permutação*, usando as bibliotecas do `R`; *Kolmogorov-Smirnov* e *Anderson-Darling*, usando as bibliotecas do `python`. Com esses, estamos testando se nossas distribuições de SFA_{spi} e SFA_{ell} podem ser consideradas diferentes ou não. Para simplificar a visualização dos dados no painel, mostramos apenas os resultados de $p-value$ (painel inferior das Figuras 4.2, 4.3 e 4.4) calculados com o `R`, por ser uma linguagem mais apropriada para testes estatísticos, já que os pacotes de `python` mencionados aqui calculam os valores de *p-value* por extrapolação e sem um intervalo de confiança. A área sombreada em laranja representa o intervalo para o qual se tem 99% de confiança do valor de $p-value$, em que para os casos com valores mínimos abaixo dos limites do eixo y, usamos setas pretas como limites superiores; também enfatizamos a nuvem azul e a sequência vermelha, que foram definidas com 1σ do pico de $(NUV-r)_0$ e são representadas como sombras cinzentas nos três painéis; por fim, as linhas vermelhas tracejadas horizontais são para indicar $p-value = 0.05$ e $p-value = 0.10$. Para $p-value < 0.05$ e $p-value < 0.10$, podemos considerar as distribuições de SFA de espirais e elípticas nesse *bin* de $(NUV-r)_0$ como estatisticamente diferentes com 5% e 10% de chance de erro, respectivamente. Se $p-value > 0.10$ (acima da linha superior), não devemos tirar conclusões fortes. Os resultados para os testes *Kolmogorov-Smirnov* e *Anderson-Darling* estão de acordo e para mais particularidades sobre cada teste estatístico e seus resultados, o leitor pode consultar o Apêndice A.

Como se pode ver nos três painéis inferiores das Figuras 4.2, 4.3 e 4.4, *o comportamento médio do SFA é estatisticamente diferente para espirais e elípticas no vale verde.* Todas as três amostras possuem $p-value < 0.10$ para pelo menos a maior parte da região do vale verde, com menor probabilidade de erro na amostra `GZ + DL`, onde todos os valores de $p-value < 0.05$. Ou seja, encontramos que, além de elípticas apresentarem maiores valores de SFA para o vale verde, esse resultado é estatisticamente robusto, sendo uma forte evidência de que elípticas e espirais de fato experimentam processos diferentes na região de transição. Vale ressaltar que esse comportamento para o *p-value* ocorre principalmente quando os valores médio para o SFA são positivos, ou seja, de *quenching*.

FIGURA 4.2. Distribuições de *SFA vs.* $(NUV - r)_0$ para a amostra com a classificação morfológica proveniente de *Galaxy Zoo* com 80% de confiança (`GZ`). Separamos espirais (linha tracejada azul) e elípticas (linha vermelha - sólida). As curvas de nível de contorno indicam a fração da amostra em: 15%, 50%, 75% e 87,5%. Também mostramos o histograma de $(NUV - r)_0$ abaixo da distribuição seguindo a codificação de cor para elípticas e espirais. Por fim, no painel inferior temos os resultados de *p-value* em escala logarítmica do teste de permutação estimado por Monte Carlo (discutido no Apêndice A.1) com duas linhas horizontais representando $p - value = 0.05$ e $p - value = 0.10$. Encontramos que elípticas apresentam valores médios maiores de SFA que espirais na região do vale verde.

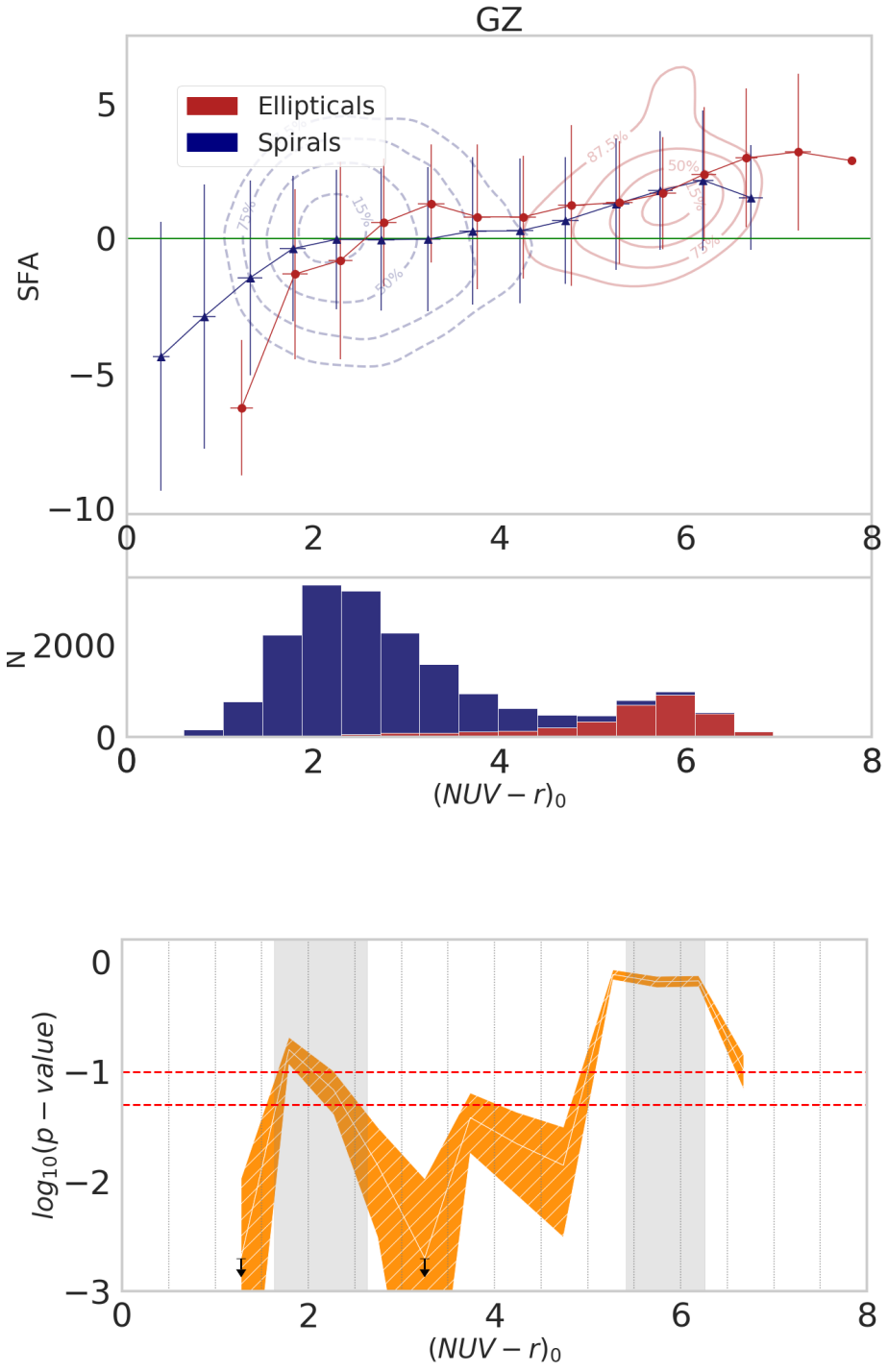


FIGURA 4.3. Distribuições de *SFA vs.* $(NUV - r)_0$ para a amostra com a classificação morfológica proveniente de *Galaxy Zoo* e classificação morfológica de Machine Learning (`GZ+ML`). Separamos espirais (linha tracejada azul) e elípticas (linha vermelha - sólida). As curvas de nível de contorno indicam a fração da amostra em: 15%, 50%, 75% e 87,5%. Também mostramos o histograma de $(NUV - r)_0$ abaixo da distribuição seguindo a codificação de cor para elípticas e espirais. Por fim, no painel inferior temos os resultados de *p-value* em escala logarítmica do teste de permutação estimado por Monte Carlo (discutido no Apêndice A.1) com duas linhas horizontais representando $p - value = 0.05$ e $p - value = 0.10$. Encontramos que elípticas apresentam valores médios maiores de SFA que espirais na região do vale verde.

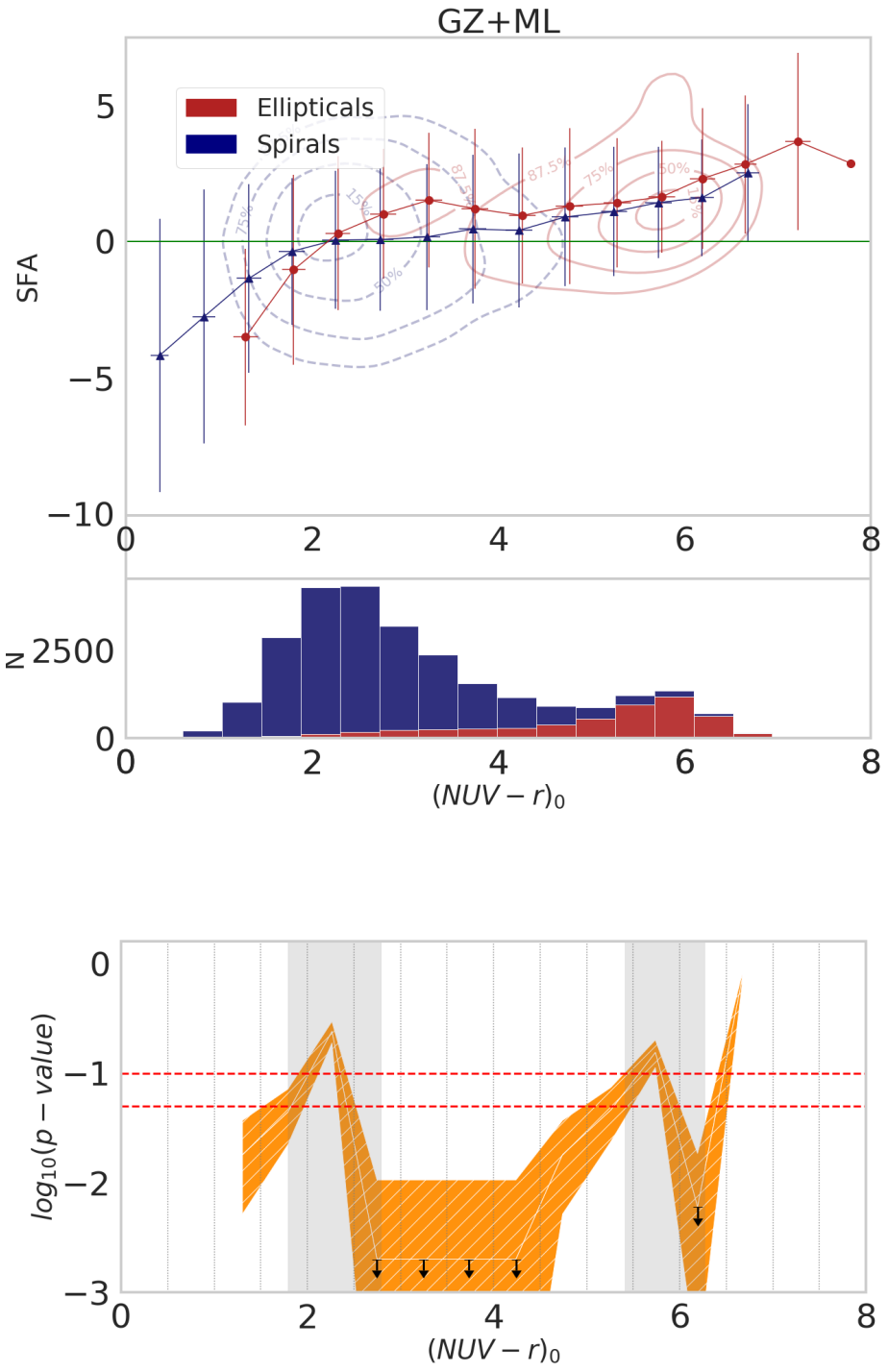
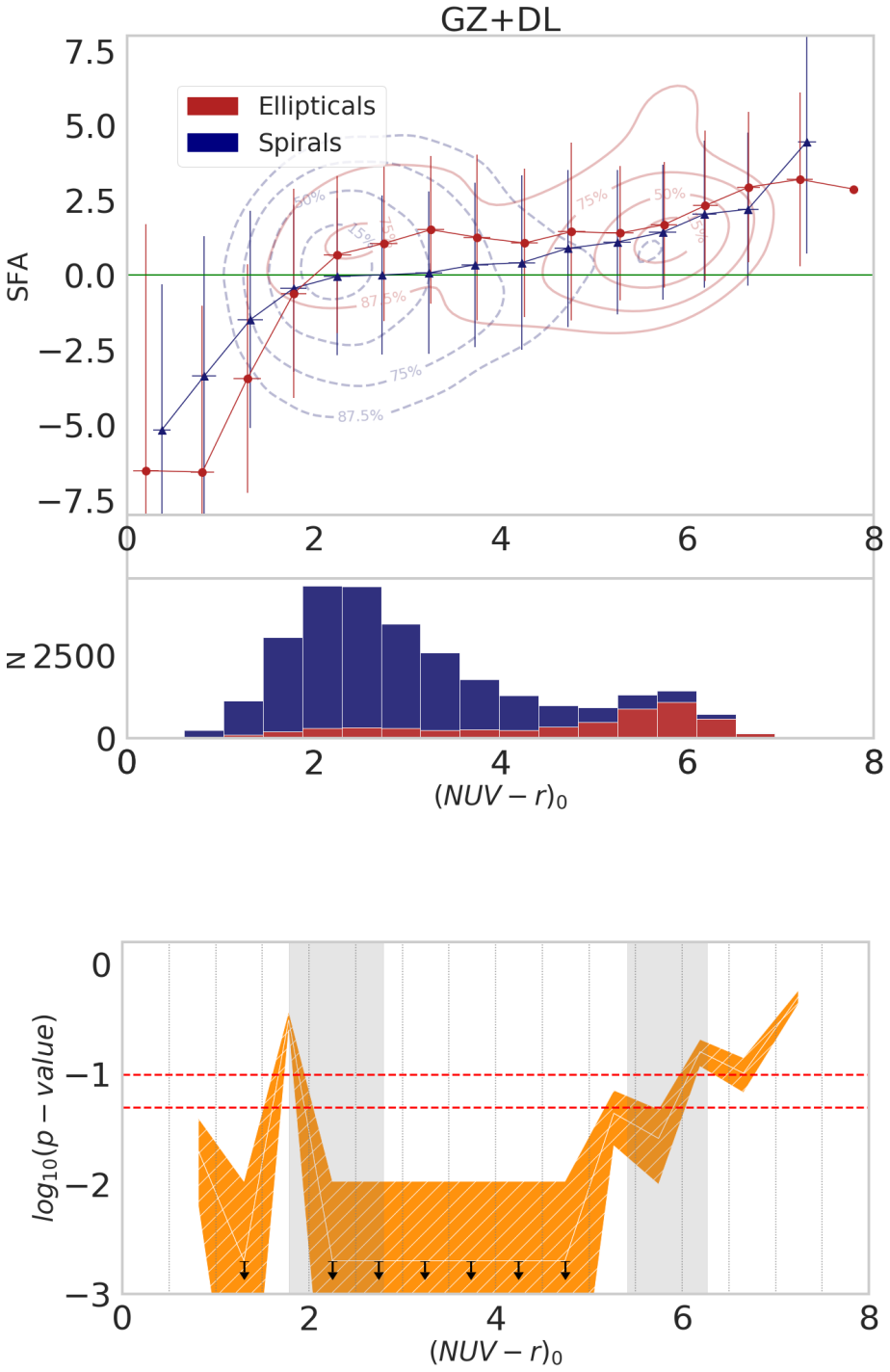


FIGURA 4.4. Distribuições de *SFA vs.* $(NUV - r)_0$ para a amostra com classificação morfológica proveniente de *Galaxy Zoo* e classificação morfológica de Deep Learning (`GZ+DL`). Separamos espirais (linha tracejada azul) e elípticas (linha vermelha - sólida). As curvas de nível de contorno indicam a fração da amostra em: 15%, 50%, 75% e 87,5%. Também mostramos o histograma de $(NUV - r)_0$ abaixo da distribuição seguindo a codificação de cor para elípticas e espirais. Por fim, no painel inferior temos os resultados de *p-value* em escala logarítmica do teste de permutação estimado por Monte Carlo (discutido no Apêndice A.1) com duas linhas horizontais representando $p - value = 0.05$ e $p - value = 0.10$. Encontramos que elípticas apresentam valores médios maiores de SFA que espirais na região do vale verde.



Como o SFA é um reflexo de alterações na taxa de formação estelar, isso também implica que o histórico de formação estelar de elípticas e espirais ao passarem pelo vale verde são diferentes, ao menos nos últimos 300 Myrs. O fato de termos menos probabilidade de erro na amostra `GZ + DL` pode ser explicado pela razão de que esta possui um número maior de galáxias na região de transição. Para amostras pequenas, há uma tendência dos testes estatísticos em obter *p-values* maiores, pois é mais difícil afirmar que as amostras são diferentes. Contudo, apesar de não termos os mesmo valores de *p-value* para as três amostras, o resultado qualitativo se mantém: as distribuições de SFA para elípticas e espirais são estatisticamente diferentes.

É interessante citar que, para a amostra `GZ+DL` temos $p - value < 0.05$ na região da nuvem azul também. Essa amostra, como discutido no Capítulo 2, é a amostra que possui mais exemplares de elípticas nessa região, e é a que possui o menor *p-value*. Isso é um indicativo de que esses dois fatos podem estar correlacionados: a maior presença de elípticas para essa amostra torna possível detectar diferenças estatísticas, o que não é viável para as outras. Embora esse resultado não seja tão robusto quanto os outros, já que depende da amostra, é possível sugerir que galáxias elípticas na nuvem azul não estão passando pelos mesmos processos de formação estelar que galáxias espirais.

Por fim, quando se trata do comportamento das tendências do SFA *vs.* $(NUV-r)_0$ para cada morfologia, podemos notar que, para galáxias espirais, a tendência do SFA suavemente se torna mais positiva, com o valor médio próximo de zero para alguns *bins* de cores (aproximadamente entre $2 < NUV - r < 3,5$). Entretanto, quando se trata de galáxias elípticas, não vemos essa tendência, onde para $NUV - r > 2$, todas as elípticas estão passando por *quench*. Isso indica que, em qualquer cor, elípticas não experienciam processos de *quench* suaves e não suportam um cenário de taxa de formação estelar constante, como esperado. Essas implicações serão discutidas com mais profundidade na Seção 4.3.

4.2 Comportamento para diferentes cortes de massa

Interessados em como o comportamento de SFA com morfologia pode variar para diferentes massas e, seguindo a lógica por trás das análises feitas em Martin et al. (2017)

e Darvish et al. (2018), utilizamos os catálogos de massa[12] fornecidos pela colaboração de pesquisadores dos institutos MPA e JHU, baseados nos trabalhos de Kauffmann et al. (2003a) e Salim et al. (2007). A ideia da análise feita nessa seção é comparar como o comportamento de SFA com morfologia é afetado para diferentes recortes de massa.

Como demonstrado nas Seções 2.4 e 4.1, os resultados apresentados aqui não dependem da amostra escolhida. Por conta disso, e devido ao fato da amostra `GZ+DL` ser a que possui mais objetos, simplificaremos esta seção e faremos a análise com recortes de massa apenas para essa amostra.

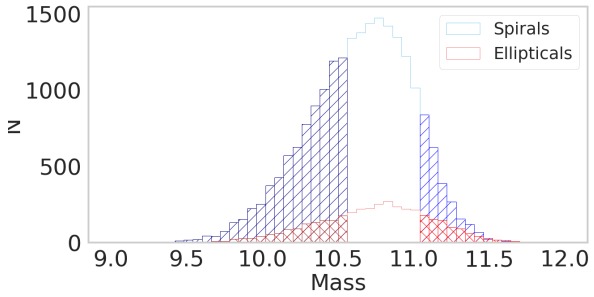


FIGURA 4.5. Distribuição de massa para galáxias espirais (azul) e elípticas (vermelho) de acordo com os catálogos de massa fornecidos pela colaboração de pesquisadores dos institutos MPA e JHU. Também mostramos os dois recortes de massa utilizados nesse trabalho, tanto para espirais quanto para elípticas: $M_* \leq 10^{10.5}$ e $M_* \geq 10^{11.0}$. Temos 7.216 espirais de baixa massa, 3.164 espirais de alta massa, 1.055 elípticas de baixa massa e 986 elípticas de alta massa.

Na Figura 4.5 mostramos as distribuições de massas de galáxias espirais e elípticas da amostra `GZ+DL`, e os dois recortes que fizemos: $M_* \leq 10^{10.5}$ e $M_* \geq 10^{11.0}$, tanto para elípticas (vermelho) quanto para espirais (azul). Optamos por recortes de massa para mais massivas *vs.* menos massivas visando realçar as diferenças nos comportamentos de SFA devido à massa, seguindo Kauffmann et al. (2003a). Para esses recortes, temos 7.216 espirais de baixa massa, 3.164 espirais de alta massa, 1.055 elípticas de baixa massa e 986 elípticas de alta massa. Seguindo a análise da Seção 4.1, os resultados para esses recortes estão nas Figuras 4.6 e 4.7.

Encontramos que espirais massivas estão passando por *burst* em grande parte do vale verde, enquanto espirais menos massivas e elípticas, de forma geral, estão passando por *quench*. Em um primeiro momento, esses resultados estão em parte de acordo com os resultados apresentados em Martin et al. (2017) e Darvish et al. (2018), onde os autores encontram nos dois trabalhos que galáxias massivas passam por *bursts*, enquanto galáxias menos massivas passam por *quenchs*, em um cenário onde galáxias satélites estariam

[1] https://wwwmpa.mpa-garching.mpg.de/SDSS/
[2] https://wwwmpa.mpa-garching.mpg.de/SDSS/DR7/Data/stellarmass.html

FIGURA 4.6. Distribuições de *SFA vs.* $(NUV - r)_0$ para a amostra de espirais para diferentes cortes de massa.

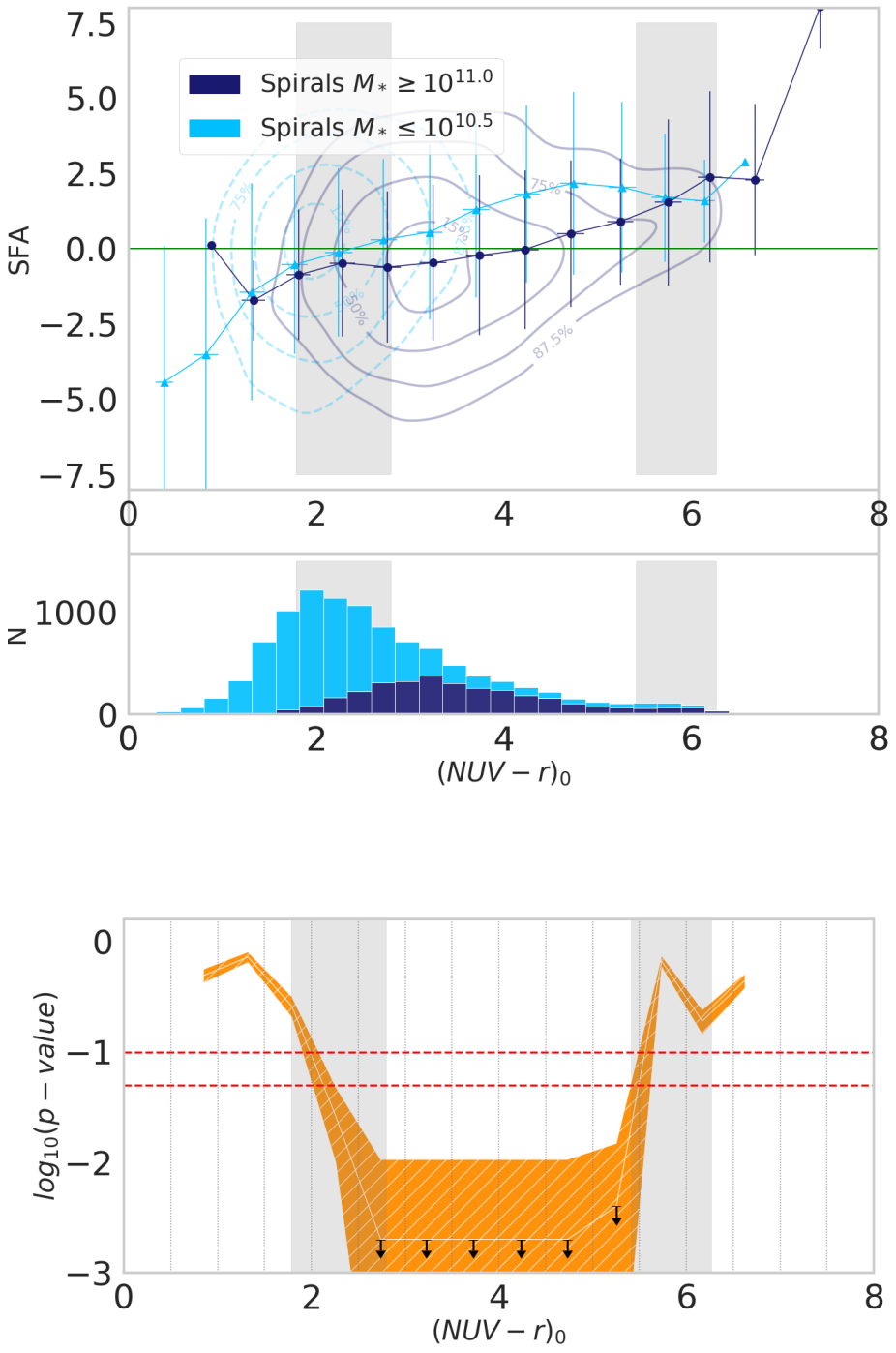
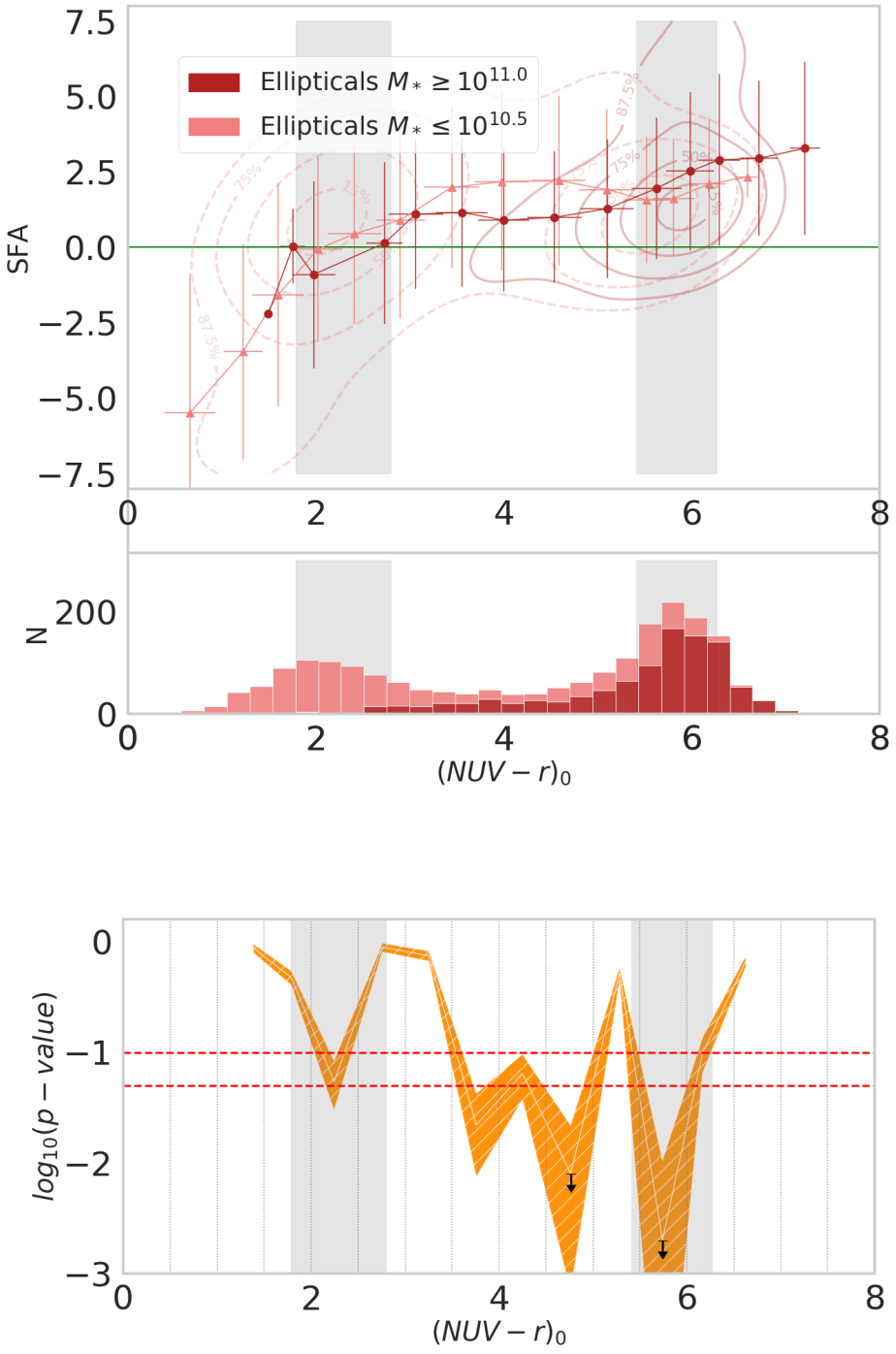


FIGURA 4.7. Distribuições de *SFA vs.* $(NUV - r)_0$ para a amostra de elípticas para diferentes cortes de massa.



perdendo seu gás molecular para respectivas galáxias centrais, acarretando *quench* nas primeiras e *burst* nas segundas.

Além de realizar recortes de massa, Darvish et al. (2018) também realizaram recortes de ambiente. Entre algumas conclusões, os autores realçam o fato de que galáxias centrais em ambientes densos (como aglomerados) estão passando por *quench*. Levando isso em consideração, junto da correlação entre morfologia e ambiente (Dressler, 1980), onde galáxias elípticas são mais numerosas em ambientes densos, é possível explicar o comportamento de *quench* para elípticas massivas como um provável efeito de ambiente. Uma análise mais profunda sobre o aspecto ambiental e seu possível papel no comportamento do SFA para diferentes recortes de massa será feita no futuro.

Vale mencionar o trabalho de La Barbera et al. (2014), que encontraram que o conteúdo estelar de galáxias elípticas massivas e centrais depende fortemente da massa dos halos de matéria escura em que estão inseridas. Em seu trabalho, mostraram que galáxias elípticas que residem halos mais massivos apresentam uma população estelar mais jovem e menores metalicidades. Os autores discutem que esse resultado está de acordo com um histórico de formação estelar mais prolongado, já que a principal fonte de elementos α são supernovas do Tipo Ia (final da vida de estrelas massivas com vida curta). Isso pode ser explicado pelo fato que galáxias elípticas em halos de matéria escura massivos possuem mais chances absorver galáxias satélites. Com isso em mente, vale notar que galáxias elípticas massivas da nossa amostra são menos *quenchy* que as de menor massa na região do vale verde, enquanto esse comportamento é alterado na sequência vermelha. Levando em consideração que as escalas de tempo de *burst* podem ser inferiores que 300 Myrs, pode ser o cenário em que esses casos não chegam a ser detectados pelo nosso método, mas afetam os valores médios de SFA.

4.3 Implicações no cenário evolutivo de galáxias elípticas e espirais

Embora não possamos associar linearmente o valor do SFA a uma escala de tempo (τ) de *quench/burst* (como evidenciado em Darvish et al., 2018 – Figura 4.8), podemos interpretar qualitativamente o significado físico dos resultados, especialmente para comparar espirais e elípticas. Como podemos ver na Figura 4.8, a conversão entre SFA e

τ não é simétrica e diferentes valores de τ são associados ao mesmo valor de SFA (e.g. SFA $= 5 \rightarrow 0.1 \leq \tau \leq 1$). Entretanto, para dois valores de SFA temos necessariamente dois valores de τ que seguem a mesma lógica, isto é, para o caso de $\mathrm{SFA}_1 > \mathrm{SFA}_2$ temos $\tau_1 < \tau_2$, tornando possível comparar as escalas de tempo relativa entre dois grupos.

Conforme destacado na Seção 4.1, na região do vale verde, temos diferentes escalas de tempo de *quench* para galáxias elípticas e espirais, com significância estatística (Figuras 4.2, 4.3 e 4.4). Isso reforça a ideia da forte correlação entre morfologia e os processos físicos responsáveis pelas alterações na formação estelar. Além disso, temos galáxias elípticas com maiores valores médios de SFA em todo o vale verde, implicando em cenários em que as galáxias elípticas experimentam processos de *quench* com menores escalas de tempo.

Junto a isso, quando analisamos o comportamento da tendência do SFA (Figuras 4.1, 4.2, 4.3 e 4.4), é interessante observar como galáxias espirais transitam suavemente a partir de valores negativos (i.e., *burst*; $NUV - r < 2$) para valores positivos (i.e., *quench*; $NUV - r > 3,5$), com alguns *bins* de cores com valores médios de $SFA \sim 0$. Por outro lado, galáxias elípticas apresentam uma mudança abrupta do SFA de negativo para positivo em $NUV - r \sim 2$ (para a amostra `GZ + DL`), seguidos por uma tendência praticamente plana para o resto do vale verde. Esses comportamentos implicam alguns aspectos evolutivos.

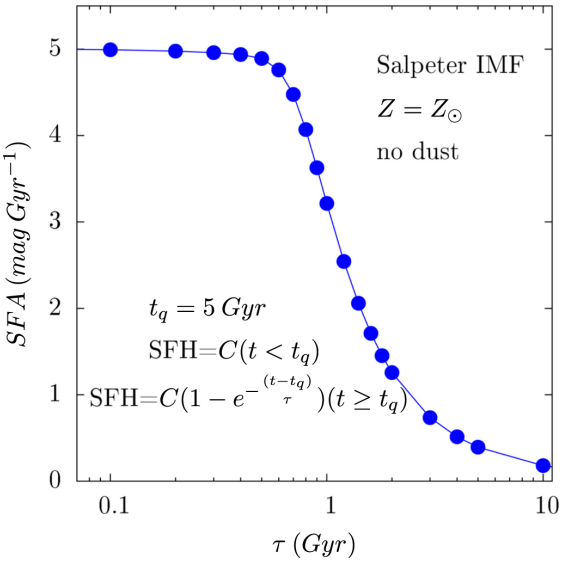


FIGURA 4.8. Figura 2 de Darvish et al. (2018) demonstrando a relação entre os valores positivos de SFA (*quenching*) e a escala de tempo τ em Gyr para cessar a formação estelar, assumindo a IMF de Salpeter, metalicidade solar e sem presença de poeira. Fica claro que a associação do SFA para τ não é linear.

Considerando um cenário em que temos apenas a interrupção do fornecimento de gás por alguns mecanismos (e.g., *quench* devido à massa - Cattaneo et al., 2006; fim do fornecimento *cold flows* e aquecimento por choque - Dekel and Birnboim, 2006), é esperada uma transição suave pelo vale verde. Isso se refletiria nos valores médios do

SFA próximos de zero, como no caso de galáxias espirais (de acordo com Schawinski et al., 2014). Por outro lado, um cenário evolutivo que considera não apenas a interrupção do suprimento de gás, mas também remoção e/ou consumo do gás da galáxia de forma acelerada (e.g., *major mergers*, *feedbacks* de AGN e estelar), teríamos uma mudança abrupta no SFR enquanto a galáxia entra no vale verde. A consequência para este segundo cenário é refletida em valores positivos e elevados de SFA (*quenching*), com uma transição abrupta, como é o comportamento médio das galáxias elípticas ($SFA > 0$ para cada *bin* de cor acima de $NUV - r \sim 2$).

Os nossos resultados estão de acordo com o cenário de *major merger* desempenhando um papel principal na formação de galáxias elípticas (e.g. Toomre, 1977) e elucidando sua rápida transição pelo vale verde. Mecanismos desencadeados pelo *merger* também podem ser necessários tanto para interromper a formação estelar quanto para impedir que a galáxia volte a formar estrelas, como *feedback* de AGN, especialmente para casos de espirais ricas em gás (e.g. Springel et al., 2005a). Uma possibilidade é o cenário em que, enquanto ocorre o *major merger*, a soma dos momentos angulares das galáxias permite que o gás seja conduzido para o centro do objeto remanescente, induzindo um *feedback* energético e alimentando o buraco negro supermassivo central, iniciando um estado de núcleo galáctico ativo (AGN). Através de estudos de ULIRGs, é possível atribuir o papel da origem de quasares a interações e *mergers* (e.g. Sanders et al., 1990; Schweitzer et al., 2006; Veilleux et al., 2006). Por sua vez, o *feedback* da AGN é capaz de extinguir a formação estelar, mecanicamente (expelindo o gás) ou energeticamente (aquecendo o ISM), garantindo a manutenção do *quench* por estrangulamento (e.g., Schawinski et al., 2009; Fabian, 2012; Nogueira-Cavalcante et al., 2019) e formando galáxias elípticas e/ou compactas, e passivas com populações estelares velhas (e.g., Sanders et al., 1990; Hopkins et al., 2006). Além disso, *major mergers* ricos em gás e outros processos como *stripping* são capazes de desencadear um *burst* estelar, utilizando todo o gás molecular presente na galáxia, esgotando-o (e.g., Di Matteo et al., 2005; Peng et al., 2015; Koutsouridou and Cattaneo, 2019). Springel et al. (2005a) demonstraram através de simulações que sem o *feedback* de AGN não é possível uma evolução rápida pelo vale verde. Estes possuem papel essencial para *quench* e avermelhamento rápidos, reproduzindo populações estelares de elípticas passivas que observamos.

Nossos resultados concordam com Schawinski et al. (2014), que chegaram à mesma conclusão ao considerar um SFH com decaimento exponencial para o vale verde, junto de

medidas de índices fotométricos. Os autores mostraram que elípticas cessam formação estelar mais rapidamente e principalmente devido a fusões (após um curto período com *burst* de formação estelar – e.g. Di Matteo et al., 2007; Rodríguez Montero et al., 2019) para o universo local. Nogueira-Cavalcante et al. (2018) chegaram às mesmas conclusões para redshifts intermediários ($0,5 \leq z \leq 1.0$), também considerando um SFH com decaimento exponencial e índices fotométricos, com o adicional de índices espectroscópios.

Entretanto, resultados recentes mostraram que, mesmo que *major mergers* possam ser o principal mecanismo físico para alterar a estrutura morfológica enquanto afeta a formação estelar, aspectos secundários são necessários para manutenção do *quench* (e.g. Rodriguez-Gomez et al., 2017, Smethurst et al., 2016), apesar de não investigados nesse projeto. Um cenário mais completo de evolução de galáxias inclui esses e outros mecanismos e, para entender completamente o papel desses mecanismos secundários em nossa amostra, seria necessária uma análise mais aprofundada em tais aspectos.

No que diz respeito ao cenário evolutivo de galáxias espirais, temos duas considerações principais: (i) galáxias espirais entrando no vale verde possuem $SFA \sim 0$, isto é, sua SFR é aproximadamente constante em 300 Myrs, indicando uma escala de tempo de *quench* maior que este valor; (ii) para o restante do vale verde, galáxias espirais apresentam $SFA > 0$, indicando uma escala de tempo de evolução menor que 300 Myrs. Estes resultados estão de acordo com os encontrados por Schawinski et al. (2014). Neste trabalho, os autores sugerem que o principal processo responsável pelo *quench* de galáxias espirais que conseguem manter seus discos até cores vermelhas são processos seculares. Uma vez que o suprimento de gás é bloqueado por algum dos mecanismos mencionados, a galáxia evolui lentamente pelo vale verde. Junto a isso, processos seculares (isto é, interações e instabilidades dinâmicas com escalas de tempo maiores de 1 Gyrs) podem acelerar a depleção do gás, no cenário em que barras induzem influxos para regiões centrais, desencadeando formação estelar.

Aplicando uma nova metodologia, nossos resultados até aqui se mostraram coerentes com outros trabalhos que se propuseram a investigar a mesma questão: o aspecto morfológico na evolução de galáxias. Entretanto, estes trabalhos são limitados a investigar apenas a região do vale verde, enquanto a metodologia aplicada aqui permite uma visão mais ampla dos cenários evolutivos. Com isso, podemos analisar o SFA não apenas

para o vale verde, mas para todos os valores de $NUV - r$, ao contrário de Martin et al. (2007), Gonçalves et al. (2012) e Nogueira-Cavalcante et al. (2018).

Tratando-se da nuvem azul, os resultados estatísticos dependem da amostra (consulte o Apêndice A), onde para `GZ` não podemos tirar conclusões, mas para `GZ + DL`, temos distribuições de SFA estatisticamente diferentes na nuvem azul para elípticas e espirais (Figura 4.4 - painel inferior). Como discutido, essa detecção de diferença estatística pode ser explicada pelo fato de que, no caso `GZ + DL`, temos uma amostra maior de elípticas azuis.

Se considerarmos os resultados da nuvem azul para a amostra `GZ + DL` como válidos (Schawinski et al., 2007 também encontraram uma amostra de elípticas com formação estelar residual no universo local; Kaviraj et al., 2007), temos que galáxias elípticas e espirais nessa região não possuem a mesma natureza de formação estelar. Enquanto galáxias espirais possuem uma SFR aproximadamente constante, refletido em valores de $SFA \sim 0$, galáxias elípticas na nuvem azul já apresentam um comportamento de *quench*. Uma possibilidade é a de que essas galáxias estejam passando pela primeira vez nessa região, após o evento de *major merger*. Como demonstrado por Mendez et al. (2011), as maiores frações de *merger* estão localizadas em cores mais azuis. Outra possibilidade é o cenário que conta com processos de rejuvenescimento para galáxias elípticas, onde uma galáxia volta a ser abastecida e a formar estrelas (e.g. Rampazzo et al., 2007; Martin et al., 2017; Pandya et al., 2017). No caso, galáxias elípticas na nuvem azul já teriam consumido o gás molecular e estariam evoluindo novamente em direção ao vale verde.

A origem do material por trás do rejuvenescimento pode ser externa, acumulando gás do ambiente (e.g. van de Voort et al., 2011; Faucher-Giguère et al., 2011), ou interna, acumulando material perdido pelas estrelas ao morrerem (e.g. Jungwiert et al., 2001; Athey et al., 2002). Davis and Young (2019) argumentaram, através da análise da metalicidade do gás dessas galáxias, que a fonte do gás molecular é externa às galáxias, provavelmente de *minor mergers*. Além disso, os autores mostram que, para dada massa, essa metalicidade do gás é substancialmente diferente para elípticas e espirais, corroborando com a ideia de naturezas diferentes para esses dois grupos.

Tratando-se agora da sequência vermelha, como se pode ver na Figuras 4.2, 4.3 e 4.4, as galáxias a alcançam com SFH semelhantes. Encontramos valores médios similares de SFA para espirais e elípticas (painel superior) sem diferença estatística entre as

distribuições (painel inferior). Esses resultados indicam que as principais diferenças para os caminhos evolutivos entre espirais e elípticas se encontram no início do processo de *quench* e, uma vez que a galáxia se torna passiva, não há dependência significativa do mecanismo físico por trás delas.

Por fim, trazemos também a análise em diferentes cortes de massa para espirais e elípticas (Seção 4.2). Encontramos que espirais massivas estão passando por *bursts*, enquanto espirais menos massivas e elípticas estão passando por *quench*. Em seu trabalho, Martin et al. (2017) encontraram que, no vale verde, galáxias massivas apresentam comportamento médio de *burst*, enquanto galáxias menos massivas, de *quench*. Os autores também sugerem um cenário onde as galáxias de baixa massa estão perdendo seu gás molecular para galáxias de alta massa. Dessa forma, teríamos um *quench* para a primeira e um *burst* para segunda. Ampliando essa análise, Darvish et al. (2018) também analisaram o efeito do ambiente. Em sua análise, os autores notaram que galáxias centrais massivas em ambientes densos estariam passando majoritariamente por *quench*, enquanto galáxias em campo e grupos passam por *bursts*. Com isso em mente, e junto ao fato de dependência entre morfologia e ambiente (demonstrado pela primeira ver por Dressler, 1980) podemos inferir que galáxias elípticas massivas não apresentam um comportamento de *burst* possivelmente pelo efeito do ambiente. Entretanto, vale ressaltar que galáxias elípticas massivas são menos *quenchy* que as menos massivas na região do vale verde, e isso pode estar de acordo com o cenário de *bursts* que não chegam a ser detectados pelo nosso método mas afetam os valores médios de SFA, seguidos por uma evolução passiva.

Capítulo 5

Conclusões

Há quase 100 anos, foi determinada a natureza extra-galáctica das até então denominadas *"nebulosas espirais"* (Hubble, 1925). Esse novo ramo da astronomia, desde então, chamou atenção de astrônomos e astrônomas pela história, em diferentes partes do mundo. Perguntas acerca de sua formação e evolução nos instigam por quase um século hoje. Em especial, a estrutura das galáxias, e sua provável relação com seus estados evolutivos, é alvo de investigação desde o nascimento da astrofísica extragaláctica (e.g. Hubble, 1926; Hubble 1927). Neste trabalhamos, visamos contribuir para o cenário evolutivo que considera o aspecto morfológico das galáxias.

Usando dados fotométricos e espectroscópicos SDSSDR12 e GALEX (Seção 2.1), e considerando três catálogos morfológicos (2.3.2 – `GZ, GZ + ML, GZ + DL`), analisamos o comportamento das distribuições de *Star Formation Acceleration* – SFA – introduzido por Martin et al. (2017), para espirais e elípticas em diferentes *bins* de cores.

Na Seção 2.4, destacamos as diferenças entre os catálogos morfológicos nos diagramas de cor–magnitude, chamando a atenção para o fato de que as classificações morfológicas de *Machine* e *Deep Learning* tendem a preencher a região do vale verde e classificar casos "não tradicionais", como elípticas azuis e espirais vermelhas, como pode ser visto nas Figuras 2.14, 2.15 e 2.16.

Aplicando uma metodologia não paramétrica, descrita na Seção 3, discutimos na Seção 4.1 que o comportamento médio da SFA é estatisticamente diferente para espirais e elípticas na região do vale verde. Além disso, mostramos que, comparativamente, galáxias elípticas cessam sua formação estelar com escalas de tempo mais curtas que as

espirais. Esses resultados estão de acordo com vários trabalhos em diferentes redshifts e apoiam o cenário de *major merger* para explicar um *quench* rápido da formação estelar e transformação morfológica (Seção 4.3 – Schawinski et al., 2014; Di Matteo et al., 2007; Nogueira-Cavalcante et al., 2018). Também mostramos as tendências de SFA com morfologia para diferentes recortes de massa (Seção 4.2), onde apenas espirais massivas possuem um estado de *burst*. Isso está de acordo com Martin et al. (2017) e Darvish et al. (2018), onde galáxias massivas passam por *burst* por receber o gás molecular de galáxias de baixa massa, com exceção de galáxias elipticas provavelmente devido a efeitos de ambiente (discussão na Seção 4.3). Por fim, para faixas de $NUV - r$ além do vale verde, encontramos para a nuvem azul da amostra `GZ+DL` um comportamento estatístico diferente, implicando que galáxias elípticas e espirais nessa região possuem naturezas diferentes, de acordo com processos de rejuvenescimento (Seção 4.3 – Rampazzo et al., 2007; Martin et al., 2017; Pandya et al., 2017; Davis and Young, 2019).

Nossos principais resultados estão resumidos a seguir:

1. nos três casos (`GZ, GZ + ML, GZ + DL`), galáxias elipticas mostram maiores valores médios de SFA, para toda a região de transição, indicando que estas experimentam processos de *quench* com menores escalas de tempo – Figuras 4.2, 4.3 e 4.4;

2. elípticas e espirais possuem distribuições de SFA estatisticamente diferentes na região do vale verde, o que indica que elas têm SFH diferente nos últimos 300 Myrs – Apêndice A e Figuras 4.2, 4.3 e 4.4, painel inferior;

3. como em Martin et al. (2017), encontramos uma fração do vale verde em *burst*, sendo estas espirais massivas – Figuras 4.6 e 4.7;

4. não encontramos uma população significativa de elípticas em estado de *burst*, possivelmente sendo explicado por efeitos de ambiente (Darvish et al., 2018) – Figuras 4.6 e 4.7;

5. e para o catálogo `GZ+DL`, encontramos diferenças estatísticas na nuvem azul para valores médios de SFA para elípticas e espirais, indicando que nessa região elas possuem naturezas diferentes, onde elípticas passaram por processos de rejuvenescimento (e.g. Martin et al., 2017; Pandya et al., 2017), principalmente devido a *minor mergers* (Davis and Young, 2019).

Como discutido nas Seções 1 e 4, galáxias passam por diferentes processos físicos simultaneamente e estudos mostram que mesmo que *major merger* possa ser o mecanismo principal para um *quench*, aspectos secundários são necessários para sua manutenção (e.g. Smethurst et al., 2016; Rodriguez-Gomez et al., 2017). Um cenário mais completo para evolução de galáxias pede algumas futuras análises como presença de AGN, presença de *outflows* por *feedback* estelar ou de AGN, análise de companheiras, de traços de interações passadas e investigação de ambiente.

Por fim, com o avanço tecnológico, cada vez mais é possível fazer estudos espacialmente resolvidos de galáxias. Com essa ferramenta, também será possível analisar o SFA espacialmente para diferentes tipos de galáxias. Com isso, poderemos investigar diferentes mecanismos como os de processo de compactação e construção da região central. Entretanto, como evidenciado neste trabalho, a utilização do fluxo em ultra-violeta se faz extremamente necessário para o estudo de evolução de galáxias. Infelizmente, essa região do espectro ainda não é observada espacialmente de forma eficaz, impossibilitando esse tipo de análise no momento.

Neste projeto, procuramos contribuir para o cenário geral de evolução de galáxias considerando um aspecto morfológico. Ao analisarmos o comportamento do SFA dependente da cor, pudemos investigar diferenças nos caminhos evolutivos para galáxias elípticas e espirais além do vale verde. Encontramos que galáxias elípticas evoluem mais rapidamente, com evidência estatística, corroborando com o cenário onde *major mergers* desempenham um papel na construção desses objetos, não apenas afetando suas estruturas mas também cessando sua formação estelar. Além disso, também encontramos que a natureza de galáxias elípticas e espirais na nuvem azul são dispares, onde galáxias elípticas não sustentam um cenário de formação estelar contínua. Por fim, ao compararmos o comportamento de galáxias mais massivas *vs.* menos massivas para elípticas e espirais, encontramos que apenas galaxias espirais massivas possuem um comportamento de *burst* no vale verde. Possivelmente, galáxias elípticas massivas não apresentam um comportamento de *burst* por um efeito do ambiente.

Referências Bibliográficas

Alam, S., Albareti, F. D., Prieto, C. A., Anders, F., Anderson, S. F., Anderton, T., Andrews, B. H., Armengaud, E., Aubourg, É., Bailey, S., et al. (2015). The eleventh and twelfth data releases of the sloan digital sky survey: final data from sdss-iii. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 219(1):12.

Alatalo, K., Lacy, M., Lanz, L., Bitsakis, T., Appleton, P. N., Nyland, K., Cales, S. L., Chang, P., Davis, T. A., De Zeeuw, P., et al. (2014). Suppression of star formation in ngc 1266. *The Astrophysical Journal*, 798(1):31.

Asari, N., Cid Fernandes, R., Stasińska, G., Torres-Papaqui, J., Mateus, A., Sodré, L., Schoenell, W., Gomes, J., and collaboration, S. (2007). The history of star-forming galaxies in the sloan digital sky survey. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 381(1):263–279.

Athey, A., Bregman, J., Bregman, J., Temi, P., and Sauvage, M. (2002). Mid-infrared observation of mass loss in elliptical galaxies. *The Astrophysical Journal*, 571(1):272.

Baldry, I. K., Glazebrook, K., Brinkmann, J., Ivezić, Ž., Lupton, R. H., Nichol, R. C., and Szalay, A. S. (2004). Quantifying the bimodal color-magnitude distribution of galaxies. *The Astrophysical Journal*, 600(2):681.

Balogh, M. L., Baldry, I. K., Nichol, R., Miller, C., Bower, R., and Glazebrook, K. (2004). The bimodal galaxy color distribution: dependence on luminosity and environment. *The Astrophysical Journal Letters*, 615(2):L101.

Balogh, M. L., Morris, S. L., Yee, H., Carlberg, R., and Ellingson, E. (1999). Differential galaxy evolution in cluster and field galaxies at z $\approx$ 0.3. *The Astrophysical Journal*, 527(1):54.

Bamford, S. P., Nichol, R. C., Baldry, I. K., Land, K., Lintott, C. J., Schawinski, K., Slosar, A., Szalay, A. S., Thomas, D., Torki, M., et al. (2009). Galaxy zoo: the dependence of morphology and colour on environment. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 393(4):1324–1352.

Barchi, P., de Carvalho, R., Rosa, R., Sautter, R., Soares-Santos, M., Marques, B., Clua, E., Gonçalves, T., de Sá-Freitas, C., and Moura, T. (2019). Machine and deep learning applied to galaxy morphology-a comparative study. *Astronomy and Computing*, page 100334.

Baugh, C., Cole, S., and Frenk, C. (1996). Evolution of the hubble sequence in hierarchical models for galaxy formation. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 283(4):1361–1378.

Beck, R., Dobos, L., Budavári, T., Szalay, A. S., and Csabai, I. (2016). Photometric redshifts for the sdss data release 12. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 460(2):1371–1381.

Bell, E. F., Wolf, C., Meisenheimer, K., Rix, H.-W., Borch, A., Dye, S., Kleinheinrich, M., Wisotzki, L., and McIntosh, D. H. (2004). Nearly 5000 distant early-type galaxies in combo-17: a red sequence and its evolution since z˜ 1. *The Astrophysical Journal*, 608(2):752.

Bianchi, L., Shiao, B., and Thilker, D. (2017). Revised catalog of galex ultraviolet sources. i. the all-sky survey: Guvcat_ais. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 230(2):24.

Bigiel, F., Leroy, A., Walter, F., Brinks, E., De Blok, W., Madore, B., and Thornley, M. D. (2008). The star formation law in nearby galaxies on sub-kpc scales. *The Astronomical Journal*, 136(6):2846.

Blanton, M. R. (2006). Galaxies in sdss and deep2: a quiet life on the blue sequence? *The Astrophysical Journal*, 648(1):268.

Blanton, M. R., Dalcanton, J., Eisenstein, D., Loveday, J., Strauss, M. A., SubbaRao, M., Weinberg, D. H., Anderson Jr, J. E., Annis, J., Bahcall, N. A., et al. (2001). The luminosity function of galaxies in sdss commissioning data. *The Astronomical Journal*, 121(5):2358.

Blanton, M. R. and Moustakas, J. (2009). Physical properties and environments of nearby galaxies. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 47:159–210.

Blanton, M. R. and Roweis, S. (2007). K-corrections and filter transformations in the ultraviolet, optical, and near-infrared. *The Astronomical Journal*, 133(2):734.

Bluck, A. F., Mendel, J. T., Ellison, S. L., Moreno, J., Simard, L., Patton, D. R., and Starkenburg, E. (2014). Bulge mass is king: the dominant role of the bulge in determining the fraction of passive galaxies in the sloan digital sky survey. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 441(1):599–629.

Boselli, A. and Gavazzi, G. (2014). On the origin of the faint-end of the red sequence in high-density environments. *The Astronomy and Astrophysics Review*, 22(1):74.

Brinchmann, J., Charlot, S., White, S., Tremonti, C., Kauffmann, G., Heckman, T., and Brinkmann, J. (2004). The physical properties of star-forming galaxies in the low-redshift universe. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 351(4):1151–1179.

Bruzual, A. et al. (1983). Spectral evolution of galaxies. i-early-type systems. *The Astrophysical Journal*, 273:105–127.

Bruzual, G. and Charlot, S. (2003). Stellar population synthesis at the resolution of 2003. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 344(4):1000–1028.

Bundy, K., Ellis, R. S., Conselice, C. J., Taylor, J. E., Cooper, M. C., Willmer, C. N., Weiner, B. J., Coil, A. L., Noeske, K. G., and Eisenhardt, P. R. (2006). The mass assembly history of field galaxies: detection of an evolving mass limit for star-forming galaxies. *The Astrophysical Journal*, 651(1):120.

Buta, R., Mitra, S., De Vaucouleurs, G., and Corwin Jr, H. (1994). Mean morphological types of bright galaxies. *The Astronomical Journal*, 107:118–134.

Calzetti, D., Armus, L., Bohlin, R. C., Kinney, A. L., Koornneef, J., and Storchi-Bergmann, T. (2000). The dust content and opacity of actively star-forming galaxies. *The Astrophysical Journal*, 533(2):682.

Calzetti, D., Kinney, A. L., and Storchi-Bergmann, T. (1994). Dust extinction of the stellar continua in starburst galaxies: The ultraviolet and optical extinction law. *The astrophysical journal. Chicago. Vol. 429, no. 2, pt. 1 (July 1994), p. 582-601.*

Cardelli, J. A., Clayton, G. C., and Mathis, J. S. (1989). The relationship between infrared, optical, and ultraviolet extinction. *The Astrophysical Journal*, 345:245–256.

Cattaneo, A., Combes, F., Colombi, S., Bertin, E., and Melchior, A.-L. (2005). Spectral and morphological properties of quasar hosts in smoothed particle hydrodynamics simulations of active galactic nucleus feeding by mergers. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 359(4):1237–1249.

Cattaneo, A., Dekel, A., Devriendt, J., Guiderdoni, B., and Blaizot, J. (2006). Modelling the galaxy bimodality: shutdown above a critical halo mass. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 370(4):1651–1665.

Chilingarian, I. V., Melchior, A.-L., and Zolotukhin, I. Y. (2010). Analytical approximations of k-corrections in optical and near-infrared bands. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 405(3):1409–1420.

Chilingarian, I. V. and Zolotukhin, I. Y. (2011). A universal ultraviolet–optical colour–colour–magnitude relation of galaxies. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 419(2):1727–1739.

Cirasuolo, M., McLure, R., Dunlop, J., Almaini, O., Foucaud, S., Smail, I., Sekiguchi, K., Simpson, C., Eales, S., Dye, S., et al. (2007). The evolution of the near-infrared galaxy luminosity function and colour bimodality up to z $\simeq$ 2 from the ukidss ultra deep survey early data release. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 380(2):585–595.

Conselice, C. J. (2006). Early and rapid merging as a formation mechanism of massive galaxies: Empirical constraints. *The Astrophysical Journal*, 638(2):686.

Croton, D. J., Springel, V., White, S. D., De Lucia, G., Frenk, C. S., Gao, L., Jenkins, A., Kauffmann, G., Navarro, J., and 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(1):11–28.

Daddi, E., Dickinson, M., Morrison, G., Chary, R., Cimatti, A., Elbaz, D., Frayer, D., Renzini, A., Pope, A., Alexander, D., et al. (2007). Multiwavelength study of massive galaxies at z˜ 2. i. star formation and galaxy growth. *The Astrophysical Journal*, 670(1):156.

Darvish, B., Martin, C., Gonçalves, T. S., Mobasher, B., Scoville, N. Z., and Sobral, D. (2018). Quenching or bursting: The role of stellar mass, environment, and specific star formation rate to. *The Astrophysical Journal*, 853(2):155.

Davis, T. A. and Young, L. M. (2019). Gas accretion as fuel for residual star formation in galaxy zoo elliptical galaxies. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters*, 489(1):L108–L113.

De Lucia, G., Springel, V., White, S. D., Croton, D., and Kauffmann, G. (2006). The formation history of elliptical galaxies. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 366(2):499–509.

De Vaucouleurs, G. (1959). Classification and morphology of external galaxies. In *Astrophysik iv: Sternsysteme/astrophysics iv: Stellar systems*, pages 275–310. Springer.

De Vaucouleurs, G. (1961). Integrated colors of bright galaxies in the u, b, v system. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 5:233.

Dekel, A. and Birnboim, Y. (2006). Galaxy bimodality due to cold flows and shock heating. *Monthly notices of the royal astronomical society*, 368(1):2–20.

Di Matteo, P., Combes, F., Melchior, A.-L., and Semelin, B. (2007). Star formation efficiency in galaxy interactions and mergers: a statistical study. *Astronomy & Astrophysics*, 468(1):61–81.

Di Matteo, T., Springel, V., and Hernquist, L. (2005). Energy input from quasars regulates the growth and activity of black holes and their host galaxies. *nature*, 433(7026):604.

Dressler, A. (1980). Galaxy morphology in rich clusters-implications for the formation and evolution of galaxies. *The Astrophysical Journal*, 236:351–365.

Eisenstein, D. J., Weinberg, D. H., Agol, E., Aihara, H., Prieto, C. A., Anderson, S. F., Arns, J. A., Aubourg, É., Bailey, S., Balbinot, E., et al. (2011). Sdss-iii: Massive spectroscopic surveys of the distant universe, the milky way, and extra-solar planetary systems. *The Astronomical Journal*, 142(3):72.

Engmann, S. and Cousineau, D. (2011). Comparing distributions: the two-sample anderson-darling test as an alternative to the kolmogorov-smirnoff test. *Journal of Applied Quantitative Methods*, 6(3):1–17.

Faber, S., Willmer, C., Wolf, C., Koo, D., Weiner, B., Newman, J. A., Im, M., Coil, A., Conroy, C., Cooper, M., et al. (2007). Galaxy luminosity functions to z˜ 1 from deep2 and combo-17: implications for red galaxy formation. *The Astrophysical Journal*, 665(1):265.

Fabian, A. (2012). Observational evidence of active galactic nuclei feedback. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 50:455–489.

Fang, J. J., Faber, S., Koo, D. C., and Dekel, A. (2013). A link between star formation quenching and inner stellar mass density in sloan digital sky survey central galaxies. *The Astrophysical Journal*, 776(1):63.

Faucher-Giguère, C.-A., Kereš, D., and Ma, C.-P. (2011). The baryonic assembly of dark matter haloes. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 417(4):2982–2999.

Feigelson, E. and Babu, G. J. (2013). Beware the kolmogorov-smirnov test.

Filion, G. J. (2015). The signed kolmogorov-smirnov test: why it should not be used. *GigaScience*, 4(1):s13742–015.

Gonçalves, T. S., Martin, D. C., Menéndez-Delmestre, K., Wyder, T. K., and Koekemoer, A. (2012). Quenching star formation at intermediate redshifts: downsizing of the mass flux density in the green valley. *The Astrophysical Journal*, 759(1):67.

Groves, B., Brinchmann, J., and Walcher, C. J. (2011). The balmer decrement of sloan digital sky survey galaxies. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 419(2):1402–1412.

Gunn, J. E., Siegmund, W. A., Mannery, E. J., Owen, R. E., Hull, C. L., Leger, R. F., Carey, L. N., Knapp, G. R., York, D. G., Boroski, W. N., et al. (2006). The 2.5 m telescope of the sloan digital sky survey. *The Astronomical Journal*, 131(4):2332.

Hogg, D. W., Baldry, I. K., Blanton, M. R., and Eisenstein, D. J. (2002). The k correction. *arXiv preprint astro-ph/0210394*.

Hogg, D. W., Blanton, M. R., Eisenstein, D. J., Gunn, J. E., Schlegel, D. J., Zehavi, I., Bahcall, N. A., Brinkmann, J., Csabai, I., Schneider, D. P., et al. (2003). The overdensities of galaxy environments as a function of luminosity and color. *The Astrophysical Journal Letters*, 585(1):L5.

Hopkins, P. F., Kereš, D., Oñorbe, J., Faucher-Giguère, C.-A., Quataert, E., Murray, N., and Bullock, J. S. (2014). Galaxies on fire (feedback in realistic environments): stellar feedback explains cosmologically inefficient star formation. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 445(1):581–603.

Hopkins, P. F., Somerville, R. S., Hernquist, L., Cox, T. J., Robertson, B., and Li, Y. (2006). The relation between quasar and merging galaxy luminosity functions and the merger-driven star formation history of the universe. *The Astrophysical Journal*, 652(2):864.

Hubble, E. (1927). The classification of spiral nebulae. *The Observatory*, 50:276–281.

Hubble, E. and Rosseland, S. (1936). Astronomy.(scientific books: The realm of the nebulae; theoretical astrophysics). *Science*, 84:509–510.

Hubble, E. P. (1925). Cepheids in spiral nebulae. *Popular Astronomy*, 33.

Hubble, E. P. (1926). Extragalactic nebulae. *The Astrophysical Journal*, 64.

Huchra, J. and Geller, M. (1982). Groups of galaxies. i-nearby groups. *The Astrophysical Journal*, 257:423–437.

Humason, M. (1936). The apparent radial velocities of 100 extra-galactic nebulae. *The Astrophysical Journal*, 83:10.

Jungwiert, B., Combes, F., and Palouš, J. (2001). Continuous stellar mass-loss in n-body models of galaxies. *Astronomy & Astrophysics*, 376(1):85–97.

Kauffmann, G. (1996). The age of elliptical galaxies and bulges in a merger model. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 281(2):487–492.

Kauffmann, G. and Charlot, S. (1998). Chemical enrichment and the origin of the colour—magnitude relation of elliptical galaxies in a hierarchical merger model. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 294(4):705–717.

Kauffmann, G., Heckman, T. M., White, S. D., Charlot, S., Tremonti, C., Brinchmann, J., Bruzual, G., Peng, E. W., Seibert, M., Bernardi, M., et al. (2003a). Stellar masses and star formation histories for 105 galaxies from the sloan digital sky survey. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 341(1):33–53.

Kauffmann, G., Heckman, T. M., White, S. D., Charlot, S., Tremonti, C., Peng, E. W., Seibert, M., Brinkmann, J., Nichol, R. C., SubbaRao, M., et al. (2003b). The dependence of star formation history and internal structure on stellar mass for 105 low-redshift galaxies. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 341(1):54–69.

Kaviraj, S., Kirkby, L. A., Silk, J., and Sarzi, M. (2007). The uv properties of e+ a galaxies: constraints on feedback-driven quenching of star formation. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 382(3):960–970.

Kennicutt Jr, R. C. (1998). Star formation in galaxies along the hubble sequence. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 36(1):189–231.

Koutsouridou, I. and Cattaneo, A. (2019). Bursting and quenching in satellite galaxies. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*.

La Barbera, F., Pasquali, A., Ferreras, I., Gallazzi, A., de Carvalho, R., and de la Rosa, I. (2014). Spider–x. environmental effects in central and satellite early-type galaxies through the stellar fossil record. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 445(2):1977–1996.

Lacey, C. and Cole, S. (1993). Merger rates in hierarchical models of galaxy formation. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 262(3):627–649.

Laher, R. R., Masci, F. J., Groom, S., Rusholme, B., Shupe, D. L., Jackson, E., Surace, J., Flynn, D., Landry, W., Terek, S., et al. (2017). Processing images from the zwicky transient facility. *arXiv preprint arXiv:1708.01584*.

Lin, L., Patton, D. R., Koo, D. C., Casteels, K., Conselice, C. J., Faber, S., Lotz, J., Willmer, C. N., Hsieh, B., Chiueh, T., et al. (2008). The redshift evolution of wet, dry, and mixed galaxy mergers from close galaxy pairs in the deep2 galaxy redshift survey. *The Astrophysical Journal*, 681(1):232.

Lintott, C., Schawinski, K., Bamford, S., Slosar, A., Land, K., Thomas, D., Edmondson, E., Masters, K., Nichol, R. C., Raddick, M. J., et al. (2010). Galaxy zoo 1: data release of morphological classifications for nearly 900 000 galaxies. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 410(1):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., et al. (2008). Galaxy zoo: morphologies

derived from visual inspection of galaxies from the sloan digital sky survey. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 389(3):1179–1189.

Martin, D. C., Fanson, J., Schiminovich, D., Morrissey, P., Friedman, P. G., Barlow, T. A., Conrow, T., Grange, R., Jelinsky, P. N., Milliard, B., et al. (2005). The galaxy evolution explorer: A space ultraviolet survey mission. *The Astrophysical Journal Letters*, 619(1):L1.

Martin, D. C., Gonçalves, T. S., Darvish, B., Seibert, M., and Schiminovich, D. (2017). Quenching or bursting: Star formation acceleration—a new methodology for tracing galaxy evolution. *The Astrophysical Journal*, 842(1):20.

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., et al. (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(2):342.

Mendez, A. J., Coil, A. L., Lotz, J., Salim, S., Moustakas, J., and Simard, L. (2011). Aegis: The morphologies of green galaxies at $0.4< z< 1.2$. *The Astrophysical Journal*, 736(2):110.

Mo, H., Van den Bosch, F., and White, S. (2010). *Galaxy formation and evolution*. Cambridge University Press.

Morgan, W. (1958). A preliminary classification of the forms of galaxies according to their stellar population. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 70(415):364–391.

Morgan, W. (1970). Spiral structure in external galaxies. In *Symposium-International Astronomical Union*, volume 38, pages 9–14. Cambridge University Press.

Nair, P. B. and Abraham, R. G. (2010). A catalog of detailed visual morphological classifications for 14,034 galaxies in the sloan digital sky survey. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 186(2):427.

Nogueira-Cavalcante, J., Gonçalves, T., Menéndez-Delmestre, K., de la Rosa, I., and Charbonnier, A. (2019). Compact galaxies at intermediate redshifts quench faster than normal-sized galaxies. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 484(3):3022–3035.

Nogueira-Cavalcante, J., Gonçalves, T., Menéndez-Delmestre, K., and Sheth, K. (2018). Star formation quenching in green valley galaxies at $0.5 \leq z \leq 1.0$ and constraints with galaxy morphologies. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 473(1):1346–1358.

Oemler, A. (1974). *The systematic properties of clusters of galaxies.* PhD thesis, California Institute of Technology.

Oke, J. B. and Sandage, A. (1968). Energy distributions, k corrections, and the stebbins-whitford effect for giant elliptical galaxies. *The Astrophysical Journal*, 154:21.

Osterbrock, D. E. and Ferland, G. J. (2006). *Astrophysics Of Gas Nebulae and Active Galactic Nuclei.* University science books.

Pandya, V., Brennan, R., Somerville, R. S., Choi, E., Barro, G., Wuyts, S., Taylor, E. N., Behroozi, P., Kirkpatrick, A., Faber, S. M., et al. (2017). The nature of massive transition galaxies in candels, gama and cosmological simulations. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 472(2):2054–2084.

Pawlik, M. M., Taj Aldeen, L., Wild, V., Mendez-Abreu, J., Lahén, N., Johansson, P. H., Jimenez, N., Lucas, W., Zheng, Y., Walcher, C. J., et al. (2018). The origins of post-starburst galaxies at $z < 0.05$. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 477(2):1708–1743.

Peng, Y., Maiolino, R., and Cochrane, R. (2015). Strangulation as the primary mechanism for shutting down star formation in galaxies. *Nature*, 521(7551):192–195.

Petrosian, V. (1976). Surface brightness and evolution of galaxies. *The Astrophysical Journal*, 209:L1–L5.

Poggianti, B. and Barbaro, G. (1997). Indicators of star formation: 4000 angstrom break and balmer lines. *arXiv preprint astro-ph/9703067*.

Rampazzo, R., Marino, A., Tantalo, R., Bettoni, D., Buson, L., Chiosi, C., Galletta, G., Grützbauch, R., and Rich, R. (2007). The galaxy evolution explorer uv emission in shell galaxies: tracing galaxy 'rejuvenation'episodes. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 381(1):245–262.

Roberts, M. S. and Haynes, M. P. (1994). Physical parameters along the hubble sequence. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 32(1):115–152.

Rodney, S. A., Riess, A. G., Scolnic, D. M., Jones, D. O., Hemmati, S., Molino, A., McCully, C., Mobasher, B., Strolger, L.-G., Graur, O., et al. (2015). Two sne ia at redshift 2: Improved classification and redshift determination with medium-band infrared imaging. *The Astronomical Journal*, 150(5):156.

Rodriguez-Gomez, V., Sales, L. V., Genel, S., Pillepich, A., Zjupa, J., Nelson, D., Griffen, B., Torrey, P., Snyder, G. F., Vogelsberger, M., et al. (2017). The role of mergers and halo spin in shaping galaxy morphology. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 467(3):3083–3098.

Rodríguez Montero, F., Davé, R., Wild, V., Anglés-Alcázar, D., and Narayanan, D. (2019). Mergers, starbursts, and quenching in the simba simulation. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 490(2):2139–2154.

Rosa, R., de Carvalho, R., Sautter, R., Barchi, P., Stalder, D., Moura, T., Rembold, S., Morell, D., and Ferreira, N. (2018). Gradient pattern analysis applied to galaxy morphology. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters*, 477(1):L101–L105.

Salim, S., Fang, J. J., Rich, R. M., Faber, S., and Thilker, D. A. (2012). Galaxy-scale star formation on the red sequence: the continued growth of s0s and the quiescence of ellipticals. *The Astrophysical Journal*, 755(2):105.

Salim, S., Rich, R. M., Charlot, S., Brinchmann, J., Johnson, B. D., Schiminovich, D., Seibert, M., Mallery, R., Heckman, T. M., Forster, K., et al. (2007). Uv star formation rates in the local universe. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 173(2):267.

Sandage, A. (1961). *The Hubble atlas of galaxies*, volume 618. Carnegie Institution of Washington Washington, DC.

Sandage, A. and Bedke, J. (1995). Book review: The carnegie atlas of galaxies/carnegie institution of washington, 1994. *The Observatory*, 115:278.

Sanders, D., Soifer, B., and Neugebauer, G. (1990). Ultraluminous infrared galaxies and the origin of quasars. In *Dynamics and Interactions of Galaxies*, pages 459–464. Springer.

Schawinski, K., Kaviraj, S., Khochfar, S., Yoon, S.-J., Yi, S., Deharveng, J.-M., Boselli, A., Barlow, T., Conrow, T., Forster, K., et al. (2007). The effect of environment on the

ultraviolet color-magnitude relation of early-type galaxies. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 173(2):512.

Schawinski, K., Urry, C. M., Simmons, B. D., Fortson, L., Kaviraj, S., Keel, W. C., Lintott, C. J., Masters, K. L., Nichol, R. C., Sarzi, M., et al. (2014). The green valley is a red herring: Galaxy zoo reveals two evolutionary pathways towards quenching of star formation in early-and late-type galaxies. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 440(1):889–907.

Schawinski, K., Virani, S., Simmons, B., Urry, C. M., Treister, E., Kaviraj, S., and Kushkuley, B. (2009). Do moderate-luminosity active galactic nuclei suppress star formation? *The Astrophysical Journal Letters*, 692(1):L19.

Schiminovich, D., Catinella, B., Kauffmann, G., Fabello, S., Wang, J., Hummels, C., Lemonias, J., Moran, S. M., Wu, R., Giovanelli, R., et al. (2010). The galex arecibo sdss survey–ii. the star formation efficiency of massive galaxies. *Monthly notices of the royal astronomical society*, 408(2):919–934.

Schlegel, D. J., Finkbeiner, D. P., and Davis, M. (1998). Maps of dust infrared emission for use in estimation of reddening and cosmic microwave background radiation foregrounds. *The Astrophysical Journal*, 500(2):525.

Schmidt, M. (1959). The rate of star formation. *The Astrophysical Journal*, 129:243.

Schweitzer, M., Lutz, D., Sturm, E., Contursi, A., Tacconi, L., Lehnert, M., Dasyra, K., Genzel, R., Veilleux, S., Rupke, D., et al. (2006). Spitzer quasar and ulirg evolution study (quest). i. the origin of the far-infrared continuum of qsos. *The Astrophysical Journal*, 649(1):79.

Sheth, K., Vogel, S. N., Regan, M. W., Thornley, M. D., and Teuben, P. J. (2005). Secular evolution via bar-driven gas inflow: Results from bima song. *The Astrophysical Journal*, 632(1):217.

Smethurst, R. J., Lintott, C., Simmons, B., Schawinski, K., Bamford, S., Cardamone, C., Kruk, S., Masters, K., Urry, C. M., Willett, K., et al. (2016). Galaxy zoo: evidence for rapid, recent quenching within a population of agn host galaxies. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 463(3):2986–2996.

Sodré, L., Ribeiro da Silva, A., and Santos, W. A. (2013). The nature of extremely red galaxies in the local universe. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 434(3):2503–2508.

Soifer, B., Helou, G., Lonsdale, C., Neugebauer, G., Hacking, P., Houck, J., Low, F., Rice, W., and Rowan-Robinson, M. (1984). The remarkable infrared galaxy arp 220= ic 4553. *The Astrophysical Journal*, 283:L1–L4.

Springel, V., Di Matteo, T., and Hernquist, L. (2005a). Black holes in galaxy mergers: the formation of red elliptical galaxies. *The Astrophysical Journal Letters*, 620(2):L79.

Springel, V., White, S. D., Jenkins, A., Frenk, C. S., Yoshida, N., Gao, L., Navarro, J., Thacker, R., Croton, D., Helly, J., et al. (2005b). Simulations of the formation, evolution and clustering of galaxies and quasars. *nature*, 435(7042):629.

Strateva, I., Ivezić, Ž., Knapp, G. R., Narayanan, V. K., Strauss, M. A., Gunn, J. E., Lupton, R. H., Schlegel, D., Bahcall, N. A., Brinkmann, J., et al. (2001). Color separation of galaxy types in the sloan digital sky survey imaging data. *The Astronomical Journal*, 122(4):1861.

Tacconi, L., Neri, R., Genzel, R., Combes, F., Bolatto, A., Cooper, M. C., Wuyts, S., Bournaud, F., Burkert, A., Comerford, J., et al. (2013). Phibss: molecular gas content and scaling relations in z 1-3 massive, main-sequence star-forming galaxies. *The Astrophysical Journal*, 768(1):74.

Thilker, D. A., Bianchi, L., Schiminovich, D., De Paz, A. G., Seibert, M., Madore, B. F., Wyder, T., Rich, R. M., Yi, S., Barlow, T., et al. (2010). Ngc 404: a rejuvenated lenticular galaxy on a merger-induced, blueward excursion into the green valley. *The Astrophysical Journal Letters*, 714(1):L171.

Thomas, D., Maraston, C., Bender, R., and De Oliveira, C. M. (2005). The epochs of early-type galaxy formation as a function of environment. *The Astrophysical Journal*, 621(2):673.

Thomas, D., Maraston, C., Schawinski, K., Sarzi, M., and Silk, J. (2010). Environment and self-regulation in galaxy formation. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 404(4):1775–1789.

Toomre, A. (1977). Mergers and some consequences. In *Evolution of Galaxies and Stellar Populations*, page 401.

van de Voort, F., Schaye, J., Booth, C., Haas, M. R., and Dalla Vecchia, C. (2011). The rates and modes of gas accretion on to galaxies and their gaseous haloes. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 414(3):2458–2478.

van den Bergh, S. (1960). A preliminary liminosity classification for galaxies of type sb. *The Astrophysical Journal*, 131:558.

Van den Bergh, S. (1976). A new classification system for galaxies. *The Astrophysical Journal*, 206:883–887.

van der Hulst, J., Hummel, E., Keel, W., and Kennicutt, R. (1990). Nuclear activity: How irritating are neighbours? In *Dynamics and Interactions of Galaxies*, pages 455–458. Springer.

Vanderplas, J., Connolly, A., Ivezić, Ž., and Gray, A. (2012). Introduction to astroml: Machine learning for astrophysics. In *Conference on Intelligent Data Understanding (CIDU)*, pages 47 –54.

Veilleux, S., Kim, D.-C., Peng, C., Ho, L., Tacconi, L., Dasyra, K., Genzel, R., Lutz, D., and Sanders, D. (2006). A deep hubble space telescope h-band imaging survey of massive gas-rich mergers. *The Astrophysical Journal*, 643(2):707.

Wetzel, A. R., Tinker, J. L., Conroy, C., and Bosch, F. C. v. d. (2014). Galaxy evolution near groups and clusters: ejected satellites and the spatial extent of environmental quenching. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 439(3):2687–2700.

Whitaker, K. E., Van Dokkum, P. G., Brammer, G., and Franx, M. (2012). The star formation mass sequence out to z= 2.5. *The Astrophysical Journal Letters*, 754(2):L29.

Willmer, C. N., Faber, S., Koo, D., Weiner, B., Newman, J. A., Coil, A., Connolly, A., Conroy, C., Cooper, M., Davis, M., et al. (2006). The deep evolutionary exploratory probe 2 galaxy redshift survey: the galaxy luminosity function to z˜ 1. *The Astrophysical Journal*, 647(2):853.

Worthey, G. and Ottaviani, D. (1997). Hγ and hδ absorption features in stars and stellar populations. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 111(2):377.

Wyder, T. K., Martin, D. C., Schiminovich, D., Seibert, M., Budavári, T., Treyer, M. A., Barlow, T. A., Forster, K., Friedman, P. G., Morrissey, P., et al. (2007). The uv-optical galaxy color-magnitude diagram. i. basic properties. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 173(2):293.

Yi, S., Yoon, S.-J., Kaviraj, S., Deharveng, J.-M., Rich, R., Salim, S., Boselli, A., Lee, Y.-W., Ree, C., Sohn, Y.-J., et al. (2005). Galaxy evolution explorer ultraviolet color-magnitude relations and evidence of recent star formation in early-type galaxies. *The Astrophysical Journal Letters*, 619(1):L111.

York, D. G., Adelman, J., Anderson Jr, J. E., Anderson, S. F., Annis, J., Bahcall, N. A., Bakken, J., Barkhouser, R., Bastian, S., Berman, E., et al. (2000). The sloan digital sky survey: Technical summary. *The Astronomical Journal*, 120(3):1579.

Zel'Dovich, Y. B. (1970). Gravitational instability: An approximate theory for large density perturbations. *Astronomy and astrophysics*, 5:84–89.

Apêndice A

Testes estatísticos

Como mencionado no Capítulo 4, para testar se nossas distribuições de SFA para elípticas e espiras em cada bin de cor são de fato diferentes, realizamos três testes estatísticos, onde mostramos ilustrativamente os resultados para o teste de *Permutação estimado por Monte Carlo*, calculado através do `R`, e mencionamos a concordância qualitativa dos testes de *Kolmogorov-Smirnov* e *Anderson-Darling*, calculados com o `Python`.

Em todos os testes mencionados, a hipótese nula era de que as distribuições são originárias da mesma distribuição pai, ou seja, são estatísticamente semelhantes, onde para o caso de descarte da hipótese nula, podemos considerar as distribuições de SFA como estatisticamente diferentes. Analisamos tal descarte através do valor de *p-value*, que pode ser interpretado como a chance de erro que a hipótese nula pode ser descartada, sendo que cada teste estatístico calcula o valor de *p-value* de forma diferente. Neste projeto, seguimos o valor crítico para o $p - value = 0.05$, onde consideramos que podemos descartar a hipótese nula com $p - value < 0.05$ e também usamos $p - value < 0.10$ como referência para casos ambíguos.

Tais testes e seus resultados serão discutidos brevemente neste apêndice e podem ser vistos na Figura A.3, onde fica claro que, apesar dos resultados não concordarem quantitativamente quanto ao valor de *p-value*, eles estão de acordo qualitativamente.

A.1 *Permutação estimado por Monte Carlo*

O teste de *Permutação estimado por Monte Carlo* calculado através do pacote `permTS - R`[1] aceita como *input* as distribuições de SFA das elípticas e das espirais para cada *bin* de cor e calcula a probabilidade das amostras terem a origem em uma mesma amostra através da diferença de suas médias. A ideia por trás do princípio da permutação é baseada na seguinte pergunta: *qual a chance de se obter essa diferença de forma aleatória?*.

O primeiro passo é calcular a média de cada uma das amostras originais e a diferença entre elas, para o caso, média de SFA das elípticas e a média de SFA das espirais. Partindo da hipótese nula de que essas amostras possuem a mesma origem, existiriam grandes chances de se reaver a diferença entre as médias de forma aleatória. Dessa forma, é realizada uma reamostragem de permutação: as amostras são misturadas e separadas em duas amostras de mesmo tamanho das amostras originais, novamente as médias e suas diferenças são calculadas. Esse processo é repetido 999 vezes, de forma que uma distribuição de diferenças de médias é obtida. Com essa distribuição, podemos definir as chances de se obter a diferença real entre as médias de forma aleatória, como o exemplo da Figura A.1.

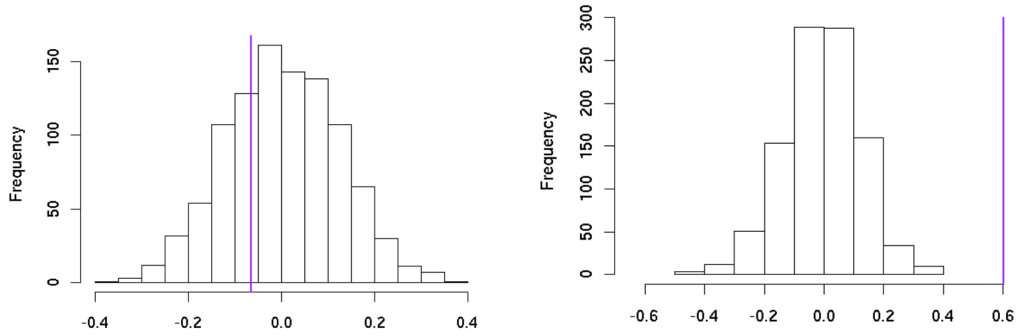


FIGURA A.1. Exemplos[2] de distribuição do vetor de *"diferença de média"* para dois casos, junto com o valor original (linha vertical, azul). À **esquerda** temos o caso onde a hipótese nula é verdadeira, ou seja, as duas amostras em questão são originadas de uma mesma amostra, e o valor da diferença de médias pode ser re-obtido de forma aleatória. À **direita** temos o caso onde a hipotese nula pode ser descartada, pois o valor original da diferença entre as amostras não pode ser re-obtido de forma aleatória

A vantagem principal do teste de permutação se dá ao fato de não ser necessário fazer hipóteses quanto às distribuições das amostras. Além disso, o pacote estatístico do `R` nos fornece o intervalo de valores para *p-value* dentro do qual têm-se 99% de confiança.

[1] Para mais informações, consultar https://cran.r-project.org/web/packages/perm/perm.pdf – pág. 6
[2] http://faculty.washington.edu/kenrice/sisg/SISG-08-06.pdf

Os resultados para os testes de *Permutação* estão nas Tabelas A.1, A.2 e A.3, com os seguintes valores apresentados:

- [a] Valor mínimo do *bin* de cor $(NUV - r)_0$;
- [b] Valor médio de $(NUV - r)_0$ para dado *bin*;
- [c] Valor de *p-value*;
- [d] Valor mínimo de *p-value*;
- [e] Valor máximo de *p-value*;
- [f] Nível de confiança que o valor de *p-value* está no intervalo entre valores mínimo[d] e máximo[e]

NUVr_min[a]	NUVr_average[b]	pvalue[c]	pvalue_min[d]	pvalue_max[e]	conf[f]
1.0	1.279016	0.002	0.00000000	0.01057916	0.99
1.5	1.793334	0.158	0.1155421	0.2050342	0.99
2.0	2.272016	0.068	0.04044131	0.10096383	0.99
2.5	2.745339	0.014	0.003082248	0.031199406	0.99
3.0	3.250347	0.002	0.00000000	0.01057916	0.99
3.5	3.740568	0.038	0.01797736	0.06379275	0.99
4.0	4.239316	0.022	0.007461047	0.042594469	0.99
4.5	4.739736	0.014	0.003082248	0.031199406	0.99
5.0	5.273805	0.764	0.6838905	0.8439282	0.99
5.5	5.743693	0.658	0.5809155	0.7357185	0.99
6.0	6.192539	0.668	0.5905848	0.7459722	0.99
6.5	6.678168	0.102	0.06792178	0.14114837	0.99

Tabela A.1. Valores de *p-value* para o teste *Permutação* calculados em `R` para amostra do Galaxy Zoo (`GZ`)

NUVr_min[a]	NUVr_average[b]	pvalue[c]	pvalue_min[d]	pvalue_max[e]	conf[f]
1.0	1.303779	0.018	0.005158803	0.036997052	0.99
1.5	1.792112	0.044	0.02226052	0.07142615	0.99
2.0	2.264701	0.24	0.188187	0.295713	0.99
2.5	2.748882	0.002	0.00000000	0.01057916	0.99
3.0	3.245548	0.002	0.00000000	0.01057916	0.99
3.5	3.737623	0.002	0.00000000	0.01057916	0.99
4.0	4.240684	0.002	0.00000000	0.01057916	0.99
4.5	4.741898	0.018	0.005158803	0.036997052	0.99
5.0	5.260922	0.046	0.02371706	0.07394339	0.99
5.5	5.738597	0.154	0.1120734	0.2005370	0.99
6.0	6.191706	0.006	0.0002072893	0.0184986927	0.99
6.5	6.66814	0.706	0.6274160	0.7848485	0.99

Tabela A.2. Valores de *p-value* para o teste *Permutação* calculados em `R` para amostra do Galaxy Zoo + Machine Learning (`GZ+ML`)

NUVr_min[a]	NUVr_average[b]	pvalue[c]	pvalue_min[d]	pvalue_max[e]	conf[f]
0.5	0.8152648	0.02	0.006286413	0.039816833	0.99
1.0	1.303442	0.002	0.00000000	0.01057916	0.99
1.5	1.78291	0.31	0.2518790	0.3714615	0.99
2.0	2.252237	0.002	0.00000000	0.01057916	0.99
2.5	2.742375	0.002	0.00000000	0.01057916	0.99
3.0	3.243444	0.002	0.00000000	0.01057916	0.99
3.5	3.738244	0.002	0.00000000	0.01057916	0.99
4.0	4.244272	0.002	0.00000000	0.01057916	0.99
4.5	4.743485	0.002	0.00000000	0.01057916	0.99
5.0	5.26751	0.044	0.02226052	0.07142615	0.99
5.5	5.746412	0.026	0.009926283	0.048044749	0.99
6.0	6.191402	0.16	0.1172797	0.2072797	0.99
6.5	6.656185	0.102	0.06792178	0.14114837	0.99
7.0	7.245889	0.508	0.4371325	0.5806599	0.99

Tabela A.3. Valores de *p-value* para o teste *Permutação* calculados em `R` para amostra do Galaxy Zoo + Deep Learning (`GZ+DL`)

A.2 Testes estatísticos complementares

Visando avaliar o quão robustos nossos resultados estatísticos são, nós também consideramos os valores de *p-value* calculados através de outros dois testes: *Kolmogorov-Smirnov* – KS, e *Anderson-Darling* – AD (e.g. Engmann and Cousineau, 2011 e referências), através do `Python`, utilizando o pacote `scipy.stats`. No caso dos dois testes, também se assume a hipótese nula de que as distribuições são originárias da mesma amostra pai. Ambos os testes são baseados em distribuições cumulativas das amostras e calculam a distância máxima entre as mesmas, sendo sensíveis para diferentes situações.

A.2.1 *Kolmogorov-Smirnov*

O teste *Kolmogorov-Smirnov* é um teste não paramétrico, que assume as distribuições empíricas como contínuas e analisa as semelhanças ou diferenças entre duas distribuições através da maior distância entre as funções de distribuições acumuladas (Figura A.2). Essa distância é calculada na Equação A.2.1, onde n e n' são os tamanhos das amostras e $F_n(x)$ e $F'_n(x)$ são os valores empíricos cumulativos no ponto x.

$$KS_{nn'} = \sqrt{\frac{nn'}{n+n'}} sup_x |F_n(x) - F_{n'}(x)| \tag{A.2.1}$$

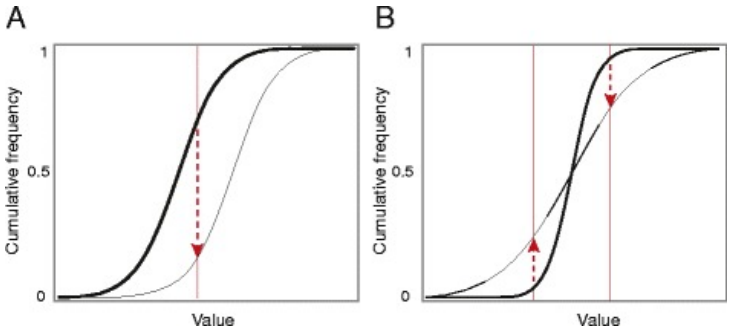


FIGURA A.2. Exemplo ilustrativo de casos ideais para aplicação do teste KS, onde as linhas em negrito são as referências. Figura 1 de Filion (2015).

Em geral, o teste KS é sensível para os seguintes quadros:

1. quando as amostras diferem globalmente próximo aos valores médios/medianos;
2. quando as médias ou medianas são semelhantes, porém os formatos das distribuições são diferentes, por variância ou simetria;
3. quando a amostra é pequena;
4. quando as duas amostras possuem tamanhos desiguais;

entre outros. A hipótese nula é descartada dependendo do valor da distância máxima $KS_{nn'}$ e um valor crítico escolhido.

O teste KS pode ser calculado através do `scipy.stats.ks_2samp` e aceita como parâmetro de entrada duas distribuições, no caso, os valores de SFA para cada *bin* de cor de espirais e de elípticas. Como output, temos a probabilidade KS e o *p-value* associado, colunas *e* das tabelas A.4, A.5 e A.6.

A.2.2 *Anderson-Darling*

Apesar de amplamente utilizado em diversos artigos dentro da astronomia, muitos afirmam que o teste KS pode não ser o mais apropriado para determinadas distribuições, o que afetar as conclusões e resultados (e.g. Feigelson and Babu, 2013). Por conta disso, também decidimos utilizar os valores de *p-value* provenientes do teste *Anderson-Darling*.

A forma que a estatística de AD é calculada para duas amostras discretas pode ser vista na Equação A.2.2, onde $Z_{(n+m)}$ é a combinação das amostra X_n e Y_m, de tamanhos n e m, de forma ordenada, e N_i representa o número de observações em X_n que são iguais ou menores que a i-ésima observação em $Z_{(n+m)}$. A hipótese nula será descartada para o caso de AD ser maior que determinado valor crítico.

$$AD = \frac{1}{mn} \sum_{i=1}^{n+m} (N_i Z_{(n+m-ni)})^2 \frac{1}{iZ_{(n+m-ni)}} \tag{A.2.2}$$

Além das aplicações citadas para o teste KS, o teste AD tem duas vantagens a mais:

1. é especialmente sensível em diferenças nas caudas das distribuições;
2. é mais sensível para pequenas diferenças, especialmente no caso de duas grandes amostras.

O teste AD pode ser calculado através do `scipy.stats.anderson_ksamp` e aceita como parâmetro de entrada duas ou mais distribuições. Como output, temos a probabilidade AD e o *p-value* associado, colunas f das tabelas A.4, A.5 e A.6.

- [a] tamanho da amostra dentro do *bin* de cor, para elípticas e espirais;
- [b] valores médio e 1σ de SFA dentro do *bin* de cor para espirais;
- [c] valores médios e de desvio de 1σ de SFA dentro do *bin* de cor para elípticas;
- [d] valores médios de $(NUV - r)_0$ para elípticas e espirais;
- [e] estatística de *Kolmogorov-Smirnov* e $p - value$ correspondente;
- [f] estatística de *Anderson-Darling* e $p - value$ correspondente.

spi_len[a]	ell_len[a]	spi_SFA_mean[b]	spi_SFA_sigma[b]	ell_SFA_mean[c]	ell_SFA_sigma[c]	spi_NUVr_mean[d]	ell_NUVr_mean[d]	ks[e]	pvalue_ks[e]	ad[f]	pvalue_ad[f]
274.0	6.0	-1.7733	3.9098	-6.3442	1.575	1.1463	1.1501	0.781	0.0006	6.9079	0.0009
1201.0	6.0	-0.5949	2.7743	-1.5754	2.9702	1.6372	1.6281	0.3718	0.3039	0.0553	0.3287
1987.0	18.0	-0.1042	2.5942	-2.3866	3.895	2.1269	2.1594	0.3203	0.0398	5.0148	0.0036
1752.0	47.0	-0.1048	2.5941	0.1762	2.8149	2.6212	2.6441	0.1978	0.0481	1.1569	0.1081
1116.0	46.0	0.0117	2.7083	1.1929	1.9001	3.1254	3.1278	0.3135	0.0002	7.0802	0.0008
627.0	62.0	0.0375	2.6494	1.0095	3.0816	3.6143	3.6334	0.2035	0.0158	3.7393	0.0101
314.0	90.0	0.1333	2.7851	0.8659	2.2426	4.1178	4.1377	0.1802	0.0184	4.4426	0.0056
181.0	123.0	0.4515	2.3678	1.2779	2.5235	4.6165	4.6296	0.156	0.0507	3.7778	0.0098
74.0	210.0	1.0432	2.3668	1.3412	2.6689	5.1322	5.1291	0.1354	0.2494	0.1333	0.3032
51.0	505.0	2.346	2.4953	1.6307	2.0435	5.6262	5.6284	0.1602	0.1686	1.9199	0.0519
24.0	460.0	2.2356	2.586	2.3512	2.4073	6.1395	6.1158	0.1812	0.4051	-0.6001	0.6558
4.0	100.0	2.2682	1.012	2.945	2.686	6.6051	6.5956	0.28	0.8664	-0.8919	0.8983

Tabela A.4. Valores de *p-value* para os testes KS e AD calculados em `Python` para amostra do Galaxy Zoo (`GZ`)

spi_len[a]	ell_len[a]	spi_SFA_mean[b]	spi_SFA_sigma[b]	ell_SFA_mean[c]	ell_SFA_sigma[c]	spi_NUVr_mean[d]	ell_NUVr_mean[d]	ks[e]	pvalue_ks[e]	ad[f]	pvalue_ad[f]
366.0	11.0	-1.7135	3.7235	-4.1764	3.3714	1.1455	1.1672	0.4302	0.0262	3.68	0.0107
1549.0	25.0	-0.5947	2.8034	-1.5489	3.5102	1.6376	1.6514	0.227	0.1368	1.0575	0.1192
2539.0	62.0	-0.022	2.5367	0.0173	2.9595	2.125	2.1362	0.0947	0.6276	-0.3737	0.5153
2296.0	110.0	-0.029	2.6316	0.9893	2.5203	2.6211	2.6324	0.245	0.0	12.9666	0.0
1514.0	142.0	0.1946	2.7083	1.527	2.3621	3.1247	3.1277	0.2813	0.0	21.9211	0.0
942.0	156.0	0.2879	2.7479	1.5041	3.0334	3.6163	3.6266	0.1979	0.0	13.204	0.0
566.0	176.0	0.3166	2.8382	0.9443	2.3259	4.1171	4.1331	0.1657	0.0011	7.8052	0.0005
336.0	234.0	0.7968	2.5811	1.3127	2.7102	4.6207	4.6264	0.1107	0.0633	2.0215	0.0471
192.0	342.0	0.7959	2.4067	1.5539	2.6943	5.1302	5.1273	0.1465	0.009	6.5917	0.0011
139.0	665.0	1.6199	2.2422	1.607	2.1046	5.6119	5.6285	0.044	0.9768	-0.9071	0.9133
84.0	581.0	1.7172	2.2929	2.255	2.5669	6.1258	6.1148	0.1294	0.1587	1.4027	0.085
10.0	118.0	3.5448	2.2781	2.7432	2.6353	6.6006	6.5941	0.3237	0.2358	0.017	0.342

Tabela A.5. Valores de *p-value* para os testes KS e AD calculados em `Python` para amostra do Galaxy Zoo + Machine Learning (`GZ+ML`)

spi_len[a]	ell_len[a]	spi_SFA_mean[b]	spi_SFA_sigma[b]	ell_SFA_mean[c]	ell_SFA_sigma[c]	spi_NUVr_mean[d]	ell_NUVr_mean[d]	ks[e]	pvalue_ks[e]	ad[f]	pvalue_ad[f]
4.0	2.0	-3.3913	4.3002	-8.8432	9.2552	0.2011	0.1086	0.5	0.7361	-0.6719	0.7083
61.0	6.0	-4.6984	4.3847	-8.1562	7.1697	0.6449	0.6716	0.3607	0.3883	-0.0014	0.3486
384.0	51.0	-1.9243	3.9272	-3.7579	3.1754	1.1439	1.1315	0.3477	0.0	12.3558	0.0
1535.0	112.0	-0.6653	2.872	-1.2156	3.75	1.6363	1.6502	0.1006	0.2288	0.7086	0.1687
2595.0	183.0	-0.1047	2.648	0.384	2.4851	2.1265	2.1198	0.1457	0.0012	6.8474	0.0009
2381.0	195.0	-0.0698	2.6507	0.888	2.671	2.6215	2.6301	0.225	0.0	21.2562	0.0
1660.0	146.0	0.0979	2.745	1.4336	2.4251	3.1252	3.127	0.2902	0.0	26.8496	0.0
1064.0	160.0	0.2409	2.7318	1.3975	3.0161	3.6183	3.6282	0.1819	0.0002	12.7897	0.0
652.0	157.0	0.2794	2.8504	1.0629	2.4846	4.1187	4.1366	0.1522	0.005	7.5959	0.0006
405.0	207.0	0.6958	2.5496	1.5073	2.6934	4.6191	4.628	0.1244	0.0262	6.2154	0.0014
244.0	314.0	1.0163	2.5338	1.4077	2.531	5.1201	5.128	0.1383	0.0093	3.8719	0.0091
244.0	619.0	1.5491	2.3831	1.6759	2.1138	5.6229	5.6278	0.0733	0.2934	0.2082	0.2806
137.0	528.0	1.7804	2.2586	2.3212	2.4447	6.1159	6.1149	0.1376	0.0292	2.9028	0.021
24.0	113.0	2.5962	2.7555	2.9008	2.6117	6.5922	6.5958	0.1582	0.6665	-0.6728	0.7091
2.0	8.0	0.87	0.5096	2.0509	2.2419	7.1908	7.1223	0.375	0.9208	-0.7236	0.7488

Tabela A.6. Valores de *p-value* para os testes KS e AD calculados em `Python` para amostra do Galaxy Zoo + Deep Learning (`GZ+DL`)

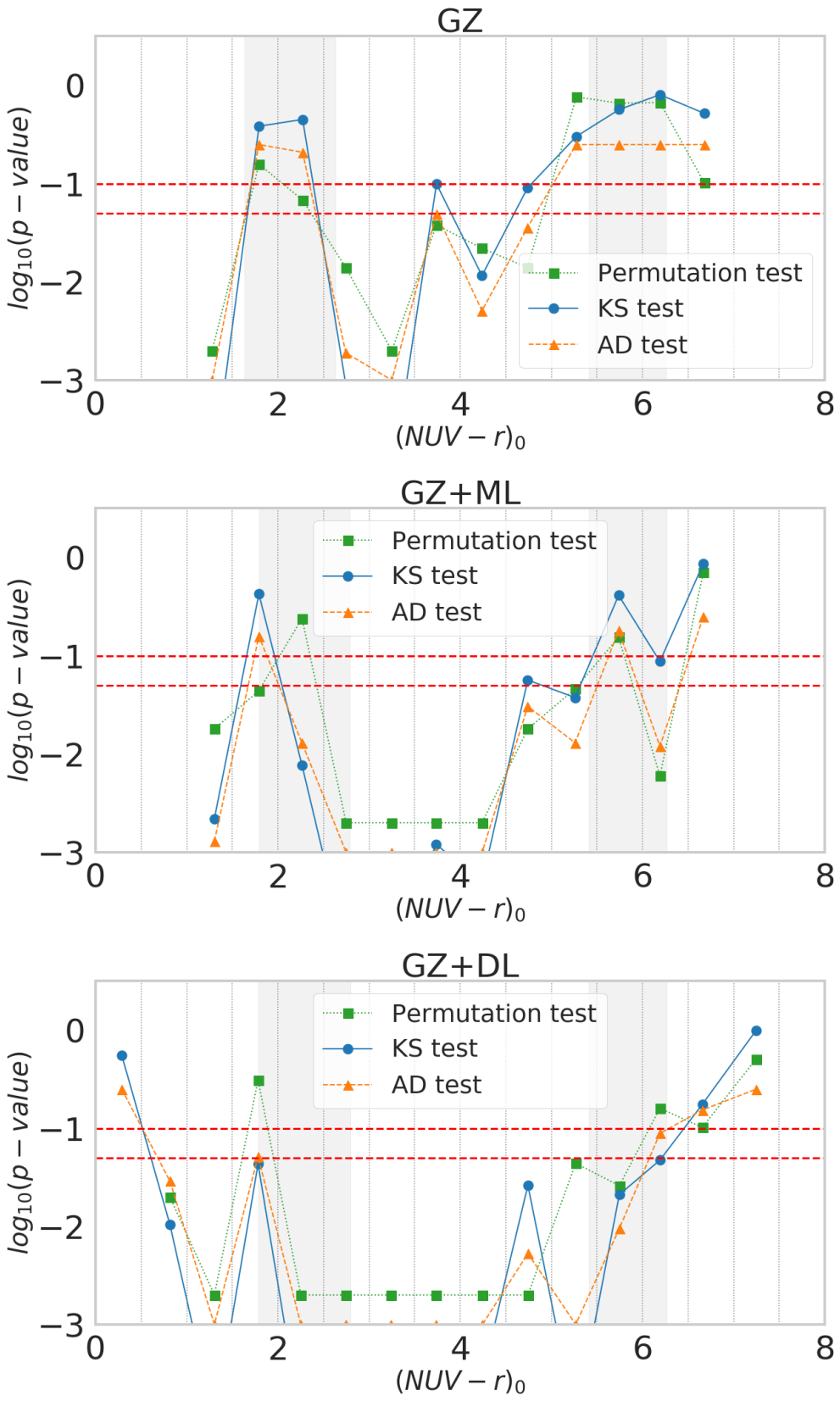


FIGURA A.3. Testes estatísticos de permutação (linha verde, pontilhada), KS (linha azul, sólida) e AD (linha laranja, tracejada) para amostras `GZ`, `GZ+ML` e `GZ+DL`, de cima para baixo.

Apêndice B

Atividades de Divulgação Científica

A atividade de divulgação científica não é uma prática recente. Tratando-se de astronomia, um dos grandes nomes que conhecemos é do astrônomo Carl Sagan, por trás da versão original do programa Cosmos. Entretanto, dedicar seu tempo para popularização de assuntos e descobertas científicas foi muito mal visto pela sociedade acadêmica, por muito tempo. Um cientista que também se dedicasse para divulgação da ciência seria gradualmente distanciado pelos seus iguais, no que hoje chamamos de *Efeito Sagan*. Com isso, a ciência se afastou da população, dando espaço para que pseudo-ciências e misticismos tomassem conta do imaginário comum. Infelizmente, hoje estamos pagando o preço. Ondas anti-cientificas e contraditórias se organizam em movimentos com escala mundial: alegam que vacinas não são necessárias, ocasionando no retorno de doenças antes erradicadas[1]; lideranças políticas e figuras públicas invalidam o aquecimento global, dando passagem para que governos não tomem as ações necessárias para reverter um quadro que está próximo de se tornar irreversível[2,3]; perguntam sobre religião e signo em entrevistas de emprego e, dependendo da resposta, o candidato pode ser eliminado[4]. Não é necessário citar que hoje, ano 2020, voltaram a acreditar que a Terra é plana[5], enquanto utilizam sinal de GPS no celular. A falta de contato com o pensamento crítico e científico se tornou uma preocupação real e, timidamente, cientistas assumem a forma de

[1] http://agenciabrasil.ebc.com.br/saude/noticia/2018-07/doencas-erradicadas-voltam-assustar-veja-os-desafios-da-vacinacao

[2] https://pt.wikipedia.org/wiki/Negacionismo_clim%C3%1tico

[3] http://www.ihu.unisinos.br/78-noticias/584057-trump-e-os-negacionistas-da-mudanca-climatica

[4] https://g1.globo.com/economia/concursos-e-emprego/noticia/2019/06/30/esquema-tatico-escravos-de-jo-e-mapa-astral-selecoes-de-emprego-inusitadas-e-o-que-dizem-os-especialistas.ghtml

[5] https://www.bbc.com/portuguese/brasil-41261724

divulgadores e facilitadores da ciência e promoção de suas descobertas, buscando re-criar pontes com a população e evitar um cenário pior de pós-verdade e *fake news*.

Assim que me formei como astrônoma, em março de 2018, eu decidi que desempenharia um papel ativo de facilitadora para divulgação científica. Nesses últimos dois anos, eu não me dediquei apenas à minha pesquisa. Uma parte substancial do que seria meu tempo livre foi redirecionada para atividades de popularização da ciência e essa Seção será um relato da minha experiência com essas ocupações.

Minha jornada começou nas redes sociais, mais especificamente através do Twitter, onde passei a me posicionar como profissional qualificada e a abrir espaços para comunicação com o público. Minha abordagem principal era de construir pontes para comunicação: pequenas curiosidades astronômicas e "o que você perguntaria para um astrônomo se pudesse?", essas foram minhas principais táticas. Em julho de 2018, compareci à Escola de Verão para Jovens astrônomos (ISYA) na Colômbia. Minha felicidade ao me deparar com o programa foi a oportunidade de ter aulas dedicadas exclusivamente para popularização da astronomia através de redes sociais, entre elas, o Twitter. Questões como linguagem e formatos de divulgação foram abordados, aspectos que eu re-aprendo sempre quando se trata de levar para um público completamente leigo, novos resultados da astronomia. A essa época, outros companheiros e companheiras já estavam presentes no Twitter com o mesmo objetivo, e nossa rede de colaboração crescia a cada mês.

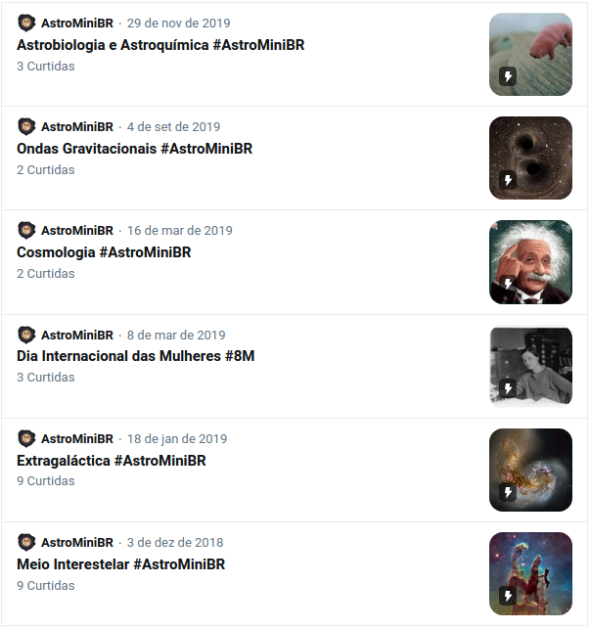


FIGURA B.1. Semanas temáticas abordadas pela #AstroMiniBR.

Em agosto de 2018, a nossa rede de astrônomos e astrônomas presentes no Twitter começou a se mobilizar em criar Threads com assuntos de astronomia, prática já adotada pela astrônoma Ana Carolina Posses Nascimento. Em uma iniciativa colaborativa das astrônomas Ana e Geisa Ponte, criou-se a tag #AstroThreadBR. A ideia por trás da tag

é, com uma série de Tweets conectados, explicar de forma descontraída e acessível algum tópico para o público leigo. Abordamos não apenas assuntos de astronomia, mas também tratamos sobre vida e carreira de cientista, método científico, histórias de mulheres na ciência, entre outros assuntos relacionados.

A repercussão da #AstroThreadBR no Brasil foi enorme. Um exemplo foi a matéria que saiu no Jornal O Globo[6], em agosto de 2018. Mais detalhes sobre a tag podem ser encontrados no site pessoal da astrônoma Geisa[7].

FIGURA B.2. Início da campanha #EuPareçoCientista, que alcançou visibilidade nacional.

Logo em seguida, estive por trás da criação da tag #AstroMiniBR, com ajuda de colaboração de outros astrônomos envolvidos na divulgação através do Twitter. A ideia por trás dessa tag seria levar curiosidades e fatos astronômicos em poucos Tweets. Ao contrário da #AstroThreaBR, a #AstroMiniBR não visa trazer o conteúdo detalhadamente explicado, e sim trazer pequenos *pockets* de astronomia para rotina das pessoas. Junto a essa tag, criamos também as "semanas temáticas". Consultamos o público para qual assunto eles teriam interesse de saber, através de uma votação. Uma vez escolhido o tema, escolhemos uma semana inteira para direcionar a tag para falar somente sobre este, de forma constante e intensiva. Todas as semanas temáticas podem ser encontradas no perfil da AstroMiniBR[8], e estão na Figura B.1. Com a última semana temática, sobre *Astrobiologia e Astroquímica*, realizada em novembro de 2019, alcançamos quase 2 milhões de visualizações nos Tweets[9].

[6]https://oglobo.globo.com/sociedade/ciencia/para-apoiar-ciencia-astronomos-brasileiros-dao-aulas-via-twitter-22974628
[7]https://www.geisaponte.com/astrothreadbr
[8]https://twitter.com/astrominibr/moments
[9]utilizando a ferramenta de tracking https://www.tweet-tag.com/en/index.php

Hoje, temos uma rede bem estabelecida de astrônomos por trás das duas tags, que estão sempre em contato e ativamente trocando ideias e sugestões sobre maneiras de abordar o público e passar o conteúdo adiante.

Ainda relatando sobre o Twitter, estive por trás da criação da tag #EuPareçoCientista (Figura B.2), inspirada na versão #ILookLikeAScientist. A ideia por trás dessa campanha era de mostrar que cientistas não seguem o esteriótipo que fomos apresentados, mas, na verdade, são pessoas normais com hábitos comuns. A campanha foi adotada ao nível nacional e alcançou os assuntos mais falados do Twitter, se tornando notícias em vários jornais[10,11,12,13].

Figura B.3. Tweet sobre o Dia Internacional de Mulheres e Meninas na Ciência. Acima, o retweet da página Quebrando o Tabu, com 1,5 milhões de seguidores.

Por último, a última grande visualização que tivemos no Twitter foi no Dia Internacional de Mulheres e Meninas na Ciência, com visibilidade na página *Quebrando o Tabu*[14], que possui cerca de 1,5 milhões de seguidores (Figura B.3). Esses exemplos demonstram o alcance que a comunidade astronômica possui no Twitter. Um ótimo exemplo foi a participação dos astrônomos e astrônomas na campanha

[10] https://revistagalileu.globo.com/Ciencia/noticia/2020/01/movimento-no-twitter-busca-desconstruir-estereotipo-de-cientistas.html
[11] http://www.fundep.ufmg.br/euparecocientista-hashtag-que-nos-da-uma-licao-sobre-estereotipos/
[12] https://catracalivre.com.br/educacao/euparecocientista-a-hashtag-que-nos-da-uma-licao-sobre-estereotipos/
[13] https://catracalivre.com.br/educacao/euparecocientista-a-hashtag-que-nos-da-uma-licao-sobre-estereotipos/
[14] https://twitter.com/QuebrandoOTabu

#ExistePesquisaNoBR (Figura B.4), desencadeada após o anúncio de cortes na CAPES em agosto de 2018. Na Figura B.4[15] temos o impacto dos Tweets com a tag #ExistePesquisaNoBR por área de conhecimento, astronomia está em roxo. É notável o impacto da astronomia ser comparável com outras áreas, mas possuir um número bem menor de pesquisadores. Não é de se espantar que um projeto de divulgação em astronomia que envolve a Sociedade Astronômica Brasileira[16], o canal Astrotubers[17] e as iniciativas de divulgação no Twitter foi selecionado no Camp Serrapilheira de 2019[18]!

Além disso, também disponibilizo minha caixa de textos para pessoas mandarem suas dúvidas sobre astronomia, carreira e qualquer tópico relacionado.

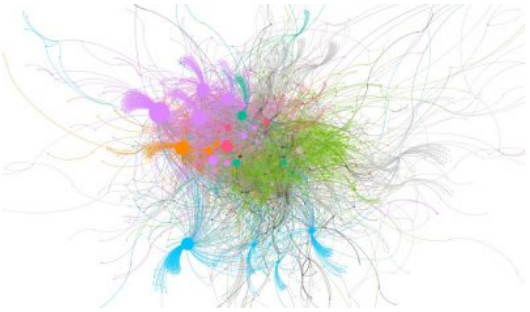


Figura B.4. Impacto da tag #ExistePesquisaNoBR para diferentes áreas do conhecimento. Astronomia está em roxo. Créditos Felipe Soares – doutorando UFRGS.

Saindo da esfera do Twitter, em março de 2018 fui convidada pelo Scicast[19], do Portal Deviante[20], para compor a equipe por trás dos episódios do podcast de astronomia. Participei de diversos episódios nesses dois anos, tanto na produção de pautas quanto na gravação. Um episódio, em especial, que vale mencionar é o de Galáxias (Figura B.5)[21], no que liderei tanto a pauta quanto o episódio. Ainda no Portal Deviante, hoje eu também participo do SciKids, onde cientistas respondem perguntas de crianças, e do Spin de Notícias, um diário de atualizações sobre os avanços nas diferentes áreas da ciência!

Para finalizar meu relato sobre minha experiência com divulgação científica, também gostaria de mencionar as atividades que realizei fora da internet. No ano de 2019 fui convidada para participar do *Pint of Science* de Volta Redonda, minha cidade natal, no qual falei sobre o futuro *merger* da Via-Láctea com Andrômeda. Aproveitando, na mesma época visitei 3 escolas, incluindo a meu antigo colégio Macedo Soares, onde falei

[15] https://wp.ufpel.edu.br/midiars/2018/08/08/existepesquisanobr-o-corte-de-recursos-da-capes-e-sua-repercussao-no-twitter/
[16] https://sab-astro.org.br/
[17] https://www.youtube.com/AstroTubers
[18] https://serrapilheira.org/camp-serrapilheira-2019-conheca-os-selecionados/
[19] https://www.deviante.com.br/podcasts/scicast/
[20] http://www.deviante.com.br/sobre/
[21] https://www.deviante.com.br/podcasts/scicast-343/

Figura B.5. Capa do episódio sobre galáxias do Scicast.

sobre a *carreira do cientista*, *como se tornar astrônoma* e *aspectos de vida fora da Terra*, acompanhada de uma sessão de perguntas e respostas com pequenos do 5^o ano. Também participei da *Oficina para montagem de Espectrógrafo utilizando CD* no Espaço Ciência Viva, com profº Luan Ghezzi e outras alunas[22], e dei entrevistas para jornais locais de Volta Redonda.

A astronomia é a ciência mais antiga da humanidade. Ela é capaz de cativar pessoas de todas as idades. Infelizmente, a falta de fontes confiáveis faz com que as pessoas tenham contato com pseudociências e misticismos e percam as maravilhas reais que conhecemos. Nessas pequenas iniciativas de divulgação cientifica que tive nesses dois últimos anos, tive a oportunidade de entrar em contato com pessoas apaixonadas e curiosas por astronomia, que procuravam uma ponte para poder conhecer mais. O contato com o público é extremamente gratificante, e o carinho que os interessados nos recebem também é! O que posso falar para finalizar é que, ao me dispor como uma divulgadora científica, consegui me tornar uma astrônoma melhor no meu dia-a-dia.

[22] https://camilasafreitas.wordpress.com/outreach/