



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO DE CIÊNCIAS FÍSICAS E MATEMÁTICAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FÍSICA

Marcos da Maia Vicente Júnior

**Buscas por trânsitos planetários ao redor de estrelas anãs M da região do bojo
Galáctico**

Florianópolis
2019

Marcos da Maia Vicente Júnior

Buscas por trânsitos planetários ao redor de estrelas anãs M da região do bojo Galáctico

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Física da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do título de mestre em Física.

Orientador: Prof. Roberto Kalbusch Saito, Dr.

Florianópolis
2019

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

Vicente Júnior, Marcos da Maia
Buscas por trânsitos planetários ao redor de estrelas
anãs M da região do bojo Galáctico / Marcos da Maia
Vicente Júnior ; orientador, Roberto Kalbusch Saito, 2019.
64 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Catarina, Centro de Ciências Físicas e Matemáticas,
Programa de Pós-Graduação em Física, Florianópolis, 2019.

Inclui referências.

1. Física. 2. Astrofísica Estelar. 3. Exoplanetas. 4. VVV
Survey. I. Saito, Roberto Kalbusch. II. Universidade
Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em
Física. III. Título.

Marcos da Maia Vicente Júnior

Buscas por trânsitos planetários ao redor de estrelas anãs M da região do bojo Galáctico

O presente trabalho em nível de mestrado foi avaliado e aprovado por banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof. Roberto Kalbusch Saito, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Rubens Tadeu Delgado Duarte, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Daniel Ruschel Dutra, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

Certificamos que esta é a **versão original e final** do trabalho de conclusão que foi julgado adequado para obtenção do título de mestre em Física.

Prof. Ivan Helmuth Bechtold , Dr.
Coordenador do Programa

Prof. Roberto Kalbusch Saito, Dr.
Orientador

Florianópolis, 09 de abril de 2019.

Este trabalho é dedicado a todos aqueles que possuem
esperança no futuro da educação.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Kátia e Marcos, pelo apoio financeiro, principalmente nos primeiros meses do curso, os puxões de orelha sem os quais esse trabalho não estaria aqui e por me amarem até a lua, ida e volta.

Ao meu irmão, Matheus, pelo companheirismo e apoio incondicional.

À minha companheira, Alessandra, por todo o apoio emocional durante essa árdua caminhada. Pelas noites em claro juntos. Pela disposição em me auxiliar no que precisava.

À minha vó, Marlene, pelo conforto adicional na minha residência.

Aos meus amigos, Ruan Miguel, Ana, Heloísa, Alexandre e Lucas, pelas jogatinas que auxiliaram a relaxar em momentos difíceis.

Ao meu antigo grupo de teatro, Abismo Teatro de Grupo, e seus integrantes, Cristovão, Isadora, João, Lausivan e Letícia, por lembrar que a arte é essencial a vida

Aos colegas de mestrado, em especial ao Eliton e Roberto, pelas ajudas no percurso.

À FETICOM por oferecer estadia quando eu não tinha para onde ir.

À família Linden, em especial Luiza, Paulo e George, por dividirem sua casa comigo no começo do percurso.

Ao Marcos Paulo, por ser esse grande amigo que me apoiou e morou comigo na maior parte do mestrado.

A Todos os Professores pelos quais eu passei durante o curso, por seus ensinamentos referentes a física e a vida.

Ao meu orientador, Dr. Roberto K. Saito, pela paciência e por ter me guiado nessa estrada.

À FAPESC, pelo financiamento do trabalho.

A você que lê esse trabalho.

RESUMO

Desde 1995, ano da descoberta do primeiro exoplaneta ao redor de uma estrela tipo solar, a busca por planetas extrassolares tem evoluído muito. Alvos ideais para essa busca são planetas orbitando estrelas do tipo M, de baixa massa, as mais comuns da Galáxia. Os dois métodos mais utilizados para encontrar potenciais exoplanetas são o de velocidades radiais e trânsitos planetários. O presente trabalho buscou encontrar trânsitos planetários ao redor de estrelas do tipo M na região do Bojo Galáctico. As estrelas anãs M foram selecionadas através dos dados de cor do levantamento fotométrico VVV. Em seguida, utilizamos os dados da missão espacial Gaia para separar as estrelas anãs de possíveis gigantes vermelhas distantes com altos níveis de extinção degenerescentes em cor com as anãs M. Ao final utilizamos um algoritmo de Box-Fitting para encontrarmos trânsitos planetários ao redor das estrelas selecionadas, com os dados de variabilidade do levantamento acima citado. Essa seleção não se mostrou suficiente, então mais uma seleção com parâmetros realistas e uma seleção visual foi feita de modo a encontrarmos alguns candidatos a exoplanetas. Então determinamos parâmetros como raio do planeta e raio de sua órbita para encontrarmos planetas extrassolares potencialmente habitáveis.

Palavras-chave: Estrelas anãs M. Trânsitos planetários. Planetas extrassolares. Exoplanetas. Zona Habitável. VVV Survey.

ABSTRACT

Since 1995, the discovery year of the first exoplanet around a solar-like star, the search for extrasolar planets has evolved a lot. Ideal targets for this quest are planets orbiting low-mass M-type stars, the most common in the Galaxy. The two most widely used methods for finding potential exoplanets are radial velocities and planetary transits. The present work sought to find planetary transits around stars of type M in the region of the Galactic Bulge. The dwarf M stars were selected using color data from the VVV Survey. Next, we use data from the Gaia space mission to separate the dwarf stars from possible distant red giants with high levels of extinction degenerated. Finally we used a Box-Fitting algorithm to find planetary transits around the selected stars, with the variability data from the above mentioned survey. This selection was not enough, then another selection with realistic parameters and a visual selection was made in order to find some candidates for exoplanets. Then we determine parameters such as the radius of the planet and the radius of its orbits to find extrasolar planets that are potentially habitable.

Keywords: M dwarfs stars. Planetary transits. Extrasolar planets. Exoplanets. Habitable Zone. VVV Survey.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1 – Localização das estrelas com Exoplanetas Potencialmente Habitáveis. A figura mostra um mapa do céu com suas principais constelações e o esboço da galáxia. As estrelas com planetas potencialmente habitáveis estão contornadas em amarelo e sua cor depende de seu tipo espectral. 19
- Figura 2 – Localização dos planetas encontrados (apenas os com massa menor que 10 massas terrestres e raios menores que 2.5 raios terrestres) em relação a chamada Zona Habitável. No eixo x temos o fluxo estelar que chega no planeta e no eixo y a temperatura de sua estrela mãe. A figura mostra os planetas com seus tamanhos em escala. Ao fundo, tons mais escuro de verde indicam uma Zona Habitável conservadora e tons mais claros, uma zona otimista. . . . 20
- Figura 3 – Diagrama esquemático de um exemplo de trânsito planetário, mostrando, acima, a figura de um planeta orbitando uma estrela e, abaixo, o efeito na sua correspondente curva de luz. Essa imagem considera o efeito chamado *limbdarkening* (escurecimento de borda), no qual, quando o planeta está começando o trânsito, a queda de luz é gradual (uma reta inclinada como no desenho, ou uma curva quando temos uma alta quantidade de pontos). Devido a cadência dos dados do VVV, esse efeito será ignorado em nosso trabalho. 21
- Figura 4 – Possíveis inclinações da órbita em relação a nossa linha de visada. Nos dois desenhos superiores detectaríamos o trânsito, pois, em relação ao observador, o planeta passa em frente a estrela. Nos desenhos inferiores, mesmo tendo um planeta, não conseguiríamos detectar um trânsito, pois o planeta não barraria nenhuma luz da estrela para o observador. 22
- Figura 5 – Representação esquemática do ângulo máximo para que seja detectado um eclipse. Pela imagem podemos perceber que, quanto mais longe da estrela está o planeta, mais próximo de 90 graus deve ser o ângulo máximo afim de que b esteja entre 0 e 1. A equação 2 relaciona os parâmetros na imagem. 23
- Figura 6 – A figura mostra porque os trânsitos em estrelas Anãs M são de mais fácil detecção. Na parte superior da figura temos uma representação esquemática do trânsito para uma estrela do tipo Anã G e uma Anã M. Logo abaixo temos a possível curva de luz produzida. Como a estrela Anã M é menor, a razão raio do planeta pelo raio da estrela acaba sendo maior, logo, mais fácil de detectar em uma curva de luz. 23

- Figura 7 – Uma representação artística da distância da Zona Habitável em relação aos diferentes tipos estelares. No eixo x temos a distância do planeta à estrela em Unidades Astronômicas e no eixo y a temperatura da estrela. Ao fundo temos as zonas em destaque, em verde claro temos a Zona Habitável conservadora e em verde escuro a Zona Habitável otimista. (KOPPARAPU; RAMIREZ, R. *et al.*, 2013) . 24
- Figura 8 – Distribuição dos *tiles* do VVV ao longo da Galáxia (SAITO, Roberto K *et al.*, 2012) em coordenadas galácticas. A representação esquemática dos *tiles* está disposta sobre um mapa de extinção da Galáxia. Os *tiles* do bojo são os que se encontram no canto esquerdo da imagem, dispostos em um quadrado, enquanto os do disco são os dispostos em um retângulo, no lado direito. Os *tiles* utilizados nesse trabalho são o b201, com $l \approx 350$ e $b \approx -10$ e os *tiles* b263 e b264 com $l \approx 0$ e $b \approx -5$. Pode-se perceber que nesse *tiles* os níveis de extinção são bem menores que na região do centro Galáctico ($l \approx 0$ e $b \approx 0$), por exemplo. (SAITO, Roberto K *et al.*, 2012) 26
- Figura 9 – Erros fotométricos em função da magnitude de cada uma das bandas do VVV, em um representante do disco (d003) em azul e de uma região do bojo próxima ao centro galáctico (b305) em vermelho. Analisando essa figura, mais tarde podemos concluir que estamos acima do ruído em nossos candidatos. (SAITO, Roberto K *et al.*, 2012) 27
- Figura 10 – Distribuição espacial dos exoplanetas conhecidos na área do VVV. Em preto temos a área do levantamento. Os eixos estão representados em coordenadas galácticas. 27
- Figura 11 – À esquerda, o diagrama cor-magnitude em K_s vs. $(J-K_s)$ de todos os objetos encontrados no *tile* b201. Ao centro, o mesmo diagrama com as anãs M, destacadas em azul, selecionadas através das cores. À direita, o diagrama cor-magnitude contendo apenas as anãs M selecionadas por cor do mesmo *tile*. 30

Figura 12 – Modelos teóricos para os diagramas cor-magnitude de estrelas na região da Via Láctea. Na primeira imagem, temos um digrama cor-magnitude utilizando dados observados com o VVV para uma área de 1 grau quadrada com centro em $(l, b) = (0.0, -9.5)$. As diferentes populações estelares estão rotuladas. Os pontos vermelhos mostram a cor das Anãs M para um modulo de distância $(m_{K_s} - M_{K_s}) = 7$ mag. No diagrama referente ao modelo de Besançon temos as estrelas da sequência principal em laranja, subgigantes em azul e gigantes em vermelho. Estrelas supergigantes, gigantes brilhantes e anãs brancas estão presentes em número reduzido (em azul claro, magenta e roxo, respectivamente). Ao lado, no modelo Trilegal estrelas do Bojo encontram-se em vermelho, do halo em azul, disco fino em laranja e disco espesso em verde (SAITO, R.; MINNITI; DIAS <i>et al.</i> , 2012)	30
Figura 13 – Histograma mostrando a quantidade de Anãs M encontradas por tipo subespectral no <i>tile</i> b201.	31
Figura 14 – Na primeira imagem temos as estrelas do <i>tile</i> b201 selecionadas por cor com seus respectivos dados de paralaxe da missão espacial Gaia em um gráfico de magnitude pela paralaxe, em escala logarítmica. Podemos perceber na imagem um grupo de estrelas separados, indicando estrelas de magnitude baixa (mais brilhantes) e paralaxe baixa (mais distantes). Com o corte em 1000 pc, equivalente a linha pontilhada, eliminamos todas as estrelas desse grupo (acima da linha) . Na segunda imagem, temos o diagrama cor-magnitude de todas as estrelas antes selecionadas apenas por cor e, em vermelho, as também selecionadas por paralaxe.	33
Figura 15 – Um exemplo de imagem obtida através do método de Box-Fitting. Acima temos a curva de luz do objeto e abaixo temos o espectrograma de frequências normalizado e a curva de luz em fase com o modelo de trânsito. Os parâmetros encontram-se acima da primeira figura. Onde n é o número de <i>bins</i> utilizados, δ é $H - L$ e σ é o erro médio(KOVÁCS; ZUCKER; MAZEH, 2002).	34

Figura 16 – Simulação de um trânsito planetário no VVV. O planeta tem um período $P= 2.8$ dias e produz um eclipse com profundidade de 1.7% em fluxo, que são os valores típicos esperados para o trânsito de um planeta tipo Super-Terra ao redor de uma estrela M6. A curva fotométrica é a típica de uma estrela de $K_s = 14.5$ mag. Podemos comparar essa imagem com os trânsitos encontrados como na Figura 18 e perceber como as imagens são similares e tão ruidosas quanto esta simulação (SAITO, R.; MINNITI; DÉKÁNY <i>et al.</i> , 2011).	35
Figura 17 – Candidatos a planetas do <i>tile</i> b263. Os planetas estão em escala com seu provável raio e separados por cor. No eixo x temos o raio da órbita de cada planeta em Unidades Astronômicas (Unidade de medida que equivale a distância da terra ao sol, ou seja, aproximadamente 150 milhões de quilômetros), no eixo y temos a temperatura da estrela-mãe de cada planeta.	39
Figura 18 – VVV J180521.94-311340.71b. Na Figura de cima temos a curva de luz da estrela, com o eixo x sendo a época em MJD na qual o dado de fluxo foi obtido e o eixo y sendo o fluxo, já normalizado. Na Figura de baixo temos os pontos de fluxo e sua respectivas barras de erro, em fase com o período de um trânsito. A linha azul representa o modelo dos parâmetros de trânsito obtidos através do método BLS. Entre as Figuras temos o período do trânsito, P , em dias, o tempo decorrido em trânsito, Δt , em horas e o raio do planeta, R , em raios solares ($R_{\odot} = 695.510$ km)	40
Figura 19 – VVV J180704.88-324042.38b. A figura é similar à Figura 18.	40
Figura 20 – Candidatos a Planetas do <i>tile</i> b264. A figura é similar a Figura 20.	41
Figura 21 – VVV J180644.36-303007.03b. A figura é similar à Figura 18.	43
Figura 22 – VVV J180720.71-301849.84b. A Figura é similar à Figura 18.	43
Figura 23 – VVV J180946.12-311329.30b. A figura é similar à Figura 18.	43
Figura 24 – A primeira imagem mostra um diagrama cor-magnitude para todas as estrelas do <i>tile</i> B263 em vermelho, com os candidatos a trânsito planetário destacados em azul. A segunda imagem mostra o mesmo diagrama para as estrelas e candidatos do <i>tile</i> B264.	45
Figura 25 – A imagem mostra a distribuição espacial de todos os nossos candidatos, sugerindo uma distribuição aleatória.	46
Figura 26 – Similar a Figura 10, porém com nossos candidatos em destaque.	46
Figura 27 – VVV J180450.90-322406.66b. A figura é similar à Figura 18.	50
Figura 28 – VVV J180331.02-320147.70b. A figura é similar à Figura 18.	50
Figura 29 – VVV J180458.45-320931.60b. A figura é similar à Figura 18.	51
Figura 30 – VVV J180529.07-314552.18b. A figura é similar à Figura 18.	51

Figura 31 – VVV J180411.39-313400.69b. A figura é similar à Figura 18.	51
Figura 32 – VVV J180536.21-312317.91b. A figura é similar à Figura 18.	52
Figura 33 – VVV J180521.94-311340.71b. A figura é similar à Figura 18.	52
Figura 34 – VVV J180504.04-310526.37b. A figura é similar à Figura 18.	52
Figura 35 – VVV J180524.22-310741.76b. A figura é similar à Figura 18.	53
Figura 36 – VVV J180636.62-325052.75b. A figura é similar à Figura 18.	53
Figura 37 – VVV J180704.88-324042.38b. A figura é similar à Figura 18.	53
Figura 38 – VVV J180654.97-323623.05b. A figura é similar à Figura 18.	54
Figura 39 – VVV J180552.46-321559.57b. A figura é similar à Figura 18.	54
Figura 40 – VVV J180734.60-320754.56b. A figura é similar à Figura 18.	54
Figura 41 – VVV J180803.85-314028.34b. A figura é similar à Figura 18.	55
Figura 42 – VVV J180620.62-312627.29b. A figura é similar à Figura 18.	55
Figura 43 – VVV J180538.99-320146.48b. A figura é similar à Figura 18.	55
Figura 44 – Espectrograma de VVV J180450.90-322406.66b	56
Figura 45 – Espectrograma de VVV J180331.02-320147.70b	56
Figura 46 – Espectrograma de VVV J180458.45-320931.60b	56
Figura 47 – Espectrograma de VVV J180529.07-314552.18b	56
Figura 48 – Espectrograma de VVV J180411.39-313400.69b	57
Figura 49 – Espectrograma de VVV J180536.21-312317.91b	57
Figura 50 – Espectrograma de VVV J180521.94-311340.71b	57
Figura 51 – Espectrograma de VVV J180504.04-310526.37b	57
Figura 52 – Espectrograma de VVV J180524.22-310741.76b	57
Figura 53 – Espectrograma de VVV J180636.62-325052.75b	57
Figura 54 – Espectrograma de VVV J180704.88-324042.38b	57
Figura 55 – Espectrograma de VVV J180654.97-323623.05b	57
Figura 56 – Espectrograma de VVV J180552.46-321559.57b	58
Figura 57 – Espectrograma de VVV J180734.60-320754.56b	58
Figura 58 – Espectrograma de VVV J180803.85-314028.34b	58
Figura 59 – Espectrograma de VVV J180620.62-312627.29b	58
Figura 60 – Espectrograma de VVV J180538.99-320146.48b	58
Figura 61 – VVV J180644.36-303007.03b. A figura é similar à Figura 18.	59
Figura 62 – VVV J180720.71-301849.84b. A figura é similar à Figura 18.	59
Figura 63 – VVV J180722.36-301745.13b. A figura é similar à Figura 18.	60
Figura 64 – VVV J180803.54-301006.96b. A figura é similar à Figura 18.	60
Figura 65 – VVV J180840.88-300912.05b. A figura é similar à Figura 18.	60
Figura 66 – VVV J180848.35-295752.06b. A figura é similar à Figura 18.	61
Figura 67 – VVV J181012.57-313453.23b. A figura é similar à Figura 18.	61
Figura 68 – VVV J180946.12-311329.30b. A figura é similar à Figura 18.	61
Figura 69 – VVV J181200.69-305013.31b. A figura é similar à Figura 18.	62

Figura 70 – VVV J180604.54-304643.98b. A figura é similar à Figura 18.	62
Figura 71 – VVV J180651.94-303329.01b. A figura é similar à Figura 18.	62
Figura 72 – Espectrograma de VVV J180644.36-303007.03b	63
Figura 73 – Espectrograma de VVV J180720.71-301849.84b	63
Figura 74 – Espectrograma de VVV J180722.36-301745.13b	63
Figura 75 – Espectrograma de VVV J180803.54-301006.96b	63
Figura 76 – Espectrograma de VVV J180840.88-300912.05b	64
Figura 77 – Espectrograma de VVV J180848.35-295752.06b	64
Figura 78 – Espectrograma de VVV J181012.57-313453.23b	64
Figura 79 – Espectrograma de VVV J180946.12-311329.30b	64
Figura 80 – Espectrograma de VVV J181200.69-305013.31b	64
Figura 81 – Espectrograma de VVV J180604.54-304643.98b	64
Figura 82 – Espectrograma de VVV J180651.94-303329.01b	64

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Localização dos principais <i>tiles</i> deste trabalho. As coordenadas de RA e DEC são os pontos do centro geométrico de cada um dos <i>tiles</i> .	26
Tabela 2 – Tabela com as cores das Anãs M nos filtros do VVV definidas em Rojas-Ayala <i>et al.</i> (2014)	29
Tabela 3 – Cores médias de cada subtipo espectral acompanhada de seu desvio padrão.	29
Tabela 4 – Parâmetros fundamentais referentes a cada subclasse das Anãs M (REID; HAWLEY, 2013)	31
Tabela 5 – Candidatos a trânsitos planetários encontrados no <i>tile</i> b263	38
Tabela 6 – Candidatos a trânsitos planetários encontrados no <i>tile</i> b264.	42

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
1.1	ZONA HABITÁVEL	21
1.2	ORGANIZAÇÃO	24
2	MATERIAIS E MÉTODOS	25
2.1	O <i>VVV SURVEY</i>	25
2.2	A MISSÃO ESPACIAL GAIA	27
2.3	SELEÇÃO DE ESTRELAS ANÃS M	28
2.4	<i>BOX-FITTING</i>	33
3	RESULTADOS	36
3.1	CANDIDATOS A TRÂNSITO PLANETÁRIO NO <i>TILE</i> B263	37
3.2	CANDIDATOS A TRÂNSITO PLANETÁRIO NO <i>TILE</i> B264	41
4	CONCLUSÃO	44
	REFERÊNCIAS	47
	APÊNDICE A – CURVAS DE LUZ E MODELO DE TRÂNSITOS DOS CANDIDATOS A TRÂNSITO PLANETÁRIO DO <i>TILE</i> B263	50
	APÊNDICE B – ESPECTROGRAMAS DOS CANDIDATOS A TRÂNSITO PLANETÁRIO DO <i>TILE</i> B263	56
	APÊNDICE C – CURVAS DE LUZ E MODELO DE TRÂNSITOS DOS CANDIDATOS A TRÂNSITO PLANETÁRIO DO <i>TILE</i> B264	59
	APÊNDICE D – ESPECTROGRAMAS DOS CANDIDATOS A TRÂNSITO PLANETÁRIO DO <i>TILE</i> B264	63

1 INTRODUÇÃO

Desde a antiguidade, uma das perguntas fundamentais feitas pela humanidade é: "Estamos sozinhos?". Essa pergunta já foi limitada ao próprio planeta Terra, quando a falta de tecnologia fazia pessoas que moravam em continentes diferentes viverem uma vida inteira sem poderem aferir a existência uns dos outros. Porém com o avanço da tecnologia, como as Grandes Navegações, por exemplo, provaram que a Terra era quase que completamente habitada e que haviam mais humanos no planeta.

Com a invenção do telescópio e a mudança de paradigma da Terra ao centro do Universo, os olhos da humanidade se voltaram ao espaço. E a grande pergunta continuou, com um outro viés. Até algumas décadas atrás, a existências de outros planetas fora de nosso sistema solar era mera especulação. Grandes empreendimentos científicos como os lançamentos das Sondas Voyager com seus discos dourados e o programa SETI (Search for Extraterrestrial Intelligence - Busca por Inteligência Extraterrestre) surgiram para tentarmos atingir nossos supostos companheiros nas estrelas. Todas as tentativas de contato mostraram-se infrutíferas. A resposta para a grande pergunta parecia mais longe de ser alcançada.

Porém a situação começou a mudar com a descoberta do primeiro planeta extrassolar ao redor de uma estrela do tipo solar, 51 Pegasi b (MAYOR; QUELOZ, 1995). Embora esse planeta não possua capacidade de abrigar vida como conhecemos, sua descoberta impulsionou a busca por mais e mais novos planetas. Atualmente, mais de 3000 planetas já foram encontrados fora do nosso sistema solar, alguns dentro do que chamamos de Zona Habitável¹. A Figura 1 mostra a localização no céu das estrelas com planetas dentro dessa possível zona habitável e a Figura 2 mostra a localização desse planetas em relação a zona.

Com essas motivações, damos início ao projeto de pesquisa. Nossos alvos de pesquisa serão estrelas Anãs M na região do Bojo Galáctico, nas quais procuraremos trânsitos planetários. O método dos trânsitos planetários é um dos dois métodos mais utilizados para detecção de exoplanetas, sendo o outro o de velocidades radiais. O método de velocidades radiais utiliza a medida de velocidade de aproximação e afastamento da estrela através do efeito Doppler para detectar os corpos que a orbitam, uma vez que ambos orbitam o mesmo centro de massa, fazendo a estrela "bambolear"(SEAGER, 2010).

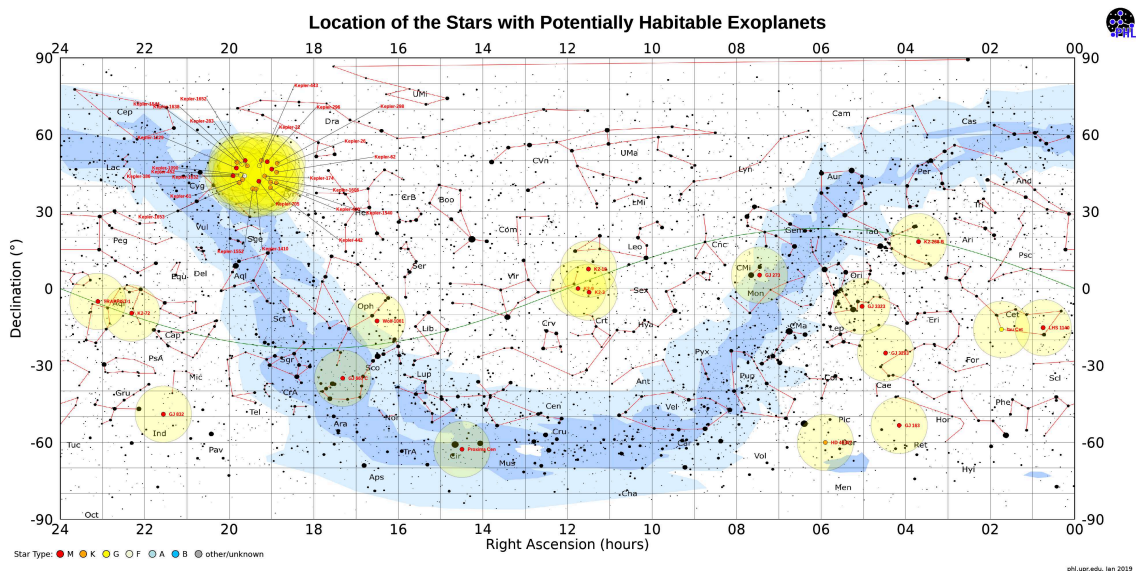
A detecção de trânsitos baseia-se na variabilidade do brilho estelar. Partindo do pressuposto que temos um observador externo presenciando um eclipse, ou seja, quando o planeta passa em frente a estrela. O planeta, por estar entre o observador e a estrela, barra um pouco da passagem de luz da estrela, diminuindo seu brilho. A Figura 3 exemplifica um trânsito e sua curva de luz.

¹ <http://phl.upr.edu/projects/habitable-exoplanets-catalog>

Com os dados de variabilidade estelar podemos obter os dados de raio do planeta, conhecendo o raio da estrela. A Equação 1 nos mostra matematicamente essa relação. ΔF é a variação de Fluxo, obtida através da razão da diferença de Fluxo durante o eclipse e fora do mesmo e $R_{Planeta}$ e $R_{Estrela}$ são, respectivamente, o raio do planeta e da estrela (SEAGER; MALLEN-ORNELAS, 2003).

$$\Delta F = \frac{F_{SemTr\grave{a}nsito} - F_{Tr\grave{a}nsito}}{F_{Tr\grave{a}nsito}} = \left(\frac{R_{Planeta}}{R_{Estrela}} \right)^2 \quad (1)$$

Figura 1 – Localização das estrelas com Exoplanetas Potencialmente Habitáveis. A figura mostra um mapa do céu com suas principais constelações e o esboço da galáxia. As estrelas com planetas potencialmente habitáveis estão contornadas em amarelo e sua cor depende de seu tipo espectral.



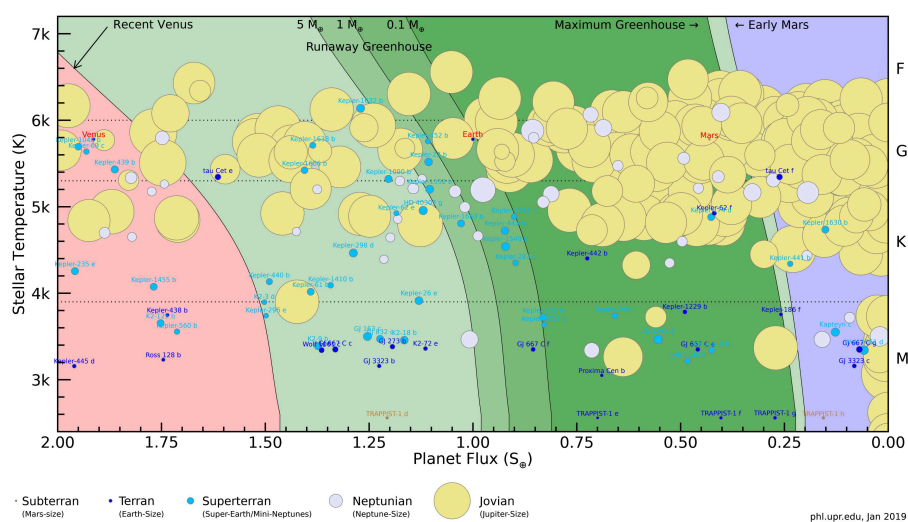
Fonte: PHL @ UPR Arcibo, Jim Cornmell (2019).

Porém, a técnica de detecção de trânsitos depende fortemente da inclinação da órbita do planeta em relação a nossa linha de visada, conforme ilustrado pela Figura 4. Na Figura 5 temos o ângulo da órbita em relação ao tamanho da estrela e distância do objeto ao planeta. O parâmetro de impacto, “b”, deve ser um valor entre 0 e 1, para que o trânsito corte nossa linha de visada, o que implica, pela equação 2, que devemos ter um ângulo próximo de 90 graus.

$$b = \frac{a \cos i}{R_*} \quad (2)$$

A técnica de velocidades radiais nos fornece a massa do planeta com precisão, enquanto a de trânsitos nos fornece bem seu raio. Combinando esta informação com velocidades radiais, se pode obter então a densidade e possível composição do planeta (BOZZA; MANCINI; SOZZETTI *et al.*, 2016).

Figura 2 – Localização dos planetas encontrados (apenas os com massa menor que 10 massas terrestres e raios menores que 2.5 raios terrestres) em relação a chamada Zona Habitável. No eixo x temos o fluxo estelar que chega no planeta e no eixo y a temperatura de sua estrela mãe. A figura mostra os planetas com seus tamanhos em escala. Ao fundo, tons mais escuro de verde indicam uma Zona Habitável conservadora e tons mais claros, uma zona otimista.



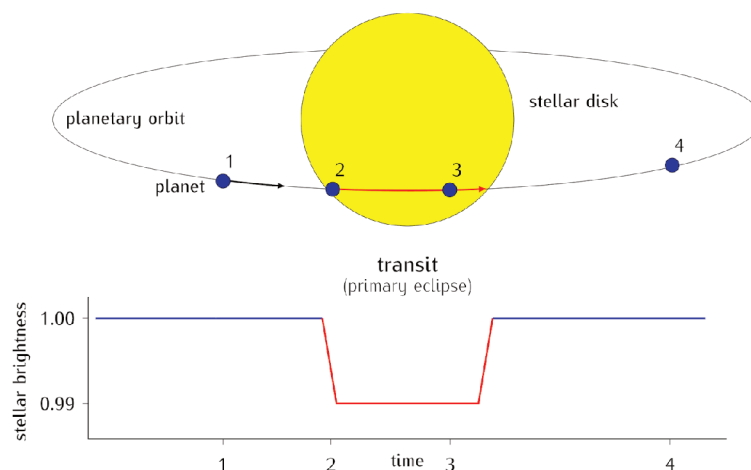
Fonte: PHL @ UPR Arcibo, Jim Cornwell (2019).

Através dos dados de variabilidade estelar que modelaremos os trânsitos dos planetas. As estrelas Anãs M foram escolhidas por serem as estrelas mais numerosas de nossa Galáxia e possuem menores massas, raios e temperaturas comparadas com outras classes de estrelas. Assim, graças à equação 2, nossos trânsitos tem maior probabilidade de ser encontrados mais próximos da estrela, com órbitas mais curtas e de mais fácil detecção, como mostra a Figura 6. Além disso, a Zona Habitável encontra-se mais próxima da estrela, perto de onde encontraremos os nossos planetas (NUTZMAN; CHARBONNEAU, 2008).

Contudo, a atividade cromosférica é importante em estrelas de baixa massa, podendo assim, esterilizar a possibilidade de vida até mesmo em planetas dentro da zona habitável (SHIELDS; BALLARD; JOHNSON, 2016).

Nosso projeto de pesquisa mira nos dados do projeto *VISTA Variables in Via Láctea Survey (VVV Survey)* que nos fornece dados de fotometria para a detecção de trânsitos planetários. Embora com nossos resultados não possamos dar uma resposta definitiva à pergunta do início da seção, esses trânsitos encontrados podem ser utilizados em pesquisas futuras para talvez conseguirmos respondê-la.

Figura 3 – Diagrama esquemático de um exemplo de trânsito planetário, mostrando, acima, a figura de um planeta orbitando uma estrela e, abaixo, o efeito na sua correspondente curva de luz. Essa imagem considera o efeito chamado *limbdarkening* (escurecimento de borda), no qual, quando o planeta está começando o trânsito, a queda de luz é gradual (uma reta inclinada como no desenho, ou uma curva quando temos uma alta quantidade de pontos). Devido a cadência dos dados do VVV, esse efeito será ignorado em nosso trabalho.



Fonte: <http://exoplanet-diagrams.blogspot.com/2015/07/the-transit-method.html> (2019).

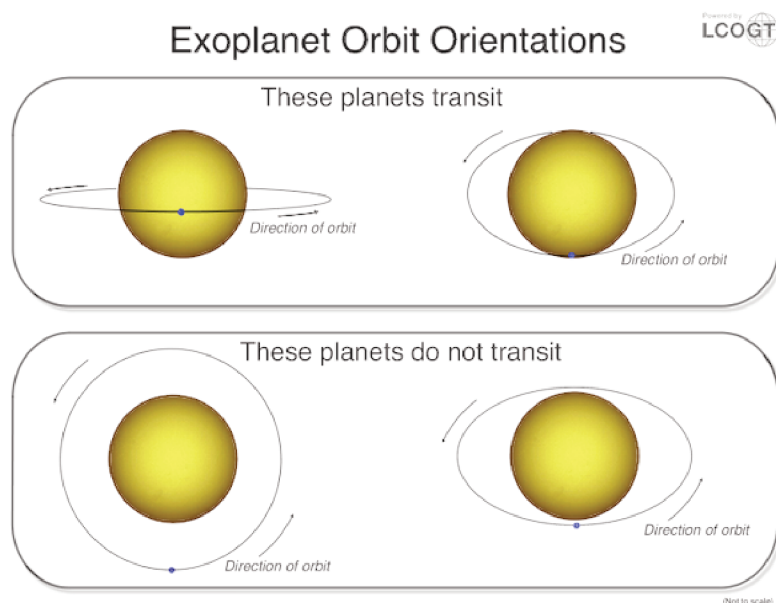
1.1 ZONA HABITÁVEL

A Zona Habitável, também chamada de Zona de Goldilocks, é uma região do espaço em volta de uma estrela na qual a temperatura da superfície de um planeta localizado nessa região, está entre 0 e 100 graus Celsius, ou seja, onde podemos ter água em estado líquido (KALTENEGGER, Lisa; TRAUB, 2009). O nome Goldilocks vem da famosa história infantil de Cachinhos Dourados (Goldilocks em inglês). A história nos fornece uma boa metáfora para a ideia da zona habitável em si. Em um dos trechos da história, Cachinhos possuía três pratos de mingau para provar. Um deles era muito quente, outro muito frio, porém o terceiro encontrava-se na temperatura perfeita. Assim, a Zona Habitável de uma estrela, não é muito próxima da mesma, onde a temperatura é quente demais, evaporando a água, nem muito distante, onde a temperatura congelaria a água. A Figura 7 mostra uma representação artística da distância da Zona Habitável em relação aos diferentes tipos estelares².

Essa comparação é útil para nossos propósitos, porém simplista. Vale ressaltar que a temperatura na superfície de um planeta não depende apenas da radiação

² <http://phl.upr.edu/library/notes/summarylimitsofthenewhabitablezone>

Figura 4 – Possíveis inclinações da órbita em relação a nossa linha de visada. Nos dois desenhos superiores detectaríamos o trânsito, pois, em relação ao observador, o planeta passa em frente a estrela. Nos desenhos inferiores, mesmo tendo um planeta, não conseguiríamos detectar um trânsito, pois o planeta não barraria nenhuma luz da estrela para o observador.



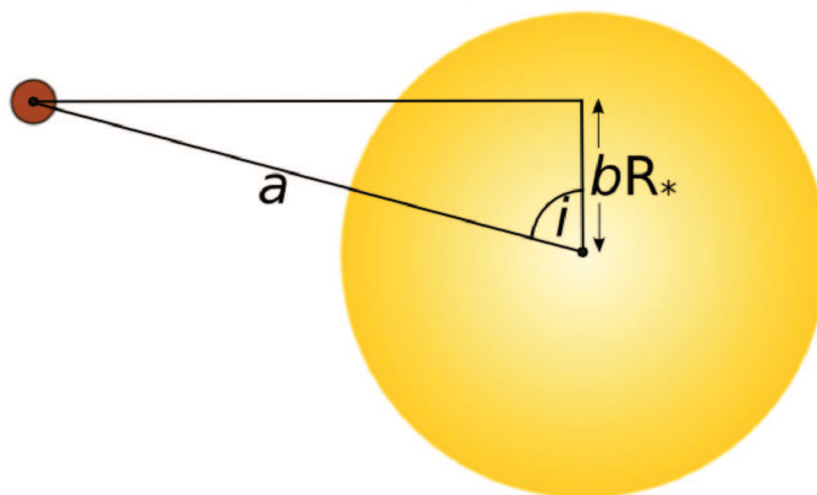
Fonte: LCOGT (2019).

estelar. Fatores como atmosfera (efeito estufa), atividade tectônica ou mesmo o campo magnético do planeta alteram a temperatura do planeta. Atividade cromosférica de uma estrela também pode fazer com que, planetas em uma posição perfeita sejam bombardeados com radiação, esterilizando a vida. Ademais, ambientes que possam parecer extremos para nós, humanos, são razoáveis para bactérias ou mesmo animais extremófilos como os tardígrados. Assim, podemos estender um pouco essa região além dos limites, para podermos encontrar mais planetas potencialmente habitáveis (CAVICCHIOLI, 2002).

Embora não possamos ter certeza de como seja a vida fora de nosso planeta, utilizamos como comparação o modo como a vida se desenvolveu na Terra. Formas variadas de vida teoricamente poderiam evoluir de compostos diferentes ou com estruturas que não sejam análogas a da Terra. Existem estudos sobre diferentes tipos de corpos habitáveis como luas com oceanos subsuperficiais em contato com um núcleo rico em silicatos ou habitats com camadas de água líquida entre duas camadas de gelo, os quais podem ser estendidos para planetas. (LAMMER *et al.*, 2009).

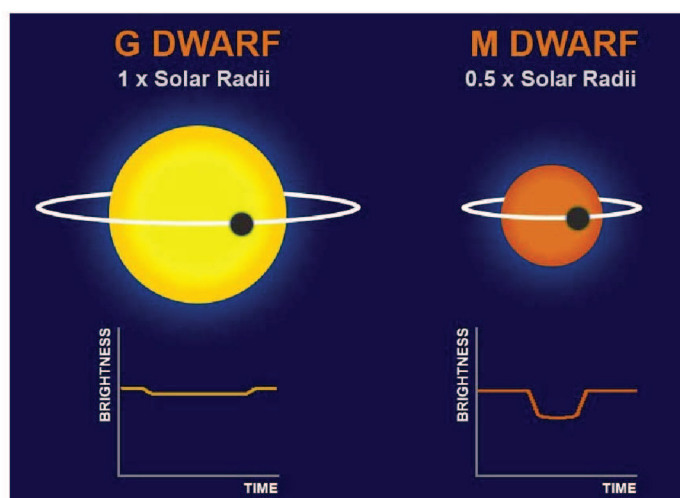
Porém, ao realizar uma busca, precisamos ter em mente o que estamos procurando e o que devem ser limitadores ou essenciais para o surgimento da vida. Na Terra, todas as reações químicas nas células precisam de água para ocorrer. Assim, conside-

Figura 5 – Representação esquemática do ângulo máximo para que seja detectado um eclipse. Pela imagem podemos perceber que, quanto mais longe da estrela está o planeta, mais próximo de 90 graus deve ser o ângulo máximo afim de que b esteja entre 0 e 1. A equação 2 relaciona os parâmetros na imagem.



Fonte: <https://www.paulanthonywilson.com/exoplanets/exoplanet-detection-techniques/the-exoplanet-transit-method/>(2019).

Figura 6 – A figura mostra porque os trânsitos em estrelas Anãs M são de mais fácil detecção. Na parte superior da figura temos uma representação esquemática do trânsito para uma estrela do tipo Anã G e uma Anã M. Logo abaixo temos a possível curva de luz produzida. Como a estrela Anã M é menor, a razão raio do planeta pelo raio da estrela acaba sendo maior, logo, mais fácil de detectar em uma curva de luz.



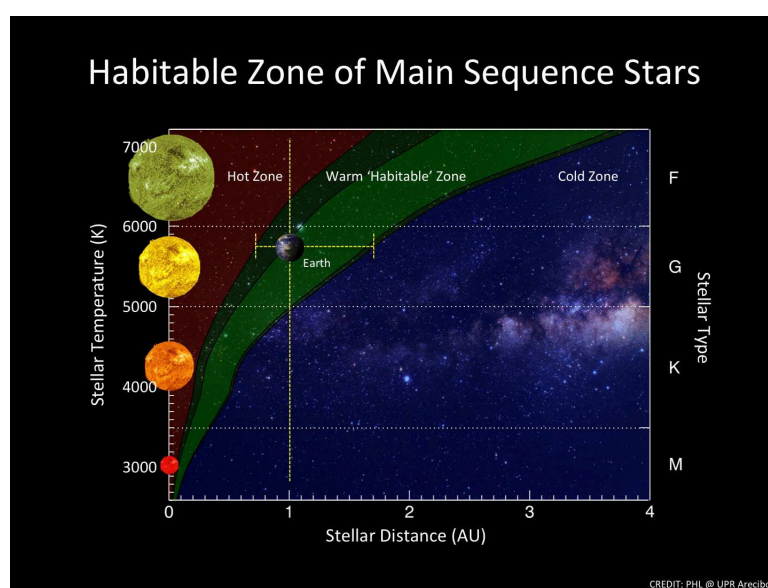
Fonte: Nora Eisner (2019).

ramos que a presença de água líquida seja um fator determinante para o surgimento de vida no resto do universo.

1.2 ORGANIZAÇÃO

O presente trabalho encontra-se organizado da seguinte maneira. No segundo capítulo discorreremos sobre os dados e os métodos que utilizamos para realizar esse trabalho. No terceiro capítulo mostramos nossos resultados e analisamos os candidatos a exoplanetas que mais se destacam. No quarto capítulo apresentamos nossas conclusões e perspectivas para trabalhos futuros.

Figura 7 – Uma representação artística da distância da Zona Habitável em relação aos diferentes tipos estelares. No eixo x temos a distância do planeta à estrela em Unidades Astronômicas e no eixo y a temperatura da estrela. Ao fundo temos as zonas em destaque, em verde claro temos a Zona Habitável conservadora e em verde escuro a Zona Habitável otimista. (KOPPARAPU; RAMIREZ, R. *et al.*, 2013)



Fonte: PHL @ UPR Arcibo.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo discorrerá sobre os projetos observacionais de monitoramento, seus dados e os métodos utilizados para a realização deste trabalho, iniciando pela seleção de estrelas Anãs M e o método do *Box-Fitting* para busca de trânsitos planetários.

2.1 O VVV SURVEY

O *VVV Survey* é um levantamento público do *European Southern Observatory* (Observatório Europeu Austral - ESO) de variabilidade estelar no infravermelho, monitorando as regiões centrais da Galáxia (Minniti et al. 2010, Saito et al. 2012). Durante os anos de 2010 a 2016, 562 graus quadrados do bojo e disco sul da Via Láctea foram mapeados. Todos eles em cinco cores do Infravermelho (Z, Y, J, H e K_s), em duas diferentes épocas, 2010 e 2015, e em uma campanha de variabilidade estelar (apenas na banda K_s), com em torno de 40-100 observações por *tile* obtidas com uma cadência irregular, com uma base temporal de aproximadamente 7 anos (2010-2016). Esses dados complementam os levantamentos passados, atuais e futuros como: 2MASS, DENIS, GLIMPSE-II, VPHAS+, MACHO, OGLE, EROS, MOA, e GAIA (Saito et. al, 2012).

O telescópio utilizado pelo VVV é o VISTA (*Visible and Infrared Survey Telescope for Astronomy* - Telescópio de Levantamento Visível e Infravermelho para Astronomia), um telescópio refletor de amplo campo, com um espelho primário de 4 metros de diâmetro, com apenas um instrumento, a VIRCAM (*VISTA InfraRed CAMera* - Câmera Infravermelha VISTA). Sua câmera possui 16 detectores Raytheon VIRGO, de 2048x2048 pixels², de HgCdTe. Cada detector individual cobre uma área de aproximadamente 694x694 arcsec² no céu.

Os detectores são arranjados em um quadrado de 4 x 4 detectores com grandes espaços entre eles (90 % no eixo X e 42.5% no eixo Y). Uma única exposição, denominada *pawprint*, corresponde a 0.599 grau quadrado. Utilizando seis *pawprint*, uma cobertura contínua do campo é alcançada, com ao menos duas exposições por pixel (exceto nas bordas). Esse campo de 6 *pawprints* é chamado de *tile*. Nesse trabalho, vamos utilizar *tile* como uma exposição individual.

Cada *tile* possui 1.5 x 1.1 grau de lado, totalizando 1.64 grau quadrado. O VVV possui 348 *tiles*, sendo 196 localizados na área do bojo e 152 na área do disco. Atualmente, todos os dados do VVV já foram liberados. O projeto agora encontra-se em uma segunda fase chamada *VVV eXtended Survey (VVVX)*. O VVVX pretende triplicar a área total do VVV (de 562 para quase 1700), além da capturar novas épocas dos *tiles* já existente.

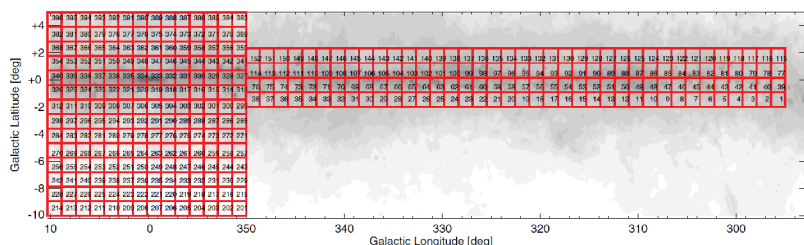
A Figura 8 mostra a representação esquemática dos *tiles* do VVV na região

Tabela 1 – Localização dos principais *tiles* deste trabalho. As coordenadas de RA e DEC são os pontos do centro geométrico de cada um dos *tiles*.

<i>tile</i>	RA(J2000.0)	Dec(J2000.0)
b201	18:04:24.384	-41:44:53.52
b263	18:05:52.752	-32:01:04.80
b264	18:09:09.288	-30:44:20.04

da Galáxia. Os *tiles* são representados por uma letra seguida de seu número de identificação, a letra "b" é utilizada para *tiles* do bojo, enquanto a "d" para os do disco. A tabela 1 contém a localização do ponto central dos 3 principais *tiles* utilizados no presente trabalho (SAITO, Roberto K *et al.*, 2012).

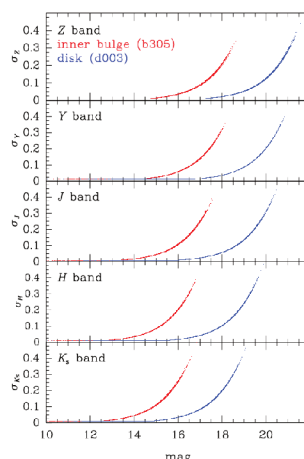
Figura 8 – Distribuição dos *tiles* do VVV ao longo da Galáxia (SAITO, Roberto K *et al.*, 2012) em coordenadas galácticas. A representação esquemática dos *tiles* está disposta sobre um mapa de extinção da Galáxia. Os *tiles* do bojo são os que se encontram no canto esquerdo da imagem, dispostos em um quadrado, enquanto os do disco são os dispostos em um retângulo, no lado direito. Os *tiles* utilizados nesse trabalho são o b201, com $l \approx 350$ e $b \approx -10$ e os *tiles* b263 e b264 com $l \approx 0$ e $b \approx -5$. Pode-se perceber que nesse *tiles* os níveis de extinção são bem menores que na região do centro Galáctico ($l \approx 0$ e $b \approx 0$), por exemplo. (SAITO, Roberto K *et al.*, 2012)



Os catálogos do VVV que utilizamos foram feitos a partir da fotometria padrão, disponibilizada pela CASU (*Cambridge Astronomical Survey Unit* - Unidade de Levantamento Astronômico de Cambridge). A calibração fotométrica do Survey foi feita a partir de diversas estrelas detectadas pelo 2MASS. A precisão fotométrica interna é da ordem de 2%. Para as bandas J, H e K_s , na maior parte do levantamento, uma exatidão similar a do 2MASS foi atingida. Porém, em regiões de alta extinção, os erros de calibração fotométrica nos filtros Z e Y são maiores. A Figura 9 mostra os erros fotométricos em função da magnitude para cada uma das bandas.

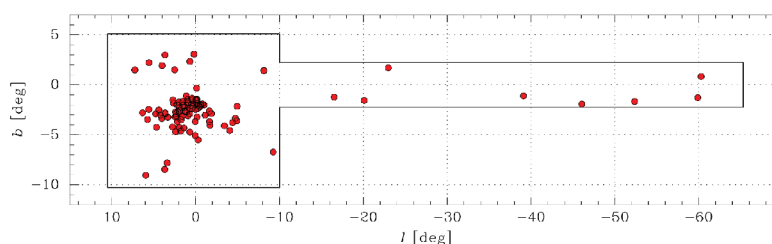
Embora o VVV tenha como objetivo principal a busca por estrelas pulsantes do tipo RR Lyrae e Cefeidas, ao contrário de outros projetos desenhados para a busca de planetas como a sonda Kepler, por exemplo, a capacidade do projeto de detectar planetas ao redor de estrelas anãs M já foi comprovada através de simulações (SAITO,

Figura 9 – Erros fotométricos em função da magnitude de cada uma das bandas do VVV, em um representante do disco (d003) em azul e de uma região do bojo próxima ao centro galáctico (b305) em vermelho. Analisando essa figura, mais tarde podemos concluir que estamos acima do ruído em nossos candidatos. (SAITO, Roberto K *et al.*, 2012)



R.; MINNITI; DÉKÁNY *et al.*, 2011) e trabalhos publicados ((ROJAS-AYALA *et al.*, 2014) e Surot (2013)). Atualmente, foram encontrados 116 exoplanetas na região do VVV¹. A maioria dos planetas na região interna do bojo foram descobertos pelo projeto OGLE (REF), usando a técnica de microlente gravitacional. A Figura 10 mostra a distribuição espacial de todos estes planetas dentro da área do VVV.

Figura 10 – Distribuição espacial dos exoplanetas conhecidos na área do VVV. Em preto temos a área do levantamento. Os eixos estão representados em coordenadas galácticas.



2.2 A MISSÃO ESPACIAL GAIA

Gaia é um observatório espacial da Agência Espacial Europeia (ESA) cujo objetivo principal é criar um mapa 3D da Galáxia através de medidas de posições, distâncias e movimento das estrelas com uma precisão sem precedentes. Ela é a

¹ <http://exoplanet.eu/catalog/>

sucessora da missão Hipparcos. A espaçonave monitora cada um de seus alvos em torno de 70 vezes em um período de cinco anos (JORDI *et al.*, 2010). O segundo lançamento de dados, que é o utilizado em nosso processo de seleção, ocorreu no dia 25 de abril de 2018 (BROWN *et al.*, 2018).

A missão observou cerca de 1.3 bilhão de objetos em 3 bandas diferentes: G (em todas as fontes), G_{BP} e G_{RP} (em 80% das fontes). A banda G cobre os comprimentos de onda entre 330 e 1050 nm e foi definida para coletar o máximo de luz nas medidas astrométricas. As bandas G_{BP} e G_{RP} são derivadas da integração dos espectros de baixa-resolução do fotômetro azul e vermelho (BP e RP) cobrindo entre 330 e 680 nm para o G_{BP} e entre 630 e 1050 nm para o G_{RP} (EVANS, D. *et al.*, 2018).

Os dados da Gaia podem ser acessados através da base Vizier/CDS. Diversos dados com seus erros associados podem ser extraídos para a consulta como: coordenadas, magnitudes, paralaxes, movimentos próprio, pseudocores e cores nas bandas G_{BP} e G_{RP} . Neste trabalho, utilizamos apenas suas medidas de coordenadas em RA/DEC e a paralaxe dos objetos com seus erros associados. Os dados de paralaxe são necessários para podermos determinar a distância de nossos objetos, na qual uma é o inverso da outra.

2.3 SELEÇÃO DE ESTRELAS ANÃS M

Para começar o projeto, precisamos selecionar nos dados do VVV Survey as estrelas anãs M. Este trabalho utiliza como critério de seleção o proposto e descrito por Iglesias (2013) e Rojas-Ayala *et al.* (2014). O VVV Survey utiliza cinco filtros de cores para categorizar as estrelas. Desses filtros, quatro deles são utilizados neste critério de seleção: Y, J, H e K_s . Como exemplo dos resultados do método de detecção, utilizaremos o *tile* b201. Esse *tile* foi escolhido como nosso objeto de estudo inicial de seleção, apesar de não ser um dos *tiles* de nossa busca. Isso se deve ao fato dessa região já ter sido estudada na literatura (e.g. Surot (2013)), assim, poderíamos comparar nossos resultados com o que era esperado.

As cores definidas nos trabalhos encontram-se na tabela 2, assim, utilizando-as, realizamos a seleção no *tile* b201. Na Figura 11 encontramos os diagramas cor-magnitude do *tile* b201 com todas as estrelas e ao lado apenas as anãs selecionadas. Podemos comparar a seleção também com os modelos teóricos de Besançon e Trilegal.

O modelo de Besançon (ROBIN *et al.*, 2003) estabelece onde as estrelas da nossa Galáxia devem se encontrar em um diagrama cor-magnitude de acordo com sua classe de luminosidade (Sequência Principal, Gigantes, Subgigantes, etc.). O modelo Trilegal (GIRARDI *et al.*, 2005) mostra onde devem ficar as estrelas de acordo com sua componente Galáctica (Bojo, Halo, Disco Fino e Disco Espesso).

Os modelos encontram-se na Figura 12. Podemos avaliar que as estrelas de

Tabela 2 – Tabela com as cores das Anãs M nos filtros do VVV definidas em Rojas-Ayala *et al.* (2014)

Cores das anãs M
$0.336 < (Y - J)_{VISTA} < 0.929$
$0.952 < (Y - H)_{VISTA} < 1.544$
$1.100 < (Y - K_s)_{VISTA} < 1.969$
$0.462 < (J - H)_{VISTA} < 0.727$
$0.642 < (J - K_s)_{VISTA} < 1.051$
$0.045 < (H - K_s)_{VISTA} < 0.438$

Tabela 3 – Cores médias de cada subtipo espectral acompanhada de seu desvio padrão.

	Y - J	Y - H	Y - K_s	J - H	J - K_s	H - K_s
M0	0.428(0.092)	1.039(0.087)	1.163(0.063)	0.611(0.116)	0.734(0.092)	0.124(0.079)
M1	0.449(0.077)	1.047(0.061)	1.200(0.064)	0.598(0.086)	0.751(0.081)	0.153(0.046)
M2	0.467(0.061)	1.042(0.073)	1.219(0.058)	0.575(0.088)	0.752(0.071)	0.177(0.058)
M3	0.487(0.081)	1.043(0.062)	1.241(0.064)	0.556(0.089)	0.754(0.083)	0.198(0.038)
M4	0.515(0.083)	1.057(0.090)	1.278(0.068)	0.542(0.110)	0.762(0.085)	0.220(0.075)
M5	0.555(0.096)	1.092(0.069)	1.340(0.082)	0.538(0.103)	0.786(0.099)	0.248(0.044)
M6	0.619(0.082)	1.150(0.067)	1.442(0.076)	0.531(0.087)	0.823(0.084)	0.292(0.033)
M7	0.664(0.117)	1.198(0.126)	1.513(0.136)	0.533(0.064)	0.849(0.068)	0.315(0.037)
M8	0.758(0.070)	1.304(0.102)	1.662(0.122)	0.546(0.052)	0.904(0.067)	0.358(0.033)
M9	0.850(0.079)	1.429(0.114)	1.830(0.139)	0.579(0.054)	0.980(0.071)	0.401(0.038)

nosso diagrama encontram-se na região referente à sequência principal, porém elas não se encontram em sua maioria na região do bojo. Ao final dessa seção discutiremos o motivo dessa aparente contradição.

Essa primeira seleção por cor nos fornece informações sobre o comportamento geral da estrela, mas não nos fornece informações básicas como raio e massa da estrela. Para isso, é necessário realizar uma segunda seleção, desta vez do tipo sub-espectral da estrela. O tipo sub-espectral das estrelas também pode ser selecionado por sua cor. A Tabela 3 fornece as cores médias de cada tipo sub-espectral acompanhado de seu desvio padrão.

Assim, utilizando-se das cores mais sensíveis à mudança de subtipo (Y-J, H-K_s, Y-K_s), Iglesias (2013) realizou uma regressão de múltiplas variáveis para definir o tipo subspectral das estrelas.

Enquanto os tipos espectrais de uma estrela são definidos por letras que não estão correlacionadas com suas diferenças, os tipos sub-espectrais variam de 0 a 9 dado seu tipo espectral. Assim, nossas estrelas variam de M0 a M9, onde 0 seriam as mais quentes e 9 as mais frias. A equação 3 descreve o número que acompanha o M (dado que todos os objetos de nosso estudo serão estrelas desse tipo espectral). A

Figura 11 – À esquerda, o diagrama cor-magnitude em K_s vs. $(J-K_s)$ de todos os objetos encontrados no *tile* b201. Ao centro, o mesmo diagrama com as anãs M, destacadas em azul, selecionadas através das cores. À direita, o diagrama cor-magnitude contendo apenas as anãs M selecionadas por cor do mesmo *tile*.

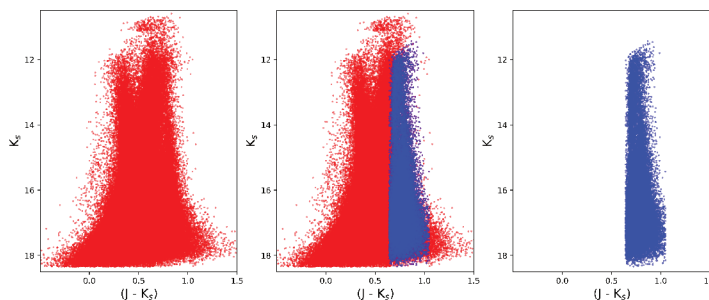


Figura 12 – Modelos teóricos para os diagramas cor-magnitude de estrelas na região da Via Láctea. Na primeira imagem, temos um digrama cor-magnitude utilizando dados observados com o VVV para uma área de 1 grau quadrada com centro em $(l, b) = (0.0, -9.5)$. As diferentes populações estelares estão rotuladas. Os pontos vermelhos mostram a cor das Anãs M para um modulo de distância $(m_{K_s} - M_{K_s}) = 7$ mag. No diagrama referente ao modelo de Besançon temos as estrelas da sequência principal em laranja, subgi-gantes em azul e gigantes em vermelho. Estrelas supergigantes, gigantes brilhantes e anãs brancas estão presentes em número reduzido (em azul claro, magenta e roxo, respectivamente). Ao lado, no modelo Trilegal estrelas do Bojo encontram-se em vermelho, do halo em azul, disco fino em laranja e disco espesso em verde (SAITO, R.; MINNITI; DIAS *et al.*, 2012)

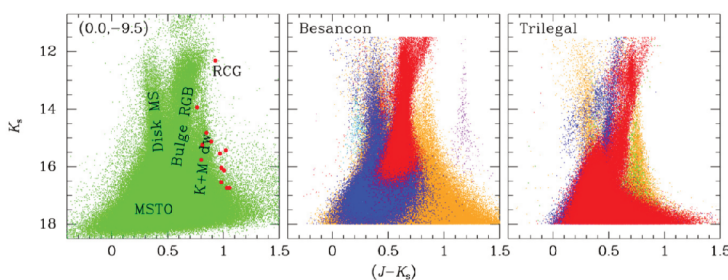


Figura 13 mostra a distribuição de estrelas por tipo subespectral no *tile* b201.

Embora as estrelas de subtipo maior sejam mais numerosas, esse resultado de muitas estrelas com subtipo menor é esperado, por serem estrelas mais brilhantes que suas contrapartes de subtipo maior e, conseqüentemente, mais visíveis da Terra. Agora que conseguimos selecionar os subtipos, temos diversas características associadas a cada estrela. As principais encontram-se na Tabela 4. Com esses parâmetros poderemos inferir importantes características sobre os exoplanetas que eventualmente

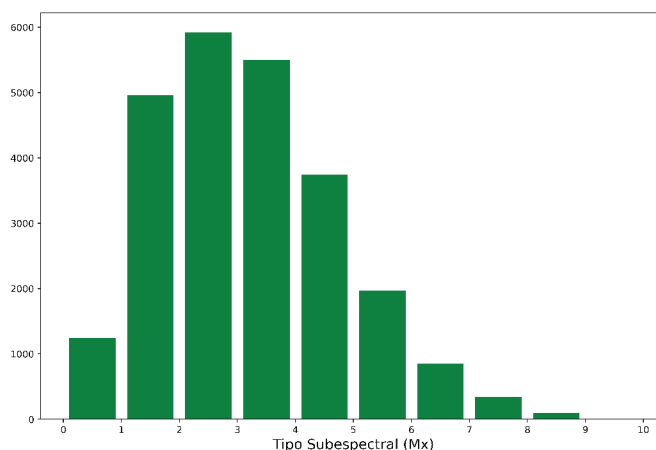
Tabela 4 – Parâmetros fundamentais referentes a cada subclasse das Anãs M (REID; HAWLEY, 2013)

Tipo Subespectral	Temperatura(K)	Raio(R_{\odot})	Massa(M_{\odot})	Magnitude Absoluta (mag)
M0	3,800	0.62	0.60	6.07
M1	3,600	0.49	0.49	6.17
M2	3,400	0.44	0.44	7.07
M3	3,250	0.39	0.36	7.46
M4	3,100	0.26	0.20	8.96
M5	2,800	0.20	0.14	9.88
M6	2,600	0.15	0.10	10.17
M7	2,500	0.12	~0.09	10.72
M8	2,400	0.11	~ 0.08	11.06
M9	2,300	0.08	~0.075	11.90

encontrarmos.

$$\begin{aligned} Subtipo_M = & 5.394(Y - J) + 4.370(Y - J)^2 + 24.325(Y - K_s) \\ & - 7.614(Y - K_s)^2 + 7.063(H - K_s) - 20.779 \end{aligned} \quad (3)$$

Figura 13 – Histograma mostrando a quantidade de Anãs M encontradas por tipo subespectral no *tile* b201.



Devido à magnitude absoluta dessas estrelas ser fraca, estrelas distantes não são visíveis em nosso céu. Assim, sabemos que as anãs M que selecionamos devem possuir níveis de extinção baixos e não precisam sofrer correções de avermelhamento. Além disso, essa região é uma região de baixa extinção interestelar. De acordo com Schultheis *et al.* (2014) podemos observar que, nessa região, A_{K_s} deve ser menor que

0.3 mag (se utilizarmos o mapa 3D, e apenas a região integrada de 0 a 2.5 kpc, deve ser menor que 0.1). Porém, com nossa seleção por cor, não temos como impedir que estrelas muito brilhantes e distantes que sofrem com efeitos de extinção sejam degenerescentes em cor com as anãs M e apareçam em nossos dados. Para uma segunda seleção, utilizaremos os dados astrométricos da missão espacial Gaia.

Os dados fotométricos e astrométricos foram cruzados através do Software TOPCAT (Tool for OPERations on Catalogues And Tables) (TAYLOR, 2005) com um erro de 1 arcsec. Os dados nos dão o valor de paralaxe de cada estrela. Esse valor indica o movimento aparente da estrela em relação a mudança de posição da Terra em sua órbita ao longo do ano. Com dados de paralaxe, podemos calcular a distância em parsec.

Um parsec equivale a distância de um objeto que possua uma paralaxe heliocêntrica de um arcsec. Assim, podemos calcular essa distância através da Equação 4.

$$Distância (parsec) = \frac{1 \text{ Unidade Astronômica}}{Paralaxe (rad)} \quad (4)$$

Assim conseguimos determinar quais estrelas em nossa seleção de cor não podem ser anãs, já que estão muito distantes para conseguirmos enxergá-las com essa magnitude aparente. A Figura 14 mostra esse problema. Podemos ver claramente dois grupos de fontes, sendo um deles de muitas estrelas brilhantes (com magnitude baixa) e uma paralaxe baixa (longa distância), o que indica que elas podem não ser anãs M, mas estrelas gigantes distantes com degenerescência em cor com nossos alvos.

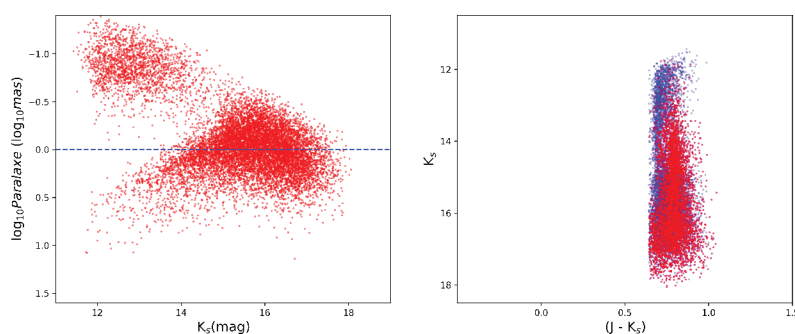
Poderíamos simplesmente tirar somente as estrelas que estão naquele grupo, mas preferimos encontrar planetas o mais perto possível de nosso Sol. Além disso, mapas 3D de extinção mostram que a uma baixa distância a correção por avermelhamento pode ser desconsiderada (Marshall *et al.* (2006) e OA Gonzalez *et al.* (2012)). Para este trabalho, estabelecemos um limite de 1000 parsec. Assim, sabemos que não temos gigantes em nossas seleção.

Essa seleção permite-nos também responder a questão de porque em nosso diagrama cor-magnitude encontramos a maioria das estrelas fora do Bojo de acordo com os modelos teóricos. O Bojo Galáctico encontra-se muito mais longe que 1kpc, assim, nossas estrelas encontram-se ainda no disco. As estrelas encontram-se na "região do Bojo", pois esta é a região que corta nossa linha de visada da Via Láctea.

Após todos esses passos, temos nossas anãs M devidamente selecionadas. Embora a grande maioria das estrelas do Universo seja dessa classe, nossa seleção tem um percentual baixo em relação ao total de objetos do *tile*. Essa diferença se dá por dois principais motivos. Como essas estrelas são pouco brilhantes, não conseguimos enxergar da Terra a maior parte delas, já que quando sua luz chega aqui, sua

magnitude é muito alta. Além disso, buscamos ter uma seleção mais precisa, eliminando estrelas com distância maior que 1kpc (para evitar problemas de extinção), com fotometria ruim ou erros muito grandes.

Figura 14 – Na primeira imagem temos as estrelas do *tile* b201 selecionadas por cor com seus respectivos dados de paralaxe da missão espacial Gaia em um gráfico de magnitude pela paralaxe, em escala logarítmica. Podemos perceber na imagem um grupo de estrelas separados, indicando estrelas de magnitude baixa (mais brilhantes) e paralaxe baixa (mais distantes). Com o corte em 1000 pc, equivalente a linha pontilhada, eliminamos todas as estrelas desse grupo (acima da linha). Na segunda imagem, temos o diagrama cor-magnitude de todas as estrelas antes selecionadas apenas por cor e, em vermelho, as também selecionadas por paralaxe.



2.4 BOX-FITTING

Para realizar a modelagem de trânsitos utilizaremos o algoritmo chamado *Box-Least Squares(BLS)*. Esse algoritmo de modelagem de trânsitos é baseado no trabalho de Kovács, Zucker e Mazeh (2002). O algoritmo supõe um sinal estritamente periódico, com um período P_0 e com apenas dois valores discretos, H e L. H sendo o valor da magnitude da estrela sem trânsito e L durante o trânsito. O tempo decorrido em trânsito é qP_0 , com q sendo um número pequeno. Assim, dado um número qualquer de pontos, o algoritmo encontra o melhor modelo estimando cinco parâmetros : H, L, q, P_0 e t_0 , a época do trânsito.

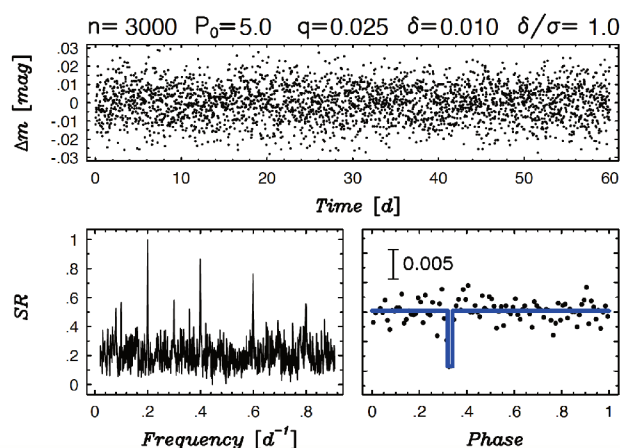
Com esses parâmetros podemos definir dados importantes sobre o planeta. H-L, a profundidade do nosso trânsito, é a razão entre a área total do planeta pela área total da estrela. Com o período, P_0 , podemos, através da terceira Lei de Kepler, estimar o raio da órbita. Essas definições supõem que o ângulo entre o trânsito e nossa linha de visada é de 90 graus e que não temos *limb darkening* (escurecimento de borda).

O algoritmo utiliza o método dos mínimos quadrados para encontrar os parâmetros do modelo com menor diferença em relação ao modelo. A frequência de dados do VVV não é otimizada para a busca de trânsitos, já que, ao contrário de projetos

como o KEPLER, sua fotometria é bem espaçada ao longo do tempo. Assim, uma segunda seleção através de parâmetros realistas de trânsito é necessária e uma terceira inspeção visual com base nas curvas de luz. Essas inspeções subsequentes são importantes pois encontramos muitos falsos positivos em algumas curvas de luz. Em muitos casos, os pontos nos quais o falso trânsito aparecia era justamente na mesma época em todas as curvas de luz. Por terem aproximadamente a mesma intensidade e duração, interpretamos como erros sistemáticos das observações dessas épocas e excluímos esse pontos em nossas análises.

O código original do algoritmo foi originalmente escrito na linguagem de programação *FORTTRAN*, porém, nesse trabalho utilizamos uma implementação na linguagem *Python* disponibilizada por Angus & Foreman-Mackey (2012).

Figura 15 – Um exemplo de imagem obtida através do método de Box-Fitting. Acima temos a curva de luz do objeto e abaixo temos o espectrograma de frequências normalizado e a curva de luz em fase com o modelo de trânsito. Os parâmetros encontram-se acima da primeira figura. Onde n é o número de *bins* utilizados, δ é $H - L$ e σ é o erro médio (KOVÁCS; ZUCKER; MAZEH, 2002).

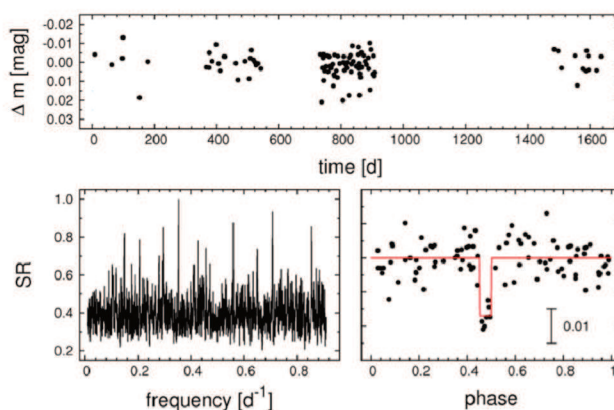


O algoritmo necessita de parâmetros iniciais dos trânsitos buscados para sua implementação. Como conhecemos bem as nossas estrelas alvas e o comportamento de seus trânsitos, já escolhemos os parâmetros com base em possíveis trânsitos de planetas rochosos. Os períodos de trânsito são tipicamente entre 1 e 20 dias, o tempo de trânsito entre 25 e 325 minutos. Assim, precisamos aplicar o algoritmo nas curvas de luz de todas as estrelas selecionadas e obteremos nossos candidatos a planetas extrassolares.

Antes de partirmos para a busca oficial nos *tiles* do VVV, realizamos testes em curvas de luz sintéticas com dados de tempo característicos dos dados do VVV, porém com trânsitos falsos. O algoritmo foi capaz de encontrar os parâmetros que modelamos para o trânsito. Além disso, já sabíamos através de simulações anteriores

(Figura 16) que os dados do VVV seriam propícios para encontrarmos, por exemplo, uma Super-Terra orbitando uma M6 (SAITO, R.; MINNITI; DÉKÁNY *et al.*, 2011).

Figura 16 – Simulação de um trânsito planetário no VVV. O planeta tem um período $P = 2.8$ dias e produz um eclipse com profundidade de 1.7% em fluxo, que são os valores típicos esperados para o trânsito de um planeta tipo Super-Terra ao redor de uma estrela M6. A curva fotométrica é a típica de uma estrela de $K_s = 14.5$ mag. Podemos comparar essa imagem com os trânsitos encontrados como na Figura 18 e perceber como as imagens são similares e tão ruidosas quanto esta simulação (SAITO, R.; MINNITI; DÉKÁNY *et al.*, 2011).



3 RESULTADOS

A busca por trânsitos foi realizada em dois *tiles* do VVV. Esses *tiles* foram o b263 e o b264 (cujas coordenadas centrais encontram-se na tabela 1). A escolha ocorreu devido a sua posição, próxima do centro Galáctico e principalmente ao grande número de épocas de medição. Enquanto a maioria dos *tiles* da região mais externa do bojo, onde a extinção é menor, possuía em torno de 62 épocas, os escolhidos possuíam 89. Esse número elevado foi muito importante para eliminar erros referentes à baixa frequência de medições e à não-otimização dos dados para busca de trânsitos planetários. Além disso, os *tiles* possuíam muitos objetos (em torno de um milhão, cada) o que aumenta a probabilidade de encontrarmos planetas extrassolares.

Porém, apesar dos dados possuírem muitas épocas, algumas das mesmas, por erros de medição ou noites de mau tempo, por exemplo, possuem dados vazios para alguns dos alvos observados. Assim, eliminamos esses dados de nossa busca. Além desse problema, encontramos 3 épocas nas quais, sistematicamente, todos os objetos apresentavam valores de magnitude mais baixos que deveriam ser encontrados. Assim, removemos esses pontos. Após essas seleções, apenas realizamos a busca por trânsitos em objetos que possuíam mais de 70 épocas.

Os dados disponíveis de brilho estelar estão disponíveis em magnitude, porém o programa busca trânsitos através do fluxo estelar. Realizamos as devidas conversões, dadas pela equação 5 (BÖHM-VITENSE; BÖHM-VITENSE; HM-VITENSE, 1989), onde F é o fluxo, m a magnitude da estrela e m_z a magnitude de ponto zero na banda de cor selecionada. Também normalizamos as curvas de luz para que sua mediana seja igual a zero. Para encontrarmos os erros em fluxo, utilizamos a equação 6, onde ΔF é o erro no fluxo e Δm o erro na magnitude.

$$F = 10^{\frac{m_z - m}{2.5}} \quad (5)$$

$$\Delta F = \left| \frac{-\ln(10) * 10^{\frac{m_z - m}{2.5}}}{2.5} * \Delta m \right| \quad (6)$$

Além dos parâmetros já escolhidos previamente, após rodar o programa, decidimos realizar mais alguns cortes. O primeiro estabelece que a profundidade do eclipse deve ser maior que 3 vezes o erro médio dos dados. Além disso, o ponto mínimo em eclipse não deve ser menor que duas vezes a profundidade do eclipse.

Essas condições foram estipuladas após diversos testes e verificações, os quais tomaram grande parte do trabalho. Escolhemos para profundidade do eclipse como não sendo maior que três vezes o valor do erro, como uma forma mais confiável de se eliminar as curvas mais ruidosas e assim termos maior confiabilidade nos candidatos.

A segunda condição veio para mitigar o efeito de pontos muito abaixo do resto da curva que causavam um eclipse obviamente falso.

Nas próximas seções discutiremos os resultados encontrados em cada um dos *tiles* separadamente.

3.1 CANDIDATOS A TRÂNSITO PLANETÁRIO NO *TILE* B263

Antes da seleção de cores o *tile* b263 possuía 1.276.514 objetos. Realizando apenas a seleção por cores, chegamos a 171.951 possíveis anãs M. Ao realizar o corte de paralaxe, com apenas os objetos monitorados pela Gaia e com distância inferior a 1000 pc, chegamos a 7.919 anãs M. Nessas estrelas, foram encontrados 17 candidatos a trânsitos planetários. Os dados de suas respectivas estrelas e características do planeta encontram-se na tabela 5.

As Figuras 18 e 19 mostram as curvas de luz das estrelas VVV J180521.94-311340.71 e VVV J180704.88-324042.38. As figuras apresentam dois gráficos. O primeiro mostra a curva de luz da estrela, com o tempo em MJD no eixo x e com o fluxo, normalizado para 0, no eixo y. O segundo mostra a mesma curva de luz, desta vez em fase, ou seja, indo de 0 a 1, com 1 sendo o período de um trânsito. Além disso, o gráfico mostra as barras de erros de fluxo e o modelo de trânsito encontrado pelo algoritmo em azul.

Todas as curvas de luz dos candidatos a trânsito planetário encontram-se no Apêndice A e seus Espectrogramas no Apêndice B.

Utilizando os dados conhecidos das estrelas anãs M e as estimativas de Zona Habitável fornecidas por Kopparapu, Ramses Ramirez *et al.* (2013), podemos traçar um gráfico comparando o tamanho dos planetas e sua distância em relação a estrela-mãe. A Figura 17 coloca esses planetas em perspectiva.

Aqui utilizamos como planetas do tipo Netuno são os planetas entre 3 raios terrestres ($R_{Terra} = 6.371$ km) e 2 raios de Netuno ($R_{Netuno} = 24.622$ km), tipo Júpiter são os que possuem entre 2 raios de Netuno e 2 raios de Júpiter ($R_{Júpiter} = 69.911$ km) e Super-Júpiter acima de 2 raios de Júpiter. Essa nomenclatura é usualmente utilizada quando nos referimos à massa do planeta, porém com a técnica de trânsito, podemos apenas calcular os raios dos planetas.

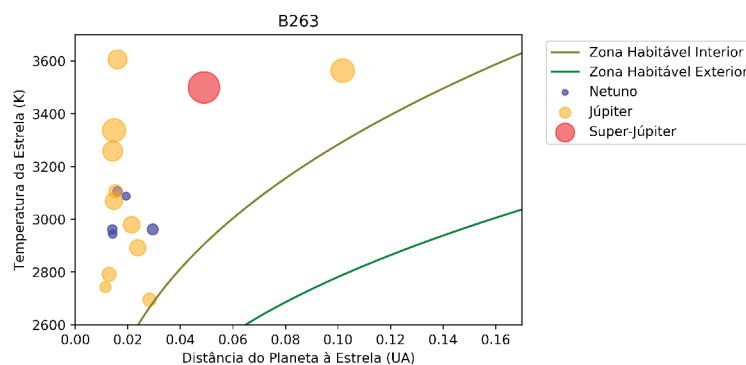
A Figura 17 nos mostra que não encontramos nenhum planeta potencialmente habitável nessa busca. Porém alguns deles são dignos de nota. O planeta VVV J180521.94-311340.71b é o que se encontra mais próximo da Zona Habitável da estrela. Mesmo utilizando uma definição otimista da Zona, como citado anteriormente, diversos fatores podem alterar a habitabilidade de um planeta. Assim, podemos considerá-lo como um bom candidato, mesmo provavelmente não sendo um planeta rochoso. Seu raio de $0.089 R_{\odot}$ é aproximadamente 2.5 raios de Netuno ($0.03539 R_{\odot}$).

Encontramos também 5 planetas do tipo Netuno, ou seja, relativamente

Tabela 5 – Candidatos a trânsitos planetários encontrados no *tile* b263

Nome da Estrela	Subtipo Espectral	Magnitude Média(mag)	Período (dias)	Tempo de Trânsito(h)	Raio do Planeta($R_{Júpiter}$)	Raio da Órbita(UA)
VVV J180450.90-322406.66	5.3	15.47	1.39	1.95	0.940	0.0130
VVV J180331.02-320147.70	3.5	13.47	1.47	2.87	0.572	0.0161
VVV J180458.45-320931.60	4.2	15.12	2.51	3.51	1.110	0.0215
VVV J180529.07-314552.18	4.3	14.31	1.36	1.90	0.625	0.0141
VVV J180411.39-313400.69	1.0	13.45	1.07	1.49	1.272	0.0161
VVV J180536.21-312317.91	2.3	15.09	1.10	1.53	1.543	0.0147
VVV J180521.94-311340.71	5.9	15.99	5.00	7.05	0.884	0.0283
VVV J180504.04-310526.37	5.6	14.93	1.23	1.72	0.719	0.0115
VVV J180524.22-310741.76	4.4	12.92	1.40	1.95	0.531	0.0142
VVV J180636.62-325052.75	1.2	14.20	17.42	24.31	1.547	0.1014
VVV J180704.88-324042.38	1.5	15.57	6.02	8.40	2.077	0.0489
VVV J180654.97-323623.05	4.7	15.29	3.17	4.42	1.090	0.0239
VVV J180552.46-321559.57	3.5	14.36	1.36	1.90	0.876	0.0153
VVV J180734.60-320754.56	3.7	14.93	1.32	1.85	1.109	0.0147
VVV J180803.85-314028.34	3.6	12.99	1.97	2.75	0.524	0.0194
VVV J180620.62-312627.29	4.3	14.52	4.11	5.73	0.691	0.0294
VVV J180538.99-320146.48	2.7	15.16	1.10	1.54	1.333	0.0143

Figura 17 – Candidatos a planetas do *tile* b263. Os planetas estão em escala com seu provável raio e separados por cor. No eixo x temos o raio da órbita de cada planeta em Unidades Astronômicas (Unidade de medida que equivale a distância da terra ao sol, ou seja, aproximadamente 150 milhões de quilômetros), no eixo y temos a temperatura da estrela-mãe de cada planeta.



menores que os do tipo Júpiter. Eles são: VVV J180331.02-320147.70b, VVV J180529.07-314552.18b, VVV J180524.22-310741.76b, VVV J180803.85-314028.34b e VVV J180620.62-312627.29b. Porém os mesmos encontram-se muito próximos da sua estrela, tornando sua temperatura superficial muito alta, ou seja, podem ser considerados Netunos Quentes.

VVV J180704.88-324042.38b é um caso curioso. Não encontramos na literatura referências de planetas do tipo Super-Júpiter orbitando anãs M, o que nos faz pensar se esse corpo é uma nova descoberta ou se pode ser uma anã marrom, por exemplo. Além disso, sua curva de luz (Figura 19) mostra uma característica quase senoidal, o que não é característico de um planeta. Portanto, esse objeto poderia ser um sistema binário, composto por uma anã vermelha e uma anã marrom.

Pode-se notar que muitos dos eclipses vem de possíveis planetas com raios muito próximos do raio de uma estrela anã M, o que podem caracterizar, na verdade, sistemas estelares binários eclipsantes. Nesses sistemas teríamos duas regiões na curva de luz no qual teríamos trânsitos. Já que apenas um deles é bem aparente, essa estrela companheira deve ter um brilho menor. Como nossa estrela principal já é, aparentemente, uma anã vermelha, essa sua companheira deve ser uma anã marrom, ou uma M9, por exemplo.

Figura 18 – VVV J180521.94-311340.71b. Na Figura de cima temos a curva de luz da estrela, com o eixo x sendo a época em MJD na qual o dado de fluxo foi obtido e o eixo y sendo o fluxo, já normalizado. Na Figura de baixo temos os pontos de fluxo e sua respectivas barras de erro, em fase com o período de um trânsito. A linha azul representa o modelo dos parâmetros de trânsito obtidos através do método BLS. Entre as Figuras temos o período do trânsito, P , em dias, o tempo decorrido em trânsito, Δt , em horas e o raio do planeta, R , em raios solares ($R_{\odot} = 695.510 \text{ km}$)

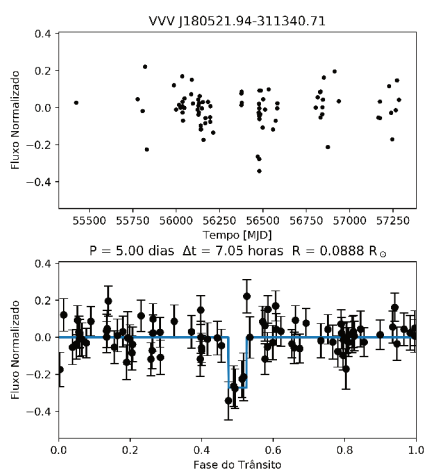
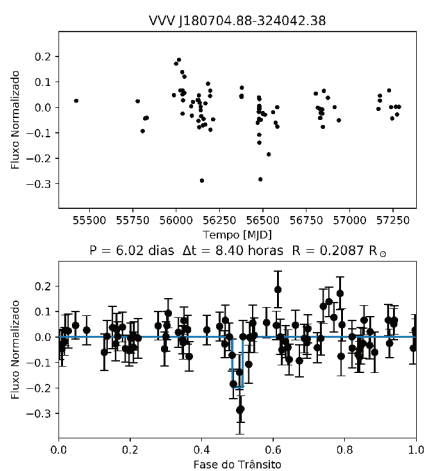


Figura 19 – VVV J180704.88-324042.38b. A figura é similar à Figura 18.



3.2 CANDIDATOS A TRÂNSITO PLANETÁRIO NO TILE B264

Antes da seleção de cores o *tile* b264 possuía 1.263.677 objetos. Realizando apenas a seleção por cores, chegamos a 157.470 possíveis anãs M. Ao realizar o corte de paralaxe, com apenas os objetos monitorados pela Gaia e com distância inferior a 1000 pc, chegamos a 5.712 anãs M.

Nesse *tile* foram encontrados 11 candidatos a trânsitos planetários. Os dados de suas respectivas estrelas e características do planeta encontram-se na tabela 6. Assim como na seção anterior plotamos um gráfico referente aos planetas e a Zona Habitável, aqui fazemos o mesmo na Figura 20.

Neste *tile* encontramos apenas planetas do tipo Netuno e Júpiter. Encontramos 2 planetas do tipo Netuno. Eles são: VVV J180720.71-301849.84b (Figura 22) e VVV J180946.12-311329.30b (Figura 23). Novamente, infelizmente, encontram-se muito próximos de sua estrela, tornando sua temperatura superficial muito alta.

Nesta figura, encontramos um dos planetas dentro da Zona Habitável, o que é muito importante. O planeta VVV J180644.36-303007.03b (Figura 21) possui um raio de $0.077 R_{\odot}$, o que o é, aproximadamente, 0,75 raio de Júpiter ou 2,1 raios de Netuno. Mesmo maior do que o esperado para um planeta potencialmente habitável, um futuro estudo do mesmo é muito importante, para determinar sua massa, possível composição da atmosfera e atividade cromosférica de sua estrela-mãe. Assim, este é nosso melhor candidato para planeta potencialmente habitável.

Abaixo, encontramos as figuras de alguns dos candidatos a trânsitos. Todas as curvas encontram-se no apêndice C e seus respectivos espectrogramas no Apêndice D.

Figura 20 – Candidatos a Planetas do *tile* b264. A figura é similar a Figura 20.

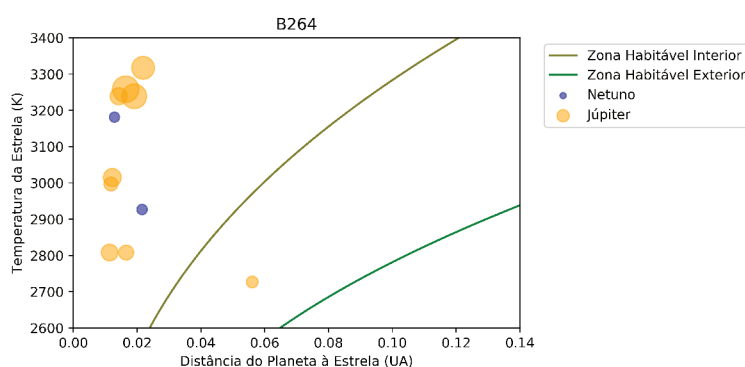


Tabela 6 – Candidatos a trânsitos planetários encontrados no *tile* b264.

Nome da Estrela	Subtipo Espectral	Magnitude Média(mag)	Período (dias)	Tempo de Trânsito(h)	Raio do Planeta($R_{Júpiter}$)	Raio da Órbita(UA)
VVV J180644.36-303007.03	5.7	15.42	13.51	18.86	0.769	0.0562
VVV J180720.71-301849.84	4.5	14.55	2.65	3.70	0.678	0.0216
VVV J180722.36-301745.13	2.4	14.92	2.01	3.93	1.515	0.0220
VVV J180803.54-301006.96	2.8	15.29	1.73	2.42	1.650	0.0192
VVV J180840.88-300912.05	2.7	15.54	1.36	1.90	1.766	0.0164
VVV J180848.35-295752.06	2.8	14.86	1.11	1.55	1.158	0.0143
VVV J181012.57-313453.23	4.0	15.17	1.05	1.50	1.172	0.0122
VVV J180946.12-311329.30	3.1	13.01	1.00	2.79	0.636	0.0129
VVV J181200.69-305013.31	5.2	15.77	2.00	2.83	0.972	0.0165
VVV J180604.54-304643.98	4.1	14.82	1.01	1.41	0.907	0.0118
VVV J180651.94-303329.01	5.2	15.86	1.14	1.62	1.115	0.0114

Figura 21 – VVV J180644.36-303007.03b. A figura é similar à Figura 18.

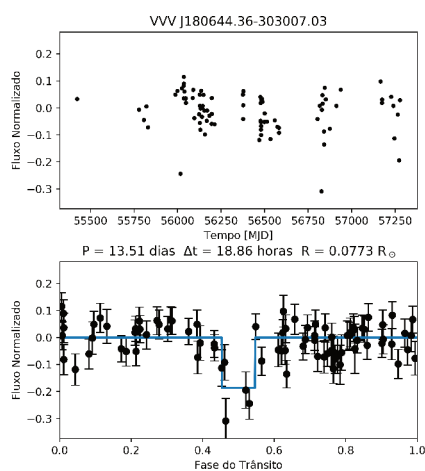


Figura 22 – VVV J180720.71-301849.84b. A Figura é similar à Figura 18.

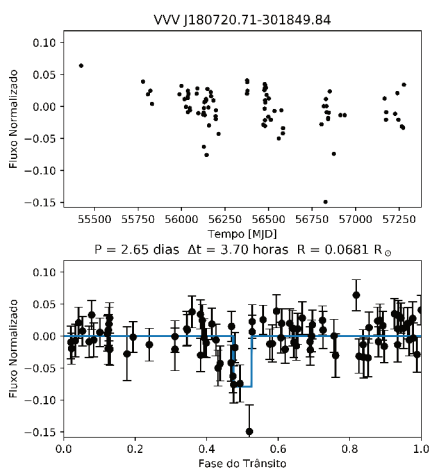
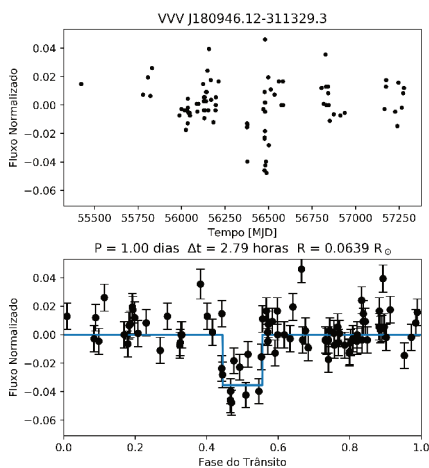


Figura 23 – VVV J180946.12-311329.30b. A figura é similar à Figura 18.



4 CONCLUSÃO

Esse trabalho utilizou métodos de seleção de estrelas anãs M encontrados na literatura, porém, potencializou os mesmos ao combinar com dados da missão espacial Gaia. Assim, temos métodos mais confiáveis para determinarmos a distância dessas estrelas e conseqüentemente eliminarmos as contaminantes como estrelas gigantes distantes.

O método de Box-Fitting, como esperado, apresentou dificuldades para tratar os dados do *VVV Survey*, devido a não-otimização dos mesmos para a busca de exoplanetas. Porém, essas dificuldades foram minimizadas ao realizarmos seleções com parâmetros mais próximos do que buscávamos, como períodos curtos e maior número de épocas observadas, e seleções visuais com as curvas de luz.

Esse trabalho visava encontrar candidatos a trânsito planetário nos dados do projeto VVV. Ao final, encontramos 28 candidatos, sendo sua grande maioria (vinte) do tipo Júpiter, sete tipo Netuno e um do tipo Super-Júpiter. Nenhum planeta potencialmente rochoso foi encontrado.

Essa falta de planetas rochosos, não é algo completamente inesperado. Dos quase 4000 exoplanetas encontrados até hoje, apenas em torno de 50 deles são rochosos e potencialmente habitáveis. A grande maioria (mais de 70 %) são planetas quentes demais, como os que encontramos. Isso se deve, principalmente, à facilidade de encontrarmos planetas grandes e próximos da estrela, comparado com planetas menores¹.

Vale ressaltar que as observações do projeto VVV foram cadenciadas para buscar RR Lyrae e Cefeidas, em contraste, por exemplo, ao satélite Kepler cuja função era especificamente encontrar planetas extrassolares. O satélite Kepler encontrou um total de 4 planetas rochosos potencialmente habitáveis (assumindo um modelo mais conservador de zona habitável). Existe também um projeto chamado "The MEarth Project" que visa justamente buscar planetas rochosos em torno de anãs M ². Até o momento, o projeto encontrou 2 planetas do tipo Super-Terra. Além disso a busca foi feita em apenas dois *tiles* do VVV (aproximadamente 0.5% da área total do projeto), o que faz com que tenhamos ainda muitas estrelas para analisar.

Porém, esse número grande de planetas tipo-Júpiter não era esperado ao redor de estrelas anãs vermelhas. Como citado anteriormente, podemos estar encontrando sistemas binários, ou precisamos refinar nossa seleção de cor. Como o nome indica, para definirmos o tipo espectral de uma estrela com exatidão, precisamos de medidas espectroscópicas da estrela. Assim, caso estejamos lidando com estrelas com um tipo espectral diferente, estaríamos encontrando estrelas com raios e massa diferentes, o que alteraria as propriedades calculadas dos planetas.

¹ <http://phl.upr.edu/>

² <https://www.cfa.harvard.edu/MEarth/Discoveries.html>

A Figura 24 mostra a distribuição dos nossos candidatos a planetas em relação ao diagrama cor-magnitude de seus respectivos *tiles*. A Figura 25 mostra a distribuição espacial dos nossos candidatos e a Figura 26 é similar a Figura 10, porém, com nossos candidatos destacados. Podemos perceber pelas figuras que os planetas encontram-se bem distribuídos, não havendo uma concentração muito grande em nenhuma região específica, o que indica menor possibilidade de erros sistemáticos.

Outro obstáculo é a falta de observações fotométricas com maior cadência para uma melhor determinação dos parâmetros planetários. Mas mesmo assim, encontramos dois planetas possivelmente dentro da Zona Habitável de suas respectivas estrelas. Esses planetas merecem ser estudados para descobrirmos mais sobre esses possíveis novos mundos. Assim, essas observações de seguimento (*follow-up*) podem ser feitas utilizando telescópios como o SOAR e o Blanco, aos quais o Brasil tem acesso.

Apesar de não encontrarmos muitos planetas nas áreas procuradas, conseguimos aperfeiçoar nossas habilidades para encontrarmos exoplanetas em diferentes *tiles* do *VVV Survey*. De agora em diante, temos uma grande gama de alvos para continuarmos nossa busca pela resposta da grande pergunta: “Estamos sozinhos?”.

Figura 24 – A primeira imagem mostra um diagrama cor-magnitude para todas as estrelas do *tile* B263 em vermelho, com os candidatos a trânsito planetário destacados em azul. A segunda imagem mostra o mesmo diagrama para as estrelas e candidatos do *tile* B264.

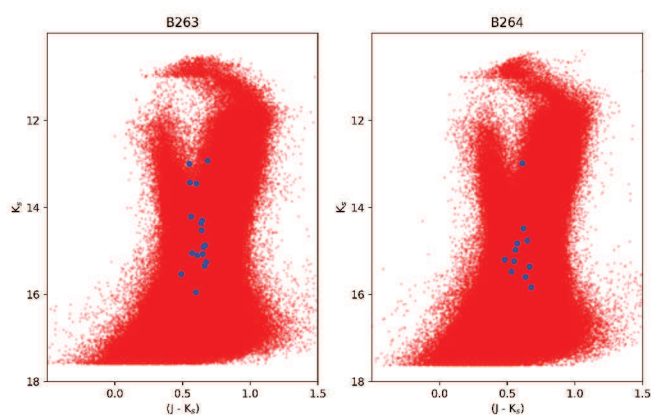


Figura 25 – A imagem mostra a distribuição espacial de todos os nossos candidatos, sugerindo uma distribuição aleatória.

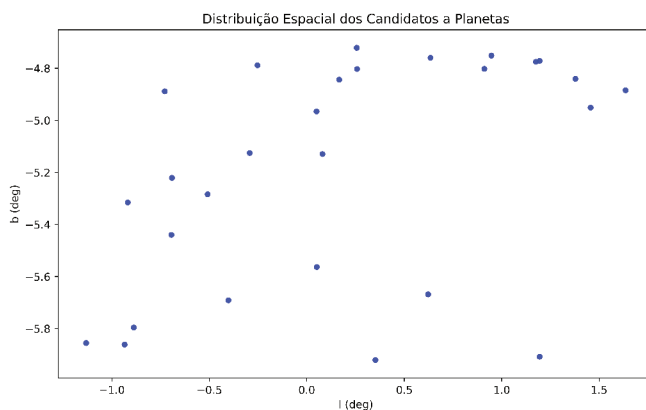
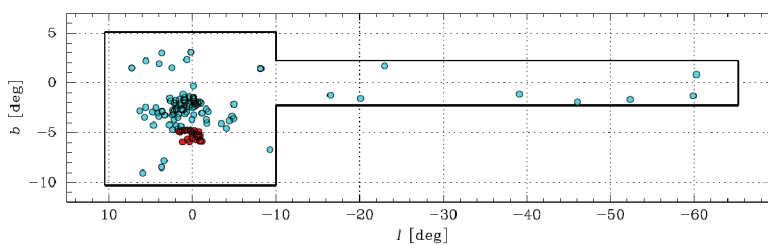


Figura 26 – Similar a Figura 10, porém com nossos candidatos em destaque.



REFERÊNCIAS

- BÖHM-VITENSE, Erika; BÖHM-VITENSE, Erika; HM-VITENSE, Erika B. **Introduction to Stellar Astrophysics: Volume 1, Basic Stellar Observations and Data**. [S.l.]: Cambridge University Press, 1989. v. 1.
- BOZZA, Valerio; MANCINI, Luigi; SOZZETTI, Alessandro *et al.* Methods of Detecting Exoplanets. *In*: SPRINGER. METHODS of Detecting Exoplanets: 1st Advanced School on Exoplanetary Science. [S.l.: s.n.], 2016.
- BROWN, AGA *et al.* Gaia Data Release 2-Summary of the contents and survey properties. **Astronomy & Astrophysics**, EDP Sciences, v. 616, a1, 2018.
- CARDELLI, Jason A; CLAYTON, Geoffrey C; MATHIS, John S. The relationship between infrared, optical, and ultraviolet extinction. **The Astrophysical Journal**, v. 345, p. 245–256, 1989.
- CAVICCHIOLI, Ricardo. Extremophiles and the search for extraterrestrial life. **Astrobiology**, Mary Ann Liebert, Inc., v. 2, n. 3, p. 281–292, 2002.
- EVANS, DW *et al.* Gaia Data Release 2-Photometric content and validation. **Astronomy & Astrophysics**, EDP Sciences, v. 616, a4, 2018.
- GIRARDI, L *et al.* Star counts in the Galaxy-Simulating from very deep to very shallow photometric surveys with the TRILEGAL code. **Astronomy & Astrophysics**, EDP Sciences, v. 436, n. 3, p. 895–915, 2005.
- GONZALEZ, OA *et al.* Reddening and metallicity maps of the Milky Way bulge from VVV and 2MASS-II. The complete high resolution extinction map and implications for Galactic bulge studies. **Astronomy & Astrophysics**, EDP Sciences, v. 543, a13, 2012.
- GRAN, F *et al.* Mapping the outer bulge with RRab stars from the VVV Survey. **Astronomy & Astrophysics**, EDP Sciences, v. 591, a145, 2016.
- IGLESIAS, D. P. **The search for exoplanetary transit candidates around M dwarf stars using VVV survey data**, 2013. Diss. (Mestrado) – Pontificia Universidad Católica de Chile.
- JORDI, C *et al.* Gaia broad band photometry. **Astronomy & Astrophysics**, EDP Sciences, v. 523, a48, 2010.
- KALTENEGGER, Lisa; TRAUB, Wesley A. Transits of Earth-like planets. **The Astrophysical Journal**, IOP Publishing, v. 698, n. 1, p. 519, 2009.

KOPPARAPU, Ravi Kumar; RAMIREZ, Ramses M *et al.* Habitable zones around main-sequence stars: dependence on planetary mass. **The Astrophysical Journal Letters**, IOP Publishing, v. 787, n. 2, p. l29, 2014.

KOPPARAPU, Ravi Kumar; RAMIREZ, Ramses *et al.* Habitable zones around main-sequence stars: new estimates. **The Astrophysical Journal**, IOP Publishing, v. 765, n. 2, p. 131, 2013.

KOVÁCS, Geza; ZUCKER, Shay; MAZEH, Tsevi. A box-fitting algorithm in the search for periodic transits. **Astronomy & Astrophysics**, EDP Sciences, v. 391, n. 1, p. 369–377, 2002.

LAMMER, Helmut *et al.* What makes a planet habitable? **The Astronomy and Astrophysics Review**, Springer, v. 17, n. 2, p. 181–249, 2009.

MARSHALL, Douglas J *et al.* Modelling the Galactic interstellar extinction distribution in three dimensions. **Astronomy & Astrophysics**, EDP Sciences, v. 453, n. 2, p. 635–651, 2006.

MAYOR, Michel; QUELOZ, Didier. A Jupiter-mass companion to a solar-type star. **Nature**, Nature Publishing Group, v. 378, n. 6555, p. 355, 1995.

MCMAHON, Richard G *et al.* First scientific results from the VISTA hemisphere survey (VHS). **The Messenger**, v. 154, n. 35-37, p. 188, 2013.

MINNITI, D *et al.* VISTA Variables in the Via Lactea (VVV): The public ESO near-IR variability survey of the Milky Way. **New Astronomy**, Elsevier, v. 15, n. 5, p. 433–443, 2010.

NUTZMAN, Philip; CHARBONNEAU, David. Design considerations for a ground-based transit search for habitable planets orbiting M dwarfs. **Publications of the Astronomical Society of the Pacific**, IOP Publishing, v. 120, n. 865, p. 317, 2008.

REID, Neill I; HAWLEY, Suzanne L. **New light on dark stars: red dwarfs, low-mass stars, brown dwarfs**. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2013.

ROBIN, Annie C *et al.* A synthetic view on structure and evolution of the Milky Way. **Astronomy & Astrophysics**, EDP Sciences, v. 409, n. 2, p. 523–540, 2003.

ROJAS-AYALA, Bárbara *et al.* M dwarfs in the b201 tile of the VVV survey-Colour-based selection, spectral types and light curves. **Astronomy & Astrophysics**, EDP Sciences, v. 571, a36, 2014.

SAITO, RK; MINNITI, D; DÉKÁNY, I *et al.* Vista variables in the via lactea (VVV): First results and perspectives. **Revista Mexicana de Astronomia y Astrofísica**, Instituto de Astronomia, v. 40, 2011.

SAITO, RK; MINNITI, D; DIAS, B *et al.* Milky Way demographics with the VVV survey-I. The 84-million star colour–magnitude diagram of the Galactic bulge. **Astronomy & Astrophysics**, EDP Sciences, v. 544, a147, 2012.

SAITO, Roberto K *et al.* VVV DR1: The first data release of the Milky Way bulge and southern plane from the near-infrared ESO public survey VISTA variables in the Via Láctea. **Astronomy & Astrophysics**, EDP Sciences, v. 537, a107, 2012.

SCHULTHEIS, M *et al.* Mapping the Milky Way bulge at high resolution: the 3D dust extinction, CO, and X factor maps. **Astronomy & Astrophysics**, EDP Sciences, v. 566, a120, 2014.

SEAGER, Sara. **Exoplanets**. [S.l.]: University of Arizona Press., 2010.

SEAGER, Sara; MALLEN-ORNELAS, Gabriela. A unique solution of planet and star parameters from an extrasolar planet transit light curve. **The Astrophysical Journal**, IOP Publishing, v. 585, n. 2, p. 1038, 2003.

SHIELDS, Aomawa L; BALLARD, Sarah; JOHNSON, John Asher. The habitability of planets orbiting M-dwarf stars. **Physics Reports**, Elsevier, v. 663, p. 1–38, 2016.

SUROT, F. R. M. **BUSQUEDA DE TRANSITOS PLANETARIOS EN EL VVV SURVEY**. 2013. f. 116. Monografía (Trabalho de Conclusão de Curso) – Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago, Chile.

TAYLOR, Mark B. TOPCAT & STIL: Starlink table/VOTable processing software. *In*: ASTRONOMICAL Data Analysis Software and Systems XIV. [S.l.: s.n.], 2005. p. 29.

APÊNDICE A – CURVAS DE LUZ E MODELO DE TRÂNSITOS DOS CANDIDATOS A TRÂNSITO PLANETÁRIO DO *TILE* B263

Figura 27 – VVV J180450.90-322406.66b. A figura é similar à Figura 18.

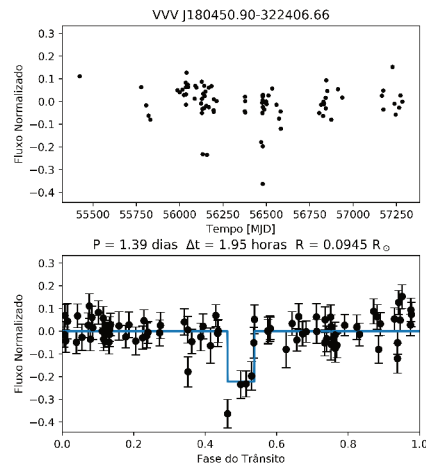


Figura 28 – VVV J180331.02-320147.70b. A figura é similar à Figura 18.

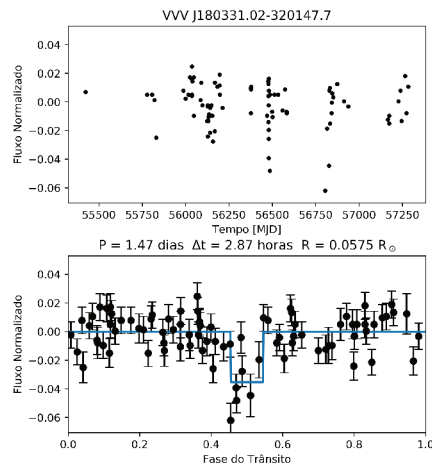


Figura 29 – VVV J180458.45-320931.60b. A figura é similar à Figura 18.

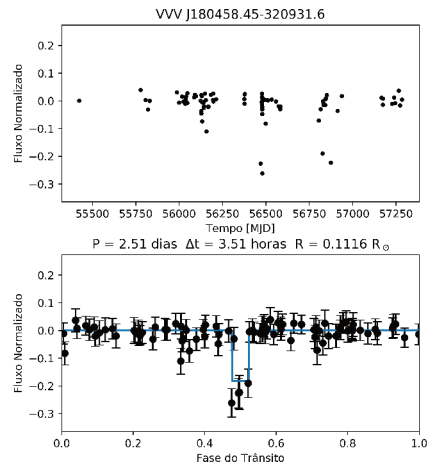


Figura 30 – VVV J180529.07-314552.18b. A figura é similar à Figura 18.

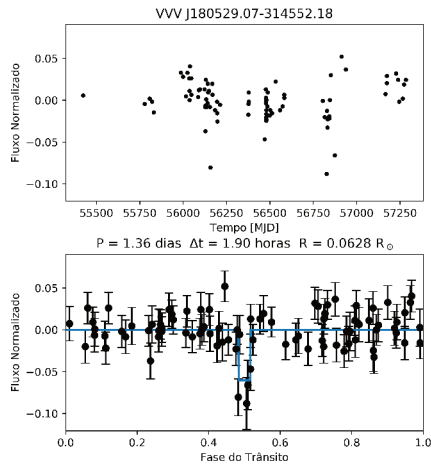


Figura 31 – VVV J180411.39-313400.69b. A figura é similar à Figura 18.

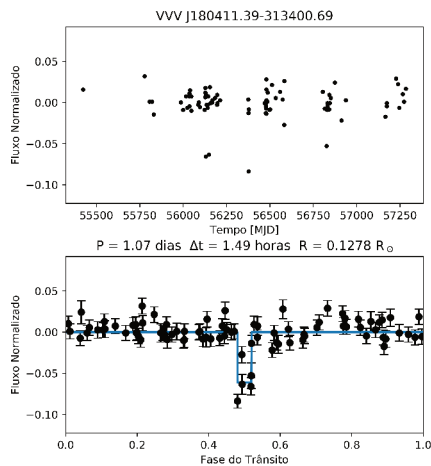


Figura 32 – VVV J180536.21-312317.91b. A figura é similar à Figura 18.

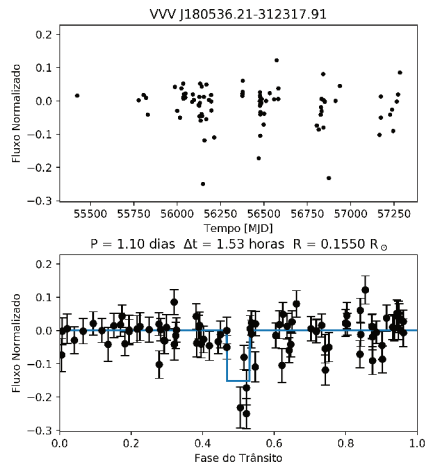


Figura 33 – VVV J180521.94-311340.71b. A figura é similar à Figura 18.

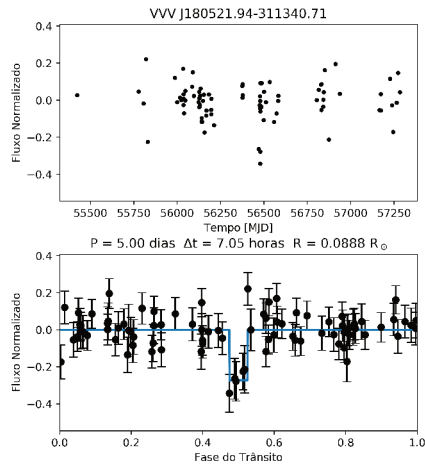


Figura 34 – VVV J180504.04-310526.37b. A figura é similar à Figura 18.

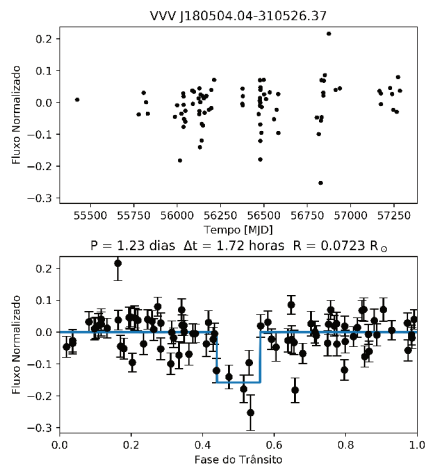


Figura 35 – VVV J180524.22-310741.76b. A figura é similar à Figura 18.

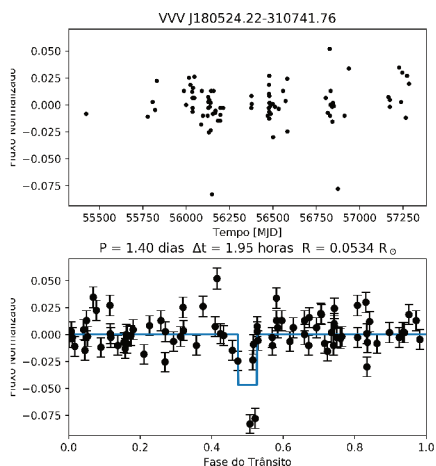


Figura 36 – VVV J180636.62-325052.75b. A figura é similar à Figura 18.

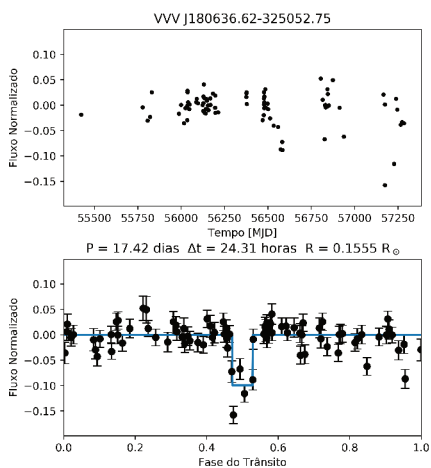


Figura 37 – VVV J180704.88-324042.38b. A figura é similar à Figura 18.

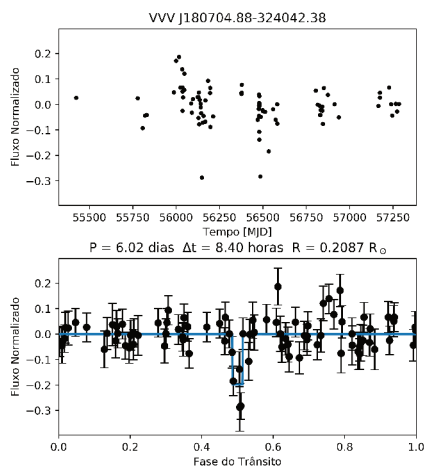


Figura 38 – VVV J180654.97-323623.05b. A figura é similar à Figura 18.

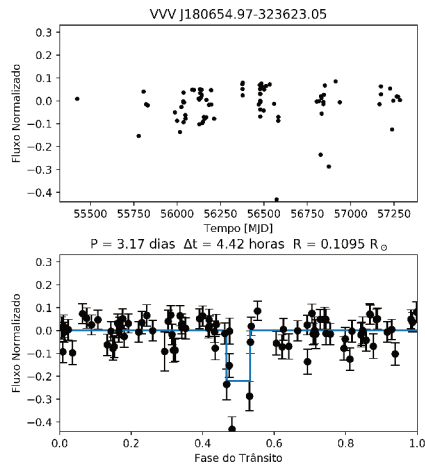


Figura 39 – VVV J180552.46-321559.57b. A figura é similar à Figura 18.

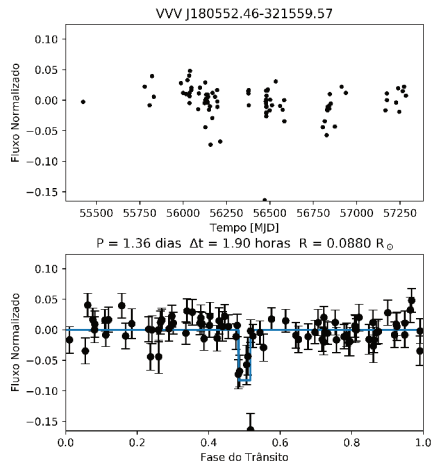


Figura 40 – VVV J180734.60-320754.56b. A figura é similar à Figura 18.

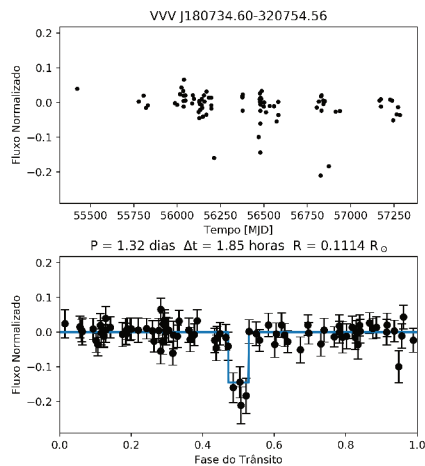


Figura 41 – VVV J180803.85-314028.34b. A figura é similar à Figura 18.

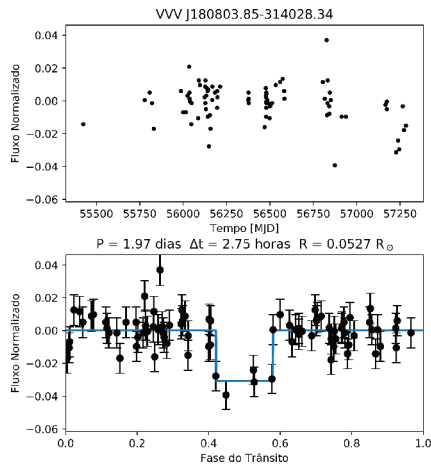


Figura 42 – VVV J180620.62-312627.29b. A figura é similar à Figura 18.

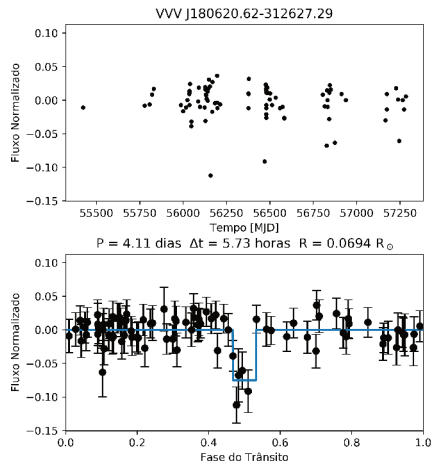
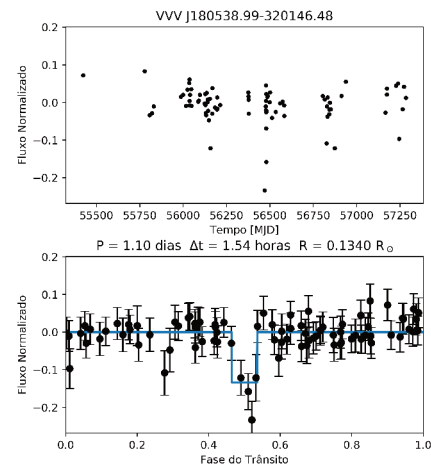


Figura 43 – VVV J180538.99-320146.48b. A figura é similar à Figura 18.



APÊNDICE B – ESPECTROGRAMAS DOS CANDIDATOS A TRÂNSITO PLANETÁRIO DO *TILE* B263

Figura 44 – Espectrograma de VVV J180450.90-322406.66b

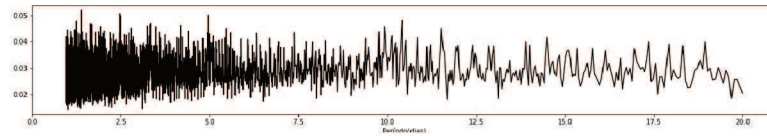


Figura 45 – Espectrograma de VVV J180331.02-320147.70b

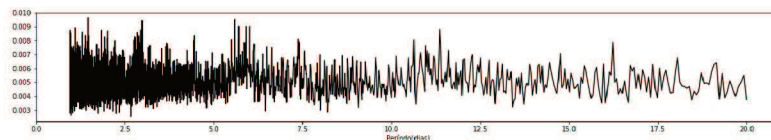


Figura 46 – Espectrograma de VVV J180458.45-320931.60b

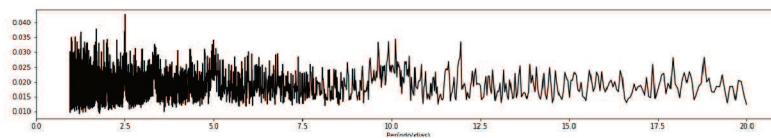


Figura 47 – Espectrograma de VVV J180529.07-314552.18b

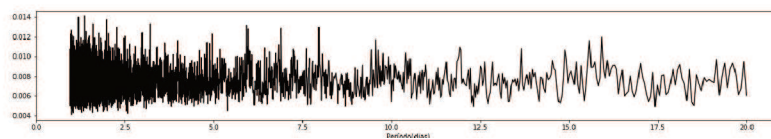


Figura 48 – Espectrograma de VVV J180411.39-313400.69b

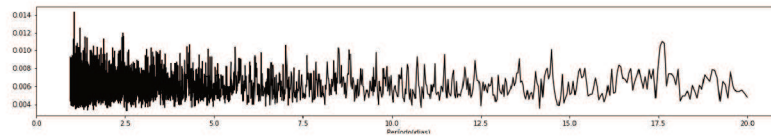


Figura 49 – Espectrograma de VVV J180536.21-312317.91b

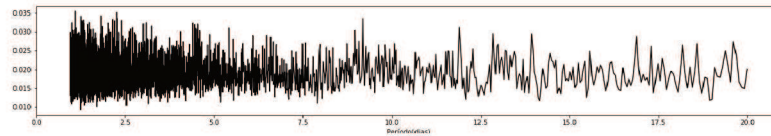


Figura 50 – Espectrograma de VVV J180521.94-311340.71b

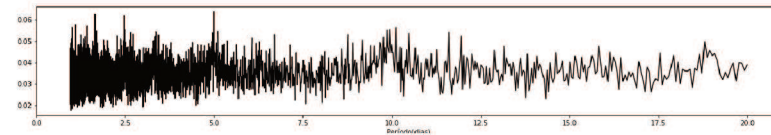


Figura 51 – Espectrograma de VVV J180504.04-310526.37b

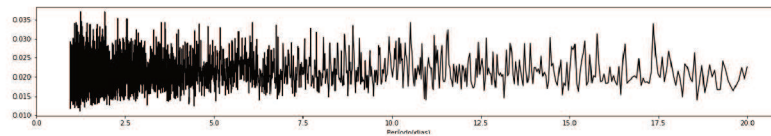


Figura 52 – Espectrograma de VVV J180524.22-310741.76b

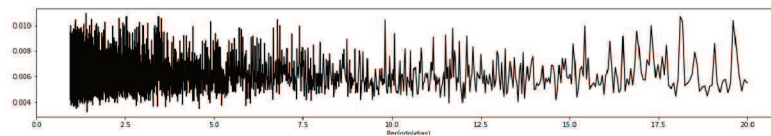


Figura 53 – Espectrograma de VVV J180636.62-325052.75b

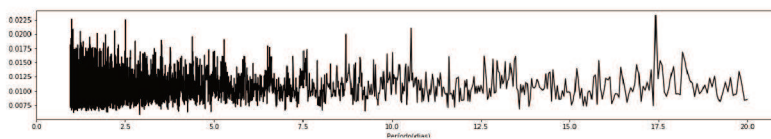


Figura 54 – Espectrograma de VVV J180704.88-324042.38b

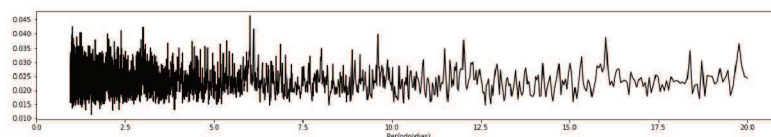


Figura 55 – Espectrograma de VVV J180654.97-323623.05b

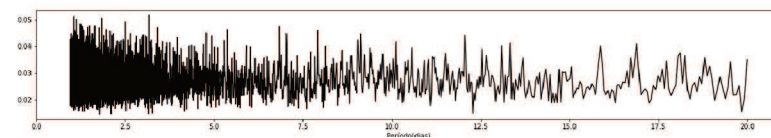


Figura 56 – Espectrograma de VVV J180552.46-321559.57b

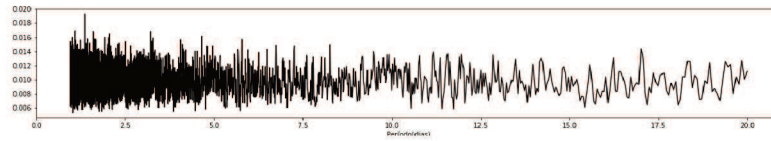


Figura 57 – Espectrograma de VVV J180734.60-320754.56b

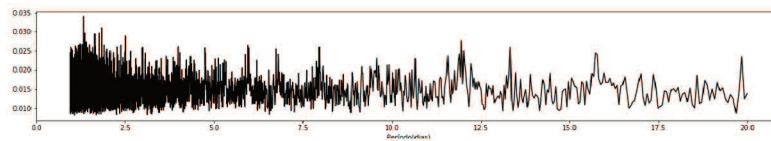


Figura 58 – Espectrograma de VVV J180803.85-314028.34b

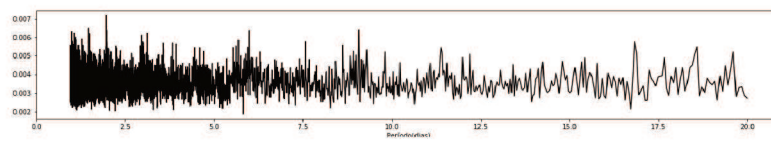


Figura 59 – Espectrograma de VVV J180620.62-312627.29b

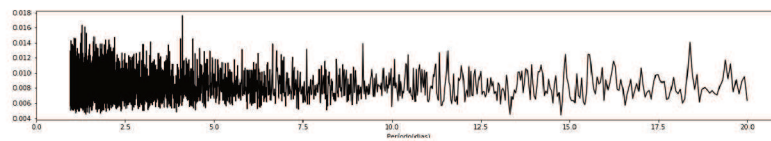
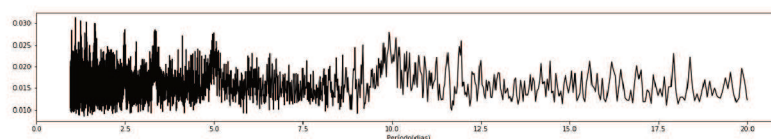


Figura 60 – Espectrograma de VVV J180538.99-320146.48b



APÊNDICE C – CURVAS DE LUZ E MODELO DE TRÂNSITOS DOS CANDIDATOS A TRÂNSITO PLANETÁRIO DO *TILE* B264

Figura 61 – VVV J180644.36-303007.03b. A figura é similar à Figura 18.

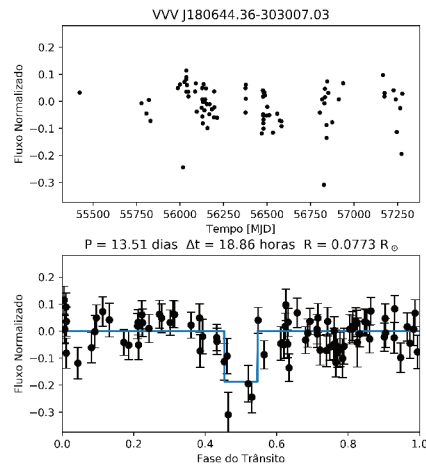


Figura 62 – VVV J180720.71-301849.84b. A figura é similar à Figura 18.

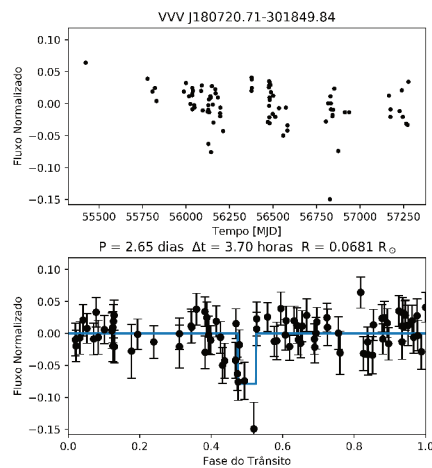


Figura 63 – VVV J180722.36-301745.13b. A figura é similar à Figura 18.

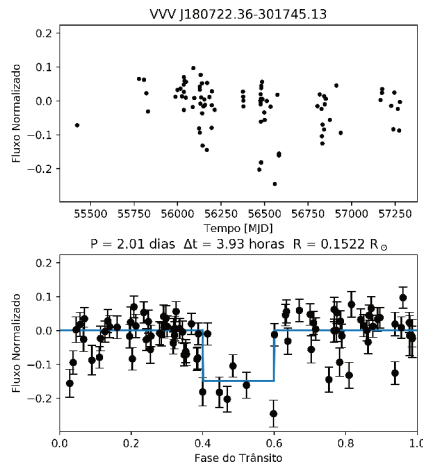


Figura 64 – VVV J180803.54-301006.96b. A figura é similar à Figura 18.

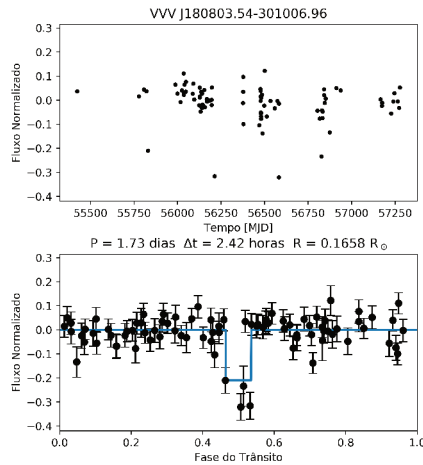


Figura 65 – VVV J180840.88-300912.05b. A figura é similar à Figura 18.

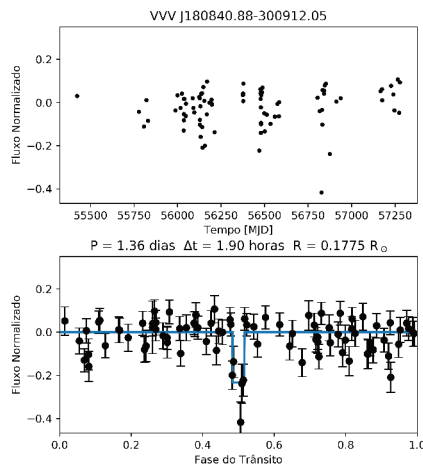


Figura 66 – VVV J180848.35-295752.06b. A figura é similar à Figura 18.

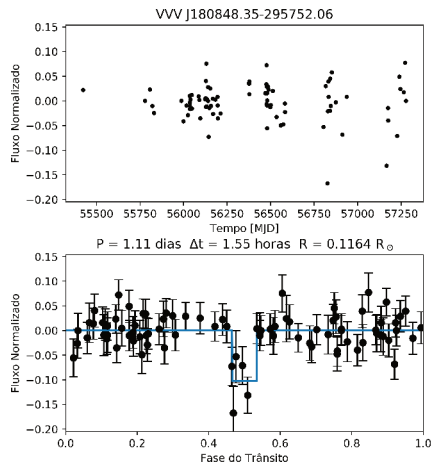


Figura 67 – VVV J181012.57-313453.23b. A figura é similar à Figura 18.

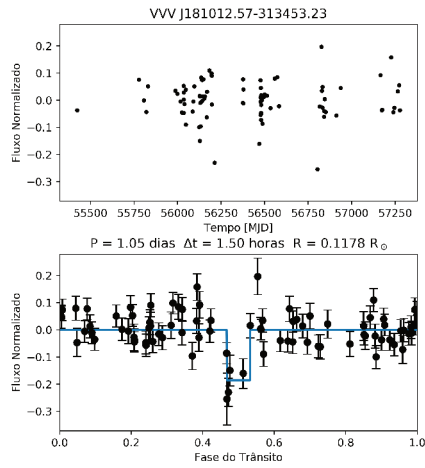


Figura 68 – VVV J180946.12-311329.30b. A figura é similar à Figura 18.

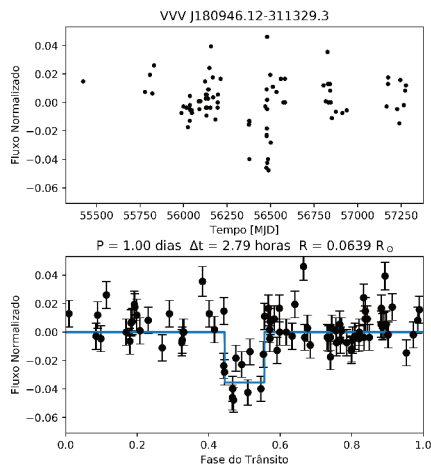


Figura 69 – VVV J181200.69-305013.31b. A figura é similar à Figura 18.

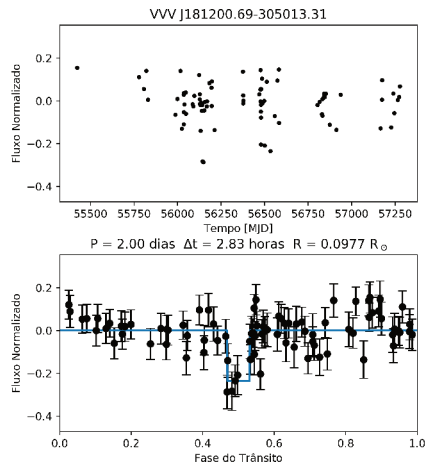


Figura 70 – VVV J180604.54-304643.98b. A figura é similar à Figura 18.

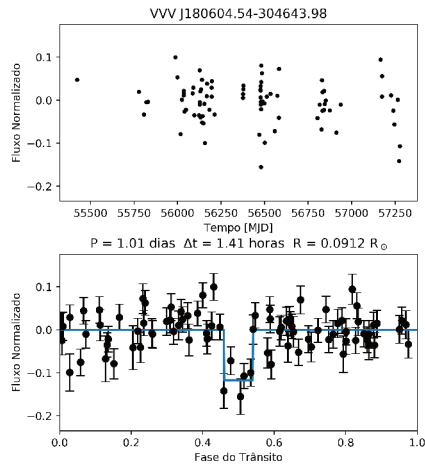
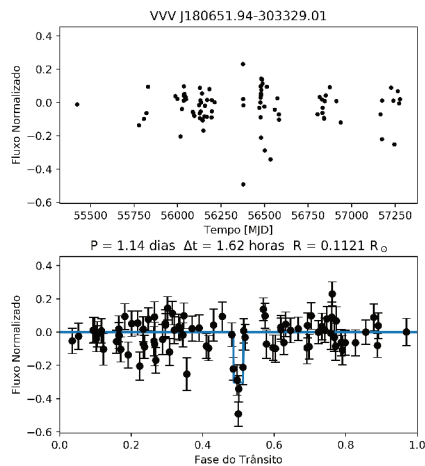


Figura 71 – VVV J180651.94-303329.01b. A figura é similar à Figura 18.



APÊNDICE D – ESPECTROGRAMAS DOS CANDIDATOS A TRÂNSITO PLANETÁRIO DO *TILE* B264

Figura 72 – Espectrograma de VVV J180644.36-303007.03b

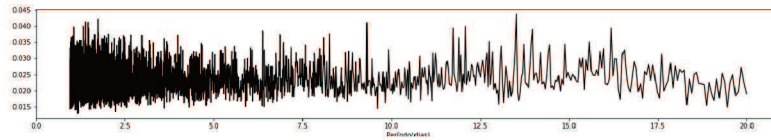


Figura 73 – Espectrograma de VVV J180720.71-301849.84b

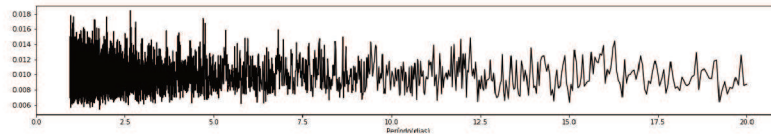


Figura 74 – Espectrograma de VVV J180722.36-301745.13b

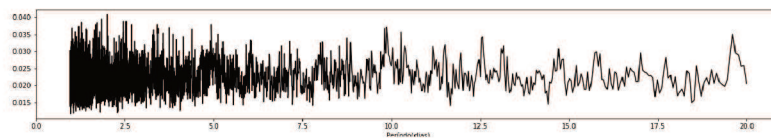


Figura 75 – Espectrograma de VVV J180803.54-301006.96b

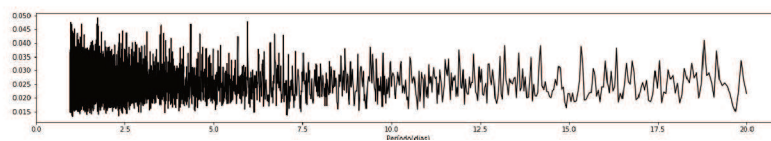


Figura 76 – Espectrograma de VVV J180840.88-300912.05b

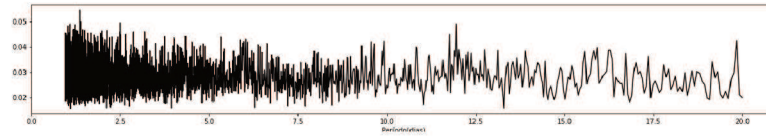


Figura 77 – Espectrograma de VVV J180848.35-295752.06b

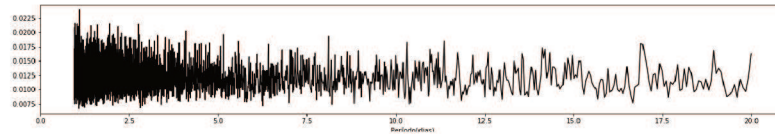


Figura 78 – Espectrograma de VVV J181012.57-313453.23b

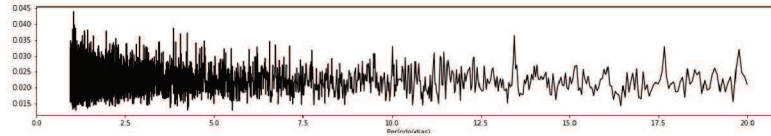


Figura 79 – Espectrograma de VVV J180946.12-311329.30b

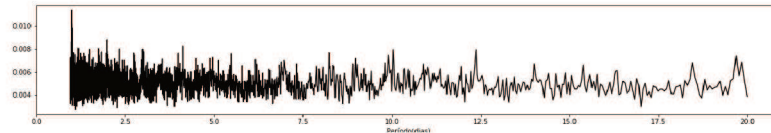


Figura 80 – Espectrograma de VVV J181200.69-305013.31b

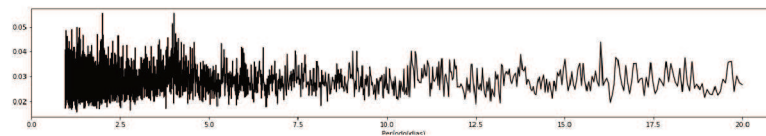


Figura 81 – Espectrograma de VVV J180604.54-304643.98b

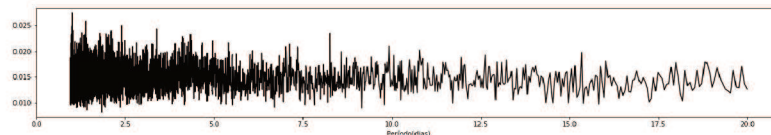


Figura 82 – Espectrograma de VVV J180651.94-303329.01b

