



Observatório  
Nacional

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

IDENTIFICAÇÃO E ESTUDO DE FONTES DE RÁDIO NO STRIPE82 DO  
SOUTHERN PHOTOMETRIC LOCAL UNIVERSE SURVEY

RODRIGO MAGALHÃES DE ARAUJO

RIO DE JANEIRO

2021



Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações

Observatório Nacional

Programa de Pós-Graduação

Dissertação de Mestrado

IDENTIFICAÇÃO E ESTUDO DE FONTES DE RÁDIO NO STRIPE82 DO  
SOUTHERN PHOTOMETRIC LOCAL UNIVERSE SURVEY

por

Rodrigo Magalhães de Araujo

Dissertação submetida ao Corpo Docente do Programa de Pós-graduação em Astronomia do Observatório Nacional, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Grau de Mestre em Astronomia.

Orientador: Dr. Roderik Adriaan Overzier

Rio de Janeiro, RJ – Brasil

Abril de 2021

M837

Magalhães de Araujo, Rodrigo

Identificação e estudo de fontes de rádio no Stripe82 do Southern Photometric Local Universe Survey [Rio de Janeiro] 2021.

xxiv, 76 p. 29,7 cm: graf. il. tab.

Dissertação (mestrado) - Observatório Nacional - Rio de Janeiro, 2021.

1. Quasares. 2. Rádio galáxias. 3. Levantamentos. 4. S-PLUS. I. Observatório Nacional. II. Título.

CDU 000.000.000

“IDENTIFICAÇÃO E ESTUDO DE FONTES DE RÁDIO NO STRIPE82 DO  
SOUTHERN PHOTOMETRIC LOCAL UNIVERSE SURVEY”

RODRIGO MAGALHÃES DE ARAUJO

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ASTRONOMIA DO OBSERVATÓRIO NACIONAL COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ASTRONOMIA.

Aprovada por:

---

Dr. Roderik Adriaan Overzier – Observatório Nacional  
(Orientador)

---

Dr. Renato de Alencar Dupke – ON

---

Dra. Thaisa Storchi Bergmann – UFRGS

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

29 DE ABRIL DE 2021



*Ao meu avô, Professor José João  
Pelo privilégio de ter sido seu  
maior aluno.*



# Agradecimentos

Enquanto esta dissertação era escrita, dentro e fora do trabalho, me tornei íntimo de um dos meus maiores medos: perguntas que só eu mesmo poderia responder. Para todos os outros questionamentos, gostaria de agradecer a cada um que despendeu seu tempo, experiência e suporte emocional em forma de resposta. Em especial, agradeço

Ao meu orientador, Roderik Overzier, pela infinita dedicação em me guiar através do caminho da pesquisa, pela paciência com minha inexperiência e, sobretudo, por ser um amigo. Há seis anos atrás, quando nos conhecemos, Roderik me inventou como cientista. Hoje, minha mente é incapaz de se fechar para tudo que aprendi e conheci através dele.

Ao meu núcleo familiar, meu avô João, minha mãe Christianne e minha irmã Lívia, por todo o investimento feito para que eu chegasse até aqui. Se um dia almejei chegar aonde cheguei e se um dia almejar ir além, é porque eles me fazem sonhar e acreditar ser possível. Faço por eles e eles fazem por mim. Agradeço ao meu cunhado Danyllo, por entrar em nossa família trazendo suas melhores qualidades e elevando ainda mais nosso nível. Agradeço ao meu sobrinho Nicolás, cuja chegada trouxe um brilho de alegria e um senso de propósito à vida de todos nós.

À minha companheira Natasha, por ter me dado a honrosa oportunidade de dividir uma vida com uma mulher maravilhosa por quem sou cada dia mais apaixonado. Sem seu carinho e cuidado, a vida faria muito pouco sentido à essa altura. Natasha me ajuda diariamente a me enxergar como uma pessoa que eu não mais acreditava ser. Ela é o maior bônus que a astronomia já me trouxe. por isso, sou grato.

Aos amigos que vão, aos que vêm e aos que ficam. Nesta pandemia, percebi da maneira mais dolorosa que a minha vida acontece no encontro. A saudade de estar entre amigos foi uma das circunstâncias que colocou esta dissertação em perigo. Por esse motivo, gostaria de agradecer e celebrar a vida de meus amigos pois, assim, celebro também a minha. Aos amigos da UFRJ: Renata, Felipe, Pedro, Fidelis, Ana, Karol e Flávia (entre tanto e tantos outros). Sete anos atrás, a vida era outra: a amizade de vocês amansa o tempo. Aos amigos do colégio: Luan, Boroto, João, Hiago, Alessandra e Ariene. Lembro de chorarmos por medo de nos perdermos uns aos outros ao deixar a escola. Desde então, muito mais nos encontramos. Aos amigos do ON: Pedrito, Ana, Nicolás e Priscilla. A sala 111 (e cômodos agregados) foi a maior instituição de afeto da academia brasileira e não seria assim sem cada um de vocês. Ao meu primeiro amigo, Pedro Henrique, nossas paixões

se confundem e nossos ideais se completam; pra mim, isso é como ser irmãos de mães diferentes.

Aos professores da UFRJ e do Observatório Nacional. Foi inspirador e potencializador estar entre aqueles que, mesmo ante todos os percalços, doam seus tempos e suas vontades pelo progresso da ciência brasileira. Acredito que o conhecimento é o único poder real e estar entre esses professores foi como estar entre super heróis. Agradeço especialmente ao professor Isaia Nisoli, da UFRJ, que se tornou um amigo e um espelho para além das salas de aula.

Aos colaboradores do S-PLUS. Toda a contribuição que ousei dar para a ciência brasileira desde a época da iniciação científica, passou por esse projeto. Agradeço à Cláudia Mendes de Oliveira por acreditar e valorizar meu esforço para com o projeto.

Ao corpo dos funcionários do Observatório Nacional, sem os quais a instituição jamais funcionaria. Se me senti amparado e acolhido no observatório, muito se deve ao trabalho destes profissionais.

Ao Observatório Nacional por permitir que eu desenvolvesse este projeto de extrema importância para meu desenvolvimento pessoal e profissional. À CAPES, pelo suporte financeiro, sem o qual a realização deste projeto seria impossível.

Ao Clube de Regatas do Flamengo, por mostrar que provações e tribulações fazem parte do caminho da vitória.

Às madrugadas.

Esta dissertação é fundamentada nos enormes esforços colaborativos que têm conduzido o levantamento S-PLUS. O projeto S-PLUS, incluindo o telescópio robótico T80-South e o levantamento científico S-PLUS, foi fundado como uma parceria entre a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), o Observatório Nacional (ON), a Universidade Federal de Sergipe (UFS) e a Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), com a importante contribuição financeira e prática de outros institutos colaboradores no Brasil, Chile (Universidad de La Serena) e Espanha (Centro de Estudios de Física del Cosmos de Aragón, CEFCA). O S-PLUS também agradece o suporte financeiro da Fundação de pesquisa de São Paulo (FAPESP), O Conselho Nacional de Pesquisa brasileiro (CNPq), A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), A Fundação Carlos Chagas Filhos de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ) e da Agência de Inovação Brasileira (FINEP). Os membros da colaboração S-PLUS são gratos pelas contribuições do pessoal do CTIO por ajudar na construção, comissionamento e manutenção do telescópio T80-South e câmera, e agradecem a Rene Laporte, INPE, e Keith Taylor por suas importantes colaborações ao projeto. Do CEFCA, o S-PLUS agradece à Antonio Marin-Franch por suas inestimáveis contribuições nas fases iniciais do projeto. À David Cristóbal-Hornillos e seu time pela sua ajuda com a instalação do pacote de redução de dados JYPE versão 0.9.9. À César Iñiguez por prover as medidas 2D das transmissões dos filtros e a todos os outros membros pelos seus

suportes com vários aspectos do projeto.



IDENTIFICAÇÃO E ESTUDO DE FONTES DE RÁDIO NO STRIPE82 DO  
SOUTHERN PHOTOMETRIC LOCAL UNIVERSE SURVEY

**RESUMO**

Galáxias hospedeiras de núcleos ativos (AGNs) desempenham um importante papel na evolução das galáxias. Estes AGNs são alimentados pela acreção de matéria em direção ao buraco negro supermassivo, o que pode resultar em emissão altamente energética e em diversos comprimentos de onda, o que é único para esta classe de galáxias. Um subconjunto da população de AGNs consiste nos AGNs *radio-loud*, isto é, eles possuem um forte excesso de emissão (síncrotron) em rádio, quando comparado com sua produção no óptico. Essa classe, que é consistida majoritariamente por radiogaláxias e quasares, é particularmente importante por causa do mecanismo de feedback que resulta quando seus jatos de rádio em expansão interagem com o gás circundante em escalas de kpc a Mpc. Estes AGNs em rádio formam, portanto, uma população fundamental para, por exemplo, estudar o acionamento de jatos de larga escala em galáxias e os mecanismos de *outflow* e aquecimento associados com jatos, para identificar ambientes densos como grupos e aglomerados de galáxias ou para localizar galáxias massivas e buracos negros supermassivos, especialmente a altos redshifts. Contudo, AGNs em rádio são consideravelmente raros no céu, e, além disso, são difíceis de se encontrar. Isso se deve ao fato de que levantamentos do céu em rádio não oferecem informação direta sobre as distâncias das fontes, tornando a identificação de suas galáxias hospedeiras um processo complicado. No hemisfério norte, esse problema foi amplamente superado pela combinação de levantamentos de rádio de campo amplo, como o NVSS e FIRST com o levantamento óptico SDSS. No hemisfério sul, não há equivalente ao levantamento espectroscópico SDSS, dificultando a identificação de novas fontes de rádio. O levantamento *Southern Photometric Local Universe Survey* (S-PLUS) tem o potencial de mudar esta situação. Este levantamento fotométrico brasileiro em 12 bandas está gerando imagens de milhares de graus quadrados e disponibilizando redshifts fotométricos e outras informações para milhares de galáxias até  $r \approx 21$  mag.

Nesta dissertação, nós conduzimos o projeto piloto de identificação das fontes de rádio na região da SDSS Stripe82 utilizando S-PLUS. Nós utilizamos um método misto entre inspeção visual e identificação automática para 4186 fontes emisoras de rádio do [Hodge et al. \(2011\)](#) e fomos capazes de encontrar contrapartidas ópticas para 1316 delas. As fontes foram divididas, em termo de suas morfologias em rádio, em cinco classes: compactas, FR1, FR2, estendidas ou incertas (no caso em que a morfologia em rádio não estava clara). Numa etapa subsequente, utilizamos as cores, as luminosidades em rádio e obtivemos os fluxos em infravermelho distante dos objetos, e contruímos critérios de

seleção para classificar as fontes como quasares (QSOs), AGNs ou galáxias em formação de estrelas (SFGs). Nossa seleção resultou em 35 novos candidatos a quasares e 15 novos candidatos a AGNs. Fomos capazes de classificar 159 fontes como SFGs, 72 delas sem nenhuma identificação prévia em catálogos espectroscópicos. Também demonstramos o poder de empregar catálogos em rádio para determinar taxas de formação estelares em galáxias normais (não-AGNs) em S-PLUS, o que será uma valiosa adição às propriedades espectrais que podem ser derivadas com base na fotometria do S-PLUS (por exemplo, redshift fotométrico, morfologia óptica, massa estelar e idade). Finalmente, este estudo também é valioso para identificar as fontes de rádio que não são detectadas no S-PLUS. Essas fontes incluirão radio AGNs altamente obscurecidos ou muito distantes e, portanto, são uma classe adicional de objetos muito interessantes para estudos futuros com imagens mais profundas ou espectroscopia. Este trabalho mostra que a combinação de levantamentos em rádio e os futuros data releases do S-PLUS será uma ferramenta poderosa para explorar o céu extragaláctico em rádio.

IDENTIFICATION AND STUDY OF RADIO SOURCES IN STRIPE82 OF THE  
SOUTHERN PHOTOMETRIC LOCAL UNIVERSE SURVEY

**ABSTRACT**

Galaxies hosting active galactic nuclei (AGNs) play an important role in the evolution of galaxies. These AGNs are powered by the accretion of matter onto a supermassive black hole, which can result in highly energetic and multiwavelength emission that is unique to this class of galaxies. A subset of the AGN population consists of so-called *radio-loud* AGN, i.e., they have a strong excess of radio (synchrotron) emission compared to their optical output. This class, which consists mostly of radio galaxies and radio quasars, are particularly important because of the feedback mechanisms that result as their expanding radio jets interact with the surrounding gas on kpc to Mpc scales. These radio AGN are thus a key population for, e.g., studying the triggering of large-scale jets in galaxies and the outflow and heating mechanisms associated with jets, for identifying dense environments such as groups and clusters of galaxies, or for locating massive galaxies and supermassive black holes especially at high redshifts. However, radio AGN are fairly rare in the sky, and, moreover, they are difficult to find. This is because radio surveys do not provide direct information on the distances of the sources, making identification of their host galaxies a difficult process. In the Northern hemisphere, this problem was largely overcome by combining wide-field radio surveys such as the NVSS and FIRST with the SDSS optical survey. In the Southern hemisphere, there is no equivalent of the SDSS spectroscopic survey, hampering the identification of new radio sources. The Southern Photometric Local Universe Survey (S-PLUS) has the potential to change this situation. This brazilian-led 12-band photometric survey is imaging thousands of square degrees delivering photometric redshifts and other information for millions of galaxies down to  $r \approx 21$  mag.

In this dissertation, we carry out a pilot project of identifying radio sources using S-PLUS in the SDSS Stripe82 region. We used a mixed-method of visual inspection and automatic identification for 4186 radio sources from [Hodge et al. \(2011\)](#) and were able to find optical counterparts for 1316 of them. Sources were divided, in terms of their radio morphology, into five classes: compact, FR1, FR2, extended or uncertain (in case the radio morphology was not clear). In a subsequent step, we used the optical colors, radio luminosities and far-infrared fluxes, and built selection criteria to classify the sources as quasars (QSOs), Active Galaxy Nuclei (AGNs) or Star-Forming Galaxies (SFGs). Our selection resulted in 35 new quasar candidates and 15 new radio AGNs candidates. We were able to classify 159 sources as SFGs, 72 of them with no previous identification

in spectroscopic catalogs. We also demonstrated the power of using radio surveys to determine star formation rates in normal (i.e., non-AGN) galaxies found in S-PLUS. This will be a valuable addition to the spectral properties that can be derived from the S-PLUS photometry (such as photometric redshift, optical morphology, stellar mass and age). Finally, this study is also valuable for the identification of radio sources that are *not* detected in S-PLUS. These sources will include highly obscured radio sources and very distant AGN (quasars and radio galaxies) that will be a very interesting class of sources worthy of follow-up with deeper imaging or spectroscopy. This work shows that the combination of radio surveys and future releases of S-PLUS will be a powerful tool for exploring the radio-bright extragalactic sky.

# Lista de Figuras

1.1	Representação figurativa do modelo unificado de AGNs. Nele é possível observar a presença do SMBH, disco de acreção e do torus de poeira, além da NLR, da BLR e do jato no caso de alta emissão em rádio. Em toda a volta estão indicadas as diferentes morfologias de acordo com o ângulo de visada, a luminosidade bolométrica da emissão e a presença de emissão em rádio (Beckmann & Shrader, 2012). Este modelo foi tomado com o intuito de simplificar a visualização dos principais componentes da estrutura de acreção. O paradigma atual compreende que o toro não é contínuo e que as nuvens da BLR tendem a estar num sistema achatado formando uma espécie de conexão entre o disco de acreção e o toro. . . . .	3
1.2	Função de massa estelar de galáxias observadas (linha pontilhada) <i>versus</i> simulada (outras linhas) (Kereš <i>et al.</i> , 2009). O painel inferior mostra o fator de correção necessário para que as simulações concordem com as observações. É possível observar que as simulações tendem a superproduzir galáxias em ambas as extremidades de baixa e alta massa da função em até 10 vezes. . . . .	4
1.3	O espectro da radiação de rádio da galáxia <i>starburst</i> M82 mostrando cada um dos regimes dominantes em cada região. A linha tracejada representa a emissão bremsstrahlung térmica, a linha pontilhada representa a emissão térmica por poeira e a linha com pontos e traços representa a radiação síncrotron. O espectro composto é representado pela linha sólida e os dados observacionais são indicados pelos pontos e barras de erro (Condon, 1992). . . . .	7
1.4	Os espectros ópticos de uma LERG (TOOT1648+5040; acima) e de uma HERG (3C 457; abaixo). Crédito da imagem: Herbert <i>et al.</i> (2010). . . . .	8
1.5	Algumas das mais comuns morfologias em rádio. A figura (a) representa a galáxia 3C 31, do tipo FRI em 1.4 GHz. (b) a FR2 3C 353 em 8.4 GHz, (c) 3C 288 em 8.4 GHz, e (d) a galáxia 3C 465 em 1.4 GHz, do tipo <i>wide-angle tailed</i> (WAP). Todas as imagens foram obtidas utilizando o rádio telescópio VLA (Banfield <i>et al.</i> , 2015). . . . .	11

1.6	Painéis superiores: relação entre a fração de galáxias que hospedam AGNs com alta atividade em rádio observado em 1.4 GHz no levantamento NVSS com a massa estelar (esquerda) e a massa do SMBH (direita) do <a href="#">Best et al. (2005)</a> . Painéis inferiores: o mesmo, mas medido em 150 MHz no levantamento LOFAR do <a href="#">Sabater et al. (2019)</a> . . . . .	12
2.1	Esquema de 12 filtros do S-PLUS. Crédito da imagem: <a href="#">Mendes de Oliveira et al. (2019)</a> . . . . .	19
2.2	A distribuição do FWHM média nos campos ("tiles") observados no S-PLUS DR1 no Stripe82. O seeing média é de 1"3 (linha pontilhada) com um valor máximo de 2"5. . . . .	20
2.3	Levantamentos fotométricos recentes comparados por profundidade, área e número de filtros. A área dos círculos e quadrados demarcados é proporcional ao número de filtros. O S-PLUS representa uma combinação única de profundidade, filtros e área. Crédito da imagem: <a href="#">Mendes de Oliveira et al. (2019)</a> . . . . .	22
2.4	A distribuição de redshifts fotométricos em S-PLUS na região de Stripe82.	23
2.5	Mapa de densidade de fontes na área do S-PLUS. Para efeitos de visualização, o gráfico foi arrumado tal que a posição de $RA = 360^\circ$ correspondesse a $0^\circ$ . É possível notar uma sobredensidade ao longo de $Dec \approx 0^\circ$ , região onde os campos das observações se sobrepõem, fazendo com que uma fração das fontes fosse observada múltiplas vezes. A sobredensidade em $RA \approx -37^\circ$ e $Dec \approx -1^\circ$ é devido ao aglomerado globular M2. . . . .	24
2.6	A área coberta pelo levantamento S-PLUS. As marcações em vermelho representam os campos a serem observados e as marcações em verde representam os campos observados até o final de 2020. A região em verde ao longo do equador é o Stripe82. Crédito da imagem: R. Overzier e ESA/Gaia/DPAC. . . . .	25
2.7	Painel da esquerda: a distribuição de redshifts espectroscópicos do catálogo de quasares do SDSS. Painel da direita: a distribuição de magnitudes na banda $r'$ dos quasares do SDSS de <a href="#">Pâris et al. (2018)</a> . . . . .	26
2.8	A comparação entre os redshifts fotométricos em S-PLUS, obtidos através do método implementado no <i>iDR3</i> , e os redshifts espectroscópicos em SDSS para quasares confirmados na Stripe82. . . . .	27
2.9	A distribuição de fluxos dos objetos em 1.4 GHz na área do Stripe82 encontrados no catálogo do <a href="#">Hodge et al. (2011)</a> . . . . .	27
2.10	Densidade de fontes em 1.4 GHz na área do Stripe82 encontrados no catálogo do <a href="#">Hodge et al. (2011)</a> . . . . .	28

2.11	A área coberta pelo HERS na observação em 350 $\mu\text{m}$ . A maioria da área foi coberta em duas observações e as faixas em cinza escuro foram cobertas em três observações. (Viero <i>et al.</i> , 2014).	28
3.1	A razão de fluxo integrado e o <i>peak flux</i> para todas as fontes no Hodge <i>et al.</i> (2011). Objetos com uma razão acima (abaixo) de 1.1 são considerados como objetos extensos (compactos).	31
3.2	Um exemplo de imagem para inspeção visual: o painel da esquerda mostra a imagem de detecção do S-PLUS com os contornos da fonte de rádio em azul e as fontes ópticas no campo numeradas em vermelho. O painel da direita exhibe a imagem em rádio marcando os componentes em rádio em azul; as cruzes vermelhas indicam a posição das fontes ópticas. Aqui vemos uma clássica galáxia FR2 com 3 componentes em rádio (0-2) e identificados com o objeto 7 do S-PLUS (a galáxia hospedeira).	32
3.3	Exemplos das 5 classes morfológicas identificadas neste projeto. De cima para baixo: (1) Fonte compacta em rádio (número 0 no painel da direita) e contrapartida óptica (número 16 no painel da esquerda); (2) Fonte FR I em rádio (números 0-1) e contrapartida óptica (número 9); (3) Fonte FR II em rádio (números 0-5) e contrapartida óptica (número 10); (4) Fonte estendida em rádio (número 0) e contrapartida óptica (número 9); (5) Fonte de morfologia incerta em rádio (números 0-4) e contrapartida óptica (número 7).	33
3.4	Esta figura mostra como um erro de redshift se traduz no erro do cálculo da taxa de formação estelar para um dado fluxo em 1.4 GHz de 1 mJy entre $z = 0$ e $z = 0.5$ .	36
3.5	Um exemplo de espectro de um quasar em $z = 1.47$ com sua respectiva correção pelo modelo espectral de quasares do Vanden Berk <i>et al.</i> (2001). O espectro original é representado pela linha vermelha pontilhada e limitada pelas linhas pontilhadas verticais da mesma cor e o modelo de distribuição típico é representado pela linha pontilhada cinza. As linhas verticais pontilhadas cinzas representam uma região de <i>buffer</i> pra fora das quais o modelo espectral de quasares é anexado a fim de evitar o grande ruído nas extremidades do espectro SDSS. O espectro resultante é corrigido pelo avermelhamento galáctico é representado pela linha preta. São mostrados, ainda, os filtros do S-PLUS e as magnitudes calculadas em cada banda como círculos em suas respectivas cores.	37

3.6	A função de luminosidade em 1.4 GHz para SFGs (em azul) e AGNs (em vermelho) obtida por <a href="#">Best &amp; Heckman (2012)</a> . Os rádio AGNs dominam as contagens para luminosidades acima de $\sim 10^{23}$ W Hz <sup>-1</sup> , enquanto as SFGs dominam abaixo disso. . . . .	38
3.7	A relação entre luminosidades em rádio e infravermelho para galáxias sem atividade de AGN). É possível notar o comportamento linear da relação porque ambos os eixos são bons indicadores da taxa de formação de estrelas. Objetos com uma emissão de rádio excessiva devido à presença de um AGN ficarão acima desta relação. Crédito da imagem: <a href="#">Condon et al. (1991)</a> . . . . .	39
3.8	O diagrama de cores para (u-g) versus (g-r), usado na seleção de quasares em $z \sim 3$ . As estrelas cinzas representam as cores simuladas para os modelos espectrais de estrelas, os quadrados coloridos de acordo com os redshifts representam as cores simuladas para quasares de SDSS e os marcadores em X conectados pela linha tracejada em azul representam a trilha de cores do modelo espectral de quasares utilizado. As linhas tracejadas em preto delimitam a região do diagrama escolhida como típica para quasares no dado intervalo de redshift. Para este projeto, especificamente, não precisamos evitar a região dominada por estrelas, uma vez que estas não emitem em rádio e, portanto, não fariam parte de nossa amostra inicial. Estas apenas foram incluídas a fim de investigar a possibilidade do uso deste mesmo método para quasares sem alta atividade em rádio. . . . .	41
3.9	O diagrama de cores para (g-r) versus (r-i), usado na seleção de quasares em $z \sim 4$ . As estrelas cinzas representam as cores simuladas para os modelos espectrais de estrelas, os quadrados coloridos de acordo com os redshifts representam as cores simuladas para quasares de SDSS e os marcadores em X conectados pela linha tracejada em azul representam a trilha de cores do modelo espectral de quasares utilizado. As linhas tracejadas em preto delimitam a região do diagrama escolhida como típica para quasares no dado intervalo de redshift. . . . .	42
4.1	A disposição das fontes inspecionadas sobre o diagrama de cores $(u-g)_{AB} \times (g-r)_{AB}$ . Estão presentes no gráfico: a trilha de cores do modelo espectral para quasares (marcadores em X variando cores de acordo com o redshift e a linha tracejada em azul), os quasares confirmados em nossa amostra (quadrados de cores variadas de acordo com o redshift), as galáxias de SDSS (círculos de cores variadas de acordo com o redshift) e as fontes do S-PLUS sem contrapartidas espectroscópicas (losangos com bordas vermelhas). As linhas tracejadas em preto definem a região típica para quasares e as marcações em Xs assinalam as fontes selecionadas por esse critério. . . . .	45

4.2	A disposição das fontes inspecionadas sobre o diagrama de cores $(g-r)_{AB} \times (r-i)_{AB}$ . Estão presentes no gráfico: a trilha de cores do modelo espectral para quasares (marcadores em X variando cores de acordo com o redshift e a linha tracejada em azul), os quasares confirmados em nossa amostra (quadrados de cores variadas de acordo com o redshift), as galáxias de SDSS (círculos de cores variadas de acordo com o redshift) e as fontes do S-PLUS sem contrapartidas espectroscópicas (losangos com bordas vermelhas). As linhas tracejadas em preto definem a região típica para quasares e as marcações em Xs assinalam as fontes selecionadas por esses critérios.	46
4.3	Os novos candidatos a quasares encontrados por nossa seleção. As imagens possuem dimensões de $27.5'' \times 27.5''$ .	51
4.4	A relação entre fluxos em rádio e infravermelho para as fontes de nossa identificação. As fontes marcadas como <i>suggested AGNs</i> e <i>suggested SFG</i> correspondem às fontes classificadas como AGNs e SFGs, respectivamente, pelo critério de corte de luminosidade. É possível perceber que ambos critérios concordam em grande medida.	52
4.5	As fontes do tipo FR1 na seleção. As imagens possuem dimensões de $54'' \times 54''$ . O painel no canto inferior direito corresponde a uma nova fonte (sem identificação espectroscópica prévia).	53
4.6	As fontes do tipo FR2 previamente identificadas.	54
4.7	As fontes do tipo FR2 identificadas por nossa seleção.	55
4.8	A distribuição de SFR calculada para a amostra de fontes selecionadas como galáxias normais.	56
4.9	As fontes identificadas como SFGs pela nossa seleção (continua na próxima página).	57
4.10	As fontes identificadas como SFGs pela nossa seleção (continua na próxima página).	58
4.11	As fontes identificadas como SFGs pela nossa seleção.	59
4.12	A distribuição de redshifts das fontes selecionadas como SFGs que já possuíam redshift espectroscópicos por SDSS.	60
4.13	A distribuição de redshifts fotométricos das fontes selecionadas como novas candidatas a SFGs.	61
4.14	A quantidade de correlações por catálogo por morfologia dentre as fontes emisoras de rádio em S-PLUS	62
4.15	Distribuição de magnitudes na banda $r$ para cada classe.	62

4.16 A distribuição de redshift das fontes compactas identificadas no SDSS. O histograma dos redshifts fotométricos de SDSS é representado em vermelho, os redshifts espectroscópicos são representados pela linha preta e em azul estão representados os redshifts dos quasares confirmados encontrados em nossa seleção. . . . . 63

# Lista de Tabelas

2.1	Profundidades fotométricas em S-PLUS como determinadas em <a href="#">Mendes de Oliveira et al. (2019)</a> . . . . .	21
4.1	As fontes emisoras em rádio de S-PLUS em termos de suas aparições em cada um dos catálogos utilizados na pesquisa. Na tabela, SDSS (spec) representa o catálogo espectroscópico do SDSS, SDSS (qso) representa o catálogo de QSOs de SDSS e SDSS(photo) representa o catálogo fotométrico do mesmo levantamento. HERS representa o catálogo em infravermelho distante. "Nenhum catálogo" representa as fontes encontradas nas imagens através do processo descrito em 3.1.2 e para as quais não possuíam contrapartida em nenhum dos catálogos utilizados. . . . .	48
4.2	Os resultados do critério de seleção para as fontes compactas. É importante salientar que os critérios de corte de luminosidade em rádio e da relação rádio-infravermelho para SFGs (em azul) são o inverso daqueles para AGNs, como comentado na seção 4.3. . . . .	49
4.3	O resumo das fontes selecionadas pelo nosso critério. A segunda e a terceira coluna representam, respectivamente, o número de fontes encontradas no catálogo de quasares e no catálogo espectroscópico de galáxias do SDSS. Na terceira coluna apresentamos o número de objetos selecionados como bons candidatos a cada uma das classes em S-PLUS. . . . .	50



# Sumário

<b>Lista de Figuras</b>	<b>xv</b>
<b>Lista de Tabelas</b>	<b>xxi</b>
<b>1 Introdução</b>	<b>1</b>
1.1 Galáxias ativas e núcleos ativos . . . . .	1
1.1.1 O modelo unificado . . . . .	1
1.1.2 Evidências e mecanismos de feedback . . . . .	4
1.2 Atividade galáctica em rádio . . . . .	5
1.2.1 Processos radiativos em rádio . . . . .	6
1.2.2 Jatos de AGNs e modos de acreção . . . . .	7
1.2.3 Radiogaláxias e quasares . . . . .	9
1.3 Grandes levantamentos do céu . . . . .	11
1.3.1 Levantamentos fotométricos no óptico . . . . .	12
1.3.2 Levantamentos em rádio . . . . .	14
1.4 Motivação científica e objetivos desta dissertação . . . . .	14
<b>2 Dados</b>	<b>17</b>
2.1 O levantamento S-PLUS . . . . .	17
2.1.1 Instrumento e sistema de filtros . . . . .	18
2.1.2 Qualidade dos dados . . . . .	18
2.1.3 Obtenção dos redshifts fotométricos . . . . .	19
2.1.4 Campos e disponibilidade dos dados . . . . .	21
2.1.5 Ressalvas . . . . .	21
2.2 Os catálogos SDSS . . . . .	22
2.2.1 Catálogo de Quasares . . . . .	23
2.3 O catálogo do rádio . . . . .	24
2.4 O catálogo infravermelho . . . . .	25
<b>3 Metodologia</b>	<b>29</b>
3.1 O processo de correlação cruzada . . . . .	29
3.1.1 Diferenciação entre objetos compactos e extensos em rádio . . . . .	30

3.1.2	Estratégia e método de correlação . . . . .	30
3.2	Identificação das classes morfológicas em rádio . . . . .	32
3.3	Construção do critério de seleção de Candidatos a AGNs . . . . .	34
3.3.1	Cálculo da luminosidade em rádio e da SFR . . . . .	34
3.3.2	Simulação das magnitudes S-PLUS a partir de espectros . . . . .	35
3.3.3	Critério de seleção de candidatos AGNs . . . . .	38
<b>4</b>	<b>Análise e resultados</b>	<b>43</b>
4.1	Radioquasares identificados . . . . .	43
4.1.1	Critério de cores para quasares em $2 \lesssim z \lesssim 3$ . . . . .	44
4.1.2	Critério de cores para quasares em $4 \lesssim z \lesssim 5$ . . . . .	44
4.1.3	Resultados da seleção . . . . .	45
4.2	Radiogaláxias identificadas . . . . .	46
4.3	Galáxias em formação de estrelas identificadas . . . . .	47
4.4	Classificações inconclusivas . . . . .	48
4.5	As populações em rádio em S-PLUS . . . . .	48
<b>5</b>	<b>Conclusões</b>	<b>65</b>
	<b>Referências Bibliográficas</b>	<b>69</b>

# Capítulo 1

## Introdução

### 1.1 Galáxias ativas e núcleos ativos

O paradigma atual da astrofísica sugere que todas as galáxias com massas estelares de  $M_* \gtrsim 10^9 M_\odot$  possuem um **buraco negro supermassivo** (*Supermassive Black Hole*; **SMBH**) em suas regiões centrais (Ferrarese & Merritt, 2000; Gebhardt et al., 2000; Kormendy & Richstone, 1995; McConnell et al., 2011). Em galáxias ativas, o SMBH está consumindo uma certa quantidade de matéria bariônica através de um disco de acreção. Esta matéria, majoritariamente em forma de gás, pode ser proveniente da fusão de galáxias, influxo por efeitos como instabilidades da barra da galáxia ou do halo de resfriamento, da perturbação de maré de estrelas na região nuclear da galáxia ou liberado pelas atmosferas estelares das estrelas do núcleo. No caso do modelo padrão de disco fino, o espiralamento da matéria é acelerado em direção ao SMBH (diferencialmente), gerando atrito entre o material do disco e emitindo radiação térmica contínua no espectro eletromagnético (Shakura & Sunyaev, 1973). Em outros sistemas, preferencialmente galáxias massivas nos centros de halos de matéria escura quente, como em grupos e aglomerados de galáxias, as taxas de acreção são muito baixas para sustentar um disco fino estruturado, e a atividade se dá principalmente a partir de poderosos jatos de rádio (Heckman & Best, 2014; Rees, 1984). A ambos esses cenários de acreção e radiação correspondente damos o nome de **núcleo ativo de galáxia** (*Active Galaxy Nuclei*; **AGN**), sendo sua galáxia hospedeira chamada de galáxia ativa. Embora a menor parte das galáxias em qualquer dado período hospedem AGNs, a presença de SMBHs em quase todas as galáxias mostra a importância desta fase de atividade na evolução galáctica.

#### 1.1.1 O modelo unificado

Os primeiros AGNs foram descobertos já no início do século XX, sendo identificados por suas altas luminosidades nucleares e pela presença de linhas de emissão largas e altamente excitadas em seus espectros, mas sem que se soubesse qual o causador destes padrões de

linhas de emissão peculiares no núcleo das galáxias (Seyfert, 1943). Entre as principais descobertas precoces estão as presenças de jatos nas (rádio) galáxias Cygnus A, Centaurus A, Virgo A (M87) e Perseus A (Baade & Minkowski, 1954) e eventualmente os primeiros cálculos corretos de redshifts dos objetos compactos mais luminosos no universo, que ficaram conhecidos, devido às suas semelhanças visuais com estrelas, como **quasares** (*quasi-stellar radio sources*) (Greenstein, 1963; Schmidt, 1963).

Uma vez que os redshifts destas fontes passaram a ser corretamente calculados, ficou claro que elas contavam com enormes luminosidades (chegando a energias totais de  $\sim 10^{61}$  erg), provenientes de regiões não maiores que  $1 \text{ pc}^1$ , o que requereria um potencial gravitacional equivalente ao das maiores galáxias conhecidas até então. Salpeter (1964) e Zel'dovich (1964) propuseram, independentemente, que os únicos objetos capazes de gerar tamanha energia a partir de regiões tão compactas seriam buracos negros sendo alimentados por discos de acreção.

O progressivo aumento na descoberta de AGNs fomentou a proposição de interpretações físicas de seus processos, destacando-se a de que todos esses tipos de AGN compartilhavam entre si relações com seus SMBH centrais através do processo descrito anteriormente. Por conectar esses tipos de AGNs com a mesma causa, esse modelo foi batizado de **modelo unificado de AGNs** (Antonucci & Miller, 1985; Urry & Padovani, 1995). De acordo com o modelo unificado, as diferentes morfologias e distribuições de energias espectrais dos AGNs podem ser explicadas pelo ângulo de visada do observador (ou seja, o ângulo do disco de acreção em relação a um observador da terra), pela luminosidade intrínseca, e pela presença de emissão em rádio ou não. Através da figura 1.1, pode-se compreender como a direção da estrutura de acreção é capaz de gerar diferenças morfológicas e espectrais, destacando-se a atuação da matéria distribuída perpendicularmente à origem da emissão.

As nuvens de gás mais próximos ao SMBH nessa direção estão sob forte influência gravitacional do disco de acreção em rotação e, por isso, reemitem a sua radiação com alargamento devido ao efeito doppler; essa região recebe o nome de região de linha larga (*Broad Line Region*; **BLR**). Estas regiões possuem extensão típica de  $10^{14}$  m, densidade entre  $10^8$  e  $10^{11} \text{ cm}^{-3}$ , temperatura  $\approx 10^4$  K e massa  $10\text{-}1000 M_{\odot}$ .

O ingrediente crucial do modelo unificado é a presença presumida de um torus obscurador. Dependendo da orientação do núcleo ativo com respeito ao observador, a BLR pode estar completamente obscurecida pelo torus de poeira, resultando em um espectro contendo apenas linhas de emissão estreitas que se originam dos nuvens de gás na região de linha estreita (*Narrow Line Region*; **NLR**), como no caso dos AGNs do tipo *Seyfert 2*. Estas regiões possuem extensões típicas de centenas de parsecs, massas que podem atingir  $10^6 M_{\odot}$  com densidade de  $\sim 10^{2-4} \text{ cm}^{-3}$  e temperatura típica de  $\sim 10^4$  K. Para este gás a maior distância da estrutura de acreção, a influência gravitacional do disco

---

<sup>1</sup>Extensão inferida através das rápidas variações de luminosidade das fontes.

tende a zero e, portanto, a reemissão da radiação não sofre alargamento no espectro. No entanto, quando a região central é visível, o observador obterá tanto linhas largas da BLR quanto estreitas da NLR no espectro, como no caso dos AGNs tipo *Seyfert 1*.

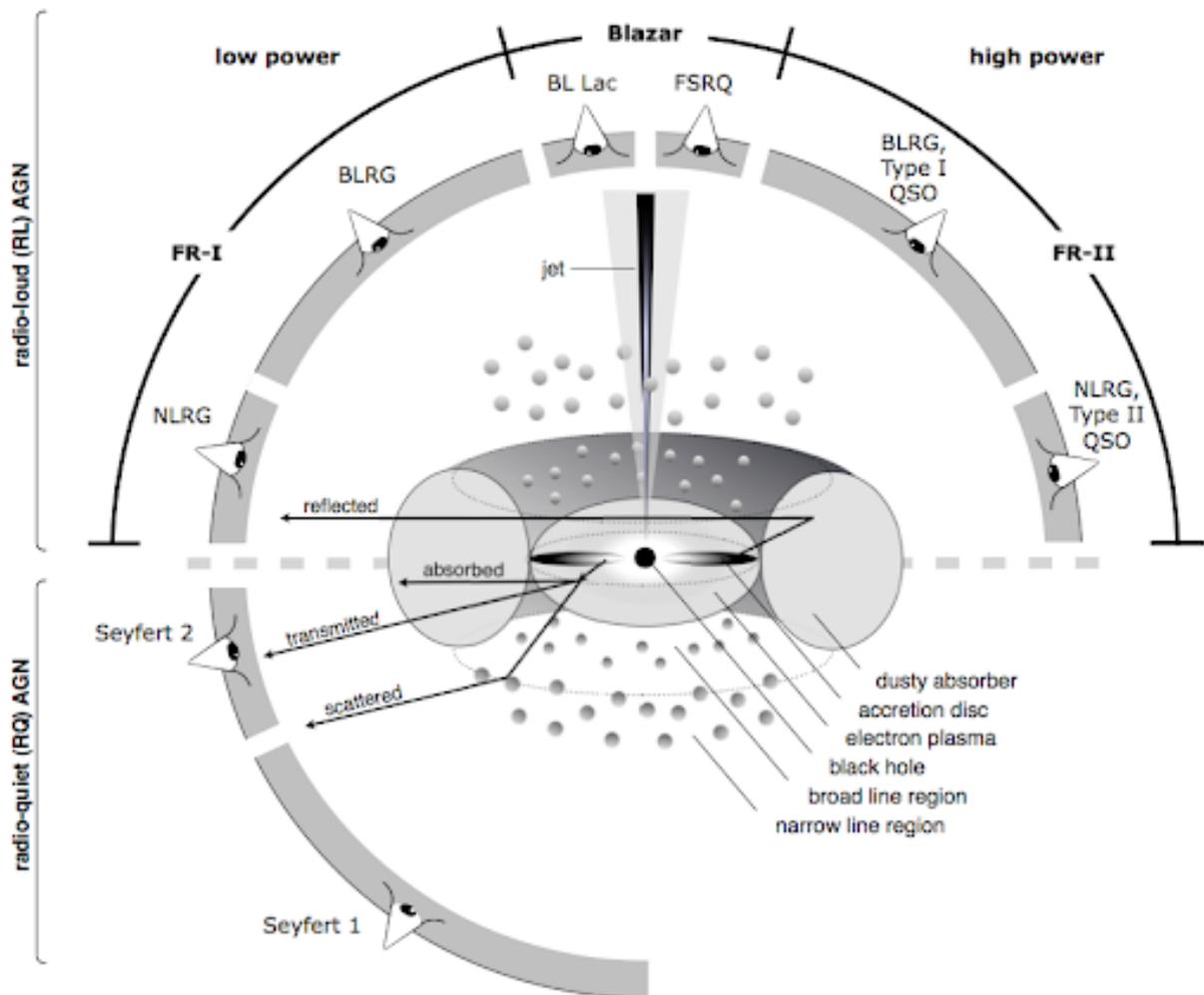


Figura 1.1: Representação figurativa do modelo unificado de AGNs. Nele é possível observar a presença do SMBH, disco de acreção e do torus de poeira, além da NLR, da BLR e do jato no caso de alta emissão em rádio. Em toda a volta estão indicadas as diferentes morfologias de acordo com o ângulo de visada, a luminosidade bolométrica da emissão e a presença de emissão em rádio (Beckmann & Shrader, 2012). Este modelo foi tomado com o intuito de simplificar a visualização dos principais componentes da estrutura de acreção. O paradigma atual compreende que o toro não é contínuo e que as nuvens da BLR tendem a estar num sistema achatado formando uma espécie de conexão entre o disco de acreção e o toro.

É importante salientar que, embora ofereça uma perspectiva geral sobre o assunto, o modelo unificado não é capaz de explicar certas diferenças morfológicas (como no caso das radiogaláxias dos tipos FR1 e FR2) e espectrais (como no caso das radiogaláxias de alta excitação e baixa excitação), a serem abordados nos próximos tópicos.

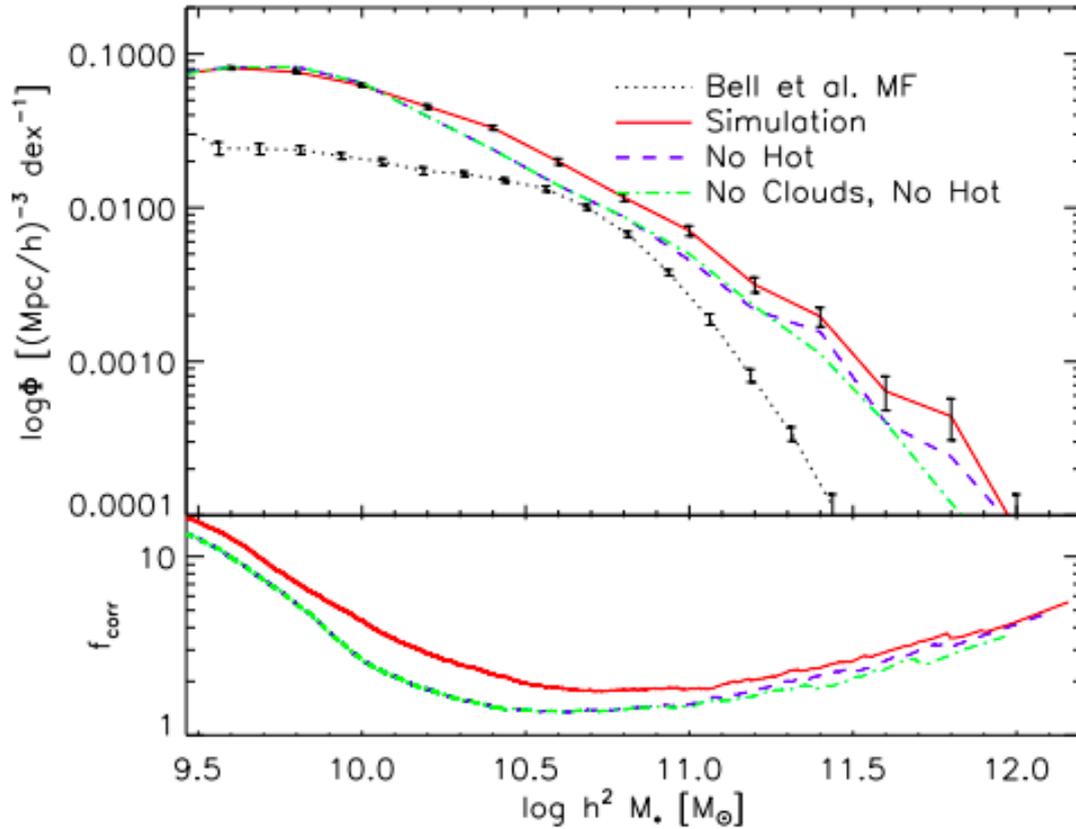


Figura 1.2: Função de massa estelar de galáxias observadas (linha pontilhada) *versus* simulada (outras linhas) (Kereš *et al.*, 2009). O painel inferior mostra o fator de correção necessário para que as simulações concordem com as observações. É possível observar que as simulações tendem a superproduzir galáxias em ambas as extremidades de baixa e alta massa da função em até 10 vezes.

### 1.1.2 Evidências e mecanismos de feedback

Além de serem as fontes astronômicas mais brilhantes conhecidas, os AGNs têm grande importância na evolução de suas galáxias hospedeiras. Através de simulações de funções de massa estelar baseadas no paradigma atual da cosmologia ( $\Lambda$ CDM), é possível observar um grande excesso nas duas extremidades da distribuição de massa das galáxias em relação ao observado. Isso indica a existência de processos através dos quais a taxa de formação estelar das galáxias seja diminuída. Esses processos recebem o nome geral de *feedback*.

A figura 1.2 compara a função de massa estelar de galáxias locais obtida por Bell *et al.* (2003) para galáxias do 2MASS e SDSS com a simulação em  $\Lambda$ CDM feitas por Kereš *et al.* (2009). Também estão presentes no gráfico simulações modificadas para considerar efeitos de feedback.

A segunda simulação (linha tracejada em azul) exclui a possibilidade de acreção de gás aquecido por choque (modo de acreção quente), realçando, assim, os efeitos de um *feedback* preventivo, onde a formação estelar é exaurida pela ausência de gás frio o suficiente

para colapsar em estrelas. Essa condição simula os efeitos extremos de *feedback* gerado por jatos de AGNs.

O terceiro cenário (linha tracejada em verde) apresenta a simulação sem modo quente de acreção e sem a presença de bolhas de gás frio ( $T \leq 10^4$  K) nas vizinhanças da região de formação estelar. Esta restrição maximiza os efeitos de um *feedback* ejetivo, uma vez que o gás ejetado pelo *outflow* não pode voltar para a galáxia resfriado, inviabilizando, desta forma, a formação estelar.

Acredita-se que a principal causa da discrepância presente na região de mais baixa massa seja causada pela explosão de supernovas, cujas ondas de choque são capazes de aquecer e expulsar parte do reservatório de gás da galáxia, outrora disponível para formação estelar (Dekel & Silk, 1986). Para a região de alta massa, no entanto, o *feedback* de supernovas seria menos eficiente, uma vez que galáxias de alta massa estão tipicamente distribuídas em potenciais gravitacionais massivos onde os outflows não são capazes de superar a velocidade de escape. O *feedback* de AGN, então, é a mais promissora alternativa para esses objetos massivos, uma vez que geram grandes pressões radiativas e mecânicas, podendo emitir jatos. Além disso, galáxias mais massivas têm maior probabilidade de hospedar um núcleo ativo devido aos seus ambientes, que tornam propícios o resfriamento lento do gás quente do halo.

Kereš *et al.* (2009) sugere que, para as galáxias de baixa massa, existe algum mecanismo capaz de prevenir suas formações ou, pelo menos, que seja altamente eficiente em diminuir suas massas. Este processo teria de ocorrer a altos redshifts, antes que as galáxias pudessem transformar a maior parte de seu gás em estrelas. Esse mecanismo de *feedback* também dá conta do excesso de galáxias de alta massa nas simulações, uma vez que suas progenitoras não teriam oportunidade de usar todo o gás disponível na ocasião de suas respectivas formações. Os autores destacam ainda a contribuição do *feedback* de AGNs, principalmente entre as galáxias de massa intermediária; acredita-se que isso desempenhe um papel no estabelecimento da relação de massa ou dispersão de velocidade entre as galáxias e seus buracos negros.

## 1.2 Atividade galáctica em rádio

Galáxias emitem radiação em diversas faixas do espectro eletromagnético e suas morfologias em cada um dos intervalos de comprimento de onda podem variar de acordo com as estruturas responsáveis pela emissão e os processos radiativos envolvidos. Nesta seção, discutiremos a origem e os modos de emissão galáctica, especificamente em rádio, e como podemos obter informação crucial sobre a evolução galáctica através deles.

### 1.2.1 Processos radiativos em rádio

Em galáxias inativas, isto é, que não possuem um AGN, a emissão em rádio está principalmente relacionada à presença de estrelas massivas, à disponibilidade de hidrogênio neutro e à presença de poeira no meio interestelar.

Estrelas de massa  $M \geq 8M_{\odot}$ , tipicamente dos tipos O e B, emitem radiação ultravioleta térmica (ou seja, a partir de um corpo em equilíbrio térmico) capaz de ionizar o hidrogênio neutro do meio interestelar, transformando-o em hidrogênio uma vez ionizado (HII). Quando as reservas de combustível no núcleo da estrela (primariamente H, seguido de He, C, Ne, O, Si e Fe) acabam, o processo de fusão nuclear se torna energeticamente custoso e sua pressão de radiação não é mais capaz de se balancear com a gravidade. A estrela passa, então, a sucumbir à gravidade e diminuir de volume. Se a massa do núcleo ferroso da estrela for tal que  $M \geq 1.4M_{\odot}$ , a pressão de degeneração de elétrons não será capaz de balancear a gravidade e, como resultado disso, a estrela colapsará rapidamente em volume. A pressão, portanto, crescerá repentinamente, causando uma explosão que lançará ao espaço as camadas externas de matéria da estrela, deixando apenas o núcleo coeso. Essa explosão, chamada *supernova*, é capaz de acelerar elétrons à velocidades relativísticas.

Os elétrons provenientes do colapso estelar podem emitir radiação em rádio por duas vias. As linhas de campo magnético da galáxia podem capturá-los, fazendo com que as partículas espiralem através delas; a mudança de velocidade angular faz com que os elétrons emitam radiação perpendicularmente ao seus trajetos: este processo radiativo se chama **radiação síncrotron**. Ao atravessar as regiões de HII, os elétrons relativísticos vão sofrer leves deflexões pelos íons da região ionizada. A diferença entre as energias antes e depois da deflexão vai ser emitida em forma de radiação. Este processo é conhecido como **radiação bremsstrahlung térmica**. Estes processos dominam o espectro galáctico em rádio, que pode ainda receber contribuição de radiação reprocessada por poeira e de linhas de emissão devido ao resfriamento das nuvens de HII.

Átomos de hidrogênio neutro também podem emitir radiação em comprimentos de onda de rádio. Isto acontece quando o *spin* do elétron componente do átomo de hidrogênio muda de direção, liberando um fóton no comprimento de onda de 21 cm ([van de Hulst et al., 1954](#)). Esta transição é extremamente rara, levando em média 10 milhões de anos para acontecer, porém, devido à grande disponibilidade de hidrogênio neutro nas galáxias, essa linha é constantemente observada.

Uma vez que, em galáxias inativas, esses processos estão intimamente ligados com a presença de hidrogênio neutro (e, portanto, altas reservas de combustível para formação estelar) e de estrelas massivas (e, portanto, com tempo de vida curto)<sup>2</sup>, concluímos que galáxias que emitem em rádio devem estar em plena fase de formação estelar ([Condon,](#)

---

<sup>2</sup>Com exceção da emissão em 21 centímetros, que apenas requer a presença de hidrogênio neutro.

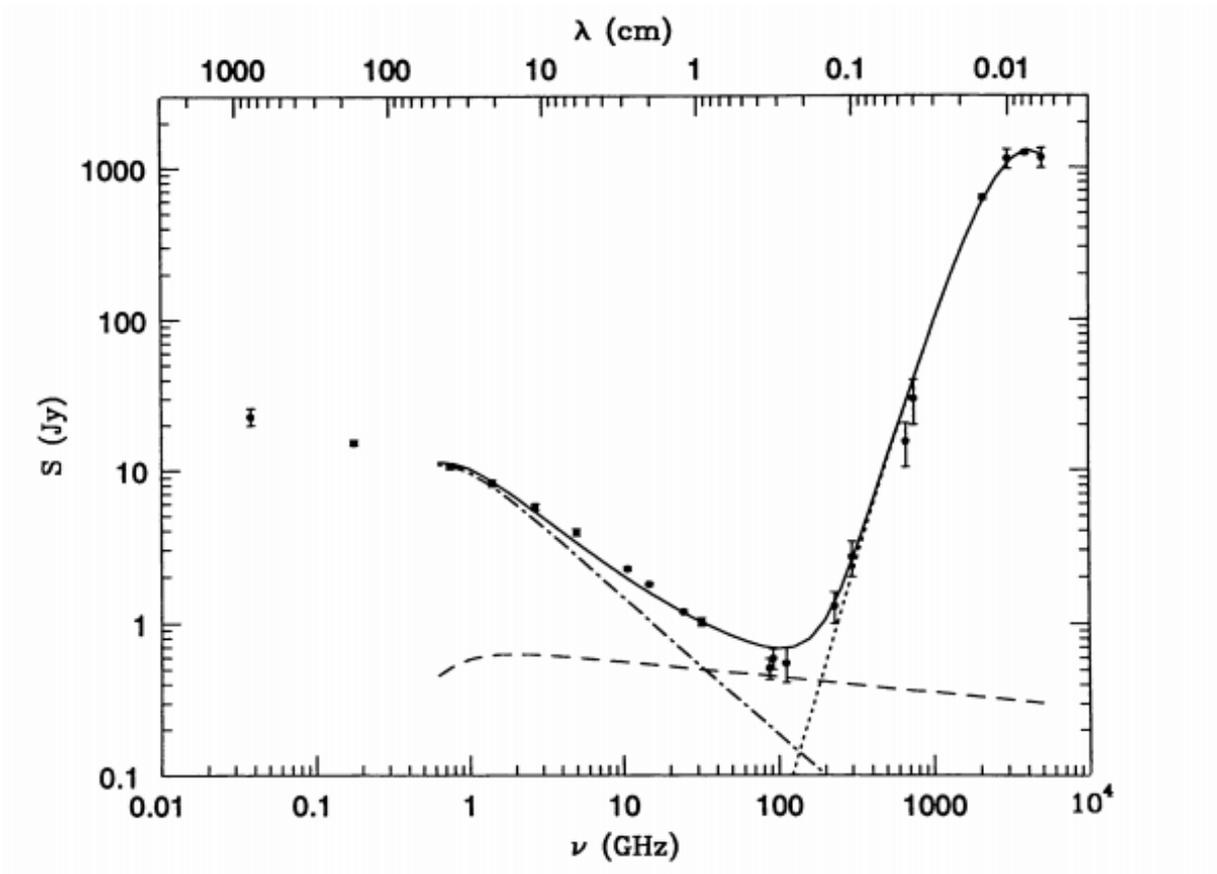


Figura 1.3: O espectro da radiação de rádio da galáxia *starburst* M82 mostrando cada um dos regimes dominantes em cada região. A linha tracejada representa a emissão bremsstrahlung térmica, a linha pontilhada representa a emissão térmica por poeira e a linha com pontos e traços representa a radiação síncrotron. O espectro composto é representado pela linha sólida e os dados observacionais são indicados pelos pontos e barras de erro (Condon, 1992).

1992).

Para AGNs a emissão em rádio está relacionada com radiação síncrotron a partir dos elétrons acelerados ao redor do disco de acreção e capturados pelos campos magnéticos do AGN (Blandford & Znajek, 1977).

### 1.2.2 Jatos de AGNs e modos de acreção

AGNs podem, também, emitir jatos: correntes de matéria em direções opostas a partir das proximidades do SMBH, com o formato afunilado estreito e que podem chegar a extensões da ordem de Mpc (Abramowicz & Fragile, 2013), dezenas de vezes o tamanho de suas galáxias hospedeiras.

A formação dos jatos está intimamente ligada com a estrutura de acreção em AGNs. O modelo tradicional prevê a criação de correntes de gás com origem no reservatório de gás da galáxia e em direção ao horizonte de eventos do buraco negro, intensificadas pelo campo magnético do disco de acreção. O gás, uma vez capturado e aquecido pelo disco de acreção,

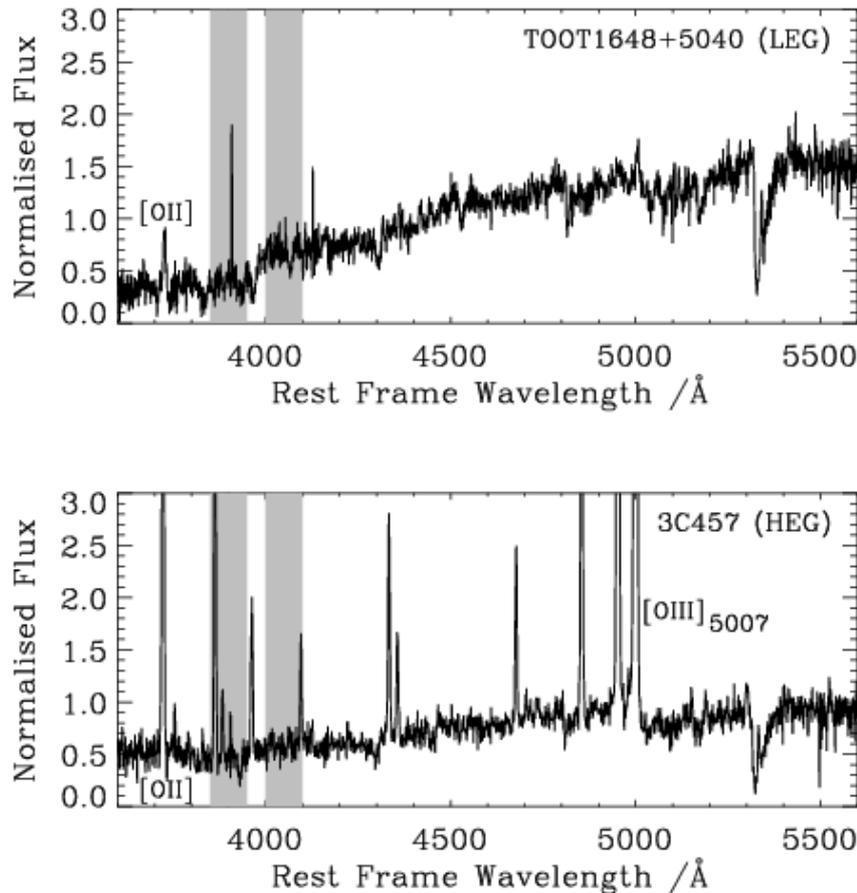


Figura 1.4: Os espectros ópticos de uma LERG (TOOT1648+5040; acima) e de uma HERG (3C 457; abaixo). Crédito da imagem: [Herbert et al. \(2010\)](#).

fica retido pela corrente de gás em direção ao buraco negro e não consegue se resfriar. Esse processo faz com que a pressão de radiação do disco aumente, transformando o disco de acreção fino em um toro espesso, privilegiando a colimação dos campos magnéticos (e, portanto, do jato resultante) ([Blandford et al., 2019](#)). A ocorrência de jatos em galáxias observadas mostra grande correlação com efeitos ambientais que influenciam na eficiência da acreção do AGN e em características espectrais distintas.

AGNs com alta emissão em rádio tendem a apresentar linhas de emissão altamente excitadas em seus espectros, porém uma significativa parcela pode não apresentar essa característica. Essas duas classes de objetos recebem o nome, respectivamente, de radiogaláxias de alta excitação (*High-Excitation Radio Galaxies*; **HERGs**) e radiogaláxias de baixa excitação (*Low-Excitation Radio Galaxies*; **LERGs**). [Best et al. \(2005\)](#) apresentaram evidências de que essas duas classes resultam de modos de acreção distintos.

A ocorrência de HERGs está relacionada a uma estrutura de acreção tradicional e meios interestelares frios e densos. O gás frio abastece um disco de acreção fino, em

um modo de acreção eficiente (1 a 10% da taxa de Eddington) conhecido como "modo frio" (**cold mode**). A energia proveniente desse processo é emitida através de todo o espectro eletromagnético e recebe o nome de "modo radiativo" (**radiative mode**), podendo também contar com a presença de jatos em galáxias com buracos negros mais massivos.

Por outro lado, as LERGs possuem tipicamente um meio interestelar quente e difuso e não apresentam um toro de poeira ou uma BLR em sua estrutura de acreção. Ao invés disso, possuem um disco de acreção geometricamente espesso e acreção dominada por advecção. O SMBH é alimentado lentamente (abaixo de 1% da taxa de Eddington) através do resfriamento de um reservatório de gás quente no halo da galáxia, o "modo quente" (**hot mode**). Nesse caso, a maior parte da energia é transportada cineticamente pelos jatos (**jet mode**) (Fabian, 2012). A figura 1.4 apresenta espectros ópticos característicos para as duas classes, cujas distinções não podem ser explicadas pelo modelo unificado de AGNs.

### 1.2.3 Radiogaláxias e quasares

Aproximadamente 10 a 20 % dos AGNs são ativos em rádio. Essas galáxias podem apresentar uma gama de morfologias envolvendo, ou não, a ocorrência de jatos. Entre as morfologias mais usuais estão: radioquasares e radiogaláxias do tipo **FR I (Fanaroff-Riley class I)** e do tipo **FR II (Fanaroff-Riley class II)** (Fanaroff & Riley, 1974).

Os quasares, como já citado anteriormente, são as fontes pontuais ópticas mais brilhantes que se tem conhecimento. De acordo com o modelo unificado, estão relacionados com a emissão aproximadamente perpendicular ao disco de acreção, de modo que a emissão do disco, a BLR e a NLR estão na direção da linha de visada. Por razão disso, seus espectros ópticos são caracterizados pela presença de um forte contínuo e linhas de emissão de alta excitação largas e estreitas. Uma característica espectral fundamental destes objetos é a grande emissão de *Lyman  $\alpha$* <sup>3</sup> em 1216 Å, produzida pelo disco de acreção com alguma contribuição da fase de altíssima formação estelar de suas galáxias hospedeiras a altos redshifts. Fótons a comprimentos de onda menores que 912 Å (o limite de *Lyman*) são fortemente absorvidos por nuvens de hidrogênio neutro na linha de visada entre o observador e a fonte da radiação (Gunn & Peterson, 1965). Este efeito dá ao espectro dos quasares uma característica de absorção conhecida como *Lyman break* tão mais acentuada quanto maior o redshift da fonte, uma vez que a abundância de hidrogênio neutro é diretamente relacionada com o redshift. O espectro em rádio, por sua vez, é plano, indicando que a radiação é predominantemente proveniente de elétrons acelerados perto do centro da galáxia.

Essas fontes ainda podem apresentar grandes variações de luminosidade. No caso dos objetos do tipo **BL Lac**, quando o AGN é observado ao longo do jato, o espectro carac-

---

<sup>3</sup>Comprimento de onda emitido na transição entre o segundo e o primeiro nível de energia em átomos de hidrogênio

terístico resulta plano, altamente intenso e sem características de emissão ou absorção. Esses objetos podem variar sua magnitude em mais de 0.1 mag por dia.

Uma outra classe de objetos similares são os quasares **OVV (Optically Violently Variable)**. Essa classe produz espectros semelhantes aos de blazares porém com a presença de linhas de emissão largas e estreitas que variam rapidamente, podendo seus fluxos variarem um fator de  $\sim 2$  em menos de uma semana (Begelman *et al.*, 1984). Por esses motivos, acredita-se que os quasares OVV representem a fase fraca na emissão de quasares altamente variáveis (ou **blazares**), sendo os objetos BL Lac os representantes da fase forte.

Nas radiogaláxias dos tipos FRs, a emissão em rádio é extensa, sendo possível visualizar claramente um par de jatos relativísticos (ou apenas um jato, devido ao efeito de *relativistic beaming* (Blandford & Königl, 1979)) em direções opostas a partir do centro da galáxia. Esses jatos possuem dimensões extragalácticas, podendo apresentar interação com o aglomerado. O formato desses jatos é determinante para a distinção dessas classes.

Galáxias do tipo FR I apresentam menos luminosidade em direção às extremidades do jato, ou seja, as regiões de menores luminosidades estão mais longe da galáxia do que as regiões de maiores luminosidades (*Edge-darkened*). As FR II, por sua vez, possuem suas regiões de menores luminosidades mais próximas à galáxia do que as regiões de maiores luminosidades (*Edge-brightened*), com máxima emissão nas regiões onde os jatos são fortemente desacelerados pela pressão das nuvens de gás do aglomerado (*ram pressure*), deixando para trás lóbulos (**radio lobes**). Essas estruturas podem também formar caudas anguladas, resultado do deslocamento da radiogaláxia através de regiões de alta densidade. A figura 1.5 mostra os principais tipos de morfologias em rádio.

Baldi *et al.* (2015) propõem, ainda, a existência da classe de objetos FR 0, compreendendo fontes com perfil de emissão similar a FR I (ou seja, dominada pelo núcleo e *edge-darkened*) porém com tamanho angular e extensão da emissão em rádio reduzidos. FR0s podem se estender por 1 - 3 kpc e mostram dominância da radiação pelo núcleo até 30 vezes maior que em FR Is. A existência de radiogaláxias com uma morfologia híbrida com um jato de tipo FR I e o outro de tipo FR II (Gopal-Krishna & Wiita, 2000) é a prova clara de que a diferença entre esses dois tipos de jatos de rádio tem uma origem externa (como ambientes diferentes), ao invés de uma origem intrínseca (como a composição ou método de lançamento dos jatos).

No universo local, a classe das HERGs é principalmente representada por galáxias elípticas massivas e do tipo FR II, apresentando população estelar antiga (Heckman & Best, 2014). Best & Heckman (2012) mostram que essa classe é dominante em altas luminosidades em rádio, a partir de  $L_{1.4GHz} \sim 10^{26} \text{ W Hz}^{-1}$ . Entre as LERGs é possível observar ambas as morfologias FR I e FR II. Best *et al.* (2005) e Sabater *et al.* (2019) foram capazes de observar forte correlação entre a fração de galáxias com alta atividade em rádio, massa estelar e massa do buraco negro (figura 1.6). Além disso, mostraram

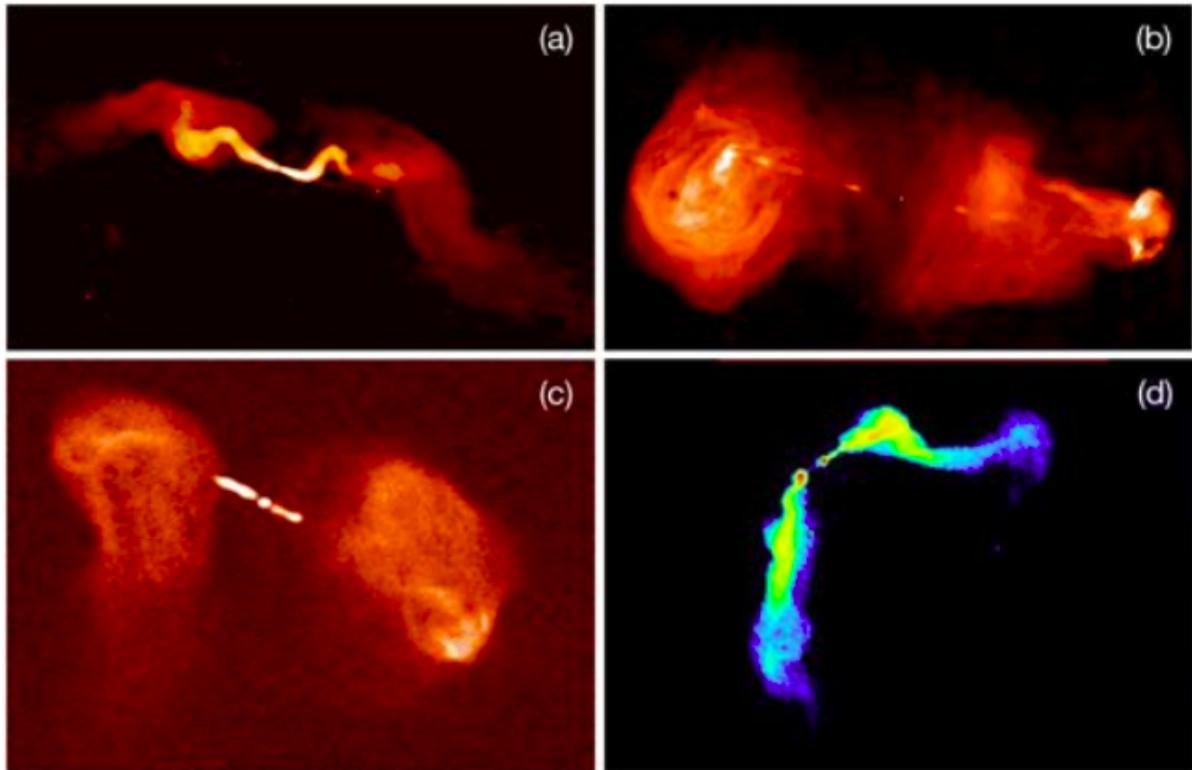


Figura 1.5: Algumas das mais comuns morfologias em rádio. A figura (a) representa a galáxia 3C 31, do tipo FRI em 1.4 GHz. (b) a FR2 3C 353 em 8.4 GHz, (c) 3C 288 em 8.4 GHz, e (d) a galáxia 3C 465 em 1.4 GHz, do tipo *wide-angle tailed* (WAP). Todas as imagens foram obtidas utilizando o rádio telescópio VLA (Banfield et al., 2015).

que a razão entre a luminosidade total de  $[\text{O III}]\lambda 5007$  (linha cuja excitação é utilizada para classificar a galáxia como HERG ou LERG) pesada pelo volume e a massa do buraco negro pesada pelo volume evolui decrescentemente em função da massa do buraco negro. Essas informações suscitam a conclusão de que integrantes da classe das LERGs estão tipicamente relacionadas a galáxias elípticas muito massivas com buracos negros muito massivos com taxa de acreção lenta e ineficiente.

### 1.3 Grandes levantamentos do céu

Historicamente, mapeamentos de grandes porções do céu têm desempenhado papéis fundamentais na descoberta e identificação de fontes astronômicas. Esses levantamentos podem ser realizados cobrindo diversas faixas do espectro eletromagnético, dependendo do tipo de objeto e efeito que se pretende observar. Para cada um dos objetivos científicos existe uma configuração instrumental do telescópio necessária, englobando desde o sistema óptico até correções das distorções produzidas pela atmosfera terrestre.

A informação obtida através desses mapeamentos também pode se dispor em duas principais categorias: informação fotométrica e informação espectral. Na fotometria, grandes porções do céu, e, portanto, um grande número de objetos, podem ser observados

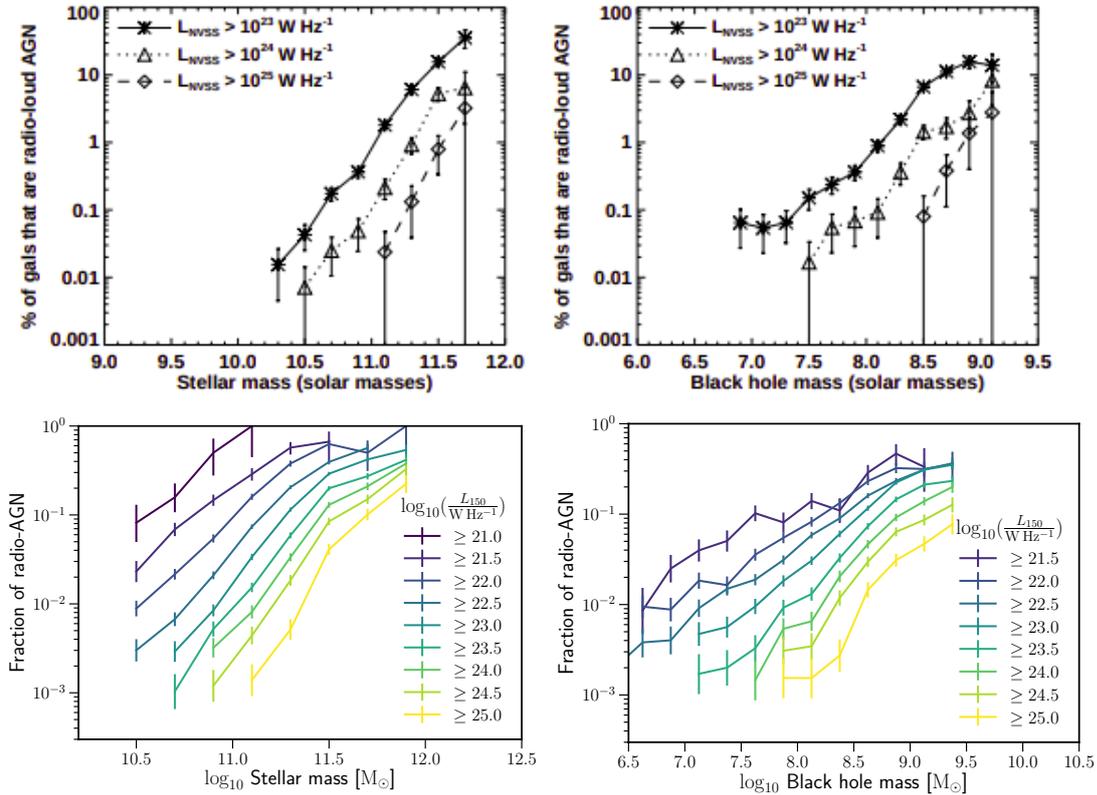


Figura 1.6: Painéis superiores: relação entre a fração de galáxias que hospedam AGNs com alta atividade em rádio observado em 1.4 GHz no levantamento NVSS com a massa estelar (esquerda) e a massa do SMBH (direita) do [Best et al. \(2005\)](#). Painéis inferiores: o mesmo, mas medido em 150 MHz no levantamento LOFAR do [Sabater et al. \(2019\)](#).

simultaneamente. Isso torna possível determinar morfologias e tamanhos angulares de objetos astronômicos, bem como quantificar a intensidade desses objetos em diversas faixas de cor no espectro eletromagnético. A espectroscopia, por sua vez, proporciona informação detalhada sobre a intensidade do objeto para cada comprimento de onda. Através dela é possível calcular a abundância de certos elementos químicos, identificar movimentos internos da fonte astronômica, determinar redshifts, entre outras finalidades.

### 1.3.1 Levantamentos fotométricos no óptico

Em se tratando de busca por objetos astronômicos ainda não identificados, os levantamentos fotométricos possuem importantes vantagens sobre os espectroscópicos, motivo pelo qual são tão comuns. Entre as principais vantagens, estão: a capacidade de observar de centenas a dezenas de milhares de objetos em uma única exposição, a maior razão sinal-ruído (*Signal-to-noise ratio*; SNR) típica, que permite exposições mais curtas<sup>4</sup>, além

<sup>4</sup>A fim de gerar espectros, a luz proveniente do objeto é decomposta em frações muito pequenas de comprimentos de onda. Desta forma, o sinal proveniente do objeto é repartido em diversas porções, o que diminui a SNR. Na fotometria, em contrapartida, o sinal do objeto é integrado em uma faixa significativamente maior do espectro eletromagnético, proporcionando maior SNR.

da disponibilidade de informação sobre distância angular e morfologia, como comentado anteriormente.

A fim de captar informação apenas de uma faixa do espectro, os sistemas fotométricos se utilizam de filtros que bloqueiam o fluxo do restante do espectro. Frequentemente esses sistemas possuem diversos filtros, gerando informação sobre diversas regiões do espectro e fazendo possível a determinação da intensidade das cores das fontes<sup>5</sup>. Uma versão simples desse sistema de filtros foi utilizada por [Johnson & Morgan \(1953\)](#) para, entre outros objetivos, unificar o diagrama de cores de estrelas da sequência principal, incluindo estrelas do tipo A0 e mais azuis. O sistema utilizado por eles consistia de 3 filtros de banda larga: U (cobrindo uma faixa de comprimento de onda no ultravioleta), B (azul) e V (visível). Esse sistema de magnitudes, conhecido como sistema Johnson-Morgan, foi posteriormente estendido com os filtros R (vermelho) e I (infravermelho).

De maneira similar, o *Sloan Digital Sky Survey* (**SDSS**) ([York et al., 2000](#)) utilizou um sistema de filtros  $u'$ ,  $g'$ ,  $r'$ ,  $i'$  e  $z'$  ([Fukugita et al., 1996](#)), e tem suas magnitudes baseadas no sistema AB ([Oke & Gunn, 1983](#)). Esse survey está agora em sua 5ª fase, tendo mapeado mais de 14000 deg<sup>2</sup> no céu do hemisfério norte até magnitude 22.2 na banda  $r'$  e uma resolução de  $\sim 1.4''$  ([Aguado et al., 2019](#)).

A fotometria também pode se utilizar de filtros de banda estreita - cobrindo intervalos poucas centenas de ângstroms - para observar características de emissão galáctica particulares como por exemplo as linhas de [O II] $\lambda$ 3727 e H $\alpha$ . Estes filtros representam, de maneira geral, informação de maior resolução espectral sob o custo de maiores tempos de integração. Levantamentos recentes como o *Southern Photometric Local Universe Survey* (**S-PLUS**) e o *Javalambre Photometric Local Universe Survey* (**J-PLUS**) se utilizam de um sistema misto entre filtros de banda larga e estreita ([Cenarro et al., 2019](#); [Mendes de Oliveira et al., 2019](#)).

A utilização de um sistema de múltiplos filtros permite fazer uma aproximação do redshift dado um modelo espectral da fonte; mais detalhes sobre o processo de obtenção do chamado redshift fotométrico são comentados em 2.1.3. O levantamento planejado *Javalambre-Physics of the Accelerated Universe Astrophysical Survey* (**J-PAS**) apresenta um sistema de 54 filtros de banda estreita, cujas magnitudes podem ser tratadas como um espectro de baixa resolução (J-Specs) ([Benitez et al., 2014](#)). Naturalmente, devido ao grande número de magnitudes associadas a cada fonte, esse levantamento dará um significativo salto na precisão dos redshifts fotométricos, como apresentado recentemente no caso do levantamento precursor do JPAS, chamado "miniJPAS" ([Bonoli et al., 2020](#)).

Apesar de todas essas finalidades da fotometria, a espectroscopia ainda é indispensável na determinação de características de emissão e dos redshifts reais dos objetos. Esta década verá a realização de vários levantamentos espectroscópicos massivos, como o Subaru

---

<sup>5</sup>Definida como a subtração entre as magnitudes em dois filtros adjacentes, com relação ao intervalo de comprimento de onda.

Prime Focus Spectrograph Survey ([Takada et al., 2014](#)).

### 1.3.2 Levantamentos em rádio

Devido a suas baixas sensibilidades para fótons menos energéticos, os **CCDs**<sup>6</sup> não são os instrumentos adequados para a observação em rádio. Para tal tarefa, é utilizado um conjunto antena-receptor capaz de captar fluxo de rádio em diferentes frequências, dependendo da configuração do rádio telescópio. O telescópio pode, além disso, dispor de um conjunto de grandes antenas e, assim, obter melhor SNR e melhor resolução angular através da técnica de interferometria ([Thompson et al., 1986](#)).

Historicamente, os levantamentos em rádio mostram um grande desbalanço entre cobertura do céu e limite de fluxo/resolução. Levantamentos como o NRAO VLA Sky Survey (NVSS) ([Condon et al., 1998](#)) e o Faint Images of the Radio Sky at Twenty Centimeters (FIRST) ([Becker et al., 1995](#)) cobrem dezenas de milhares de graus quadrados no céu e contém centenas de milhares de fontes de rádio, a maior parte sendo radiogaláxias e radioquasares a altos redshifts (até  $z \sim 6$ ) com alguma contribuição de galáxias com formação estelar (star-Forming galaxies; SFG) e AGN menos luminosos ([Overzier et al., 2003](#)). Todavia, esses levantamentos possuem resolução limitante para grande número de objetivos científicos e baixas profundidades (da ordem de 1–10 de mJy) que dificultam os estudos em alto redshift ou baixa luminosidade.

Por outro lado, surveys como o *Phoenix Deep Survey* (PDS) ([Hopkins et al., 2003](#)) e o *Bootes Deep Field* ([Wilman et al., 2003](#)), com limite de fluxo de 60–200  $\mu$ Jy, tipicamente não cobrem porções maiores que algumas dezenas de graus quadrados no céu. Apenas recentemente surveys como os organizados por [Hodge et al. \(2011\)](#) em 1.4 GHz e [Heywood et al. \(2016\)](#) em 1-2GHz conseguiram atingir um limite de fluxo em torno de dezenas de  $\mu$ Jy em uma área de  $\approx 100$  graus quadrados, abrindo caminho para estudos populacionais mais completos em uma maior faixa de redshifts.

A combinação de levantamentos ópticos e em rádio é crucial para estudar a evolução da população dos radio AGNs, em primeiro lugar porque os dados de rádio não fornecem nenhuma informação direta sobre os redshifts ou as propriedades físicas das galáxias hospedeiras que coincidem com as fontes de rádio detectadas.

## 1.4 Motivação científica e objetivos desta dissertação

Os levantamentos S-PLUS e J-PLUS, quando combinados, irão cobrir cerca de 20000 deg<sup>2</sup> no céu em 12 bandas, algo sem precedentes na história da fotometria. Estes dados terão importância crucial para uma gama de objetivos ([Cenarro et al., 2019](#); [Mendes de Oliveira et al., 2019](#)). Graças à sobreposição de grandes levantamentos no rádio (NVSS

---

<sup>6</sup>**Charge-Coupled Device:** captador utilizado em telescópios ópticos-infravermelhos.

e FIRST) e óptico (SDSS), a maioria dos trabalhos na identificação de rádio AGNs até hoje se concentrou no hemisfério norte. No hemisfério sul, espera-se, portanto, que o levantamento S-PLUS possa dar uma contribuição particularmente forte para este estudo, comparando-o com levantamentos de rádio existentes ou futuros no sul.

Esta tese apresenta um projeto piloto usando o primeiro lançamento de dados significativo disponível no início deste projeto: o Data Release 1 (DR1) do S-PLUS na região Stripe82 (Mendes de Oliveira *et al.*, 2019). Embora esta região equatorial também seja coberta pelo levantamento SDSS, é uma área excelente para testar os métodos que desejamos empregar no levantamento S-PLUS completo, incluindo os muitos milhares de graus quadrados que ainda não têm cobertura ou apresentam cobertura incompleta no óptico.

A região Stripe82 do SDSS também se beneficia de análises anteriores das contrapartidas ópticas de fontes de rádio. Por exemplo, utilizando os levantamentos no rádio realizados por Hodge *et al.* (2011) e Heywood *et al.* (2016), junto os dados do SDSS, Prescott *et al.* (2018) foram capazes de identificar 4975 fontes de rádio com suas galáxias hospedeiras dentre as quais 2799 não possuíam redshift espectroscópico. Foram encontradas 3 novas radiogaláxias gigantes (**GRGs**; *Giant Radio Galaxies*). Para galáxias com  $z \leq 0.85$ , 1178 foram identificadas como AGNs e 340 como *star-forming galaxies* (SFGs) utilizando os métodos de classificação do Best & Heckman (2012). Também utilizando os espectros do SDSS, foram capazes de dividir as fontes entre 57 HERGs e 1121 LERGs.

A partir desses dados, Whittam *et al.* (2018) observaram que HERGs tendem a ter taxas de acreção mais altas do que LERGs, como previsto na literatura, porém com maior sobreposição entre as duas classes e que galáxias com menores taxas de acreção são mais massivas e possuem população estelar mais velha. Em 84% da amostra, ao menos 10% do feedback galáctico se dava através de jatos, demonstrando que simulações hidrodinâmicas tendem a subestimar o feedback mecânico.

Em nosso trabalho, também utilizamos o levantamento no rádio realizado por Hodge *et al.* (2011) para construir um catálogo de fontes do S-PLUS emissoras em rádio contendo: posições e magnitudes das fontes ópticas, posições dos componentes em rádio relacionados, fluxo, taxa de formação estelar/luminosidade de AGN e morfologia da fonte de rádio. A partir disso, o projeto visou identificar novos objetos que não tinham um redshift espectroscópico pelo SDSS. Para essas fontes, utilizamos os redshifts fotométricos do S-PLUS no intuito de estimar as luminosidades em rádio e outras propriedades das fontes.

Nosso objetivo seguinte foi encontrar bons candidatos a rádio quasares e radiogaláxias por métodos independentes de espectroscopia. Com a classificação morfológica das fontes de rádio, construímos subamostras de candidatos a SFGs, radiogaláxias FR1/FR2, e rádio quasares, resultando em um Value-Added Catalog (VAC) associado com os próximos data releases (internos e públicos) do S-PLUS. No futuro, este VAC poderá ser cruzado com outros VACs do S-PLUS, como o catálogo de aglomerados de galáxias (tese de mestrado da S. Werner; IAG/USP 2019), o catálogo de quasares ópticos (tese de doutorado da

L. Nakazono; IAG/USP 2020), e um novo catálogo de redshifts fotométricos (tese de mestrado da M. Buzzo; IAG/USP 2020) para estudar o papel de rádio AGNs na evolução de galáxias e seus ambientes. O código criado para a identificação das fontes também ficará disponível e poderá ser adaptado futuramente para o uso de outros catálogos de fontes de rádio, para ser estendido para maiores áreas do S-PLUS e até mesmo para a utilização em outros levantamentos.

Esta dissertação está organizada da seguinte forma. O capítulo 2 descreve detalhadamente os dados ópticos, no rádio e no infravermelho utilizados em nosso estudo, bem como o pré-processamento realizado a fim de preparar a amostra para o processo de identificação. O capítulo 3 se dedica à construção do código de identificação e correlação, à seleção dos candidatos a AGNs e à obtenção de propriedades como luminosidade em rádio, taxa de formação estelar, entre outros. O capítulo 4 trata da aplicação dos métodos de identificação de fontes e apresenta os candidatos a AGNs descobertos. Por fim, o capítulo 5 recapitula as principais conclusões de nosso processo e expressa as expectativas para os futuros *data releases* do S-PLUS.

# Capítulo 2

## Dados

### 2.1 O levantamento S-PLUS

O projeto S-PLUS<sup>1</sup> consiste em um levantamento do céu em 12 bandas ópticas que iniciou suas operações 2016 (Mendes de Oliveira *et al.*, 2019). Em 2019 o projeto apresentou seus primeiros dados públicos cobrindo uma área de 300 deg<sup>2</sup> na região do equador terrestre conhecida como Stripe82 e agora se encaminha para seu terceiro *data release*. Quando completo, o levantamento pretende cobrir 9300 deg<sup>2</sup> do céu no hemisfério sul.

O projeto funciona em um esquema de consórcio entre instituições científicas no Brasil e no Chile (onde está situado o telescópio) e é financiado pela parceria entre a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), Observatório Nacional, Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) e a Universidade Federal de Sergipe (UFS), além de contribuições internacionais da Universidade de La Serena e do CEFCA. Este consórcio possui ainda um programa de colaboração externa através do qual cientistas de todo o mundo podem dispor de tempo de telescópio.

O levantamento é dividido em 5 sub-levantamentos, visando expandir a utilidade do programa para os diversos interesses científicos da comunidade. São eles:

- **O levantamento principal (*Main Survey*; MS):** Cobrindo 8000 deg<sup>2</sup> com observações se período único por campo e por filtro em condições fotométricas e *seeing* entre 0.8" e 2.0". A estratégia do MS é similar à do J-PLUS e é esperado que ambos os levantamentos possam ser combinados futuramente para projetos científicos extragalácticos cobrindo até 16000 deg<sup>2</sup> no céu.
- **O levantamento curto (*Short Survey*; SS):** O SS pretende cobrir a mesma área do MS porém com 1/12 do tempo de exposição, resultando em limites de saturação mais baixos. Este levantamento foca na procura de estrelas de baixa metalicidade.

---

<sup>1</sup><http://www.splus.iag.usp.br/>

- **O levantamento de campos de variabilidade (*Variability Fields Survey*; VFS):** O VFS visa realizar observações repetidas sobre alguns campos já observados pelo MS com o intuito de acompanhar eventos de variabilidade como asteróides, supernovas e blazares.
- **O levantamento galáctico (*Galactic Survey*; GS):** Cobrindo uma região de  $1420 \text{ deg}^2$  no plano galáctico, incluindo regiões do bojo e do disco. Este levantamento visa viabilizar o estudo de estrelas variáveis e de aglomerados estelares abertos.
- **O levantamento dos campos *mármore*s (*Marble Field Survey*; MFS):** O MFS visa observar campos selecionados específicos com a maior frequência possível quando o *seeing* for alto demais para a realização do MS. Alguns dos objetos de interesse são: a galáxia M83, a pequena nuvem de Magalhães, o aglomerado Hydra, entre outros.

Para o presente trabalho utilizamos as imagens de detecção e o *master catalog* do primeiro e segundo *data release* do S-PLUS, obtidos a partir do levantamento principal.

### 2.1.1 Instrumento e sistema de filtros

O levantamento é observado através do telescópio T80-South (T80S) situado em *Cerro Tololo*, Chile. O T80S possui uma abertura de 0.8 m e foi otimizado para operar roboticamente. O T80S é equipado com uma câmera com resolução de  $0.55''/\text{pixel}$  e campo de visão de  $1.4 \times 1.4 \text{ deg}^2$ .

Os 12 filtros fotométricos do S-PLUS são distribuídos entre 5 filtros de banda larga e 7 filtros de banda estreita, mostrados na figura 2.1. Os filtros de banda estreita (J0378, J0395, J0410, J430, J0515, J0660 e J0861) foram projetados com o intuito principal de identificar absorções e contínuos em emissões estelares, sendo centrados em linhas de interesse para estrelas e galáxias próximas como as de [OII],  $H\alpha$ , entre outras. Dentre os filtros de banda larga (uJAVA, gSDSS, rSDSS, iSDSS e zSDSS), as bandas  $g$ ,  $r$ ,  $i$  e  $z$  são similares àqueles do SDSS enquanto a banda  $u$  possui uma transmissão mais eficiente do que a do SDSS. Uma descrição mais detalhada para este sistema de filtros pode ser encontrada em [Cenarro et al. \(2019\)](#).

### 2.1.2 Qualidade dos dados

As imagens de detecção<sup>2</sup> foram utilizadas para estimar o *seeing*, quantificado pela variação de largura à meia altura (*Full Width at Half Maximum*; FWHM) das fontes pontuais nos campos do S-PLUS. Para cada campo, selecionamos objetos insaturados relativamente

<sup>2</sup>As imagens de detecção são uma combinação das imagens nos filtros  $g$ ,  $r$ ,  $i$  e  $z$  que melhora a detecção e determinação das formas das fontes.

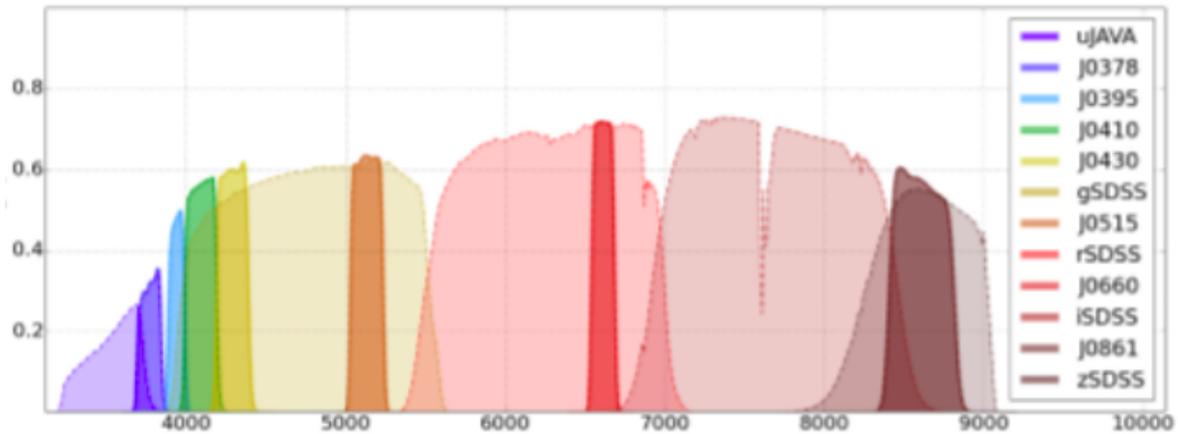


Figura 2.1: Esquema de 12 filtros do S-PLUS. Crédito da imagem: [Mendes de Oliveira et al. \(2019\)](#).

brilhantes ( $12 < r < 17$  mag) e determinamos seu FWHM mediano para obter uma medida do *seeing* durante as observações desse campo. O resultado é apresentado na figura 2.2. O *seeing* médio sobre a região de Stripe82 foi de cerca de  $1''.3$  (linha pontilhada) com um valor máximo de  $2''.5$ .

A profundidade fotométrica do catálogo foi calculada utilizando as observações realizadas nos  $300 \text{ deg}^2$  da região conhecida como Stripe82, disponível no primeiro *data release* do levantamento. Para tanto, foram utilizadas cinco parâmetros de magnitudes diferentes para a detecção de fontes em um dado filtro, com  $\text{SNR} \geq 3$ . A tabela 2.1 mostra a profundidade fotométrica estimada pelo método supracitado.  $m_{peak}$  representa a magnitude petrosiana (total) na qual as detecções começam a decair rapidamente ([Petrosian, 1976](#)).  $m_{50\%}$ ,  $m_{80\%}$  e  $m_{95\%}$  representam, respectivamente, as magnitudes onde 50%, 80% e 95% das fontes detectadas estão incluídas.  $m_{3arcs}$  corresponde à magnitude integrada em uma abertura fixa de  $3''$  de diâmetro. Espera-se que as imagens do S-PLUS estejam completas até magnitudes  $g \approx 21.62$  e  $r \approx 21.38$  para todos os objetos, pontuais e extensos, com  $\text{SNR} \geq 3$ .

A figura 2.3 compara o S-PLUS com outros levantamentos fotométricos no que diz respeito a cobertura no céu, número de filtros e profundidade fotométrica. Apesar de não alcançar profundidades extraordinárias, o levantamento cobre uma área acima da média e em uma gama de filtros inédita até o início de suas operações.

### 2.1.3 Obtenção dos redshifts fotométricos

Os redshifts fotométricos do DR1 foram estimados utilizando o código **BPZ2** (*Bayesian Photometric redshift*) ([Benítez, 2000](#)) que utiliza a técnica de ajuste de modelos espectrais a partir de uma biblioteca de espectros contendo 5 galáxias *early-type* e 9 do tipo *late-type*. Este método se baseia na relação entre cores e redshifts para modelos espec-

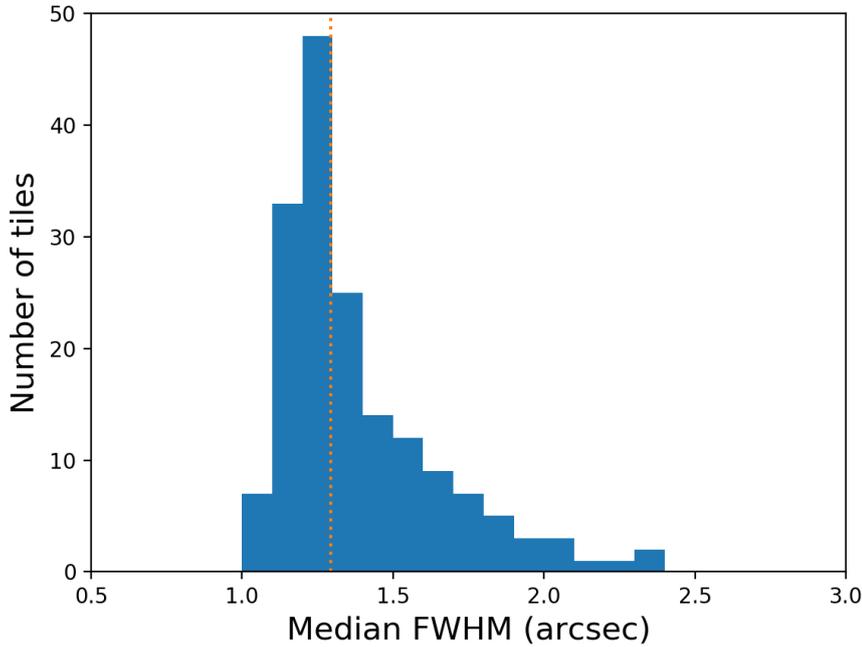


Figura 2.2: A distribuição do FWHM média nos campos ("tiles") observados no S-PLUS DR1 no Stripe82. O seeing média é de  $1''.3$  (linha pontilhada) com um valor máximo de  $2''.5$ .

trais. Dado um conjunto de cores para um modelo  $C$  em um certo redshift  $z$ , define-se a relação  $C = C(z)$ . Ao se utilizar uma diversidade de modelos em diferentes redshifts, é possível definir a função discreta  $C_m = C_m(z)$  onde  $C_m$  representa os conjuntos de cores dos modelos. Através da interpolação e da extrapolação da função acima, o método é capaz de gerar um espaço de cores que representam as soluções possíveis. A partir disto, o redshift fotométrico (photo- $z$ ) para um objeto observado com cores  $C'$  é aquele que melhor aproxima a função  $C' = C_m(z)$ . Esta aproximação é feita a partir da estimativa por máxima verossimilhança entre os dados (D) e o modelo (T) utilizando a função 2.1 onde  $p(z|D, m_0)$  representa a distribuição *a posteriori* (PDF),  $p(z, T|m_0)$  a verossimilhança,  $p(D|z, T)$  a distribuição *a priori* e  $m_0$  a magnitude aparente da galáxia.

$$p(z|D, m_0) \propto p(z, T|m_0) \times p(D|z, T) \quad (2.1)$$

A fim de testar esse método para o levantamento, [Molino et al. \(2020\)](#) compilaram um catálogo de  $\approx 100.000$  galáxias espectroscopicamente confirmadas até  $z = 1$  para comparar com os redshifts fotométricos obtidos. As precisões obtidas foram de  $\sigma_z < 0.8\%$ ,  $\sigma_z < 2.0\%$  e  $\sigma_z < 3.0\%$  para as magnitudes  $r < 17$ ,  $r < 19$  e  $r < 21$ , respectivamente. A figura 2.4 mostra a distribuição de redshifts obtidos através deste método para as fontes do DR1.

Filter	$m_{peak}$	$m_{50\%}$	$m_{80\%}$	$m_{95\%}$	$m_{3arcs}$
u	21.07	22.10	23.11	24.12	22.56
J0378	20.64	21.83	22.86	23.88	22.27
J0395	20.11	21.47	22.52	23.65	21.87
J0410	20.30	21.53	22.57	23.67	21.94
J0430	20.38	21.54	22.59	23.67	21.94
g	21.79	21.88	22.85	23.88	22.16
J0515	20.61	21.33	22.42	23.53	21.64
r	21.63	21.12	22.07	22.88	21.32
J0660	21.36	21.02	21.98	22.93	21.12
i	21.22	20.54	21.41	22.07	20.72
J0861	20.32	20.23	21.29	22.36	20.39
z	20.64	20.27	21.05	21.77	20.37

Tabela 2.1: Profundidades fotométricas em S-PLUS como determinadas em [Mendes de Oliveira et al. \(2019\)](#).

### 2.1.4 Campos e disponibilidade dos dados

O catálogo principal (*Master Catalogue*; MC) do S-PLUS compila posições, redshifts fotométricos automáticos (método discutido profundamente em [Molino et al. \(2020\)](#)), magnitudes, FWHM, entre outros parâmetros das fontes observadas. O MC apenas inclui fontes com  $\text{SNR} > 3$  e sob um corte de magnitude em  $r_{aper} = 21^3$ . Fazem parte dos dados do S-PLUS: imagens em múltiplos filtros, catálogos fotométricos e VACs produzidos pelo nosso consórcio. Estes dados, juntamente com notícias sobre o levantamento, teses defendidas e publicações relacionadas, ficam disponíveis na página oficial do projeto<sup>4</sup>.

No presente trabalho, utilizamos a cobertura fotométrica da região do Stripe82, referente à primeira fase de observações do MS do S-PLUS. A região foi coberta em 170 campos. Foram identificadas  $\approx 3$  milhões de fontes das quais 2/3 foram classificadas como pontuais e 1/3 como extensas. A densidade de fontes através da região está presente na figura 2.5. A sobredensidade na extremidade esquerda da imagem corresponde à região do plano galáctico, onde a incidência de estrelas é maior. É possível notar também uma sobredensidade ao longo de  $\delta \approx 0^\circ$  onde os campos das observações se sobrepõe, fazendo com que uma fração das fontes fosse observada múltiplas vezes. A sobredensidade em  $\alpha \approx -37^\circ$  e  $\delta \approx -1^\circ$  é devido ao aglomerado globular M2.

### 2.1.5 Ressalvas

Durante a execução deste projeto de mestrado, melhorias significativas foram feitas na redução dos dados, na fotometria e calibração fotométrica, e na determinação de redshifts fotométricos que irão superar a qualidade dos produtos de dados lançados como parte do

<sup>3</sup> $r_{aper}$  se refere à magnitude na banda r calculada com uma abertura fixa de  $3''$

<sup>4</sup><http://www.splus.iag.usp.br>

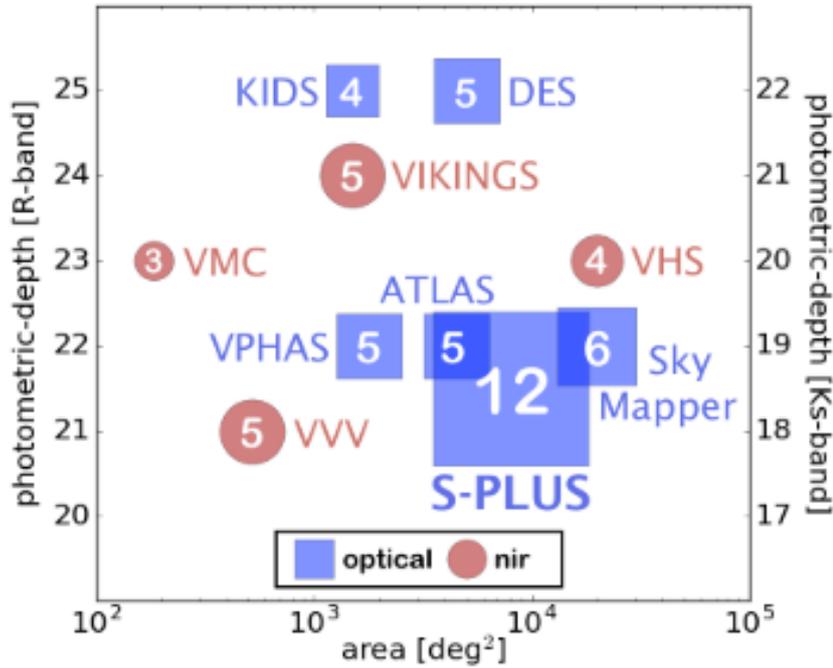


Figura 2.3: Levantamentos fotométricos recentes comparados por profundidade, área e número de filtros. A área dos círculos e quadrados demarcados é proporcional ao número de filtros. O S-PLUS representa uma combinação única de profundidade, filtros e área. Crédito da imagem: [Mendes de Oliveira et al. \(2019\)](#).

DR1. A divulgação oficial do segundo *data release* (DR2) está prevista para o primeiro semestre de 2021. A colaboração já tem acesso ao terceiro *data release* interno ("iDR3") que representa  $\sim 25\%$  do levantamento final processado com alta qualidade. Embora alguns destes produtos aprimorados já estejam disponíveis informalmente na colaboração, outros ainda estão em preparação. Para que isso não interrompa o fluxo desta dissertação, decidimos aceitar as ressalvas e trabalhar com os dados do DR1 tanto quanto possível, a menos que especificado de outra forma.

Um mapa recente da área planejada pelo S-PLUS (em vermelho) e da área já observada (em verde) que fazem parte do MS do DR3 interno é mostrado na figura 2.6. A região do Stripe82 utilizada nesta dissertação consiste na faixa verde contínua ao longo do equador. A imagem de fundo mostra as densidades estelares como medidas recentemente pelo satélite *Gaia*.

## 2.2 Os catálogos SDSS

Em operação desde 1998, o SDSS se encontra atualmente em seu décimo sexto *data release* ([Ahumada et al., 2020](#)), tendo mapeado, até o momento, mais de  $14000 \text{ deg}^2$  do céu com profundidade fotométrica de  $r' = 22.2 \text{ mag}$  em todo o survey e  $r' = 24.6 \text{ mag}$  na região do Stripe82 ([Jiang et al., 2014](#)). Constam em seus catálogos fotométricos mais de 400 milhões de fontes ([Ahn et al., 2012](#)) e, portanto, uma seleção mais eficiente das fontes

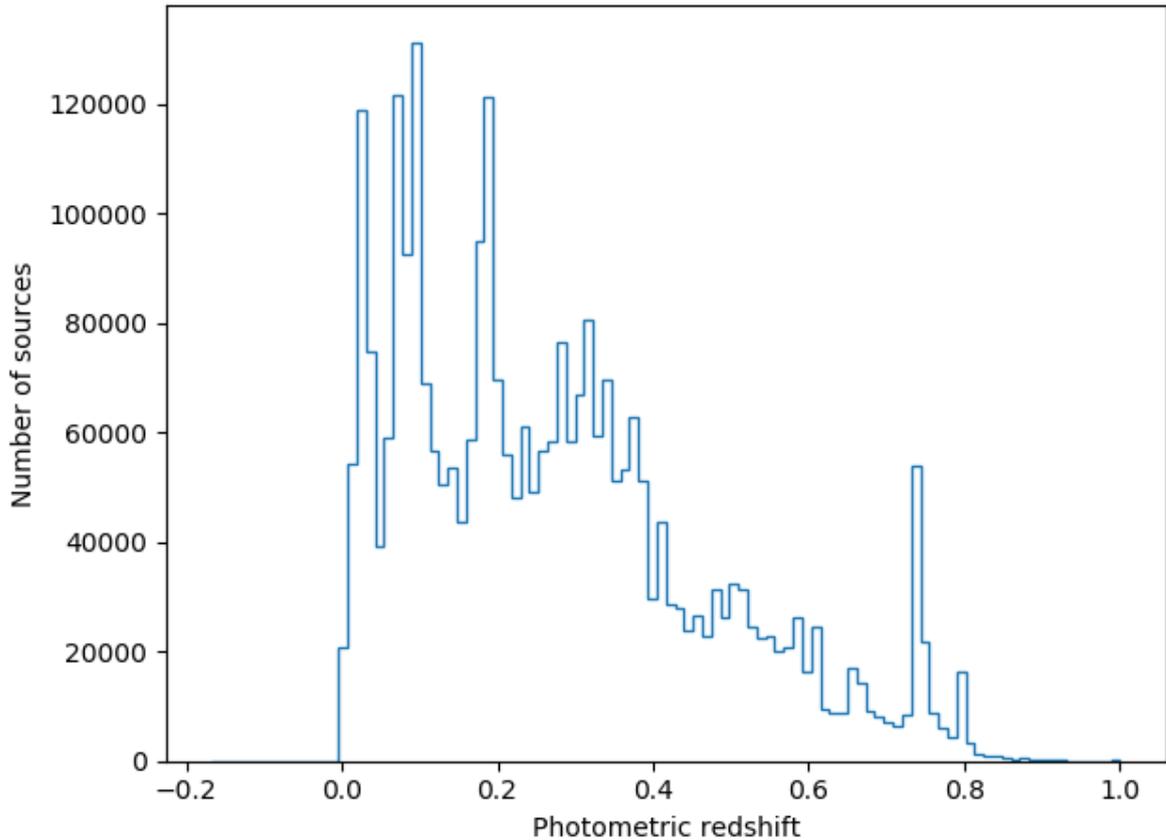


Figura 2.4: A distribuição de redshifts fotométricos em S-PLUS na região de Stripe82.

pode ser realizada através de consultas na base de dados do SDSS.

Neste trabalho, utilizamos o *Catalog Archive Server* (CAS)<sup>5</sup> para obter catálogos contendo redshifts fotométricos e espectroscópicos na área do Stripe82.

### 2.2.1 Catálogo de Quasares

Através da análise dos espectros do SDSS, [Pâris et al. \(2018\)](#) foram capazes selecionar candidatos a quasares que posteriormente foram confirmados através de um método misto. Para o processamento automático, a redução do espectro é realizada utilizando os métodos presentes em [Bolton et al. \(2012\)](#) através do ajuste de modelos espectrais para estrelas, galáxias e quasares em variados redshifts. Os 5 ajustes com menores  $\chi^2$  são comparados em termos de suas classificações (estrela, galáxia ou quasar) e pela bandeira *ZWARNING*<sup>6</sup>. Se o método utilizado para essa classificação não apresentar resultado de acordo com as condições discutidas no artigo, o espectro é selecionado para inspeção visual. Os métodos empregados nessa inspeção visual são comentados em [Pâris et al. \(2012\)](#).

Em seu décimo quarto *data release*, o catálogo de quasares do SDSS conta com mais

<sup>5</sup><http://skyserver.sdss.org/CasJobs>

<sup>6</sup>sendo *ZWARNING* = 0 a bandeira correspondente a um redshift estimado com melhor qualidade.

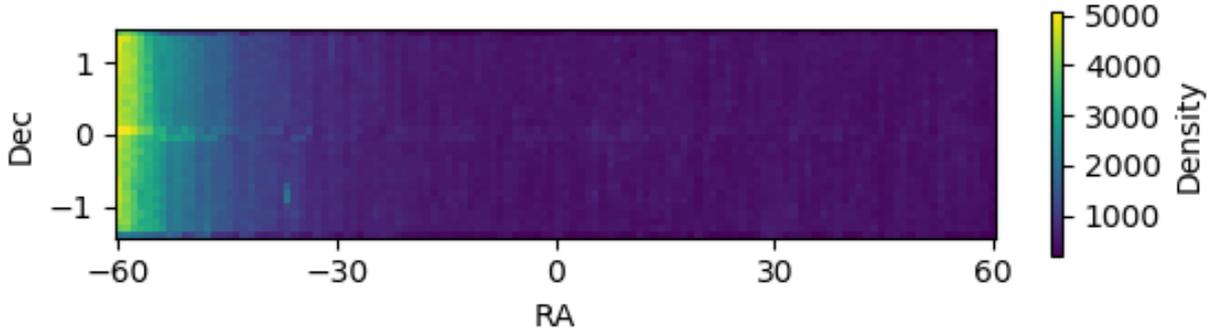


Figura 2.5: Mapa de densidade de fontes na área do S-PLUS. Para efeitos de visualização, o gráfico foi arrumado tal que a posição de  $RA = 360^\circ$  correspondesse a  $0^\circ$ . É possível notar uma sobredensidade ao longo de  $Dec \approx 0^\circ$ , região onde os campos das observações se sobrepõem, fazendo com que uma fração das fontes fosse observada múltiplas vezes. A sobredensidade em  $RA \approx -37^\circ$  e  $Dec \approx -1^\circ$  é devido ao aglomerado globular M2.

de 500 mil objetos identificados em  $\approx 9400 \text{ deg}^2$  da área do levantamento. Este catálogo foi utilizado no presente trabalho a fim de identificar quasares já espectroscopicamente confirmados na área do S-PLUS, bem como obter seus redshifts. A figura 2.7 mostra as distribuições de redshifts espectroscópicos e de magnitudes na banda  $r'$  dos quasares do SDSS no DR14.

A figura 2.8 mostra uma comparação<sup>7</sup> entre os redshifts fotométricos determinados usando os dados do S-PLUS e os redshifts espectroscópicos em SDSS para todos os quasares confirmados na Stripe82 até  $r < 19 \text{ mag}$ .

## 2.3 O catálogo do rádio

No que diz respeito aos dados em rádio que serão a base das identificações que pretendemos realizar, decidimos por utilizar o levantamento em rádio conduzido por [Hodge et al. \(2011\)](#) em 1.4 GHz com o *Very Large Array* (VLA). Este levantamento possui resolução angular de  $1''.8$  e alcança valor eficaz (*root mean square*; rms) de ruído típico de  $52 \mu\text{Jy beam}^{-1}$ , cobrindo uma área de  $92 \text{ deg}^2$  na Stripe82. Ambas a resolução e a sensibilidade são melhores do que as dos levantamentos NVSS e FIRST, também conduzidos em 1.4 GHz com o VLA.

Os catálogos foram extraídos das imagens utilizando o código HAPPY ([White et al., 1997](#)) que define "ilhas" de *pixels* a partir de um limite definido pelo usuário. O HAPPY também necessita um limite de ruído que foi escolhido como cinco vezes o rms das imagens ( $250 \mu\text{Jy beam}^{-1}$ ). O catálogo resultante deste processo conta com 17969 componentes separados e densidade média de  $\approx 195$  fontes por  $\text{deg}^2$ . As figuras 2.9 e 2.10 mostram,

<sup>7</sup>Os redshifts fotométricos do S-PLUS DR1 que foram usados na maior parte desta tese ainda não incluíam templates de quasares. A comparação mostrada na figura 2.8 foi feita a partir dos dados do iDR3 (R. Overzier, comunicação privada e Buzzo et al. em preparação).

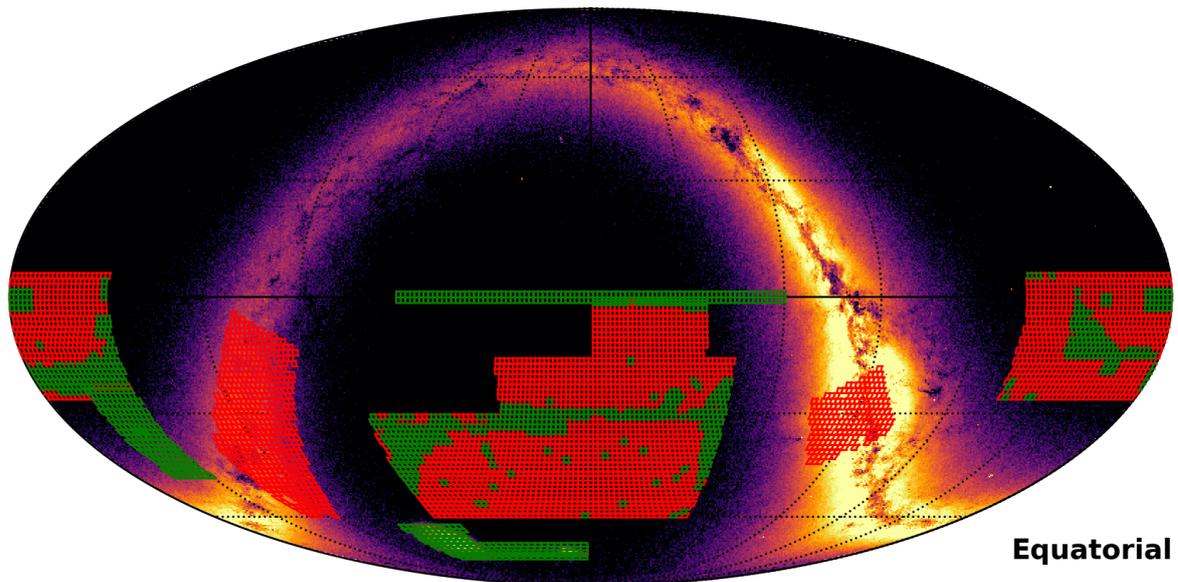


Figura 2.6: A área coberta pelo levantamento S-PLUS. As marcações em vermelho representam os campos a serem observados e as marcações em verde representam os campos observados até o final de 2020. A região em verde ao longo do equador é o Stripe82. Crédito da imagem: R. Overzier e ESA/Gaia/DPAC.

respectivamente, a distribuição dos fluxos de fontes e o mapa de densidade de fontes no Stripe82.

Entre as informações disponíveis no catálogo estão a ascensão reta (*Right Ascension; RA*) e a declinação (*Declination; Dec*), o pico de fluxo (*Peak flux;  $F_{peak}$* ) em  $\text{mJy beam}^{-1}$ <sup>8</sup> e o fluxo integrado (*integrated flux;  $F_{int}$* ) em mJy, integrado sobre o ajuste gaussiano elíptico da fonte. Também estão presentes no catálogo o RMS na posição de cada fonte, além de valores para eixo maior e eixo menor baseados no FWHM da fonte.

O levantamento disponibiliza recortes das imagens das fontes em quadrados de até  $30 \times 30$ <sup>9</sup>. O catálogo e as imagens deste levantamento foram utilizados no auxílio da identificação e inspeção de fontes de rádio em S-PLUS.

## 2.4 O catálogo infravermelho

Em uma etapa posterior à identificação e categorização das fontes do S-PLUS emissores em rádio, aplicamos critérios para definir novos candidatos utilizando diversos critérios fotométricos; entre eles, a relação rádio-infravermelho, descrita na seção 3.3.3. Para tanto,

<sup>8</sup>Derivado através do ajuste de um modelo gaussiano elíptico para o perfil de fluxo da fonte.

<sup>9</sup><https://third.ucllnl.org/cgi-bin/stripe82cutout>

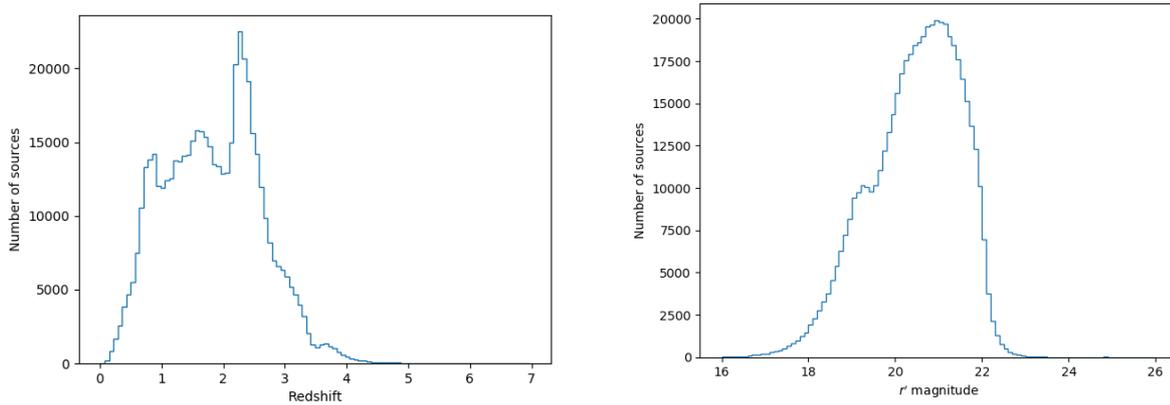


Figura 2.7: Painel da esquerda: a distribuição de redshifts espectroscópicos do catálogo de quasares do SDSS. Painel da direita: a distribuição de magnitudes na banda  $r'$  dos quasares do SDSS de [Pâris et al. \(2018\)](#).

utilizamos os dados em infravermelho distante obtidos pelo *Herschel Stripe82 Survey* (HERS) ([Viero et al., 2014](#)).

Este levantamento foi realizado pelo instrumento *Spectral and Photometric Imaging Receiver* (SPIRE), a bordo do observatório espacial Herschel. Foram observados 79 deg<sup>2</sup> da Stripe82 em 250, 300 e 500  $\mu\text{m}$  com profundidades médias de, respectivamente, 13.0, 12.9 e 14.8 mJy/beam. O catálogo produzido pelo levantamento possui  $3.3 \times 10^4$  fontes detectadas com  $\text{SNR} \geq 3$ . A imagem [2.11](#) mostra a área total mapeada ([Viero et al., 2014](#)).

Para este trabalho, obtivemos o catálogo das fontes em infravermelho distante a partir de sua página virtual<sup>10</sup>.

<sup>10</sup>[https://sites.astro.caltech.edu/hers/HerS\\_Home.html](https://sites.astro.caltech.edu/hers/HerS_Home.html)

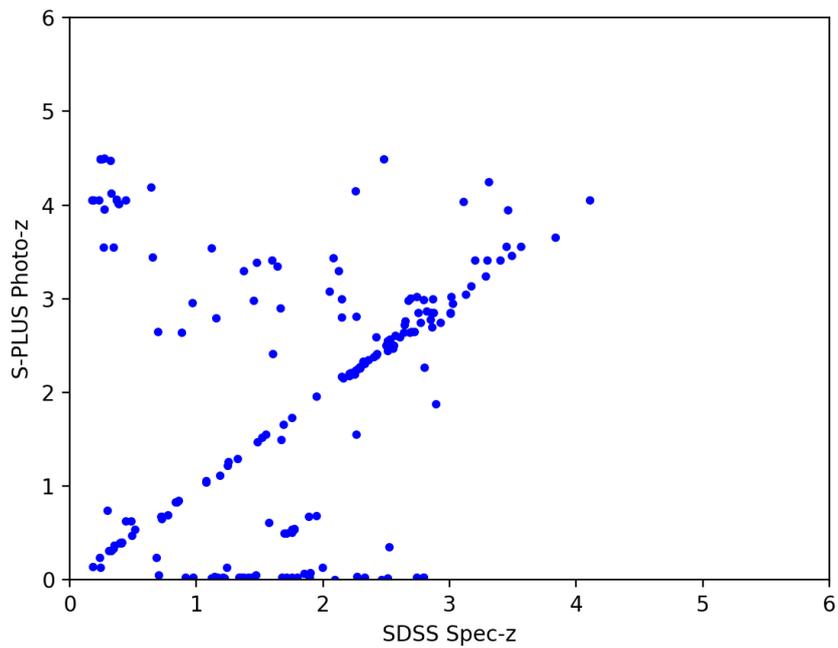


Figura 2.8: A comparação entre os redshifts fotométricos em S-PLUS, obtidos através do método implementado no *iDR3*, e os redshifts espectroscópicos em SDSS para quasares confirmados na Stripe82.

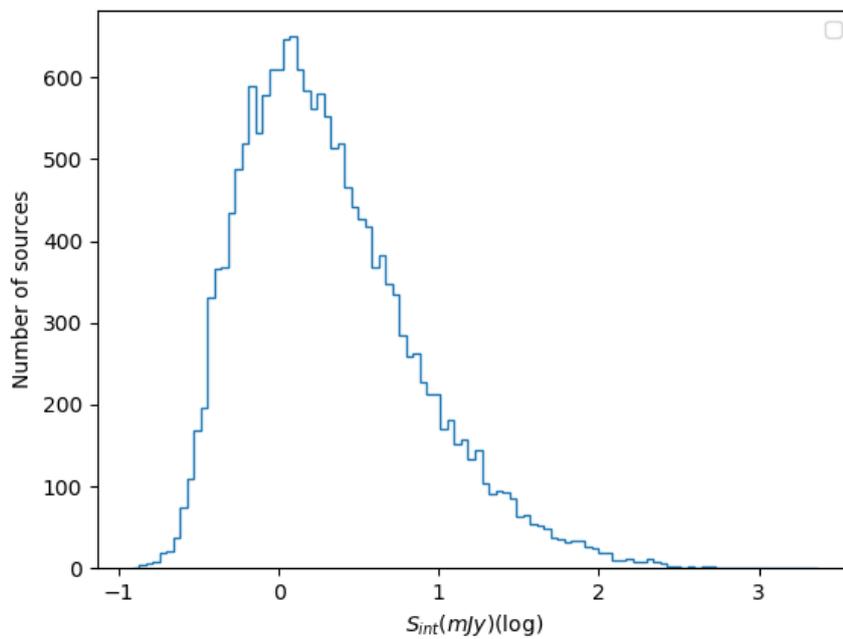


Figura 2.9: A distribuição de fluxos dos objetos em 1.4 GHz na área do Stripe82 encontrados no catálogo do [Hodge et al. \(2011\)](#).

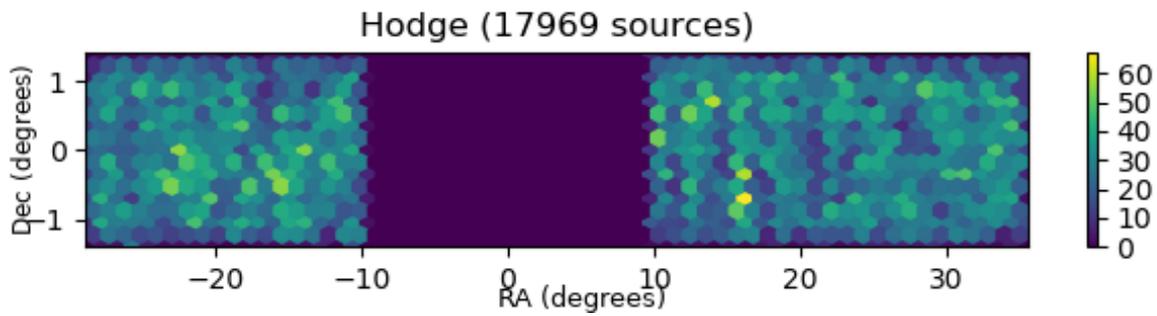


Figura 2.10: Densidade de fontes em 1.4 GHz na área do Stripe82 encontrados no catálogo do [Hodge et al. \(2011\)](#).

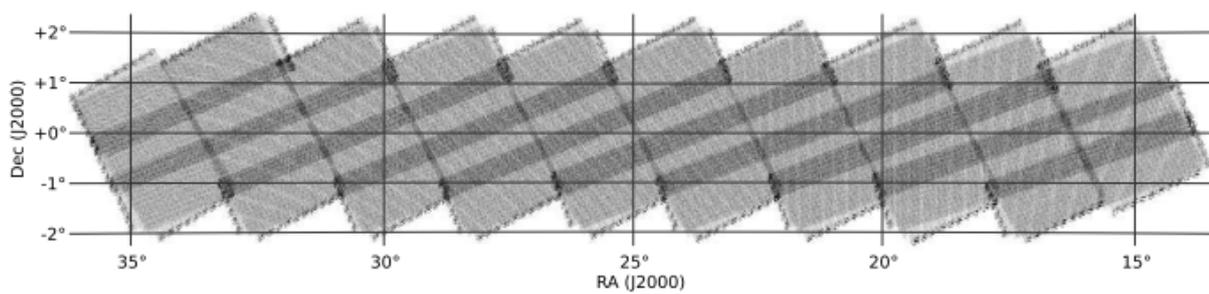


Figura 2.11: A área coberta pelo HERS na observação em 350  $\mu\text{m}$ . A maioria da área foi coberta em duas observações e as faixas em cinza escuro foram cobertas em três observações. ([Viero et al., 2014](#)).

# Capítulo 3

## Metodologia

Seguindo a apresentação dos dados e do processo de seleção das amostras a serem utilizadas, iremos descrever a metodologia utilizada no trabalho. O projeto é dividido em 3 etapas principais: (i) processo de correlação cruzada entre os catálogos de rádio e óptico, (ii) os critérios de seleção de candidatos a AGNs e (iii) a construção do *VAC*.

A primeira das etapas supracitadas foi baseada na metodologia presente em [Prescott et al. \(2018\)](#) a fim de construir um código para auxiliar a inspeção das fontes de rádio. Também se fez necessária a utilização de um código para a simulação de magnitudes utilizando os filtros do S-PLUS, desenvolvido durante o período de iniciação científica.

### 3.1 O processo de correlação cruzada

A identificação de fontes de rádio às suas galáxias hospedeiras não pode ser resumida à busca de sobreposições espaciais entre objetos nos dois comprimentos de onda. Devido às grandes discrepâncias de resolução entre observações nos diferentes comprimentos de onda (tipicamente, as catálogos no óptico têm maior resolução), um *offset* é esperado entre a posição de um mesmo objeto em rádio e no óptico<sup>1</sup>. Além disso, é comum que múltiplos componentes em rádio estejam relacionados à mesma hospedeira no óptico, uma vez que a radiação nessas duas faixas do espectro podem depender de processos e regimes completamente distintos. Esses fatores apontam para a conclusão de que um processo de correlação completamente automático seria pouco viável e eficiente. Não obstante, uma inspeção visual se faz necessária a fim de decidir sobre a morfologia da fonte de rádio.

Por esses motivos optamos por um processo misto entre correlação automática e inspeção visual. Para tanto, foi necessário subdividir o catálogo de objetos em rádio em duas amostras: objetos compactos isolados e objetos extensos.

---

<sup>1</sup>A posição é determinada pelo centróide do grupo de *pixels* que formam a imagem do objeto, sobre a qual a resolução tem forte influência. Essa discrepância é exacerbada quanto menos compacta for a fonte.

### 3.1.1 Diferenciação entre objetos compactos e extensos em rádio

Para realizar tal seleção, consideramos o critério descrito em [Hodge et al. \(2011\)](#), no qual uma fonte é considerada compacta se a razão entre o fluxo integrado numa gaussiana ajustada sobre a área do objeto ( $S_{int}$ ) e o seu pico de fluxo ( $S_{peak}$ ) é tal que  $S_{int}/S_{peak} \leq 1.1$ ; esta relação é ilustrada na figura 3.1. Além disso, consideramos como fontes isoladas aquelas que tinham uma separação de ao menos 30 segundos de arco para qualquer outra fonte do catálogo. Este critério visa selecionar fontes nas quais a emissão é proveniente de uma área mínima em torno do *beam* da antena, garantindo que são pontuais. Estando essas fontes isoladas de outras do catálogo, podemos ter certeza que as emissões só podem ser proveniente de *radio-loud quasars* ou SFGs.

Através deste método conseguimos selecionar 2548 objetos pontuais e de único componente cujas correlações com contrapartidas ópticas dependem simplesmente de suas posições e, portanto, podem ser identificados automaticamente através de um código. As fontes compactas que possuíam vizinhas próximas foram consideradas compactas não isoladas, podendo pertencer a qualquer categoria de radiogaláxia, e o restante foi rotulado como fontes extensas. As duas últimas categorias foram, ainda, organizadas em ordem decrescente de fluxo a fim de privilegiar a classificação de fontes mais brilhantes.

### 3.1.2 Estratégia e método de correlação

A fim de auxiliar a inspeção visual das fontes de rádio e suas correlações com as fontes ópticas, construímos um programa em *python* chamado *XMATCH* capaz de desempenhar 4 fundamentais funções.

Em primeiro lugar, o código gera, a partir das imagens de detecção do S-PLUS, um catálogo das fontes em cada apontamento utilizando SExtractor ([Bertin & Arnouts, 1996](#)). Este processo visa dar conta de fontes menos brilhantes que possam ter sido perdidas no catálogo principal do levantamento devido a cortes de magnitudes feitas no DR1 do S-PLUS. Em seguida, o catálogo de fontes em rádio é subdividido em listas para cada campo da observação do S-PLUS, permitindo que cada campo seja inspecionado separadamente. O código então, através da posição das fontes de rádio, é capaz de fazer o download das imagens de rádio e, por fim, exibe a interface de inspeção visual para cada uma das fontes de rádio identificadas.

A interface de inspeção visual consiste na imagem óptica centrada na fonte de rádio e na imagem da mesma região em rádio, ambas lado a lado. Todas as fontes presentes nas imagens são numeradas e codificadas por cor, sendo vermelho a cor relacionada aos objetos ópticos e azul para os objetos em rádio. Para auxiliar a inspeção, os contornos das fontes de rádio foram sobrepostas à imagem óptica e as posições de todas as fontes ópticas no campo foram marcadas com cruces na imagem em rádio, como pode ser observado na figura 3.2.

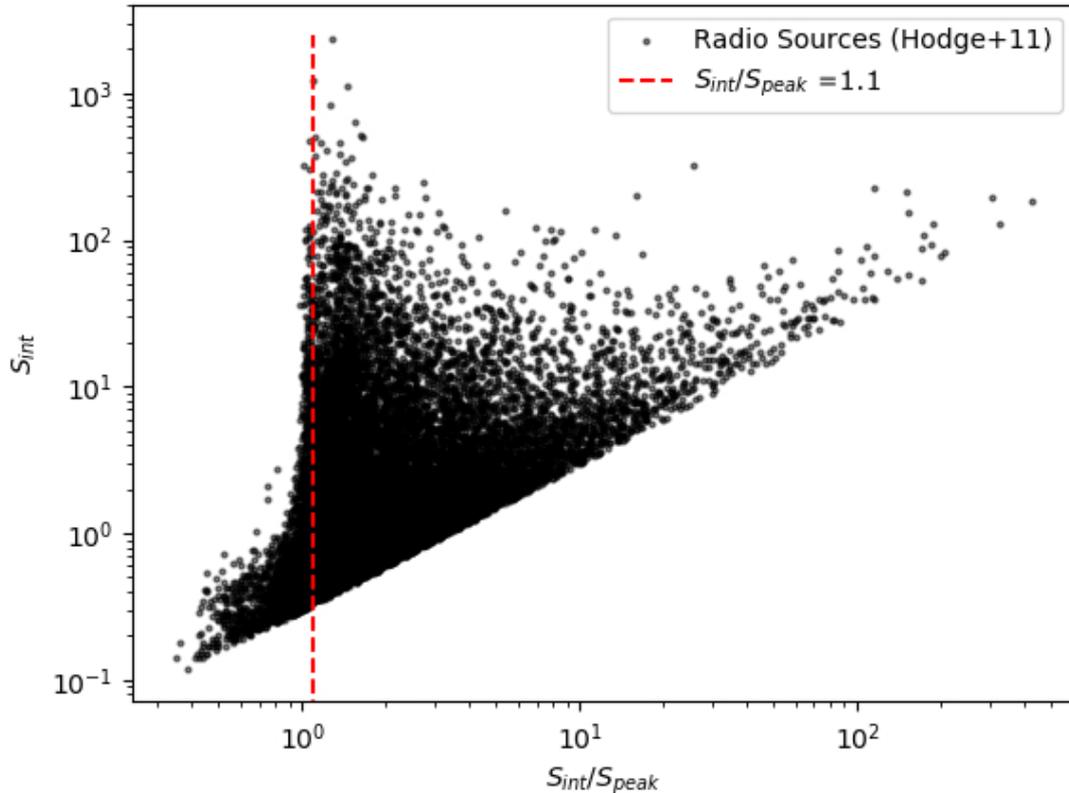


Figura 3.1: A razão de fluxo integrado e o *peak flux* para todas as fontes no [Hodge et al. \(2011\)](#). Objetos com uma razão acima (abaixo) de 1.1 são considerados como objetos extensos (compactos).

Este código possui, ainda, um variante para a correlação automática das fontes classificadas como isoladas e compactas, utilizando uma distância máxima de 5 segundos de arco para as fontes ópticas.

Os resultados desse processo são armazenados em um catálogo fundindo as informações no óptico e em rádio. O código também armazena as imagens de inspeção visual tanto para fontes de rádio com contrapartidas no óptico quanto para as que não possuem contrapartidas.

Devido à sobreposição entre as bordas das maiorias dos campos do S-PLUS, uma pequena fração das fontes foi inspecionada mais de uma vez. Posteriormente, criamos um catálogo indexado a partir das galáxias hospedeiras e eliminando múltiplas identificações. Deste modo, cada galáxia no óptico somente aparece uma vez em nosso catálogo e uma nova coluna informa o número de componentes em rádio associados. As imagens de objetos com múltiplas identificações visuais continuam salvos para triagem futura, quando podemos escolher qual deles possui a melhor imagem óptica associada.

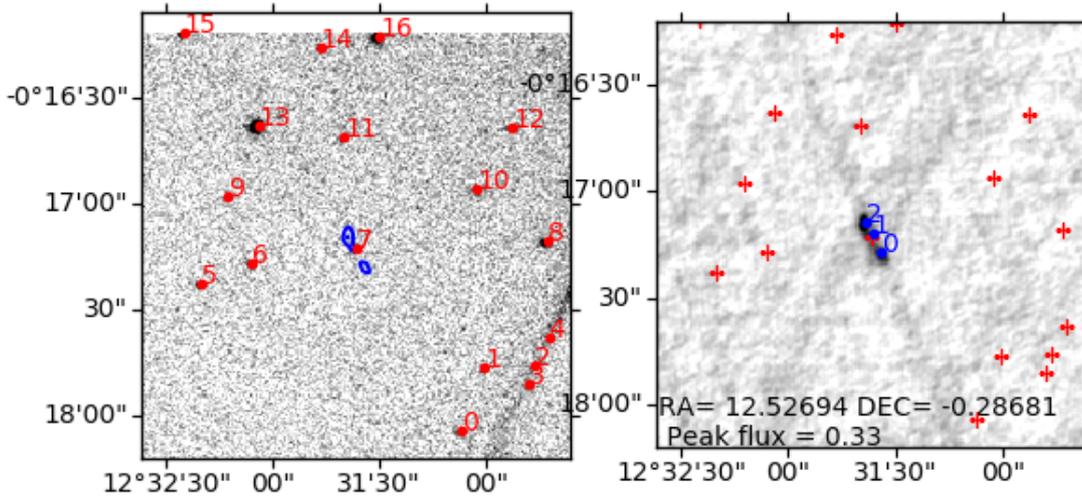


Figura 3.2: Um exemplo de imagem para inspeção visual: o painel da esquerda mostra a imagem de detecção do S-PLUS com os contornos da fonte de rádio em azul e as fontes ópticas no campo numeradas em vermelho. O painel da direita exibe a imagem em rádio marcando os componentes em rádio em azul; as cruzes vermelhas indicam a posição das fontes ópticas. Aqui vemos uma clássica galáxia FR2 com 3 componentes em rádio (0-2) e identificados com o objeto 7 do S-PLUS (a galáxia hospedeira).

## 3.2 Identificação das classes morfológicas em rádio

As fontes podem, finalmente, ser classificadas em 5 classes morfológicas de acordo com os seguintes protocolos de inspeção visual:

- **Fonte compacta:** fontes com aspecto pontual em rádio e contornos de fluxo concêntricos. A fonte óptica cuja posição coincide com a da fonte em rádio é considerada a contrapartida. Veja o primeiro painel da figura 3.3 por um exemplo.
- **Radiogaláxia FR I:** fontes estendidas ao longo de uma direção preferencial com um ou mais componentes, possuindo concentração de fluxo em suas regiões centrais e difusas em direção a suas extremidades. A fonte óptica que coincide com a posição da região de maior concentração de fluxo em rádio é considerada a contrapartida. Veja o segundo painel da figura 3.3 por um exemplo.
- **Radiogaláxia FR II:** fontes compostas por pelo menos dois componentes estendidos em sentidos opostos com concentração de fluxo em suas extremidades opostas. Também é comum a presença de um componente central de menor fluxo. A fonte óptica que se encontra na posição central entre os componentes de rádio é considerada a contrapartida. Veja o terceiro painel da figura 3.3 por um exemplo.
- **Fonte estendida:** fontes de componente único cujos contornos de rádio se estendem em uma direção preferencial com concentração de fluxo na região central ou fontes

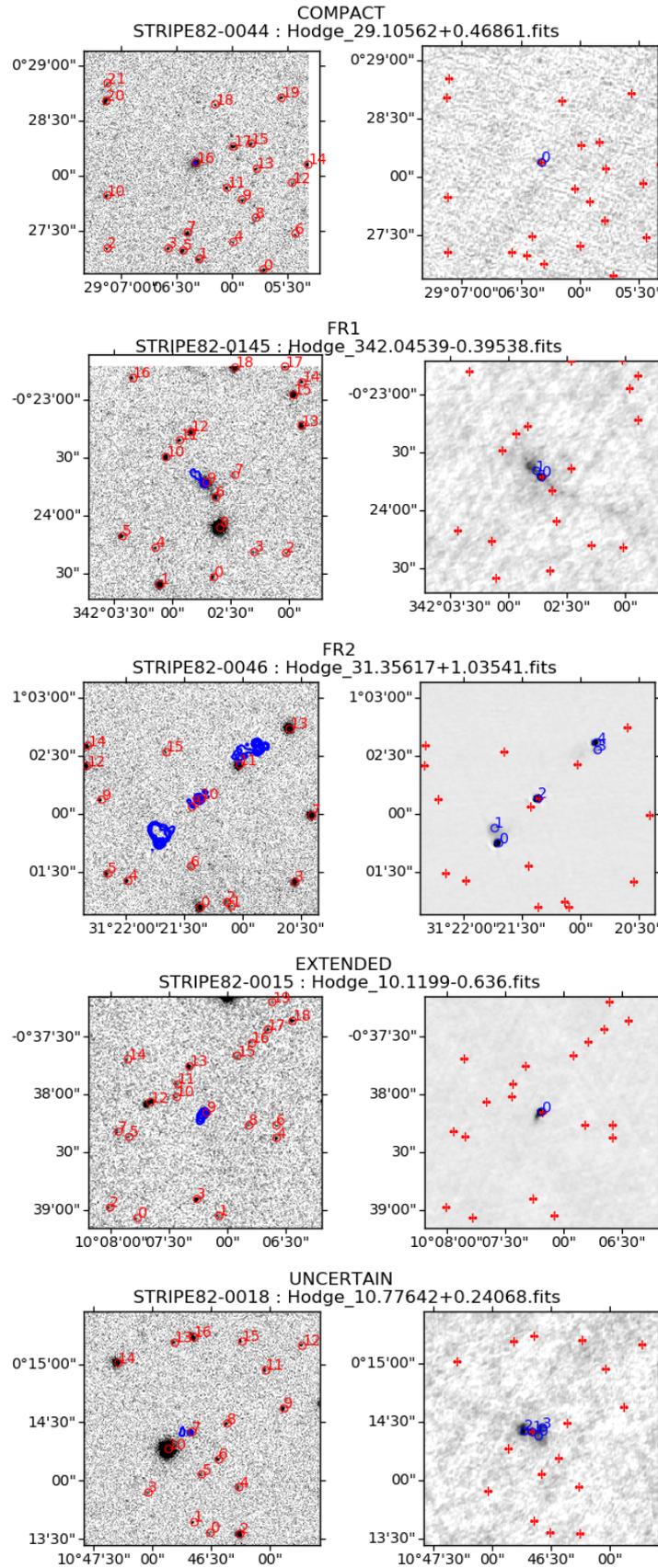


Figura 3.3: Exemplos das 5 classes morfológicas identificadas neste projeto. De cima para baixo: (1) Fonte compacta em rádio (número 0 no painel da direita) e contrapartida óptica (número 16 no painel da esquerda); (2) Fonte FR I em rádio (números 0-1) e contrapartida óptica (número 9); (3) Fonte FR II em rádio (números 0-5) e contrapartida óptica (número 10); (4) Fonte estendida em rádio (número 0) e contrapartida óptica (número 9); (5) Fonte de morfologia incerta em rádio (números 0-4) e contrapartida óptica (número 7).

com emissão em rádio difusa. A fonte óptica cuja posição coincide com a posição de maior concentração em rádio é considerada a contrapartida. Veja o quarto painel da figura 3.3 por um exemplo.

- **Morfologia incerta:** Fontes que não se encaixam em nenhuma das classes previamente descritas ou cujas morfologias não fomos capazes de decidir através deste protocolo. Podem fazer parte dessa categoria fontes do tipo *double-double*, WAT (*Wide-Angle Tailed*), NAT (*Narrow-Angle Tailed*), entre outros. Neste caso, a fonte óptica central entre os componentes em rádio é considerada a contrapartida. Também utilizamos esta categoria para classificar fontes cujas contrapartidas ópticas estejam sob dúvida. Veja o último painel da figura 3.3 por um exemplo.

Em seguida, o código sugere uma contrapartida óptica para a fonte em rádio no centro da imagem (dentro de um raio de 20 segundos de arco) ou o usuário pode adicionar manualmente os números correspondentes às contrapartidas (se encontradas). Eventualmente, durante o processo, também utilizamos o auxílio do Skyserver do SDSS a fim de obter informação complementar (morfologia óptica, espectro e redshift) para fontes cuja classificação seja problemática.

### 3.3 Construção do critério de seleção de Candidatos a AGNs

Seguindo o processo de inspeção visual, a partir do catálogo de objetos identificados, desenvolvemos um código para encontrar essas fontes no catálogo de galáxias do SDSS/Stripe82 e no catálogo de quasares do SDSS/DR14 ([Pâris et al., 2018](#)), a fim de encontrar fontes previamente identificadas e acessar redshifts espectroscópicos.

O código conta ainda com funções como calcular luminosidades em rádio, taxa de formação estelar (no caso a emissão no rádio, devido às explosões de supernovas) e luminosidade total de AGN. Por fim, o *script* aplica um critério de corte de fluxo a fim de decidir se um objeto é um possível candidato a AGN. Essa seleção é reforçada por critérios posteriormente adicionados.

#### 3.3.1 Cálculo da luminosidade em rádio e da SFR

A fim de calcular a luminosidade em rádio, nos utilizamos da fórmula :

$$L_{1.4\text{GHz}} = \frac{4\pi D_{lum}^2 S_{int}}{(1+z)^{1+\alpha}} \quad (3.1)$$

onde  $D_{lum}$  é a distância de luminosidade do objeto, obtida através de seu redshift<sup>2</sup>. O fator  $(1+z)^{1+\alpha}$  dá conta de trazer o fluxo integrado observado em 1.4 GHz ( $S_{int}$ ) para o referencial de repouso utilizando o redshift  $z$  e o índice espectral  $\alpha$ . Para a frequência de 1.4 GHz, utilizamos  $\alpha = -0.7$  (Condon et al., 2002). Em seguida, utilizamos as fórmulas 3.2 e 3.3 presentes em Bell (2003)<sup>3</sup> para estimar as taxas de formação estelar dos objetos a partir de suas luminosidades em rádio, assumindo que a emissão no rádio é devido aos explosões de supernovas e não é um AGN. Sendo a luminosidade típica de uma galáxias em 1.4 GHz dada por  $L_c = 6.4 \times 10^{21}$  W/Hz. As SFRs foram calculadas para os objetos sugeridos como galáxias a partir dos critérios de seleção comentados no último tópico desta seção.

As estimativas dos SFRs dependem do redshifts das fontes. Na figura 3.4 mostramos como um erro no redshift fotométrico leva a um erro na SFR para um fonte com um fluxo típico em 1.4 GHz de 1 mJy.

$$\psi(M_{\odot} \text{ yr}^{-1}) = 5.52 \times 10^{-22} L_{1.4 \text{ GHz}} \quad L > L_c \quad (3.2)$$

$$\psi(M_{\odot} \text{ yr}^{-1}) = \frac{5.52 \times 10^{-22}}{0.1 + 0.9(L/L_c)^{0.3}} L_{1.4 \text{ GHz}} \quad L \leq L_c \quad (3.3)$$

### 3.3.2 Simulação das magnitudes S-PLUS a partir de espectros

Com o objetivo de elaborarmos um de nossos critérios de seleção de possíveis candidatos a AGNs utilizando apenas a informação fotométrica do S-PLUS, planejamos simular as magnitudes S-PLUS a partir de espectros de AGNs confirmados e perfis de distribuição espectral típicos para estrelas e quasares. Para realizar tal tarefa, adaptamos um código previamente desenvolvido durante a iniciação científica capaz de convoluir espectros com curvas de transmitâncias de filtros fotométricos e, assim, simular as magnitudes em cada filtro.

Essas magnitudes posteriormente foram utilizadas para realizar diagramas cor-cor a fim de localizar regiões típicas para quasares (e evitar as regiões de estrelas) para, desta forma, auxiliar a identificação de fontes ainda não espectroscopicamente confirmadas.

<sup>2</sup>Só foi possível, portanto, obter a luminosidade em rádio dos objetos que possuíam algum redshift disponível. Foram priorizados os redshifts espectroscópicos.

<sup>3</sup>A SFR derivada neste artigo foi obtida utilizando uma amostra de galáxias diversas com informações no ultravioleta distante, óptico, infravermelho e rádio para calibrar a razão IR/FUV como indicador de extinção (a partir da comparação com  $H\alpha$ ) e corrigir a relação rádio-infravermelho (comentada em 3.3.3). Como resultado, foi obtido que a razão IR/Rádio tende a ser maior para galáxias mais fracas do que para as mais luminosas. Por essa razão a equação final possui um termo para galáxias menos luminosas do que a luminosidade típica em rádio a 1.4GHz e um termo para as mais luminosas.

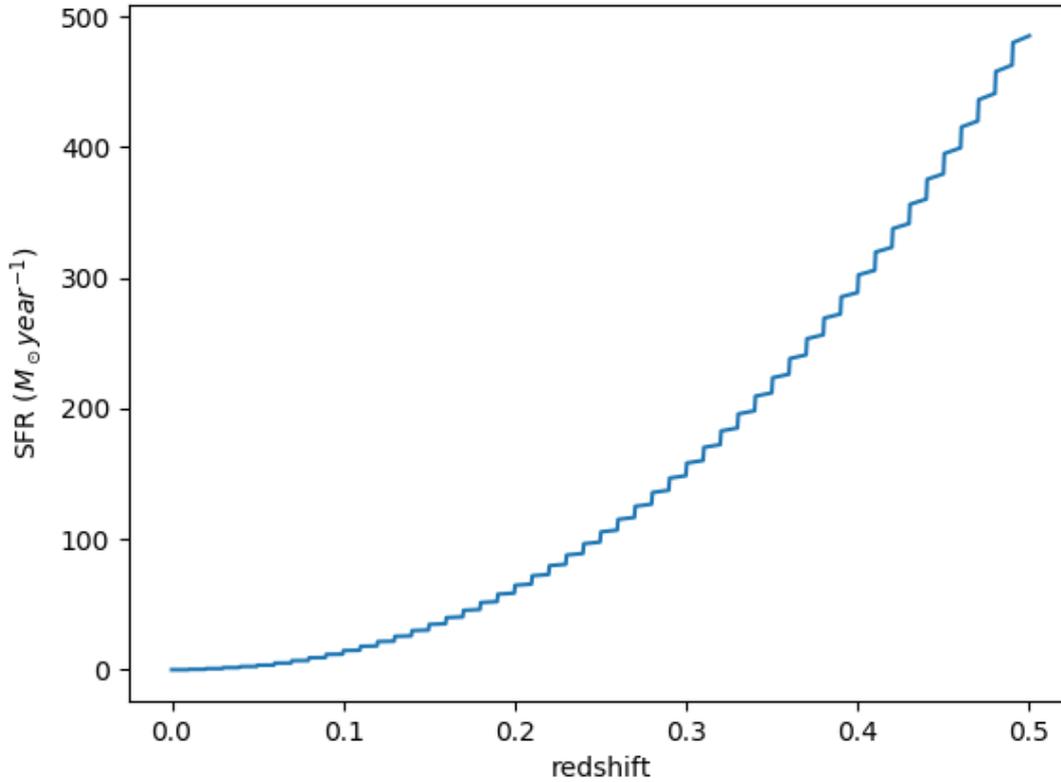


Figura 3.4: Esta figura mostra como um erro de redshift se traduz no erro do cálculo da taxa de formação estelar para um dado fluxo em 1.4 GHz de 1 mJy entre  $z = 0$  e  $z = 0.5$ .

### Perfis de distribuições espectrais estelares

Utilizamos os perfis de distribuição espectral típicos da biblioteca de espectros estelares da ESO, compilados por [Pickles \(1998\)](#). Os espectros cobrem entre 1150 - 25 000 Å em intervalos de 5 Å e não estão incluídos os espectros de estrelas do tipo L e G.

### Perfil de distribuição espectral de quasares

Para processar as magnitudes dos quasares, primeiramente utilizamos o perfil de distribuição espectral típico para quasares obtido por [Vanden Berk et al. \(2001\)](#). No processo, usamos nosso código para calcular as magnitudes do espectro em diferentes redshifts através de seu deslocamento entre  $0 < z \leq 5$  em passos de 0.1. Com isso, conseguimos montar uma trilha das cores típicas para quasares de acordo com o redshift.

Em seguida, selecionamos randomicamente 1000 quasares do catálogo SDSS em intervalos regulares de redshift com  $0 < z \leq 5$  e que possuíssem a bandeira QSO\_Z\_WARNING = 0, significando que nenhum problema foi encontrado na obtenção de seus redshift e, portanto, conferindo confiabilidade à seleção. Fomos capazes, então, de obter seus es-

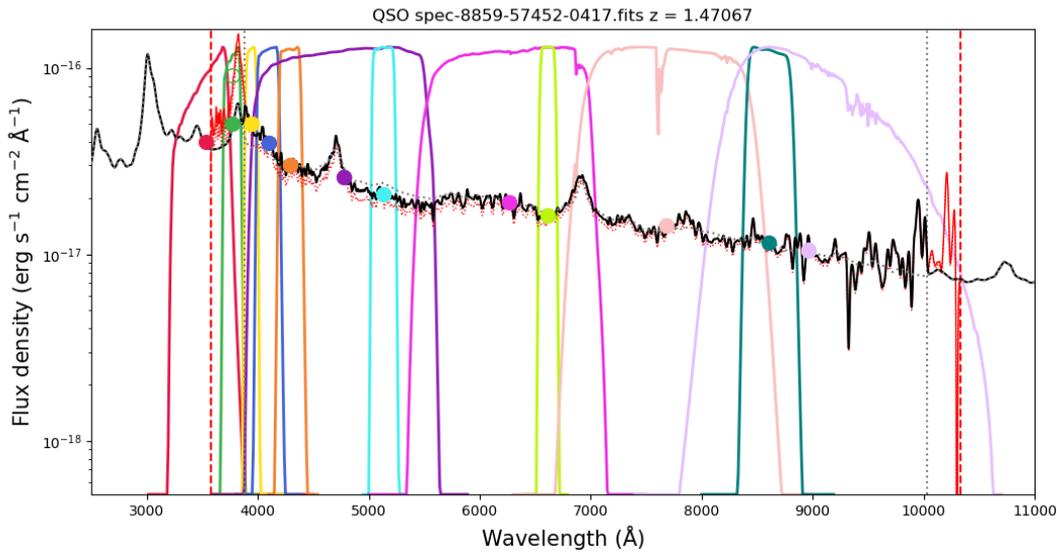


Figura 3.5: Um exemplo de espectro de um quasar em  $z = 1.47$  com sua respectiva correção pelo modelo espectral de quasares do [Vanden Berk et al. \(2001\)](#). O espectro original é representado pela linha vermelha pontilhada e limitada pelas linhas pontilhadas verticais da mesma cor e o modelo de distribuição típico é representado pela linha pontilhada cinza. As linhas verticais pontilhadas cinzas representam uma região de *buffer* pra fora das quais o modelo espectral de quasares é anexado a fim de evitar o grande ruído nas extremidades do espectro SDSS. O espectro resultante é corrigido pelo avermelhamento galáctico é representado pela linha preta. São mostrados, ainda, os filtros do S-PLUS e as magnitudes calculadas em cada banda como círculos em suas respectivas cores.

pectros utilizando o *SDSS science archive server* (SAS)<sup>4</sup> e calculamos suas magnitudes com nosso código.

Devido ao fato de os espectros do SDSS não cobrirem toda a extensão de comprimento de onda cobertos pelos filtros do S-PLUS, fez-se necessária a extensão de seus espectros. Uma adaptação ao código foi adicionada no intuito de identificar a necessidade de extensão em ambos extremos do espectro. A extensão foi realizada utilizando, novamente, o perfil espectral típico para quasares da seguinte forma: primeiramente o código identifica a necessidade de extensão, em seguida, posiciona o espectro típico a partir do redshift do objeto selecionado e, por fim, escalona o espectro com relação ao fluxo utilizando como referência o fluxo no comprimento de onda central em uma banda escolhida<sup>5</sup>. A figura 3.5 demonstra como esta extensão foi realizada de forma detalhada para um quasar em  $z = 1.47$ .

<sup>4</sup><https://dr15.sdss.org/optical/spectrum/search>

<sup>5</sup>Em nosso caso, escolhemos a banda  $i$  por ser coberta por todos os espectros utilizados.

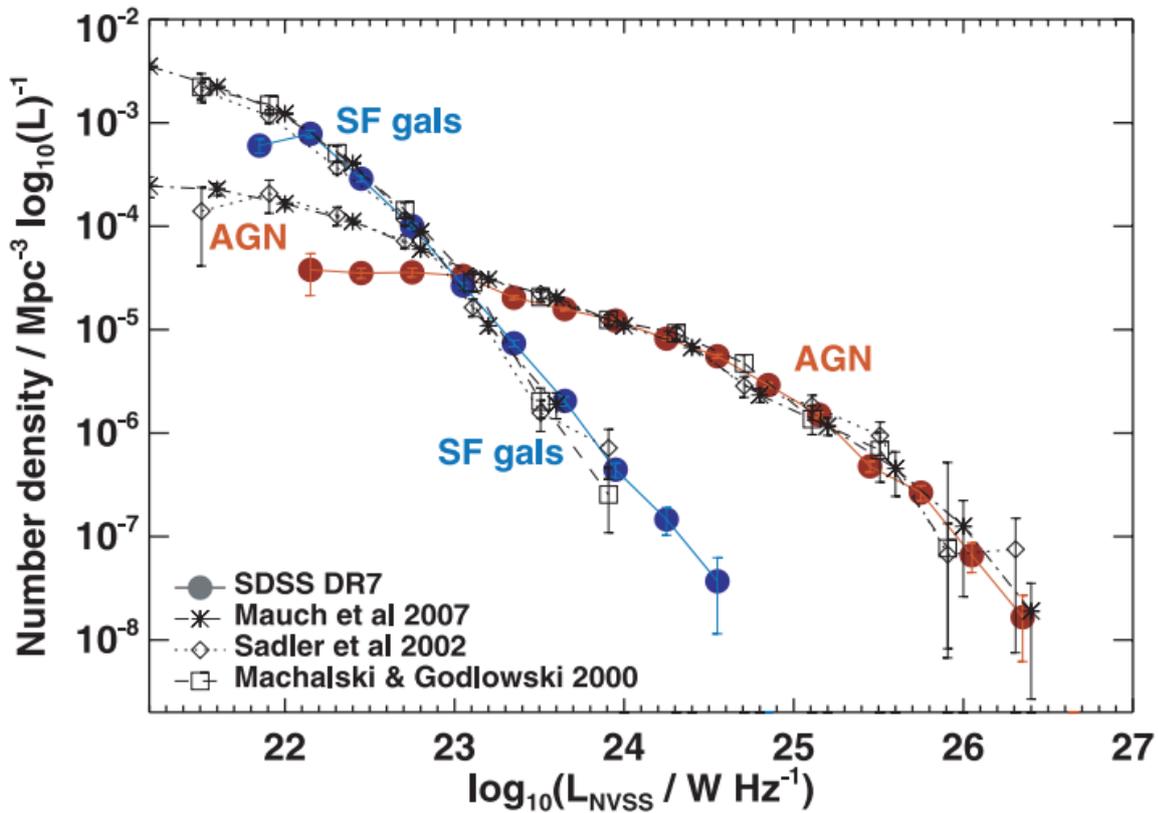


Figura 3.6: A função de luminosidade em 1.4 GHz para SFGs (em azul) e AGNs (em vermelho) obtida por [Best & Heckman \(2012\)](#). Os rádio AGNs dominam as contagens para luminosidades acima de  $\sim 10^{23} \text{ W Hz}^{-1}$ , enquanto as SFGs dominam abaixo disso.

### 3.3.3 Critério de seleção de candidatos AGNs

O principal desafio desse projeto foi encontrar bons candidatos a rádio AGNs utilizando apenas métodos dependentes da fotometria. Para tanto, nos utilizamos de 3 critérios: (1) o corte de luminosidade, (2) a relação radioinfravermelho distante e (3) o critério de cores.

#### O corte de luminosidade em rádio

Para nosso primeiro critério, nos baseamos no artigo de [Machalski & Godlowski \(2000\)](#) que comparou as funções de luminosidades de SFGs e AGNs, concluindo que essas classes representam componentes distintos da função de luminosidade em rádio com os AGNs dominando a relação a partir de  $L_{1.4\text{GHz}} = 10^{23} \text{ W Hz}^{-1}$ . Este resultado foi reforçado por [Sadler et al. \(2002\)](#) e [Best & Heckman \(2012\)](#) (figura 3.6). Utilizando um corte em luminosidade, podemos, portanto, conferir evidência de atividade de AGN a uma fonte de rádio.

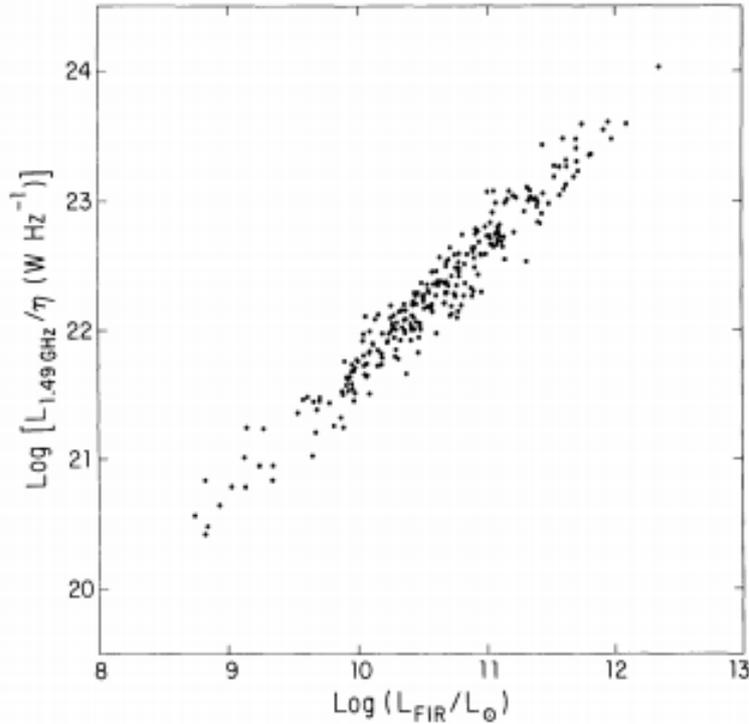


Figura 3.7: A relação entre luminosidades em rádio e infravermelho para galáxias sem atividade de AGN). É possível notar o comportamento linear da relação porque ambos os eixos são bons indicadores da taxa de formação de estrelas. Objetos com uma emissão de rádio excessiva devido à presença de um AGN ficarão acima desta relação. Crédito da imagem: [Condon et al. \(1991\)](#).

### A relação rádioinfravermelho

Em um seguinte diagnóstico, cruzamos o catálogo em infravermelho distante do HERSCHEL ([Viero et al., 2014](#)) com os objetos identificados no S-PLUS em torno de um raio máximo de 5 segundos de arco e remontamos a relação rádio-infravermelho. A figura 3.7 apresenta esta relação como foi obtido pelo [Condon et al. \(1991\)](#). Essa relação se deve ao fato de que em SFGs, tanto a emissão de rádio quanto a emissão de infravermelho distante traçam a taxa de formação de estrelas. Quaisquer objetos que estejam acima desta relação terão emissão de rádio em excesso que só pode ser explicada pela presença de emissão de rádio síncrotron de um AGN. Portanto, aqueles objetos em nossa amostra que não se apresentam na relação linear entre rádio e infravermelho, podem ser pré-selecionados como candidatos a AGNs. Em nosso trabalho, decidimos por utilizar a relação supracitada em termos do fluxo dos objetos em rádio e infravermelho, uma vez que o cálculo da luminosidade depende do redshift das fontes e, sendo esses redshifts fotométricos, não podemos garantir grande acurácia para todos os objetos. Felizmente, ambos os eixos da figura 3.7 dependem do redshift da mesma maneira, e a análise pode ser feita tanto no espaço da luminosidade quanto no espaço do fluxo.

Para realizar tal tarefa, mapeamos as fontes em rádio identificadas que possuíam

contrapartida em infravermelho e identificamos a região na qual a razão entre os fluxos era linear. A partir desta região, realizamos um ajuste linear dos pontos com uma significância de  $3\sigma$ , como visto na figura 4.4. As fontes no exterior dessa região foram classificadas pelo método como AGNs.

### Critérios de cores

Outra ferramenta importante para nossa análise, proporcionada pela disponibilidade de magnitudes em diversas bandas fotométricas, são as cores dos objetos. Similarmente ao processo realizado na obtenção dos redshifts fotométricos, descrito em 2.1.3, podemos utilizar as relações entre magnitudes dos objetos em cada banda para determinar regiões no espaço de cores (dado um intervalo de redshifts) onde é mais provável localizar um certo tipo de fonte.

Especialmente para quasares, as cores típicas podem ser principalmente identificadas pela posição do limite de *Lyman* e da linha de *Lyman*  $\alpha$  da técnica de *band-drop* (e.g. [Richards et al., 2001](#)). Dados dois filtros consecutivos  $F_1$  e  $F_2$ , podemos calcular o intervalo de redshift necessário para que a linha de *Lyman*  $\alpha$  esteja completamente contida sob a curva de  $F_2$  através da equação 3.4 onde  $\lambda_{min}$  e  $\lambda_{max}$  representam, respectivamente, limites de comprimento de onda inferior e superior de  $F_2$ . A magnitude calculada através deste filtro,  $m_2$ , resultará baixa devido ao alto fluxo de *Lyman*  $\alpha$ .

$$\lambda_{min} < 1216 \text{ \AA} (1 + z) < \lambda_{max} \quad (3.4)$$

Dado que  $F_1$  cobre comprimentos de onda menores que os de  $F_2$ , a magnitude  $m_1$  calculada por esse filtro corresponde à região anterior ao *Lyman break*, onde o espectro se apresenta plano e de baixo fluxo. Portanto, comparado a uma galáxia normal e em redshifts muito mais baixos do que o quasar típico, na qual o espectro não possui estes *breaks* nas mesmas bandas, um quasar no intervalo de redshift 3.4 possui cor  $C = m_1 - m_2$  consideravelmente mais alta. Neste caso, o quasar em questão seria considerado um  $F_1$  *dropout*, significando que a região do espectro perto da linha de *Lyman*  $\alpha$  cai fora do filtro  $F_1$ . É comum, ainda, que se adicione mais um critério cobrindo a porção do contínuo do espectro a fim de garantir a seleção dos objetos de interesse, bem como auxiliar a visualização e a determinação da região do espaço de cores na qual se pretende selecionar estes objetos.

Para este trabalho, decidimos por investigar os diagramas de cores em dois *band-drops* consecutivos, tornando nossa seleção mais eficiente para  $z \sim 2 - 5$ . Para nos referenciar sobre a escolha das regiões típicas de quasares, introduzimos nos diagramas as trilhas de cores simuladas para o modelo espectral de quasares através dos intervalos de redshift de interesse, para quasares confirmados no SDSS e para modelos espectrais de estrelas

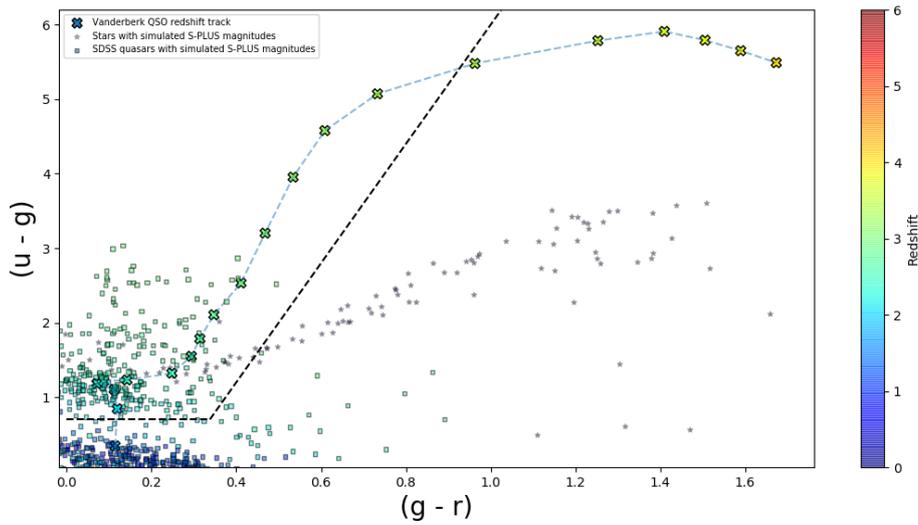


Figura 3.8: O diagrama de cores para  $(u-g)$  versus  $(g-r)$ , usado na seleção de quasares em  $z \sim 3$ . As estrelas cinzas representam as cores simuladas para os modelos espectrais de estrelas, os quadrados coloridos de acordo com os redshifts representam as cores simuladas para quasares de SDSS e os marcadores em X conectados pela linha tracejada em azul representam a trilha de cores do modelo espectral de quasares utilizado. As linhas tracejadas em preto delimitam a região do diagrama escolhida como típica para quasares no dado intervalo de redshift. Para este projeto, especificamente, não precisamos evitar a região dominada por estrelas, uma vez que estas não emitem em rádio e, portanto, não fariam parte de nossa amostra inicial. Estas apenas foram incluídas a fim de investigar a possibilidade do uso deste mesmo método para quasares sem alta atividade em rádio.

diversas<sup>6</sup>, o processo de simulação destas cores foi detalhado em 3.3.2.

As figuras 3.8 e 3.9 mostram os diagramas gerados para suportar a escolha de nossos critérios. Figura 3.8 apresenta o diagrama cor-cor para  $(g-r)_{AB}$  versus  $(u-g)_{AB}$ . Este diagrama mostra a localização de estrelas (estrelas cinzas), quasares do SDSS (quadrados coloridos pelos redshifts) e uma trilha de cores para quasares, simulada usando o modelo de [Vanden Berk et al. \(2001\)](#) (marcadores em X conectados e coloridos pelos redshifts). Este diagrama tem alta eficiência para selecionar quasares em  $z \sim 3$  na região demarcada com as linhas tracejadas. Figura 3.9 apresenta o diagrama cor-cor para  $(r-i)_{AB}$  versus  $(g-r)_{AB}$ . Este diagrama é otimizado para a seleção de quasares em  $z \sim 4$ .

<sup>6</sup>Processo de menor importância em nossa análise, visto que é altamente improvável que estrelas possuam emissão em rádio significativa.

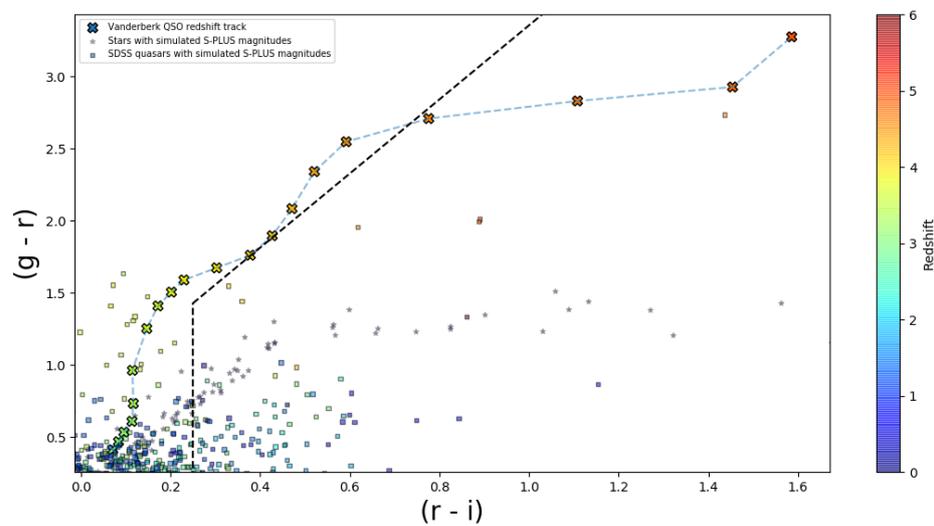


Figura 3.9: O diagrama de cores para  $(g-r)$  versus  $(r-i)$ , usado na seleção de quasares em  $z \sim 4$ . As estrelas cinzas representam as cores simuladas para os modelos espectrais de estrelas, os quadrados coloridos de acordo com os redshifts representam as cores simuladas para quasares de SDSS e os marcadores em X conectados pela linha tracejada em azul representam a trilha de cores do modelo espectral de quasares utilizado. As linhas tracejadas em preto delimitam a região do diagrama escolhida como típica para quasares no dado intervalo de redshift.

# Capítulo 4

## Análise e resultados

Neste projeto piloto, realizamos o processo de correlação e classificação para todas as fontes compactas isoladas, não isoladas e as 1000 fontes extensas de maior fluxo (cobrindo todas as fontes até  $S_{peak} = 8.42$  mJy). O número total de inspeções, contabilizando duplicadas, foi de 4186 fontes ao longo de todos os  $\sim 92$  deg<sup>2</sup> do levantamento em rádio, das quais 1415 possuíam contrapartidas ópticas. Após a remoção das fontes duplicadas e de múltiplos componentes, contabilizamos um total de 1316 fontes em S-PLUS com contrapartidas em rádio.

No presente capítulo, apresentamos e discutimos nosso processo de seleção e classificação destes objetos emissores em rádio. Em uma etapa seguinte, apresentamos uma visão geral de nosso processo de identificação em termos do número de fontes encontradas em cada um dos catálogos utilizados.

### 4.1 Radioquasares identificados

A primeira população de interesse que estudamos foi a de radioquasares. A fim de identificar novos candidatos para esta população, nos baseamos em três critérios fundamentais: A compacidade em rádio, a compacidade no óptico e os diagramas de cores.

A compacidade em rádio foi inferida a partir do método explicitado na seção 3.1.1, para o caso de fontes isoladas, e através da inspeção visual pelo protocolo comentado em 3.2, para o restante das fontes. No total, 3376 fontes foram classificadas como compactas, 1112 das quais foram identificadas nas imagens ópticas e 599 fazem parte do MC do S-PLUS.

A compacidade no óptico foi quantificada a partir do FWHM disponível pelo catálogo em S-PLUS. Foram consideradas fontes compactas no óptico as fontes com  $\text{FWHM} \leq 2.5''$ . A decisão desse critério foi suportada pelo fato de que esse é o limite superior de FWHM para as fontes mais brilhantes e insaturadas do catálogo (ver figura 2.2), que tendem a ser não resolvidas (neste caso, estrelas) assim como os quasares. Em análise posterior, obtivemos que mais de 97% dos objetos em S-PLUS que possuíam como contrapartidas

quasares ópticos espectroscopicamente identificados em SDSS possuíam FWHM dentro do limite estabelecido.

Para a seleção por cores, decidimos utilizar dois critérios distintos, garantindo que pudéssemos encontrar novos candidatos a quasares em uma maior faixa de redshifts.

#### 4.1.1 Critério de cores para quasares em $2 \lesssim z \lesssim 3$

Para esta faixa de redshift, quasares são categorizados como *u-dropouts*, significando que o *Lyman break* cai entre as bandas *u* e *g*, portanto, é esperada grande variação na cor  $(u - g)_{AB}$ . O critério visualmente estabelecido, a partir da figura 3.8, para determinar a região típica para quasares nesse caso é mostrado em 4.1.

$$(u - g)_{AB} \geq 0.7 \quad \wedge \quad (u - g)_{AB} \geq 8 \times (g - r)_{AB} - 2 \quad (4.1)$$

A figura 4.1 mostra como as fontes compactas de nossa seleção se dispõem sobre o diagrama de cores  $(u - g)_{AB} \times (g - r)_{AB}$ . A trilha de cores dos quasares entre  $z = 2 - 4$  é marcada pela linha tracejada azul e pelos marcadores em X variado de cores de acordo com o redshift. Os quadrados representam aquelas fontes dentre as inspecionadas que possuíam contrapartida no catálogo de espectroscópico de quasares do SDSS e os círculos representam as fontes no catálogo espectroscópico de galáxias do SDSS. Os marcadores em forma de losango vermelho representam as fontes de S-PLUS que não possuíam nenhuma contrapartida espectroscópica e, portanto, caracterizam os principais alvos de nosso processo de seleção. As linhas tracejadas pretas demarcam a região típica para quasares definida em 4.1. Todas as fontes estão assinaladas com suas respectivas barras de erro e as setas indicam a direção na qual as magnitudes medidas estão acima do limite de magnitude<sup>1</sup>. As letras Xs em azul assinalam as fontes selecionadas pelo critério.

#### 4.1.2 Critério de cores para quasares em $4 \lesssim z \lesssim 5$

Para esta faixa de magnitude, os quasares são categorizados como *g-dropouts*, portanto, é esperada grande variação na cor  $(g - r)_{AB}$ . Os critérios estabelecidos, a partir de 3.9, para determinar a região típica para quasares neste caso são mostrados em 4.2 e 4.3. Os critérios foram divididos em dois componentes apenas para otimizar a região selecionada.

$$0 \leq (g - r)_{AB} \leq 1.5 \quad \wedge \quad 0 \leq (r - i)_{AB} \leq 0.25 \quad (4.2)$$

$$(g - r)_{AB} \geq 1.5 \quad \wedge \quad (g - r)_{AB} \geq 2.6 \times (r - i) + 0.78 \quad (4.3)$$

---

<sup>1</sup>Uma seta para cima, por exemplo, significa que um objeto possui magnitude na banda *u* maior do que o limite de magnitude estabelecido, significando que sua cor  $(u - g)_{AB}$  pode ser ainda maior do que a assinalada no gráfico.

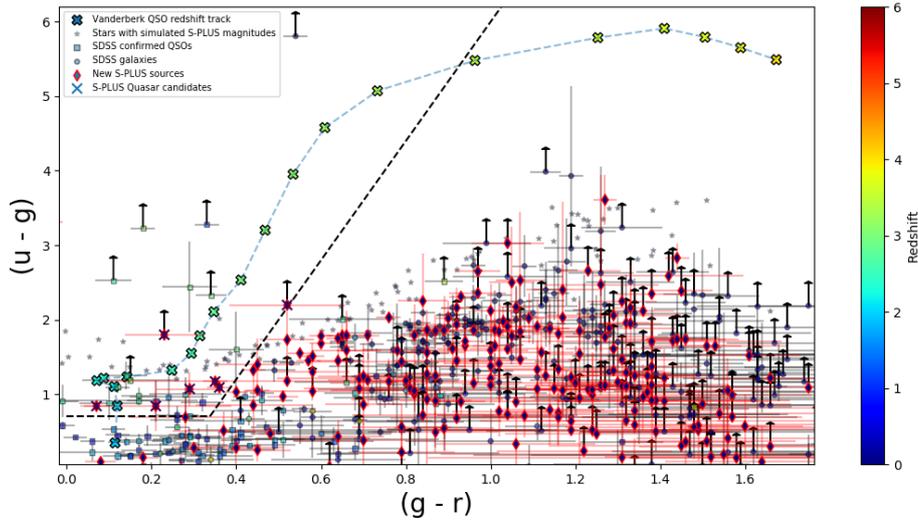


Figura 4.1: A disposição das fontes inspecionadas sobre o diagrama de cores  $(u - g)_{AB} \times (g - r)_{AB}$ . Estão presentes no gráfico: a trilha de cores do modelo espectral para quasares (marcadores em X variando cores de acordo com o redshift e a linha tracejada em azul), os quasares confirmados em nossa amostra (quadrados de cores variadas de acordo com o redshift), as galáxias de SDSS (círculos de cores variadas de acordo com o redshift) e as fontes do S-PLUS sem contrapartidas espectroscópicas (losangos com bordas vermelhas). As linhas tracejadas em preto definem a região típica para quasares e as marcações em Xs assinalam as fontes selecionadas por esse critério.

A figura 4.2 mostra como as fontes compactas de nossa seleção se dispõem sobre o diagrama de cores  $(g - r)_{AB} \times (r - i)_{AB}$ . A trilha de cores dos de quasares entre  $z = 3 - 5$  é marcada pela linha tracejada azul e pelos marcadores em X variado de cores de acordo com o redshift. Os quadrados representam aquelas fontes dentre as inspecionadas que possuíam contrapartida no catálogo de espectroscópico de quasares do SDSS e os círculos representam as fontes no catálogo espectroscópico de galáxias do SDSS. Os marcadores em forma de losango vermelho representam as fontes de S-PLUS que não possuíam nenhuma contrapartida espectroscópica e, portanto, caracterizam os principais alvos de nosso processo de seleção. As linhas tracejadas pretas demarcam a região típica de para quasares definida em 4.2 e 4.3. Todas as fontes estão assinaladas com suas respectivas barras de erro e as setas indicam a direção na qual as magnitudes medidas estão acima do limite de magnitude. As letras Xs em azul assinalam as fontes selecionadas pelos critérios.

### 4.1.3 Resultados da seleção

Aplicando os critérios de seleção supracitados, fomos capazes de encontrar 87 objetos compactos tanto em rádio quanto no óptico e com cores condizentes com às de quasares com  $2 \lesssim z \lesssim 5$  dentre os quais 35 não fazem parte do catálogo de quasares em SDSS e, portanto, representam nossa amostra de candidatos a novos quasares no S-PLUS. A

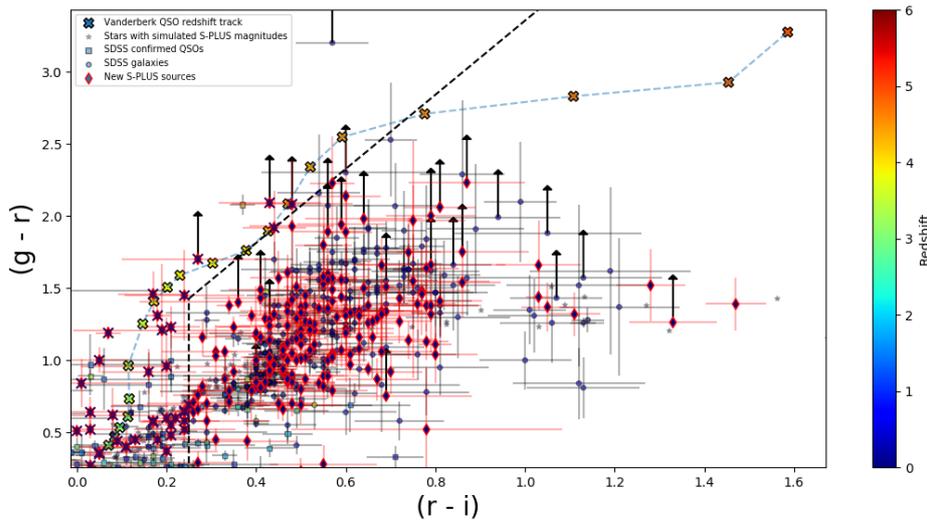


Figura 4.2: A disposição das fontes inspecionadas sobre o diagrama de cores  $(g - r)_{AB} \times (r - i)_{AB}$ . Estão presentes no gráfico: a trilha de cores do modelo espectral para quasares (marcadores em X variando cores de acordo com o redshift e a linha tracejada em azul), os quasares confirmados em nossa amostra (quadrados de cores variadas de acordo com o redshift), as galáxias de SDSS (círculos de cores variadas de acordo com o redshift) e as fontes do S-PLUS sem contrapartidas espectroscópicas (losangos com bordas vermelhas). As linhas tracejadas em preto definem a região típica para quasares e as marcações em Xs assinalam as fontes selecionadas por esses critérios.

figura 4.3 apresenta as imagens de S-PLUS (geradas pela composição das bandas  $g$ ,  $r$ , e  $i$ , utilizando o *S-PLUS Cloud*<sup>2</sup>) para os 35 candidatos obtidos.

## 4.2 Radiogaláxias identificadas

A seleção de radiogaláxias dentre as fontes de S-PLUS com contrapartida em rádio se deu por duas vias distintas. Primeiramente, todas as fontes classificadas morfologicamente com FR1s e FR2s foram automaticamente selecionadas com AGNs em rádio. Em seguida, as fontes compactas em rádio que não passaram nos critérios de seleção para quasares (seja por ausência de compacidade no óptico ou por não cumprirem os critérios de cores) e as fontes de morfologia estendida foram testadas em termos de suas luminosidades em rádio e de suas relações rádio-infravermelho distante em busca de atividade típica de AGNs em rádio; métodos comentados na seção 3.3.3. Estas fontes compactas e estendidas em rádio podem representar radiogaláxias não resolvidas na imagem óptica, radiogaláxias que apenas possuem suas regiões centrais (*cores*) ou emissão em rádio menos poderosa (por exemplo, *radio-quiet Seyferts*).

Utilizando simultaneamente os critérios de corte de luminosidade e da relação radio-

<sup>2</sup><https://splus.cloud/Makeimage>

infravermelho, fomos capazes de encontrar 6 candidatos a AGNs compactos em rádio. Todos esses objetos já contém redshifts espectroscópicos em SDSS e um deles pertence ao catálogo de quasares do SDSS. Entre as radiogaláxias do tipo FR1 e FR2, 15 novos objetos não possuem nenhum redshift espectroscópico e, portanto, configuram novos candidatos a AGNs em rádio. A figura 4.4 mostra a distribuição de fluxo em rádio por fluxo em infravermelho para as fontes de nossa amostra. Os círculos azuis e vermelhos representam, respectivamente, as fontes sugeridas como SFRs e AGNs pelo critério de corte de luminosidade. Os círculos em ciano representam as fontes extraídas das imagens que não foram identificadas em nenhum dos catálogos ópticos e, portanto, não possuíam redshift disponível para o cálculo da luminosidade em rádio. Apesar da grande concordância entre os dois métodos mostrada na figura, o reduzido número de contrapartidas no infravermelho distante para as fontes do S-PLUS prejudicou a determinação de novos candidatos a AGNs em nossa amostra.

A figura 4.5 mostra as imagens em S-PLUS (geradas pela composição das bandas  $g$ ,  $r$ , e  $i$ , utilizando o *S-PLUS Cloud*) de todas as fontes do tipo FR1 selecionadas em nosso critério. As figuras e correspondem, respectivamente, às imagens (geradas pela composição das bandas  $g$ ,  $r$ , e  $i$ , utilizando o *S-PLUS Cloud*) das fontes do tipo FR2 previamente identificadas e das novas candidatas selecionadas por este trabalho.

### 4.3 Galáxias em formação de estrelas identificadas

A fim de selecionar SFGs, utilizamos os métodos de corte de luminosidade e da relação radio-infravermelho novamente porém, desta vez, de maneira inversa: bons candidatos a SFGs precisavam apresentar  $L_{1.4\text{GHz}} < 10^{23} \text{ W Hz}^{-1}$  e, simultaneamente, não se apresentarem na região de AGNs do gráfico de fluxo em rádio *versus* infravermelho distante. Com esse método, 159 objetos foram selecionados como galáxias normais, nenhum deles fazendo parte dos catálogos de AGNs de SDSS, o que qualifica a seleção. A figura 4.8 mostra a distribuição de SFR para as galáxias selecionadas. Dentre as fontes sem nenhuma identificação espectroscópica prévia, 72 delas foram classificadas com SFGs. Estas fontes são mostradas nas figuras 4.9, 4.10 e 4.11, com imagens geradas através da ferramenta de listas de imagens do SDSS<sup>3</sup>.

É interessante ressaltar que, dentre as fontes classificadas como SFGs e que continham redshifts espectroscópicos, notamos um limite superior da população em  $z \sim 0.3$  com média em torno de  $z = 0.15$ , como pode ser observado na figura 4.12. Entre as novas fontes selecionadas como candidatas a SFGs, a distribuição de redshifts fotométricos possui um limite em  $z \sim 0.5$  (4.13), atestando que o levantamento S-PLUS pode ser utilizado para selecionar fontes além dos limites de SDSS e determinar as suas taxas de formação estelar.

<sup>3</sup><http://skyserver.sdss.org/dr15/en/tools/chart/list.aspx>

Morfologia	S-PLUS	SDSS (Spec)	SDSS (QSO)	SDSS (Photo)	HERS	Nenhum catálogo	Média de componentes	Total de fontes
Compactas	599 (53.9%)	486 (43.7%)	130 (11.7%)	844 (75.9%)	113 (10.1%)	56 (5.0%)	1	1112 (84.5%)
FR2s	60 (53.6%)	60 (53.6%)	31 (27.7%)	68 (60.7%)	4 (3.6%)	10 (8.9%)	1.7	112 (8.5%)
FR1s	20 (66.7%)	22 (73.3%)	5 (16.7%)	15 (50.0%)	1 (3.4%)	2 (6.7%)	1.2	30 (2.2%)
Extendidas	9 (52.9%)	10 (58.8%)	7 (41.1%)	9 (52.9%)	0 (0%)	1 (5.9%)	1	17 (1.3%)
Incertas	27 (60.0%)	17 (37.8%)	4 (8.9%)	35 (77.8%)	1 (2.3%)	2 (4.4%)	1.3	45 (3.4%)
Total	715	595	177	971	119	71	1.1	1316

Tabela 4.1: As fontes emisoras em rádio de S-PLUS em termos de suas aparições em cada um dos catálogos utilizados na pesquisa. Na tabela, SDSS (spec) representa o catálogo espectroscópico do SDSS, SDSS (qso) representa o catálogo de QSOs de SDSS e SDSS(photo) representa o catálogo fotométrico do mesmo levantamento. HERS representa o catálogo em infravermelho distante. "Nenhum catálogo" representa as fontes encontradas nas imagens através do processo descrito em 3.1.2 e para as quais não possuíam contrapartida em nenhum dos catálogos utilizados.

## 4.4 Classificações inconclusivas

Em nossa hierarquia de classificações, cada objeto foi primeiramente testado com respeito a suas cores e compacidade no óptico, com o intuito de o selecionar como candidato a quasar. Falhando neste teste, utilizamos os testes de luminosidade e rádio-infravermelho para decidir se a fonte pertence à classe dos AGNs ou das SFGs. Se estes dois critérios apresentassem resultados contrários ou um deles não apresentasse nenhum resultado (como foi muito comum para o critério de rádio-infravermelho, conforme comentamos em 4.2), a fonte seria assinalada como classificação inconclusiva.

A maior parte das fontes identificadas foi classificada nessa categoria ( $\approx 54\%$ ), com maior contribuição das fontes compactas.

## 4.5 As populações em rádio em S-PLUS

A tabela 4.1 e a figura 4.14 mostram o número de objetos identificados nas imagens de S-PLUS por classe morfológica e por suas presenças em cada um dos catálogos utilizados. É possível perceber que nem todos os objetos identificados encontrados pertencem ao MC do S-PLUS devido aos critérios utilizados para incluir uma fonte em tal catálogo, como comentado na seção 2.1.4. A figura 4.15 mostra a distribuição de magnitudes na banda  $r$  para cada uma das classes morfológicas identificadas nas imagens em rádio.

Também é importante notar que a média de componentes para morfologias que, tipi-

camente, possuem múltiplos componentes (como é o caso das FR1s e FR2s) não reflete necessariamente a tendência do catálogo em rádio. Isso se deve ao fato de que o corte de fluxo em nossa amostra pode excluir componentes menos brilhantes de uma dada fonte, fazendo com que a média de componentes seja, portanto, menor do que a real.

O excesso de fontes compactas identificadas também se deve à seleção de nossa amostra, na qual a correlação deste tipo de fonte foi priorizada visando maximizar nossas oportunidades de selecionar candidatos a quasares. A imagem 4.16 mostra a de redshifts das fontes compactas em rádio que possuem redshifts espectroscópicos e fotométricos em SDSS. É possível perceber que o redshift fotométrico é limitado a  $z \lesssim 2$ . Isto se deve ao fato de que os métodos de determinação de redshift fotométrico não são otimizados para a identificação de quasares através das cores, como no caso de S-PLUS, onde a biblioteca de espectros utilizada não engloba espectros de AGNs e quasares. Portanto, os redshifts espectroscópicos, tanto de S-PLUS quanto de SDSS, não são confiáveis para quasares e, por esse motivo, decidimos não utilizar o critério de corte de luminosidade para a seleção dessas fontes.

Os critérios de seleção foram realizados para todas as fontes de nossa identificação que faziam parte do catálogo S-PLUS. A cada fonte foram atribuídas 4 bandeiras representando o desempenho das fontes em cada um dos testes. Por exemplo, se uma fonte compacta em rádio possui  $\text{FWHM} < 2.5''$ , possui luminosidade em rádio  $L_{1.4\text{GHz}} < 10^{23} \text{ W Hz}^{-1}$ , não possui fluxo em infravermelho identificado e se qualifica na região típica de quasares em  $(u - g)_{AB} \times (g - r)_{AB}$ , a ela é associada ao conjunto de bandeiras [1,0,0,1] e sua classificação final é como QSO. A tabela 4.2 apresenta os resultados para a seleção das fontes compactas entre três possíveis classes: Quasares, AGNs e classificações inconclusivas. Os critérios e a hierarquia dessas classificações estão explicitadas nas 4 seções anteriores.

Critérios	QSO	AGN	SFG	Classificação Inconclusiva
Compacidade em rádio	87	19	71	248
Corte de luminosidade em rádio	72	81	159	377
Relação rádio-infravermelho	3	8	159	4
Diagrama de cores	87	20	5	23
<b>Total</b>	<b>87</b>	<b>86</b>	<b>159</b>	<b>383</b>

Tabela 4.2: Os resultados do critério de seleção para as fontes compactas. É importante salientar que os critérios de corte de luminosidade em rádio e da relação rádio-infravermelho para SFGs (em azul) são o inverso daqueles para AGNs, como comentado na seção 4.3.

Na tabela 4.3, apresentamos o resumo de nosso processo de seleção. A segunda coluna

da tabela representa as fontes encontradas no catálogo de quasares de SDSS e a terceira coluna representa as fontes encontradas no catálogo espectroscópico de galáxias do SDSS. Na terceira coluna (em vermelho) apresentamos os novos candidatos em S-PLUS para cada uma das classes.

Classificação	Quasares confirmados (SDSS)	Spec-z (SDSS)	Novas identificações	Total
QSO	52	58	35	87
AGN	33	71	15	86
SFG	0	87	72	159
Classificação inconclusiva	57	237	-	383

Tabela 4.3: O resumo das fontes selecionadas pelo nosso critério. A segunda e a terceira coluna representam, respectivamente, o número de fontes encontradas no catálogo de quasares e no catálogo espectroscópico de galáxias do SDSS. Na terceira coluna apresentamos o número de objetos selecionados como bons candidatos a cada uma das classes em S-PLUS.

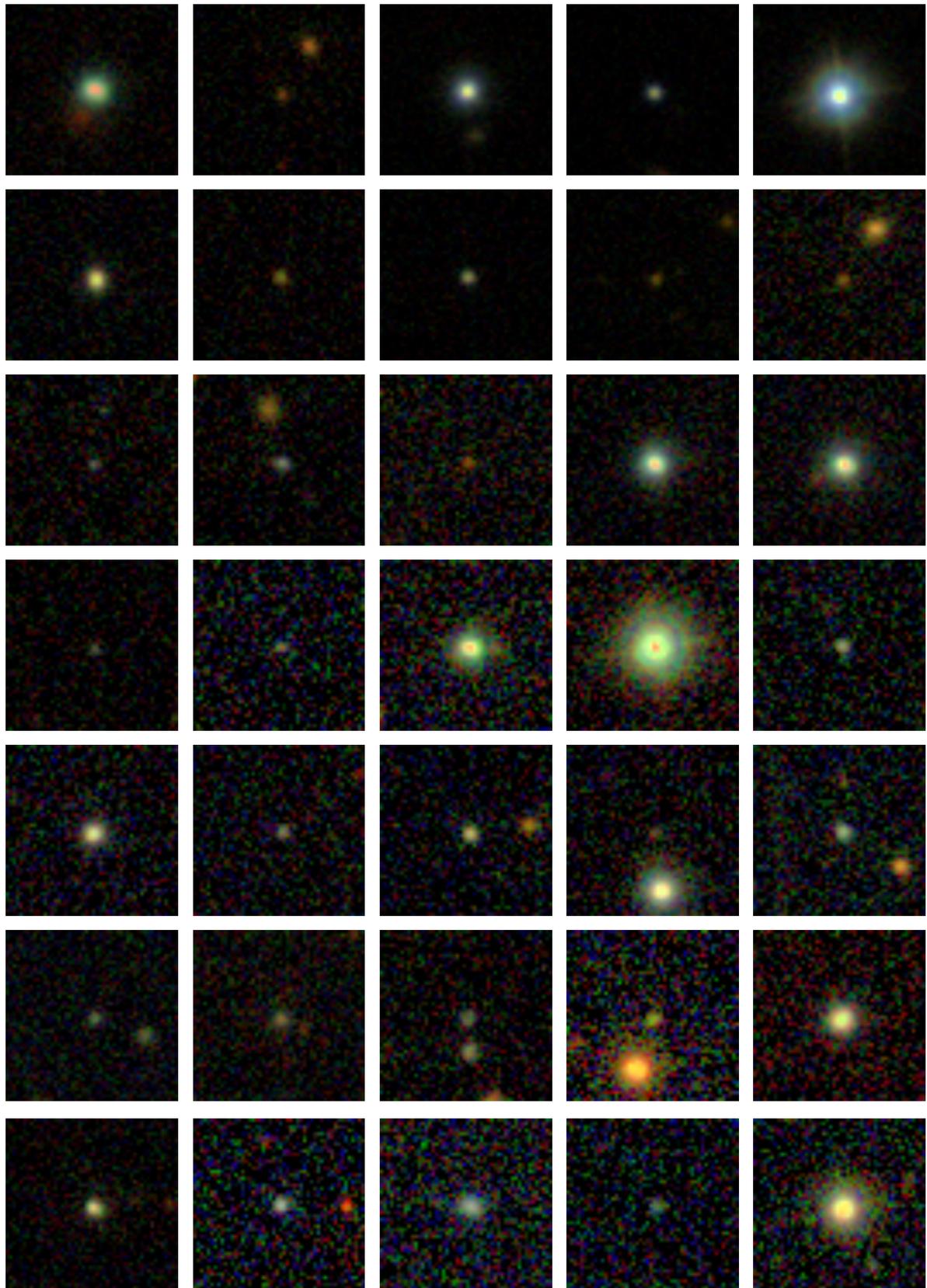


Figura 4.3: Os novos candidatos a quasares encontrados por nossa seleção. As imagens possuem dimensões de  $27.5'' \times 27.5''$ .

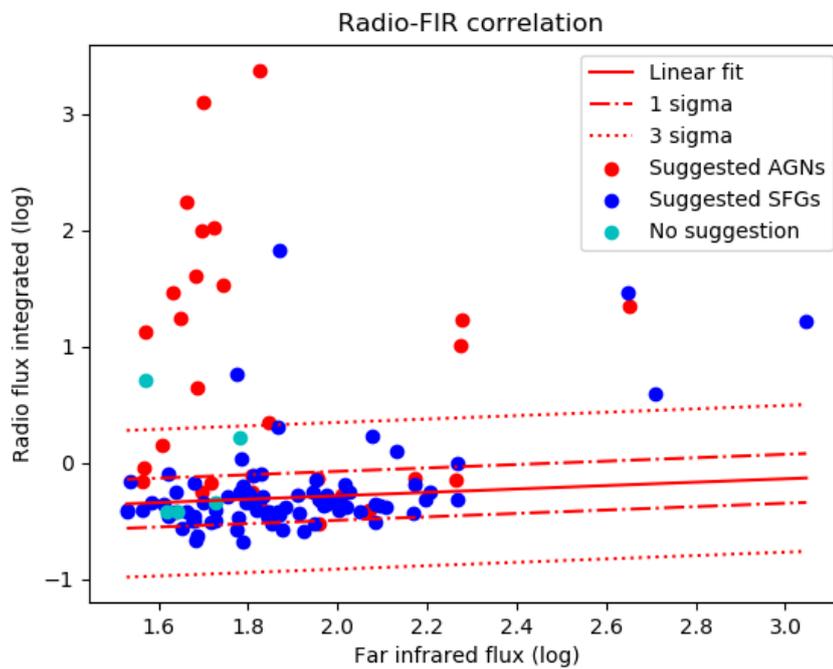


Figura 4.4: A relação entre fluxos em rádio e infravermelho para as fontes de nossa identificação. As fontes marcadas como *suggested AGNs* e *suggested SFG* correspondem às fontes classificadas como AGNs e SFGs, respectivamente, pelo critério de corte de luminosidade. É possível perceber que ambos critérios concordam em grande medida.

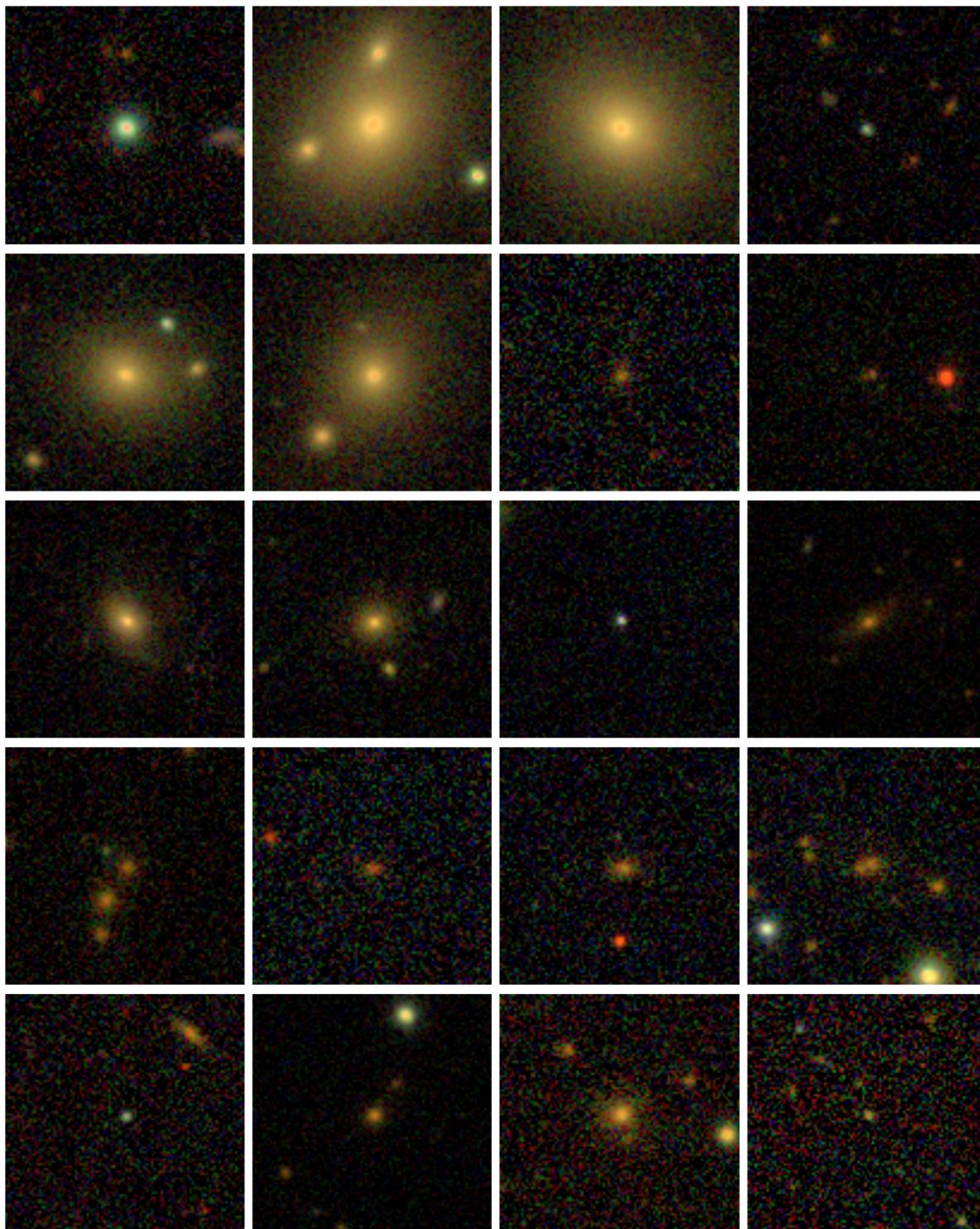


Figura 4.5: As fontes do tipo FR1 na seleção. As imagens possuem dimensões de  $54'' \times 54''$ . O painel no canto inferior direito corresponde a uma nova fonte (sem identificação espectroscópica prévia).

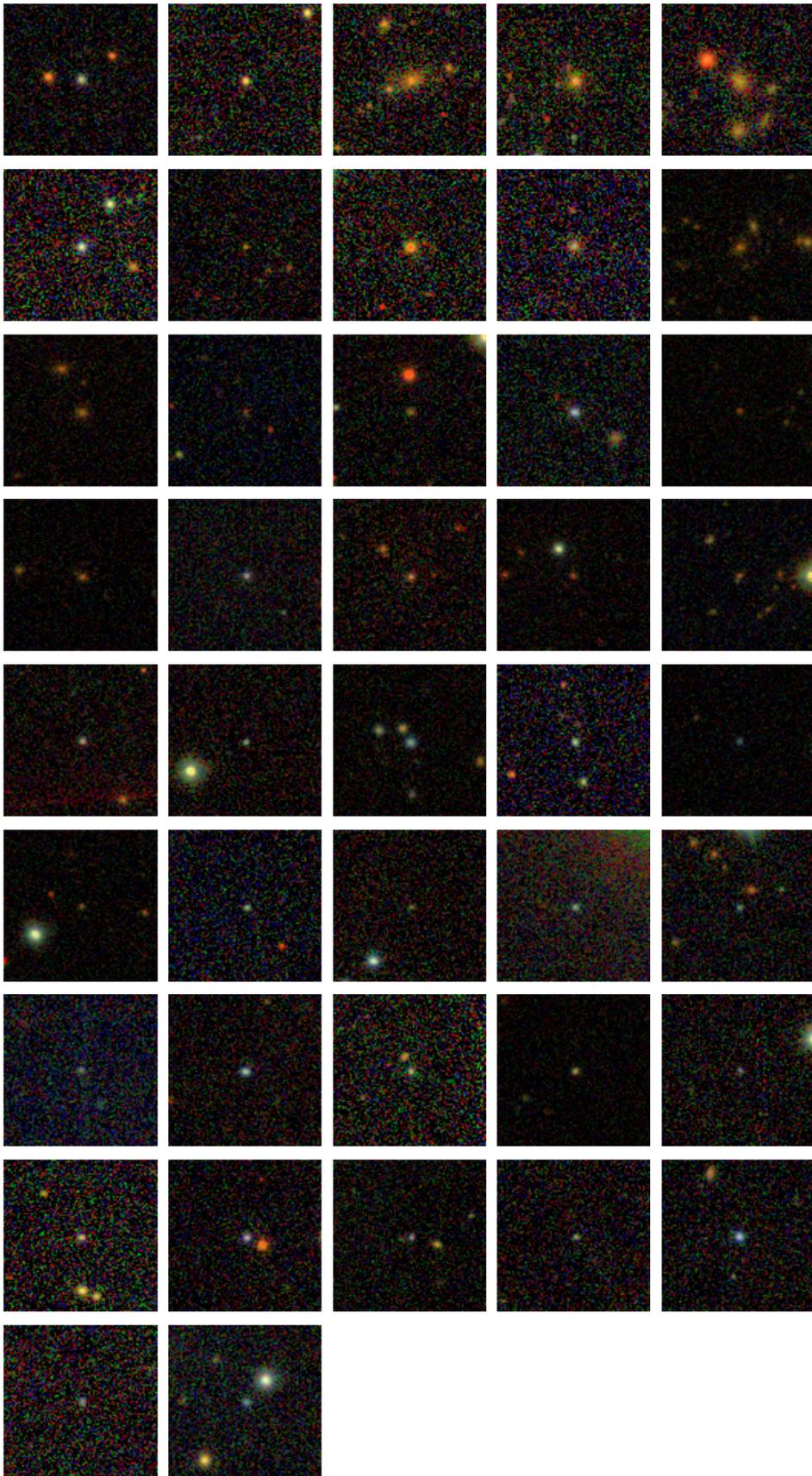


Figura 4.6: As fontes do tipo FR2 previamente identificadas.

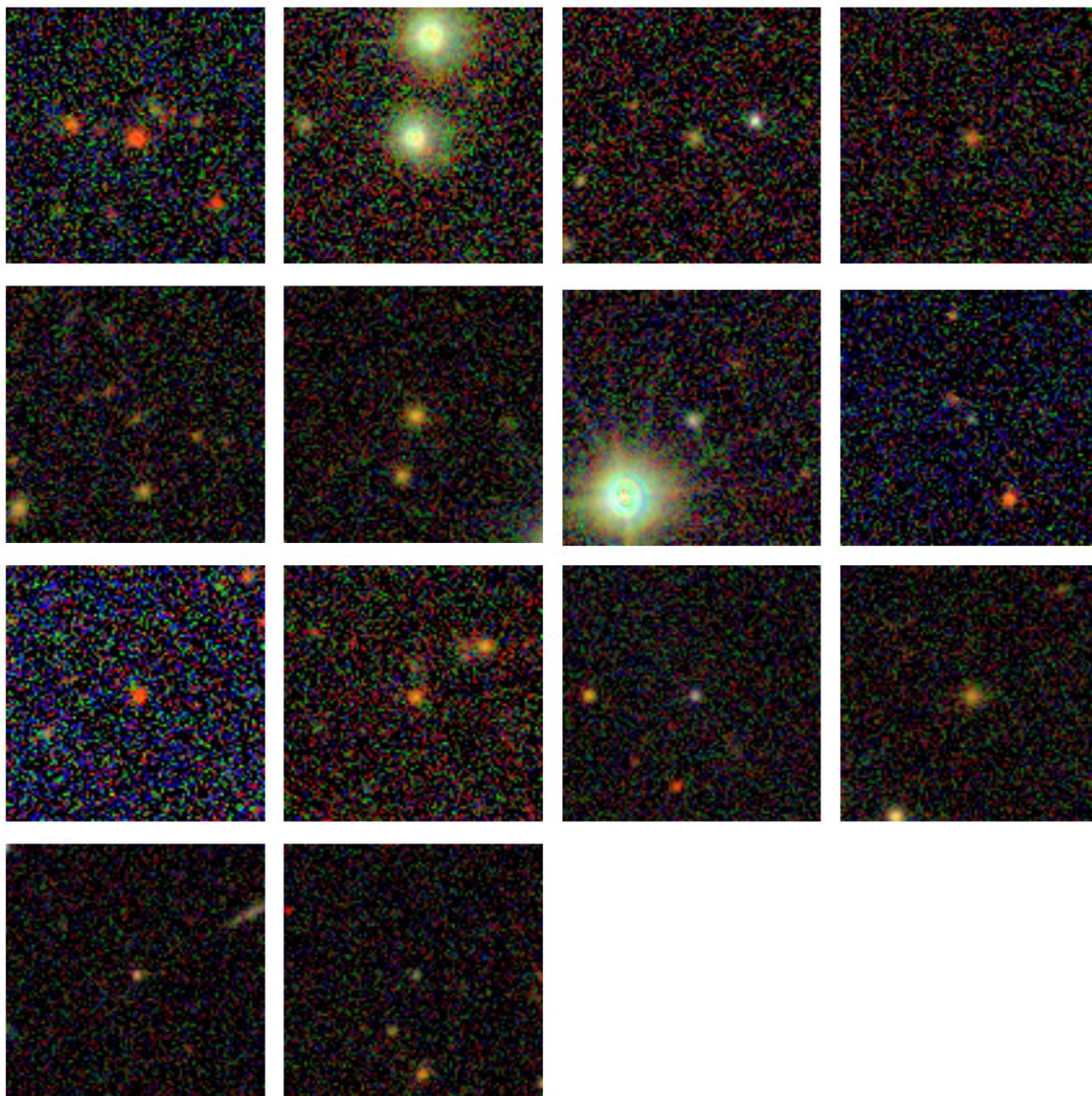


Figura 4.7: As fontes do tipo FR2 identificadas por nossa seleção.

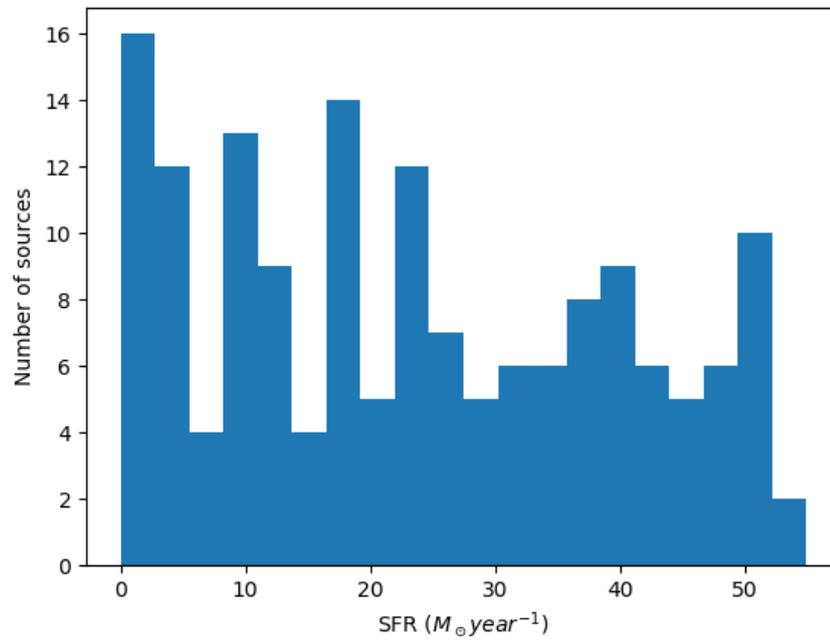


Figura 4.8: A distribuição de SFR calculada para a amostra de fontes selecionadas como galáxias normais.

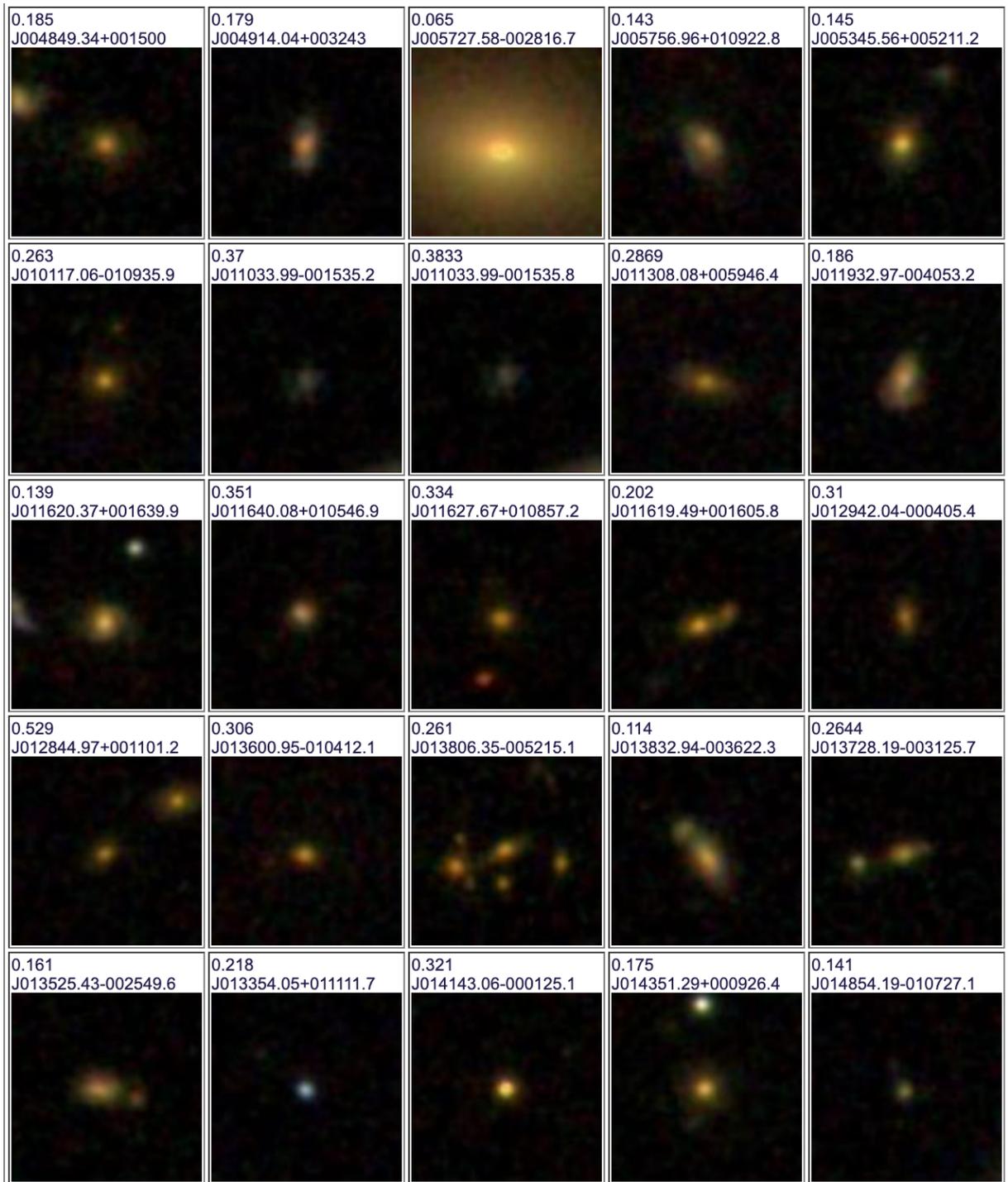


Figura 4.9: As fontes identificadas como SFGs pela nossa seleção (continua na próxima página).

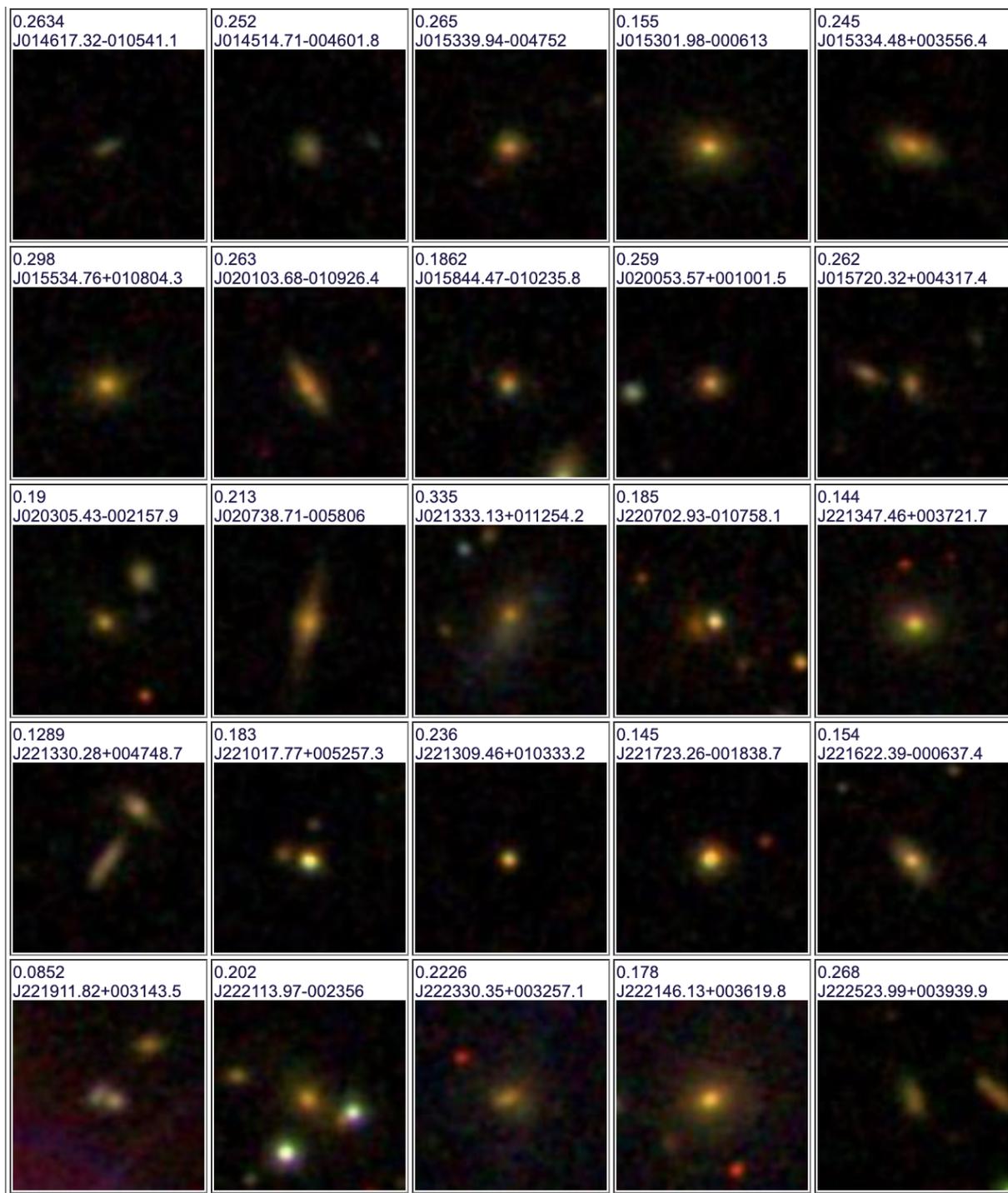


Figura 4.10: As fontes identificadas como SFGs pela nossa seleção (continua na próxima página).

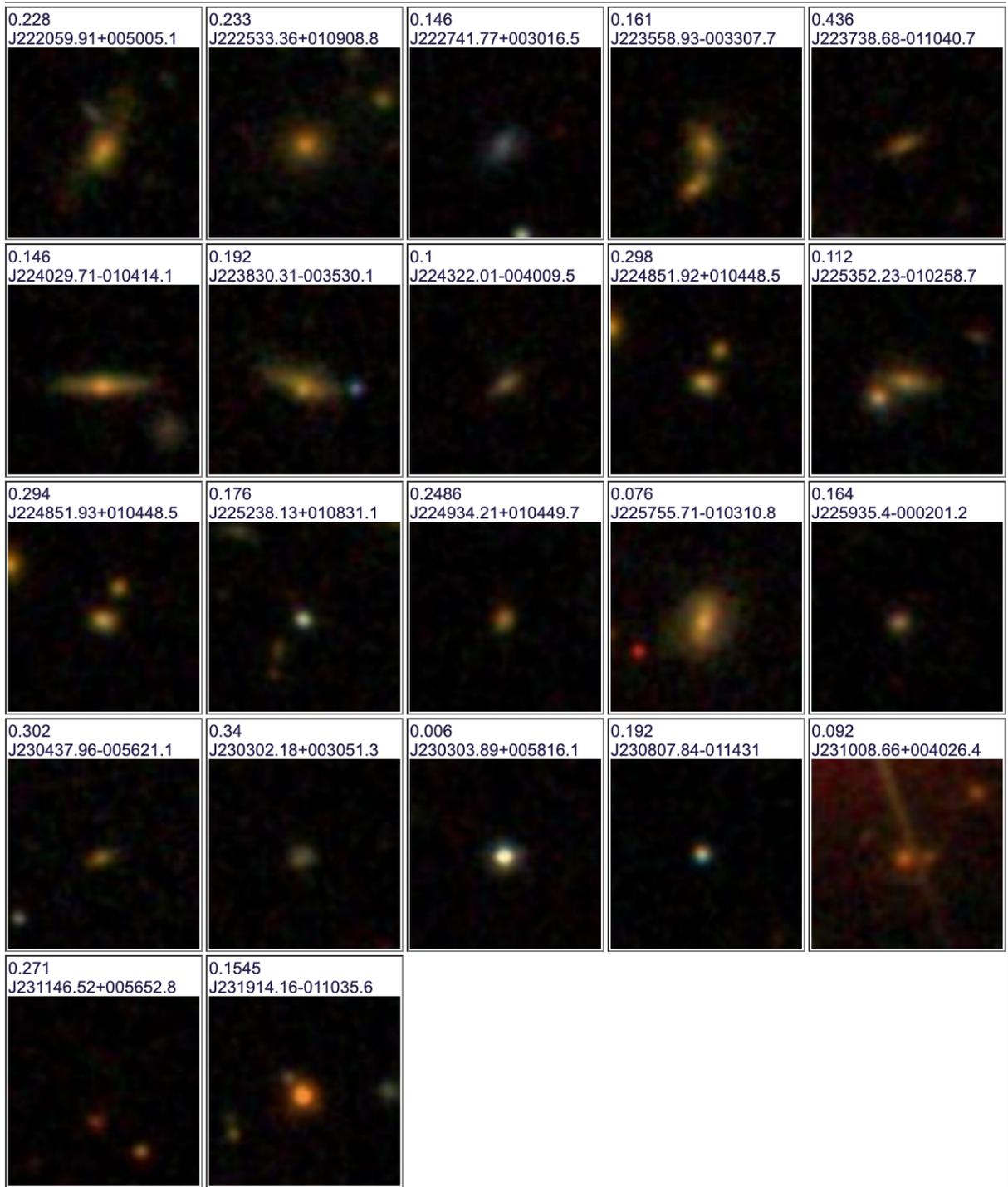


Figura 4.11: As fontes identificadas como SFGs pela nossa seleção.

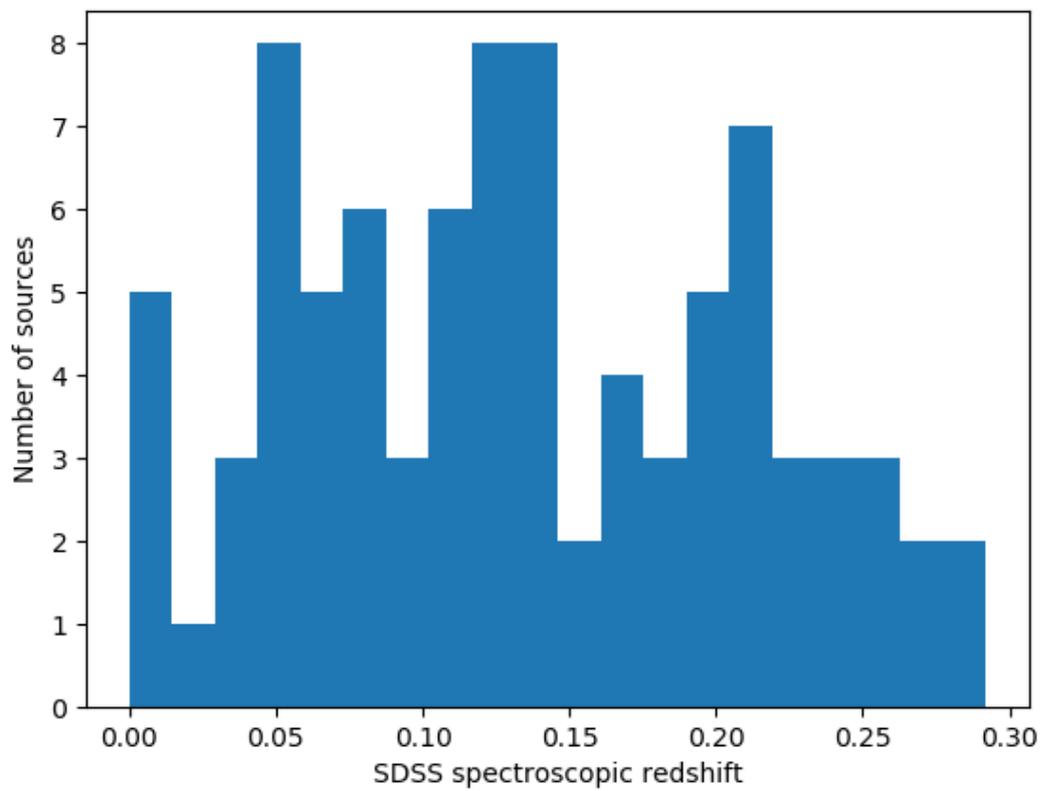


Figura 4.12: A distribuição de redshifts das fontes selecionadas como SFGs que já possuíam redshift espectroscópicos por SDSS.

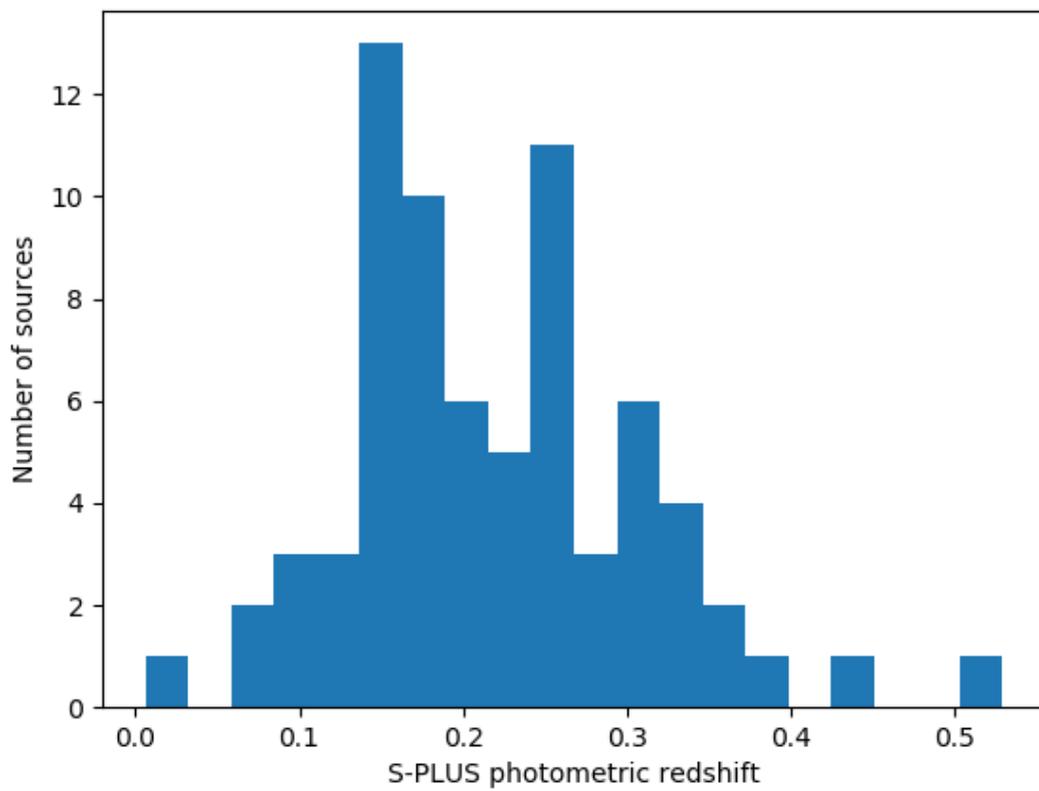


Figura 4.13: A distribuição de redshifts fotométricos das fontes selecionadas como novas candidatas a SFGs.

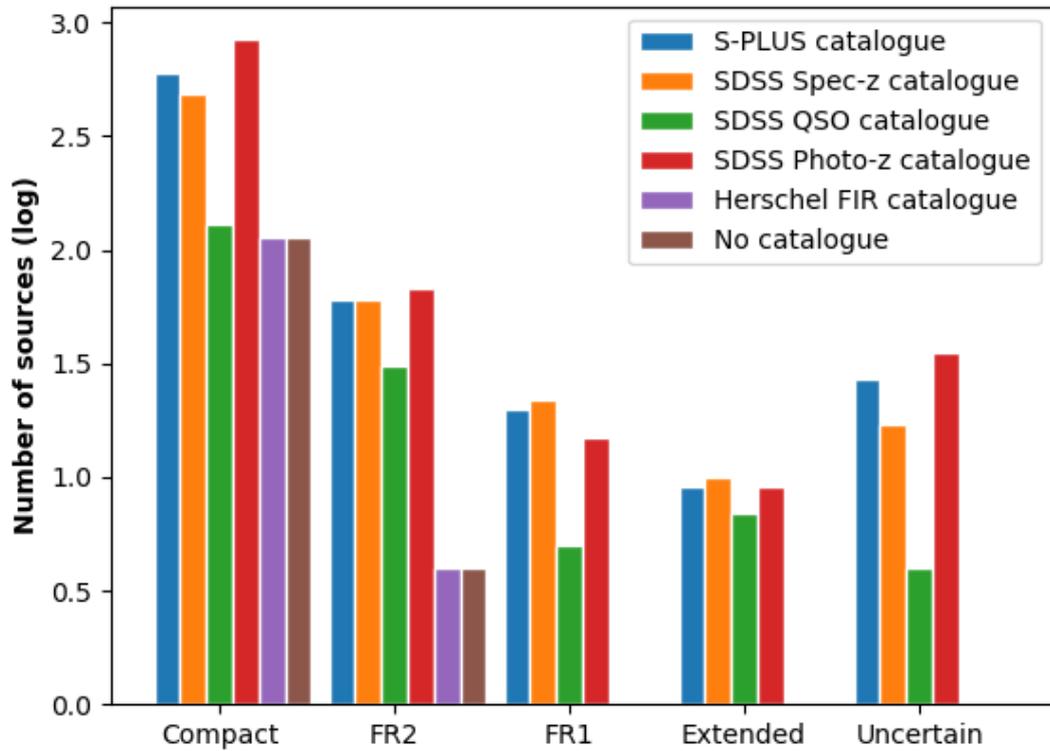


Figura 4.14: A quantidade de correlações por catálogo por morfologia dentre as fontes emisoras de rádio em S-PLUS

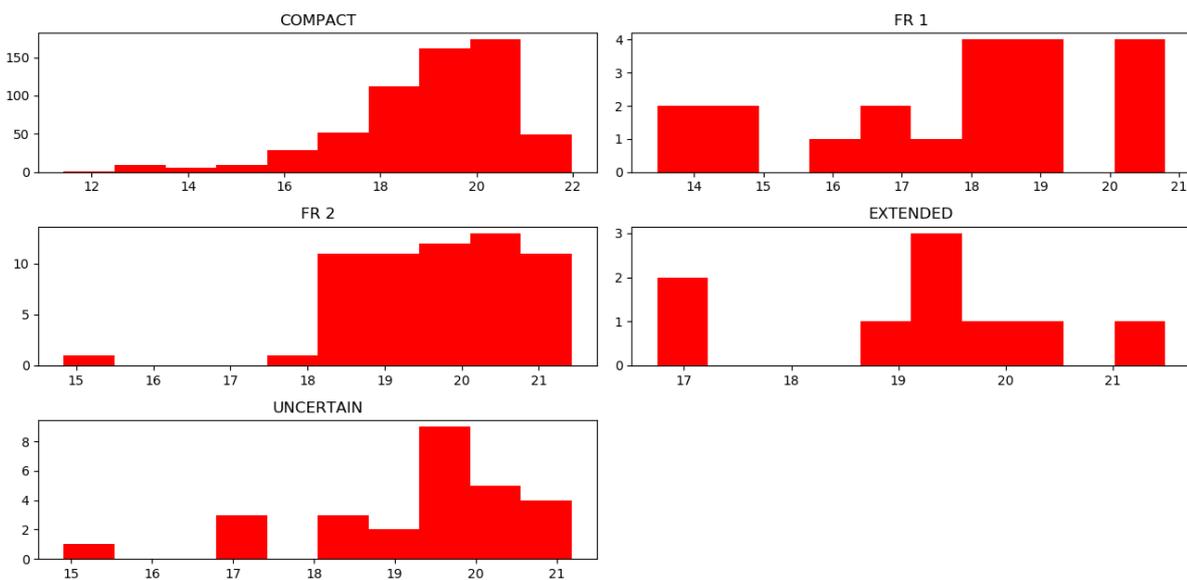


Figura 4.15: Distribuição de magnitudes na banda  $r$  para cada classe.

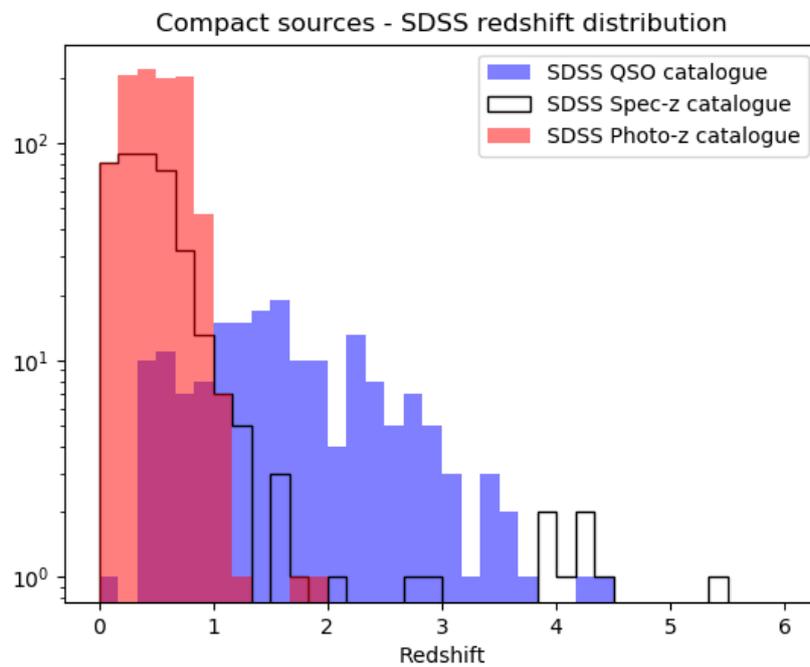


Figura 4.16: A distribuição de redshift das fontes compactas identificadas no SDSS. O histograma dos redshifts fotométricos de SDSS é representado em vermelho, os redshifts espectroscópicos são representados pela linha preta e em azul estão representados os redshifts dos quasares confirmados encontrados em nossa seleção.



# Capítulo 5

## Conclusões

Neste trabalho, nos dedicamos a desenvolver um método para encontrar galáxias em S-PLUS emisoras em rádio e classificá-las com respeito às suas morfologias neste comprimento de onda. O objetivo final deste processo era determinar um protocolo para seleção de novos objetos em relação a suas características de emissão observadas em S-PLUS e, assim, estender a população conhecida de AGNs no hemisfério sul. Para tanto, o projeto foi dividido em duas fundamentais etapas: a identificação de contrapartidas em rádio para as fontes de S-PLUS e a classificação dessas fontes enquanto possíveis AGNs.

Para a primeira etapa, a partir de catálogo de rádio compilado por [Hodge et al. \(2011\)](#), construímos um código capaz de obter as imagens em rádio das fontes, subdividir o catálogo em rádio em listas indexadas pelos campos observados em S-PLUS (permitindo a inspeção de um campo de cada vez e, assim, tornando o código mais eficiente), extrair fontes a partir das imagens de detecção de S-PLUS (dando conta, assim, de possíveis fontes excluídas do catálogo óptico devido aos cortes de magnitude) e, finalmente, gerar as imagens comparativas e entre rádio e óptico que auxiliam na determinação de contrapartidas e da morfologia das fontes. Esse código, por sua vez, conta com um modo automático (projetado especialmente para encontrar contrapartidas para fontes compactas e isoladas em rádio) e um modo de inspeção visual, no qual o usuário pode sugerir morfologias e contrapartidas ópticas. A amostra escolhida para o projeto piloto desta inspeção contava com 4186 fontes em rádio, a maioria delas classificadas como compactas. Dentre as fontes inspecionadas, fomos capazes de encontrar 1316 contrapartidas nas imagens ópticas e 715 no catálogo S-PLUS. Utilizando as posições das contrapartidas, obtivemos magnitudes e FWHMs em S-PLUS e contrapartidas nos catálogos espectroscópicos de quasares e galáxias em SDSS, bem como contrapartidas em infravermelho distante no catálogo do HERS.

Na segunda fase do projeto, utilizamos parâmetros como magnitudes ópticas, fluxo em rádio e infravermelho e FWHM das fontes previamente identificadas para elaborar critérios de seleção para candidatos a quasares e AGNs em geral sem recorrer à espectroscopia. Elaboramos 4 critérios a serem combinados nas seleções: (1) A compactidade em rádio,

(2) o corte de luminosidade em rádio, (3) a relação rádio-infravermelho e (4) os critérios de seleção por cores. Como resultado desta seleção, identificamos 50 novos candidatos a AGNs, sendo eles 35 quasares e 15 radiogaláxias. Os critérios ainda foram capazes de recuperar 52 dos 99 quasares confirmados por SDSS no catálogo S-PLUS<sup>1</sup>, mostrando que a seleção funciona para a maioria das fontes, mesmo mediante limitações de redshift e de magnitude. Os critérios de seleção conduzidos neste trabalho visam a determinação de bons candidatos em detrimento da completude da seleção. Também demonstramos o poder de empregar catálogos em rádio para determinar taxas de formação estelar em galáxias normais (não-AGNs) em S-PLUS, o que será uma valiosa adição às propriedades espectrais que podem ser derivadas com base na fotometria do S-PLUS (por exemplo, redshift fotométrico, morfologia óptica, massa estelar e idade). Finalmente, este estudo também é valioso para identificar as fontes de rádio que não são detectadas no S-PLUS. Essas fontes incluirão radio AGNs altamente obscurecidos ou muito distantes e, portanto, são uma classe de objetos adicional muito interessante para estudos futuros com imagens mais profundas ou espectroscopia.

Um fundamental dificultante da seleção realizada por esse trabalho foi a baixa confiabilidade nos redshifts fotométricos do DR1 de S-PLUS, principalmente para AGNs, uma vez que essa classe não é considerada na biblioteca de modelos utilizada na obtenção destes redshifts. A restrição nos redshifts fotométricos nos impede de utilizar o critério de corte de luminosidade para quasares e tende a tornar subestimada a luminosidade em rádio para AGNs, fazendo com que este critério selecione um número menor de fontes do que o correto. A fim de ampliar e aprimorar os resultados aqui reportados, a análise apresentada neste trabalho deverá ser repetida utilizando os dados do vindouro DR3 do S-PLUS, que contém melhorias na redução dos dados, calibração fotométrica, além de redshifts fotométricos aprimorados englobando modelos espectrais de AGNs e quasares. Esta dissertação fornece um roteiro claro que pode ser utilizado para o aprofundamento desta análise.

A metodologia apresentada neste trabalho pode ser continuada pela obtenção de espectros para os candidatos selecionados e, através deles, a confirmação de novos quasares e AGNs na região do Stripe82. Em posse destes resultados, será possível compilar um VAC das fontes emisoras de rádio em S-PLUS contendo posições, morfologia e número de componentes em rádio, redshifts espectroscópicos, luminosidades, magnitudes e a classificação das fontes quanto à origem de suas emissões em rádio. Outro passo importante será a extensão da análise para toda a área coberta por S-PLUS.

A fim de realizar esta extensão, recentes catálogos em rádio cobrindo o hemisfério sul como o NVSS ([Condon et al., 1998](#)), o *Very Large Array Sky Survey* (VLASS) ([Lacy et al., 2020](#)), o *Sydney University Molonglo Sky Survey* (SUMMS) ([Mauch et al., 2003](#))

---

<sup>1</sup>Neste caso, definimos como quasares os objetos identificados no catálogo de QSOs de SDSS e com emissão compacta em rádio

e os levantamentos do *Australian square-kilometre-array pathfinder* (ASKAP) ([Johnston et al., 2008](#)), serão fundamentais aliados na cobertura efetiva dos  $\sim 9300 \text{ deg}^2$  planejados para o S-PLUS.

O código produzido para a identificação e sugestão de morfologias das fontes de rádio em S-PLUS fica disponível para a colaboração e pode ser facilmente adaptado para o uso em diferentes catálogos de rádio e ópticos. Um possível desenvolvimento do trabalho envolve a utilização do código para a identificação de fontes também no hemisfério norte, a partir dos catálogos J-PLUS ([Cenarro et al., 2019](#)) e (mini)JPAS ([Bonoli et al., 2020](#)). Unindo as identificações em ambos os hemisférios, será possível estudar as fontes emissoras em rádio em mais de  $20,000 \text{ deg}^2$  no céu.



## Referências Bibliográficas

- Abramowicz, M. A., Fragile, P. C., 2013, “Foundations of Black Hole Accretion Disk Theory”, Living Reviews in Relativity, 16(1):1. doi: 10.12942/lrr-2013-1.
- Aguado, D. S., Ahumada, R., Almeida, A., et al., 2019, “The Fifteenth Data Release of the Sloan Digital Sky Surveys: First Release of MaNGA-derived Quantities, Data Visualization Tools, and Stellar Library”, Astrophys. J. Suppl., 240(2):23. doi: 10.3847/1538-4365/aaf651.
- Ahn, C. P., Alexandroff, R., Allende Prieto, C., et al., 2012, “The Ninth Data Release of the Sloan Digital Sky Survey: First Spectroscopic Data from the SDSS-III Baryon Oscillation Spectroscopic Survey”, Astrophys. J. Suppl., 203(2):21. doi: 10.1088/0067-0049/203/2/21.
- Ahumada, R., Prieto, C. A., Almeida, A., et al., 2020, “The 16th Data Release of the Sloan Digital Sky Surveys: First Release from the APOGEE-2 Southern Survey and Full Release of eBOSS Spectra”, Astrophys. J. Suppl., 249(1):3. doi: 10.3847/1538-4365/ab929e.
- Antonucci, R. R. J., Miller, J. S., 1985, “Spectropolarimetry and the nature of NGC 1068.” Astrophys. J., v. 297 (out.), pp. 621–632. doi: 10.1086/163559.
- Baade, W., Minkowski, R., 1954, “On the Identification of Radio Sources.” Astrophys. J., v. 119 (jan.), pp. 215. doi: 10.1086/145813.
- Baldi, R. D., Capetti, A., Giovannini, G., 2015, “Pilot study of the radio-emitting AGN population: the emerging new class of FR 0 radio-galaxies”, Astron. Astrophys., 576:A38. doi: 10.1051/0004-6361/201425426.
- Banfield, J. K., Wong, O. I., Willett, K. W., et al., 2015, “Radio Galaxy Zoo: host galaxies and radio morphologies derived from visual inspection”, Mon. Not. Roy. Astron. Soc., v. 453, n. 3 (nov.), pp. 2326–2340. doi: 10.1093/mnras/stv1688.
- Becker, R. H., White, R. L., Helfand, D. J., 1995, “The FIRST Survey: Faint Images of the Radio Sky at Twenty Centimeters”, Astrophys. J., v. 450 (set.), pp. 559. doi: 10.1086/176166.

- Beckmann, V., Shrader, C. R., 2012, Active Galactic Nuclei.
- Begelman, M. C., Blandford, R. D., Rees, M. J., 1984, “Theory of extragalactic radio sources”, Reviews of Modern Physics, v. 56, n. 2 (abr.), pp. 255–351. doi: 10.1103/RevModPhys.56.255.
- Bell, E. F., 2003, “Estimating Star Formation Rates from Infrared and Radio Luminosities: The Origin of the Radio-Infrared Correlation”, Astrophys. J., v. 586, n. 2 (abr.), pp. 794–813. doi: 10.1086/367829.
- Bell, E. F., McIntosh, D. H., Katz, N., et al., 2003, “The Optical and Near-Infrared Properties of Galaxies. I. Luminosity and Stellar Mass Functions”, Astrophys. J. Suppl., v. 149, n. 2 (dez.), pp. 289–312. doi: 10.1086/378847.
- Benitez, N., Dupke, R., Moles, M., et al., 2014, “J-PAS: The Javalambre-Physics of the Accelerated Universe Astrophysical Survey”, arXiv e-prints, art. arXiv:1403.5237.
- Benítez, N., 2000, “Bayesian Photometric Redshift Estimation”, Astrophys. J., v. 536, n. 2 (jun.), pp. 571–583. doi: 10.1086/308947.
- Bertin, E., Arnouts, S., 1996, “SExtractor: Software for source extraction.” Astron. Astrophys. Suppl., v. 117 (Jun), pp. 393–404. doi: 10.1051/aas:1996164.
- Best, P. N., Heckman, T. M., 2012, “On the fundamental dichotomy in the local radio-AGN population: accretion, evolution and host galaxy properties”, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, v. 421, n. 2 (03), pp. 1569–1582. ISSN: 0035-8711. doi: 10.1111/j.1365-2966.2012.20414.x. Disponível em: <<https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2012.20414.x>>.
- Best, P. N., Kauffmann, G., Heckman, T. M., et al., 2005, “The host galaxies of radio-loud active galactic nuclei: mass dependences, gas cooling and active galactic nuclei feedback”, Mon. Not. Roy. Astron. Soc., v. 362, n. 1 (set.), pp. 25–40. doi: 10.1111/j.1365-2966.2005.09192.x.
- Blandford, R. D., Königl, A., 1979, “Relativistic jets as compact radio sources.” Astrophys. J., v. 232 (ago.), pp. 34–48. doi: 10.1086/157262.
- Blandford, R. D., Znajek, R. L., 1977, “Electromagnetic extraction of energy from Kerr black holes.” Mon. Not. Roy. Astron. Soc., v. 179 (maio), pp. 433–456. doi: 10.1093/mnras/179.3.433.

- Blandford, R., Meier, D., Readhead, A., 2019, “Relativistic Jets from Active Galactic Nuclei”, Annual Review of Astronomy and Astrophysics, v. 57, n. 1 (Aug), pp. 467–509. ISSN: 1545-4282. doi: 10.1146/annurev-astro-081817-051948. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1146/annurev-astro-081817-051948>>.
- Bolton, A. S., Schlegel, D. J., Aubourg, É., et al., 2012, “Spectral Classification and Redshift Measurement for the SDSS-III Baryon Oscillation Spectroscopic Survey”, Astron. J., 144(5):144. doi: 10.1088/0004-6256/144/5/144.
- Bonoli, S., Marín-Franch, A., Varela, J., et al., 2020, “The miniJPAS survey: a preview of the Universe in 56 colours”, arXiv e-prints, art. arXiv:2007.01910.
- Cenarro, A. J., Moles, M., Cristóbal-Hornillos, D., et al., 2019, “J-PLUS: The Javalambre Photometric Local Universe Survey”, Astron. Astrophys., 622:A176. doi: 10.1051/0004-6361/201833036.
- Condon, J. J., 1992, “Radio emission from normal galaxies.” Ann. Rev. Astron. Astrophys., v. 30 (jan.), pp. 575–611. doi: 10.1146/annurev.aa.30.090192.003043.
- Condon, J. J., Anderson, M. L., Helou, G., 1991, “Correlations between Far-Infrared, Radio, and Blue Luminosities of Spiral Galaxies”, Astrophys. J., v. 376 (jul.), pp. 95. doi: 10.1086/170258.
- Condon, J. J., Cotton, W. D., Greisen, E. W., et al., 1998, “The NRAO VLA Sky Survey”, Astron. J., v. 115, n. 5 (maio), pp. 1693–1716. doi: 10.1086/300337.
- Condon, J. J., Cotton, W. D., Broderick, J. J., 2002, “Radio Sources and Star Formation in the Local Universe”, Astron. J., v. 124, n. 2 (ago.), pp. 675–689. doi: 10.1086/341650.
- Dekel, A., Silk, J., 1986, “The Origin of Dwarf Galaxies, Cold Dark Matter, and Biased Galaxy Formation”, Astrophys. J., v. 303 (abr.), pp. 39. doi: 10.1086/164050.
- Fabian, A., 2012, “Observational Evidence of Active Galactic Nuclei Feedback”, Annual Review of Astronomy and Astrophysics, v. 50, n. 1 (sep), pp. 455–489. doi: 10.1146/annurev-astro-081811-125521. Disponível em: <<https://doi.org/10.1146/annurev-astro-081811-125521>>.
- Fanaroff, B. L., Riley, J. M., 1974, “The morphology of extragalactic radio sources of high and low luminosity”, Mon. Not. Roy. Astron. Soc., v. 167 (May), pp. 31P–36P. doi: 10.1093/mnras/167.1.31P.

- Ferrarese, L., Merritt, D., 2000, “A Fundamental Relation between Supermassive Black Holes and Their Host Galaxies”, *Astrophys. J. Lett.*, v. 539, n. 1 (ago.), pp. L9–L12. doi: 10.1086/312838.
- Fukugita, M., Ichikawa, T., Gunn, J. E., et al., 1996, “The Sloan Digital Sky Survey Photometric System”, *Astron. J.*, v. 111 (abr.), pp. 1748. doi: 10.1086/117915.
- Gebhardt, K., Bender, R., Bower, G., et al., 2000, “A Relationship between Nuclear Black Hole Mass and Galaxy Velocity Dispersion”, *Astrophys. J. Lett.*, v. 539, n. 1 (ago.), pp. L13–L16. doi: 10.1086/312840.
- Gopal-Krishna, Wiita, P. J., 2000, “Extragalactic radio sources with hybrid morphology: implications for the Fanaroff-Riley dichotomy”, *Astron. Astrophys.*, v. 363 (nov.), pp. 507–516.
- Greenstein, J. L., 1963, “Red-Shift of the Unusual Radio Source: 3C 48”, *Nature*, v. 197, n. 4872 (mar.), pp. 1041–1042. doi: 10.1038/1971041a0.
- Gunn, J. E., Peterson, B. A., 1965, “On the Density of Neutral Hydrogen in Intergalactic Space.” *Astrophys. J.*, v. 142 (nov.), pp. 1633–1636. doi: 10.1086/148444.
- Heckman, T. M., Best, P. N., 2014, “The Coevolution of Galaxies and Supermassive Black Holes: Insights from Surveys of the Contemporary Universe”, *Ann. Rev. Astron. Astrophys.*, v. 52 (ago.), pp. 589–660. doi: 10.1146/annurev-astro-081913-035722.
- Herbert, P. D., Jarvis, M. J., Willott, C. J., et al., 2010, “Evidence of different star formation histories for high- and low-luminosity radio galaxies”, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, v. 406, n. 3 (ago.), pp. 1841–1847. doi: 10.1111/j.1365-2966.2010.16783.x.
- Heywood, I., Jarvis, M. J., Baker, A. J., et al., 2016, “A deep/wide 1-2 GHz snapshot survey of SDSS Stripe 82 using the Karl G. Jansky Very Large Array in a compact hybrid configuration”, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, v. 460, n. 4 (Aug), pp. 4433–4452. doi: 10.1093/mnras/stw1250.
- Hodge, J. A., Becker, R. H., White, R. L., et al., 2011, “High-resolution Very Large Array Imaging of Sloan Digital Sky Survey Stripe 82 at 1.4 GHz”, *Astron. J.*, 142(1):3. doi: 10.1088/0004-6256/142/1/3.
- Hopkins, A. M., Afonso, J., Chan, B., et al., 2003, “The Phoenix Deep Survey: The 1.4 GHz Microjansky Catalog”, *Astron. J.*, v. 125, n. 2 (fev.), pp. 465–477. doi: 10.1086/345974.

- Jiang, L., Fan, X., Bian, F., et al., 2014, “The Sloan Digital Sky Survey Stripe 82 Imaging Data: Depth-optimized Co-adds over 300 deg<sup>2</sup> in Five Filters”, Astrophys. J. Suppl., 213(1):12. doi: 10.1088/0067-0049/213/1/12.
- Johnson, H. L., Morgan, W. W., 1953, “Fundamental stellar photometry for standards of spectral type on the Revised System of the Yerkes Spectral Atlas.” Astrophys. J., v. 117 (maio), pp. 313. doi: 10.1086/145697.
- Johnston, S., Taylor, R., Bailes, M., et al., 2008, “Science with ASKAP. The Australian square-kilometre-array pathfinder”, Experimental Astronomy, v. 22, n. 3 (dez.), pp. 151–273. doi: 10.1007/s10686-008-9124-7.
- Kereš, D., Katz, N., Fardal, M., et al., 2009, “Galaxies in a simulated  $\Lambda$ CDM Universe - I. Cold mode and hot cores”, Mon. Not. Roy. Astron. Soc., v. 395, n. 1 (maio), pp. 160–179. doi: 10.1111/j.1365-2966.2009.14541.x.
- Kereš, D., Katz, N., Davé, R., et al., 2009, “Galaxies in a simulated  $\Lambda$ CDM universe – II. Observable properties and constraints on feedback”, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, v. 396, n. 4 (07), pp. 2332–2344. ISSN: 0035-8711. doi: 10.1111/j.1365-2966.2009.14924.x. Disponível em: <<https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2009.14924.x>>.
- Kormendy, J., Richstone, D., 1995, “Inward Bound—The Search For Supermassive Black Holes In Galactic Nuclei”, Ann. Rev. Astron. Astrophys., v. 33 (jan.), pp. 581. doi: 10.1146/annurev.aa.33.090195.003053.
- Lacy, M., Baum, S. A., Chandler, C. J., et al., 2020, “The Karl G. Jansky Very Large Array Sky Survey (VLASS). Science Case and Survey Design”, Publ. Astron. Soc. Pacific, 132(1009):035001. doi: 10.1088/1538-3873/ab63eb.
- Machalski, J., Godlowski, W., 2000, “1.4 GHz luminosity function of galaxies in the Las Campanas redshift survey and its evolution”, Astron. Astrophys., v. 360 (ago.), pp. 463–471.
- Mauch, T., Murphy, T., Buttery, H. J., et al., 2003, “SUMSS: a wide-field radio imaging survey of the southern sky - II. The source catalogue”, Mon. Not. Roy. Astron. Soc., v. 342, n. 4 (jul.), pp. 1117–1130. doi: 10.1046/j.1365-8711.2003.06605.x.
- McConnell, N. J., Ma, C.-P., Gebhardt, K., et al., 2011, “Two ten-billion-solar-mass black holes at the centres of giant elliptical galaxies”, Nature, v. 480, n. 7376 (dez.), pp. 215–218. doi: 10.1038/nature10636.

- Mendes de Oliveira, C., Ribeiro, T., Schoenell, W., et al., 2019, “The Southern Photometric Local Universe Survey (S-PLUS): improved SEDs, morphologies and redshifts with 12 optical filters”, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, (Aug), pp. 2048. doi: 10.1093/mnras/stz1985.
- Molino, A., Costa-Duarte, M. V., Sampedro, L., et al., 2020, “Assessing the photometric redshift precision of the S-PLUS survey: the Stripe-82 as a test-case”, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, v. 499, n. 3 (dez.), pp. 3884–3908. doi: 10.1093/mnras/staa1586.
- Oke, J. B., Gunn, J. E., 1983, “Secondary standard stars for absolute spectrophotometry.” *Astrophys. J.*, v. 266 (mar.), pp. 713–717. doi: 10.1086/160817.
- Overzier, R. A., Röttgering, H. J. A., Rengelink, R. B., et al., 2003, “The spatial clustering of radio sources in NVSS and FIRST; implications for galaxy clustering evolution”, *Astron. Astrophys.*, v. 405 (jul.), pp. 53–72. doi: 10.1051/0004-6361:20030527.
- Pâris, I., Petitjean, P., Aubourg, É., et al., 2012, “The Sloan Digital Sky Survey quasar catalog: ninth data release”, *Astron. Astrophys.*, 548:A66. doi: 10.1051/0004-6361/201220142.
- Pâris, I., Petitjean, P., Aubourg, É., et al., 2018, “The Sloan Digital Sky Survey Quasar Catalog: Fourteenth data release”, *Astron. Astrophys.*, 613:A51. doi: 10.1051/0004-6361/201732445.
- Petrosian, V., 1976, “Surface Brightness and Evolution of Galaxies”, *Astrophys. J. Lett.*, v. 210 (dez.), pp. L53. doi: 10.1086/182301.
- Pickles, A. J., 1998, “A Stellar Spectral Flux Library: 1150-25000 Å”, *Publ. Astron. Soc. Pacific*, v. 110, n. 749 (jul.), pp. 863–878. doi: 10.1086/316197.
- Prescott, M., Whittam, I. H., Jarvis, M. J., et al., 2018, “The Stripe 82 1-2 GHz Very Large Array Snapshot Survey: multiwavelength counterparts”, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, v. 480, n. 1 (Oct), pp. 707–721. doi: 10.1093/mnras/sty1789.
- Rees, M. J., 1984, “Black Hole Models for Active Galactic Nuclei”, *Ann. Rev. Astron. Astrophys.*, v. 22 (jan.), pp. 471–506. doi: 10.1146/annurev.aa.22.090184.002351.

- Richards, G. T., Fan, X., Schneider, D. P., et al., 2001, “Colors of 2625 Quasars at  $0 < Z < 5$  Measured in the Sloan Digital Sky Survey Photometric System”, *Astron. J.*, v. 121, n. 5 (maio), pp. 2308–2330. doi: 10.1086/320392.
- Sabater, J., Best, P. N., Hardcastle, M. J., et al., 2019, “The LoTSS view of radio AGN in the local Universe. The most massive galaxies are always switched on”, *Astron. Astrophys.*, 622:A17. doi: 10.1051/0004-6361/201833883.
- Sadler, E. M., Jackson, C. A., Cannon, R. D., et al., 2002, “Radio sources in the 2dF Galaxy Redshift Survey - II. Local radio luminosity functions for AGN and star-forming galaxies at 1.4 GHz”, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, v. 329, n. 1 (jan.), pp. 227–245. doi: 10.1046/j.1365-8711.2002.04998.x.
- Salpeter, E. E., 1964, “Accretion of Interstellar Matter by Massive Objects.” *Astrophys. J.*, v. 140 (ago.), pp. 796–800. doi: 10.1086/147973.
- Schmidt, M., 1963, “3C 273 : A Star-Like Object with Large Red-Shift”, *Nature*, v. 197, n. 4872 (mar.), pp. 1040. doi: 10.1038/1971040a0.
- Seyfert, C. K., 1943, “Nuclear Emission in Spiral Nebulae.” *Astrophys. J.*, v. 97 (jan.), pp. 28. doi: 10.1086/144488.
- Shakura, N. I., Sunyaev, R. A., 1973, “Reprint of 1973A&A....24..337S. Black holes in binary systems. Observational appearance.” *Astron. Astrophys.*, v. 500 (jun.), pp. 33–51.
- Takada, M., Ellis, R. S., Chiba, M., et al., 2014, “Extragalactic science, cosmology, and Galactic archaeology with the Subaru Prime Focus Spectrograph”, *Publ. Astron. Soc. Japan*, 66(1):R1. doi: 10.1093/pasj/pst019.
- Thompson, A. R., Moran, J. M., Swenson, G. W., 1986, *Interferometry and synthesis in radio astronomy*.
- Urry, C. M., Padovani, P., 1995, “Unified Schemes for Radio-Loud Active Galactic Nuclei”, *Publ. Astron. Soc. Pacific*, v. 107 (set.), pp. 803. doi: 10.1086/133630.
- van de Hulst, H. C., Muller, C. A., Oort, J. H., 1954, “The spiral structure of the outer part of the Galactic System derived from the hydrogen emission at 21 cm wavelength”, *Bull. Astron. Inst. Netherlands*, v. 12 (maio), pp. 117.
- Vanden Berk, D. E., Richards, G. T., Bauer, A., et al., 2001, “Composite Quasar Spectra from the Sloan Digital Sky Survey”, *Astron. J.*, v. 122, n. 2 (ago.), pp. 549–564. doi: 10.1086/321167.

- Viero, M. P., Asboth, V., Roseboom, I. G., et al., 2014, “The Herschel Stripe 82 Survey (HerS): Maps and Early Catalog”, *Astrophys. J. Suppl.*, 210(2):22. doi: 10.1088/0067-0049/210/2/22.
- White, R. L., Becker, R. H., Helfand, D. J., et al., 1997, “A Catalog of 1.4 GHz Radio Sources from the FIRST Survey”, *Astrophys. J.*, v. 475, n. 2 (fev.), pp. 479–493. doi: 10.1086/303564.
- Whittam, I. H., Prescott, M., McAlpine, K., et al., 2018, “The Stripe 82 1-2 GHz Very Large Array Snapshot Survey: host galaxy properties and accretion rates of radio galaxies”, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, v. 480, n. 1 (Oct), pp. 358–370. doi: 10.1093/mnras/sty1787.
- Wilman, R. J., Röttgering, H. J. A., Overzier, R. A., et al., 2003, “The clustering of sub-mJy radio sources in the Bootes Deep Field”, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, v. 339, n. 3 (mar.), pp. 695–700. doi: 10.1046/j.1365-8711.2003.06215.x.
- York, D. G., Adelman, J., Anderson, John E., J., et al., 2000, “The Sloan Digital Sky Survey: Technical Summary”, *Astron. J.*, v. 120, n. 3 (set.), pp. 1579–1587. doi: 10.1086/301513.
- Zel’dovich, Y. B., 1964, “The Fate of a Star and the Evolution of Gravitational Energy Upon Accretion”, *Soviet Physics Doklady*, v. 9 (set.), pp. 195.