

OBSERVATÓRIO NACIONAL

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ASTRONOMIA



TESE DE DOUTORADO

---

**Procura de exoplanetas em curvas de  
luz cromáticas do satélite CoRoT**

---

*Autor:*

Rodrigo Carlos Boufleur

*Orientador:*

Dr. Marcelo Emilio

*Coorientador:*

Dr. Jorge Ramiro de La Reza

2017

Rodrigo Carlos Bouffeur

**Procura de exoplanetas em curvas de luz cromáticas do satélite CoRoT**

Tese apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Doutor, ao Programa de Pós-Graduação em Astronomia, do Observatório Nacional.

Orientador: Dr. Marcelo Emilio

Coorientador: Dr. Jorge Ramiro de La Reza

Rio de Janeiro


2017

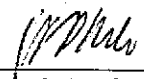
"PROCURA DE EXOPLANETAS EM CURVAS DE LUZ CROMÁTICAS DO  
SATÉLITE CoRoT".

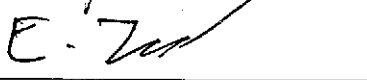
RODRIGO CARLOS BOUFLEUR

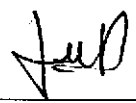
TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-  
GRADUAÇÃO EM ASTRONOMIA DO OBSERVATÓRIO NACIONAL COMO  
PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE  
DOUTOR EM ASTRONOMIA.

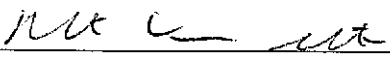
Aprovada por:

  
\_\_\_\_\_  
Dr. Marcelo Emilio – UEPG (Orientador)

  
\_\_\_\_\_  
Dr. Gustavo Porto de Melo – OV/UFRJ

  
\_\_\_\_\_  
Dr. Eduardo Janot Pacheco – USP/IAG

  
\_\_\_\_\_  
Dr. Fernando Virgilio Roig – ON/MCTIC

  
\_\_\_\_\_  
Dr. Roberto Vieira Martins – ON/MCTIC

RIO DE JANEIRO – BRASIL

28 DE AGOSTO DE 2017

## DEDICATÓRIA

Para minha mãe.



## AGRADECIMENTOS

Reunir este trabalho foi, sem a menor dúvida marginal, uma intensa obra coletiva, que passou por várias estações e me deixa, com o apoio de muitas pessoas, mais preparado para seguir adiante na vida acadêmica e profissional.

Gostaria de iniciar demonstrando minha gratidão pelo professor Ramiro de La Reza. A você agradeço de modo particular por ter aberto as portas do Observatório Nacional, ao me aceitar como seu coorientado. E assim seguimos desde o mestrado até agora. Obrigado pelo apoio e pela disposição sempre presentes, e por toda a inspiração em ciência que carrega consigo e que desperta na gente.

Gostaria de agradecer aos professores e aos funcionários do Observatório Nacional e do Observatório do Valongo. A pós-graduação foi muito além de uma formação intelectual. O conhecimento, a organização, a estrutura, os seminários e escolas, são experiências que nem todo pós-graduando em nosso país tem com essa frequência. Isso tudo certamente teve um impacto muito positivo durante todo o percurso da Pós-Graduação.

Seguindo adiante, quero celebrar a família que fiz nessas praias. Os grandes e queridos amigos/hermanos Vladimir e Diego. Gracias por todo. Pelo riso, pelas caras feias, pela parceria e pelo apoio. Chegamos juntos e, de certa maneira, juntos voltamos a seguir. Fizemos história bonita, que marcou, que espero continue. E os grandes amigos que se seguiram no Rio. Karina, Natália e Marcondes. Vocês me proporcionaram momentos felizes demais da conta e deixaram a vida mais suave.

Agradeço aos meus colegas, que fizeram toda a diferença com o passar dos anos. De maneira mais próximas aos meus contemporâneos. Gustavos Rossi, Pinheiro e Bragança. Anderson Ribeiro, Mário, D. Emilia, Diogo, Sandro, Márcio, Gabriela, Ximena, Cintia, Rodrigo, Walter, Carlos, Flora, Vanderlei e tanta gente mais. Ali, muito se cultivou, sejam ideias, sejam amizades, do café e à Feira. Amizades importantes que ainda me acompanham. Desejo também lembrar daqueles amigos distantes, que a gente vê vez ou outra, mas que sempre estão na torcida e vibrando com cada uma de nossas conquistas.

Um dos momentos mais interessantes, e por vezes inspiradores durante a pós-

graduação, foi a convivência e o aprendizado durante o estágio doutoral sanduíche. Chegou em um momento em que novas ideias precisavam se pensadas. Agradeço o apreço e a dedicação em colaborar sempre que necessário. A vocês além de todo o conhecimento um pouco da cultura ficou: Dr. Heike Rauer, Dr. Juan Cabrera, Dr. Szilard Csizmadia, Dr. John-Lee, Dr. Ruth Titz-Weider e Dr. Anders Erikson.

Ao amigos e colegas do Observatório da UEPG agradeço toda a paz no último estágio do doutorado. De maneira especial ao Laerte Andrade, à Jessica Mayara Eidam e ao Alan Pereira, pelo trabalho em equipe. E a todos os demais pela convivência ímpar.

Preciso agradecer de maneira muito sincera e respeitosa todo o apoio que recebi desde o início da minha formação acadêmica. Eu diria, Prof. Marcelo, que são raras as pessoas que conhecem o quanto de fato você se dedica e investe tempo nos seus estudantes e orientados. Eu refaço a trajetória desde a minha primeira função acadêmica (formatação html) até os dias de hoje e me surpreendo. Agradeço pela paciência, pelo crédito e pela confiança, pois, não sabíamos ao certo aonde acabaríamos com esse projeto de buscar exoplanetas. Começamos do zero, rasos de conhecimento específico e aprendendo através de reveses. Mas seguimos, com o nosso passo, e hoje entregamos um planeta e o domínio de algumas várias técnicas sofisticadas envolvidas na análise desse tipo de sinal. Posso dizer que aprendi e que tenho confiança para seguir adiante. O aprendizado foi grande, foi extenso. E espero que possamos partilhar essa estrada nos anos que seguem.

Finalmente, gostaria de agradecer à D. Terezinha, em todo o seu bom humor e pró-atividade. O seu apoio, desde o início, sempre fez muita diferença. Sempre houve uma palavra de ânimo e também um gesto animador. Obrigado a todos que de alguma forma contribuíram para que esse trabalho pudesse se concretizar.

## RESUMO

Um dos tópicos mais promissores da astronomia moderna é a descoberta e caracterização de planetas extrassolares. Missões espaciais dedicadas à procura de exoplanetas produziram uma quantidade de dados formidável e, em especial, a missão Kepler contribuiu para que milhares de novos exoplanetas fossem detectados. Nessa tese fizemos um estudo do processo de detecção e confirmação de exoplanetas. Desenvolvemos uma modificação em um algoritmo de correção de mudanças súbitas em curvas de luz cromáticas do satélite CoRoT (Convection, Rotation and planetary Transits). Por meio de estatísticas robustas e um melhor manejo da variabilidade de curto prazo, mostramos que nossa implementação diminuiu as variações sistemáticas de curvas de luz e melhora a probabilidade de detecção de exoplanetas quando comparado ao algoritmo original. Todas as curvas de luz cromáticas do satélite CoRoT (um total de 65.655) foram analisadas nessa tese com nosso algoritmo. A totalidade dos exoplanetas CoRoT em curvas cromáticas anteriormente publicados foram redescobertos e dezenas de novos candidatos de trânsito foram encontrados. Onze dos nossos candidatos possuíam medições espectroscópicas das estrelas hospedeiras e foram recuperados do ESO Science Archive Facility. Calculamos os parâmetros estelares para três das estrelas hospedeiras candidatas que possuíam um número maior de observações espectroscópicas e dentre eles as medidas de velocidade radial permitiram confirmar um novo exoplaneta. O exoplaneta encontrado nesse trabalho orbita uma estrela com  $0,79^{+0,08}_{-0,09}$  raios solares, com um período de  $6,71837 \pm 0,00001$  dias, massa de  $0,15 \pm 0,1 M_J$  e raio  $0,57^{+0,06}_{-0,05} R_J$ . A análise dos parâmetros encontrados nos dois outros candidatos que temos medidas espectroscópicas das estrelas hospedeiras sugerem a existência de possíveis companheiros planetários.

Palavras-chave: Exoplanetas. Satélite CoRoT. Análise de dados.

## ABSTRACT

One of the most promising topics in modern astronomy is the discovery and characterization of extrasolar planets. Space missions dedicated to search exoplanets produced a formidable amount of data. In particular the Kepler mission contributed for thousands of new exoplanets detection. In this thesis we performed a study of the detection and confirmation process of exoplanets. We have developed a modification in an algorithm of correction of sudden changes in CoRoT (Convection, Rotation and planetary Transits) satellite chromatic light curves. In our implementation we adopted a robust statistics and a better management and we show it reduces the systematic variations of light curves and improves the probability of detection of exoplanets when compared to the original algorithm. All the chromatic light curves of the CoRoT satellite (a total of 65,655) were analyzed with our algorithm in this thesis . We rediscovered all CoRoT exoplanets that were published and found in chromatic light-curves. In addition, dozens of new candidates were found in this work. Spectroscopic measurements for eleven of our candidates host stars were available at the ESO Science Archive Facility. We calculated stellar parameters for three candidate host stars that presented a greater number of spectroscopic observations. Among them the radial velocity measurements allowed to confirm a new exoplanet. The exoplanet found in this work orbits a star with  $0.79_{-0.08}^{+0.09}$  solar radii, with a period of  $6.71837 \pm 0.00001$  days,  $0.15 \pm 0.1 M_J$  and  $0.57_{-0.05}^{+0.06} R_J$ . The analysis of the parameters found in the two other candidates that we have spectroscopic measurements of the host stars suggest the existence of possible planetary companions.

Keywords: Exoplanets. CoRoT Satellite. Data Analysis.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

|   |    |
|---|----|
| Figura 1 - Domínio de detecção de exoplanetas para diferentes métodos. . . . .  | 18 |
| Figura 2 - Esquema de trânsito planetário em uma curva de luz. . . . .  | 24 |
| Figura 3 - Apontamentos da missão CoRoT. . . . .  | 31 |
| Figura 4 - Máscara de observação no campo de exoplanetas. . . . .   | 35 |
| Figura 5 - Campos observados pela missão CoRoT. . . . .   | 36 |
| Figura 6 - Comparação entre o fluxo original e o fluxo retificado. . . . .  | 42 |
| Figura 7 - Mediana dos desvios absolutos da mediana - CDA . . . . .   | 43 |
| Figura 8 - Mediana dos desvios absolutos da mediana - MCDA . . . . .  | 44 |
| Figura 9 - Periodogramas obtidos com o algoritmo BLS. . . . .   | 51 |
| Figura 10 - Fluxograma da rotina de pré-análise de periodogramas. . . . .   | 53 |
| Figura 11 - Estrelas presentes nos campos observados observados. . . . .  | 61 |
| Figura 12 - Análise do Espectro Singular do alvo CoRoT ID 652345526. . . . .  | 63 |
| Figura 13 - Reconstrução do espectro singular para o alvo CoRoT ID 652345526. . . . .                                 | 63 |
| Figura 14 - Síntese espectral para a estrela CoRoT-32a. . . . .   | 67 |
| Figura 15 - Trajetórias evolutivas para as estrelas de massa solar selecionadas usando os modelos de Genebra. . . . . | 68 |
| Figura 16 - Curvas de luz do alvo CoRoT-32a. . . . .  | 72 |
| Figura 17 - Fase orbital do exoplaneta CoRoT-32b. . . . .   | 73 |
| Figura 18 - Análise das medidas de velocidade radial com o espectro CLEANEST. . . . .                                 | 74 |
| Figura 19 - Espalhamento do bissetor para as medidas de CoRoT-32a. . . . .  | 75 |
| Figura 20 - Resíduo ponderado para o caso de modulação rotacional com a presença de um planeta. . . . .               | 76 |
| Figura 21 - Curva de velocidade radial para o CoRoT-32b. . . . .  | 76 |
| Figura 22 - Análise das medidas de velocidade radial com o espectro CLEANEST. . . . .                                 | 79 |
| Figura 23 - A curva de luz dobrada em fase para o CoRoT ID 104848249. . . . .   | 80 |
| Figura 24 - A curva de luz dobrada em fase para o CoRoT ID 652345526. . . . .   | 81 |
| Figura 25 - MCDA – <i>Run</i> IRa01. . . . .  | 95 |
| Figura 26 - MCDA – <i>Run</i> LRa02. . . . .  | 95 |
| Figura 27 - MCDA – <i>Run</i> LRa03. . . . .  | 96 |
| Figura 28 - MCDA – <i>Run</i> LRa04. . . . .  | 96 |
| Figura 29 - MCDA – <i>Run</i> LRa05. . . . .  | 97 |
| Figura 30 - MCDA – <i>Run</i> LRa06. . . . .  | 97 |
| Figura 31 - MCDA – <i>Run</i> LRe01. . . . .  | 98 |
| Figura 32 - MCDA – <i>Run</i> LRe02. . . . .  | 98 |
| Figura 33 - MCDA – <i>Run</i> LRe03. . . . .  | 99 |
| Figura 34 - MCDA – <i>Run</i> LRe04. . . . .  | 99 |

|  |     |
|--|-----|
| Figura 35 - MCDA - <i>Run</i> LRc05. . . . . | 100 |
| Figura 36 - MCDA - <i>Run</i> LRa06. . . . . | 100 |
| Figura 37 - MCDA - <i>Run</i> LRa07. . . . . | 101 |
| Figura 38 - MCDA - <i>Run</i> LRa08. . . . . | 101 |
| Figura 39 - MCDA - <i>Run</i> LRc09. . . . . | 102 |
| Figura 40 - MCDA - <i>Run</i> SRa01. . . . . | 102 |
| Figura 41 - MCDA - <i>Run</i> SRc01. . . . . | 103 |
| Figura 42 - MCDA - <i>Run</i> LRc02. . . . . | 103 |
| Figura 43 - MCDA - <i>Run</i> SRc03. . . . . | 104 |
| Figura 44 - MCDA - <i>Run</i> SRa01. . . . . | 104 |

## LISTA DE TABELAS

|   |    |
|---|----|
| Tabela 1 - Parâmetros de trânsito para os planetas do Sistema Solar. . . . .                                      | 22 |
| Tabela 2 - Planetas confirmados da missão CoRoT. . . . .  | 37 |
| Tabela 3 - Candidatos de maior interesse – parte 1 . . . . .  | 57 |
| Tabela 4 - Candidatos de maior interesse – parte 2 . . . . .  | 58 |
| Tabela 5 - Medidas espectroscópicas do HARPS obtidas a partir do <i>ESO Archive</i> . . . . .                     | 65 |
| Tabela 6 - Parâmetros estelares obtidos a partir do algoritmo Exofast. . . . .                                    | 69 |
| Tabela 7 - Parâmetros planetários para os sistemas CoRoT-32b, CoRoT ID 104848249<br>e CoRoT ID 652345526. . . . . | 78 |
| Tabela 8 - Detalhamento quantitativo dos <i>runs</i> do CoRoT . . . . .   | 93 |

## SUMÁRIO

|       |  |    |
|-------|--|----|
| 1     | INTRODUÇÃO . . . . .   | 14 |
| 2     | MÉTODOS DE DETECÇÃO . . . . .  | 17 |
| 2.1   | O método de imageamento direto . . . . .   | 18 |
| 2.2   | O método de microlente gravitacional . . . . .                                       | 19 |
| 2.3   | O método de trânsito . . . . .   | 20 |
| 2.4   | O método de velocidade radial . . . . .  | 26 |
| 3     | A MISSÃO COROT . . . . .   | 29 |
| 3.1   | Visão geral . . . . .  | 29 |
| 3.2   | Observações do CoRoT . . . . .   | 32 |
| 3.3   | Ruído e processamento de dados . . . . .   | 33 |
| 3.4   | Curvas de luz obtidas com o CoRoT . . . . .  | 34 |
| 4     | A MODIFIED COROT DETREND ALGORITHM (MCDA) . . . . .                                  | 38 |
| 4.1   | O Algoritmo . . . . .  | 40 |
| 4.2   | Performance e validação . . . . .  | 42 |
| 5     | DETECÇÃO DE TRÂNSITOS . . . . .  | 46 |
| 5.1   | <i>Detrending</i> das curvas de luz . . . . .  | 47 |
| 5.2   | O algoritmo de busca de trânsitos . . . . .  | 48 |
| 5.2.1 | <i>Busca e detecção de trânsitos</i> . . . . .                                       | 50 |
| 5.3   | Elaboração de Candidatos . . . . .   | 52 |
| 5.3.1 | <i>Inspeção Visual</i> . . . . .   | 54 |
| 5.3.2 | <i>Determinação de parâmetros físicos e orbitais</i> . . . . .                       | 55 |
| 5.3.3 | <i>Ranqueamento de candidatos</i> . . . . .  | 56 |
| 6     | RESULTADOS . . . . .   | 60 |
| 6.1   | Análise de contaminação dos campos . . . . .   | 60 |
| 6.2   | Modelagem da variabilidade fotométrica . . . . .                                     | 62 |
| 6.2.1 | <i>Análise do Espectro singular</i> . . . . .  | 62 |
| 6.3   | Análise espectroscópica . . . . .  | 65 |
| 6.3.1 | <i>Medidas de velocidade radial</i> . . . . .  | 65 |
| 6.3.2 | <i>Determinação de parâmetros estelares</i> . . . . .                                | 66 |
| 6.4   | Modelagem da curva de luz e determinação dos parâmetros físicos e orbitais . . . . . | 69 |
| 6.5   | O exoplaneta CoRoT-32b . . . . .   | 71 |
| 6.6   | CoRoT ID 104848249 . . . . .   | 77 |
| 6.7   | CoRoT ID 652345526 . . . . .   | 80 |
| 7     | CONCLUSÃO . . . . .  | 82 |
|       | REFERÊNCIAS . . . . .  | 83 |



|   |     |
|---|-----|
| <b>APÊNDICE A</b> – <i>RUNS</i> DA MISSÃO CoRoT . . . . .                     | 93  |
| <b>APÊNDICE B</b> – PERFORMANCE DO MCDA NOS DEMAIS RUNS DO<br>CoRoT . . . . . | 94  |
| <b>APÊNDICE C</b> – LISTA DE CANDIDATOS A SISTEMAS BINÁRIOS. . .              | 105 |
| <b>APÊNDICE D</b> – PUBLICAÇÕES ACEITAS . . . . .                             | 123 |

# 1 INTRODUÇÃO

Um dos tópicos mais promissores da Astronomia Moderna é a descoberta e caracterização de planetas extrassolares. Missões como MOST (Microvariability and Oscillations of Stars Telescope) (Walker et al., 2003) e especialmente os satélites dedicados para a procura de exoplanetas CoRoT (Convection, Rotation and planetary Transits) (Baglin et al., 2006) e Kepler (Borucki et al., 2003) produziram uma quantidade de dados formidável e juntos contribuíram para que milhares de novos exoplanetas fossem detectados.

Historicamente, a menção de métodos para a detecção de planetas extrassolares já vem sendo citada desde a década de 1940 (Reuyl; Holmberg, 1947). Nos anos 1950 (Struve, 1952) propôs a técnica de observação via efeito doppler: observar a perturbação gravitacional induzida em uma estrela pela presença de um companheiro orbital. As primeiras reivindicações de descobertas de exoplanetas datam dos anos 1970 (Demianski; Proszynski, 1979), que reportaram a descoberta de um planeta de longo período em torno do pulsar PSR B0329+54, um caso bastante controverso. Wolszczan e Frail (1992) encontraram dois planetas orbitando o pulsar PSR 1257+12, em torno de um ambiente bastante hostil e banhado em radiação. Controvérsias acerca de sua formação ou não a partir dos remanescentes de uma Supernova (Fridlund et al., 2010) circulam no meio acadêmico. O assim considerado marco inicial, a descoberta de um exoplaneta em torno de um estrela de sequência principal, veio pouco tempo depois com Mayor e Queloz (1995). Desde então, o interesse e a importância do estudo desse campo em Astronomia cresceu significativamente e levou à descoberta de mais de 3600 exoplanetas (e contando...) devidamente catalogados (Schneider, 2017).

Na atualidade, a ciência de exoplanetas vem se surpreendendo quase diariamente com novas descobertas. Até bem pouco tempo o número de planetas conhecidos era pequeno e a nossa maneira de pensar sobre sistemas planetários também era muito diferente. Este ainda é um dos tópicos mais promissores da Astronomia Moderna, mas precisou de tempo para que antigas ideias pudessem vir a ser testadas e confirmadas. E hoje, com

milhares de planetas conhecidos e confirmados, nossa perspectiva mudou. Aprendemos que exoplanetas coexistem em um amplo intervalo de massas e de raios, o que por sua vez resulta em variedade de composições e densidades, trazendo delimitadores importantes para que possamos entender melhor os processos de formação planetária. Com os números atuais, estatisticamente relevantes, é possível estabelecer relações mais precisas sobre os processos dinâmicos, composições atmosféricas, inclusive clima e condições de habitabilidade.

A partir das listas de candidatos do *Kepler*, os trabalhos de [Borucki et al. \(2011\)](#) e [Morton e Johnson \(2011\)](#) trazem um estudo estatístico robusto sobre a taxa de ocorrência de planetas extrassolares. As populações de estrelas que sabemos possuir planetas em órbita são majoritariamente dos tipos FGK, seja por limitações técnicas, seja por viés observacional. Portanto, levando em consideração esse viés amostral, sabemos que uma em cada duas estrelas anãs pode hospedar um planeta ([Mayor et al., 2011](#); [Fressin et al., 2013](#)) e que as configurações multi-planetárias que vimos surgir nos últimos anos são bastante diversas quando comparadas ao nosso Sistema Solar. *Hot Jupiters*, mini-Netunos, super-Terras. Vimos que a ocorrência de planetas é bastante comum e, se por um lado encontrar sistemas similares ao nosso sistema solar ainda desafia nossa tecnologia e recursos, por outro lado abrem caminho para avançar nessa disciplina que ainda é bastante nova.

Nesta tese nos preocupamos em entender todo o processo de detecção de exoplanetas, desde a obtenção de dados, até a confirmação *de facto* de um exoplaneta. E para isso fizemos uso de inúmeras técnicas estatísticas, desenvolvemos métodos e técnicas de análise, e finalizamos oferecendo uma perspectiva bastante completa de como é o processo de detecção de planetas extrassolares utilizando medidas fotométricas e espectroscópicas.

O trabalho consistiu na análise de mais de 65 mil curvas de luz, todas obtidas pela missão CoRoT, um programa de pequenos satélites da agência espacial francesa CNES (Centre National d'Etudes Spatiales), num consórcio entre França, Áustria, Bélgica, Brasil, ESA (European Space Agency), Alemanha e Espanha. Para complementar nossa informação fotométrica e entender a natureza de alguns objetos estudados, também obtivemos medidas do espectrógrafo HARPS (High Accuracy Radial velocity Planet Searcher).

No segundo capítulo discutimos os principais métodos de detecção de exoplanetas utilizados na atualidade e damos um foco especial ao método de Trânsito e ao método de Velocidade Radial, as duas técnicas empregadas neste trabalho pra detectar e caracterizar exoplanetas.

O terceiro capítulo é dedicado à missão CoRoT. Nesta parte do trabalho descrevemos alguns aspectos técnicos da missão, discutimos as características e as propriedades dos dados obtidos pelo satélite, de modo a elucidar quais são os principais obstáculos encontrados ao se estudar curvas de luz para a detecção de trânsitos.

O MCDA (Modified CoRoT Detrend Algorithm) é detalhado no quarto capítulo. Nele descrevemos como funciona esta técnica que implementamos para fazer a retificação das curvas de luz. Discutimos também sua performance com os dados e sua validação enquanto algoritmo de *detrend*.

O quinto capítulo é dedicado à detecção de trânsitos em curvas de luz, a descrição dos algoritmos empregados e o processo da elaboração da lista de pré-candidatos a exoplanetas e a candidatos a estrelas binárias.

O sexto e último capítulo é dedicado a nossas principais descobertas. Nele discutimos o processo de modelagem precisa empregada nas curvas de luz para a determinação de parâmetros físicos e orbitais de exoplanetas e fazemos o estudo de medidas de velocidade radial para confirmar a natureza de nossos candidatos.

Finalmente, fazemos uma breve síntese deste trabalho comentando os principais pontos e realizações.

## 2 MÉTODOS DE DETECÇÃO

De modo diferente aos planetas do Sistema Solar, onde a observação de suas propriedades físicas e orbitais pode, em geral, ser feita de modo direto, a observação de planetas extrassolares esbarra em um fator fundamental: distâncias astronômicas e a decorrente separação angular módica entre planeta e estrela. Embora existam sistemas de exoplanetas detectados de maneira direta, métodos indiretos são, atualmente, a maneira mais eficaz de detecção e caracterização de sistemas planetários e são responsáveis por 98 % dos planetas confirmados (Schneider, 2017).

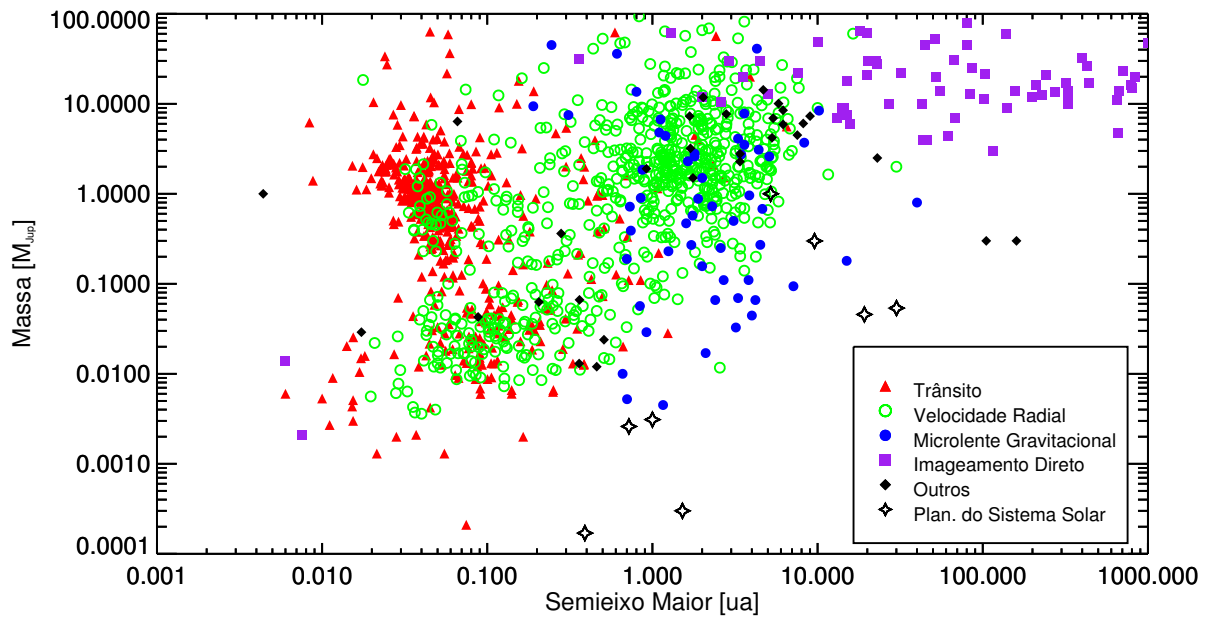
O *método direto* é aquele que busca a evidência física direta do exoplaneta. O mais conhecido e único capaz de produzir novas descobertas na atualidade é o *imageamento direto*. Há, no entanto, a proposição de outras técnicas desta mesma classe, como as detecções de atividades magnetosféricas ou auroreais no comprimento de onda do rádio (Lazio; Farrell, 2006; Nichols, 2011) ou o imageamento direto de trânsitos planetários (van Belle et al., 2014).

Em contraste, *métodos indiretos* observam a variação das propriedades intrínsecas das estrelas de modo reflexo. Por exemplo, sutis alterações em suas coordenadas de posição ou em seu fluxo luminoso como uma função do tempo podem ter suas origens relacionadas à presença de um exoplaneta. Estes são atualmente os métodos mais acessíveis e mais empregados, em especial os métodos de velocidade radial e de trânsito. A figura 1 mostra um panorama atual dos sistemas confirmados para diferentes técnicas de detecção empregadas, em contraste com suas características físicas, indicando as limitações observacionais de cada um dos métodos.

A seguir, serão descritos brevemente as principais técnicas de detecção com um destaque especial para os métodos de Trânsito e de Velocidade Radial utilizados nesta tese.

**Figura 1 - Domínio de detecção de exoplanetas para diferentes métodos.**

Exoplanetas confirmados até a presente data utilizando diferentes métodos. A título de comparação, os planetas do Sistema Solar estão indicados.



Fonte: [Schneider \(2017\)](#).

## 2.1 O método de imageamento direto

O imageamento direto busca detectar os fótons emitidos na região do infravermelho oriundos do planeta ou a luz refletida de sua estrela mãe. Até o momento é pequeno o número de planetas descobertos através deste método, em geral orbitando estrelas de baixa massa e anãs marrons ([Ollivier et al., 2009](#)). Para que seja possível a observação de planetas por imageamento direto, técnicas associadas são necessárias para que se atinja os limites mínimos de observação. A *coronografia*, método desenvolvido originalmente por Bernard Lyot nos anos 1930 para observar a corona solar em épocas fora de eclipses, utiliza uma máscara para obstruir a luz proveniente da estrela, tornando possível visualizar o planeta. Atualmente existe um leque considerável de técnicas coronográficas que estuda o ganho na utilização de diferentes máscaras e no desenho dos coletores ([Perryman, 2011](#)).

O desafio do imageamento direto, portanto, depende da compensação de dois fatores majoritários: contraste luminoso e resolução angular. Um exoplaneta reflete uma quantidade de luz ínfima em comparação com a emissão de sua estrela hospedeira e a

separação angular entre planeta e estrela é, para estrelas na vizinhança do Sistema Solar, da ordem de milissegundos de arco. A estrela mais próxima do Sistema Solar, Próxima Centauri, encontra-se a  $4,246 \pm 0,006$  *anos-luz* de distância (Lurie et al., 2014) e possui um exoplaneta com separação orbital de  $0,049 \pm 0,004$  *ua* (Anglada-Escudé et al., 2016). A observação direta desse exoplaneta, supondo o auxílio de técnicas coronográficas, demandaria um poder de resolução superior a  $38$  *mas*. Há, atualmente, diversos instrumentos instalados em telescópios de grande porte aptos a realizar esse tipo de medida com níveis de precisão de, em média,  $\sim 50$  *mas*, mas que podem chegar  $\sim 1$  *mas* quando combinada com técnicas interferométricas (Absil; Mawet, 2010; Claudi, 2016).

## 2.2 O método de microlente gravitacional

A partir da teoria da relatividade sabemos que a luz, ao interagir gravitacionalmente, é defletida em um determinado ângulo devido à presença de um corpo massivo. O método de microlente gravitacional estuda esta magnificação da luz provocada pelo alinhamento entre uma estrela frontal (lente) espacialmente não resolvida da estrela de fundo (fonte), com respeito à linha de visada do observador. Se a estrela frontal possuir em órbita planetas, pode ser observado um efeito de lente pontual adicional. Uma vez que a posição da fonte e da lente mudam temporalmente com relação ao observador, este fenômeno é registrado por meio de curvas de luz.

A probabilidade de detecção desse tipo de evento é da ordem de  $10^{-8}$  (Perryman, 2011), de modo que missões observacionais que usam essa técnica (Abe et al., 1997; Udalski, 2003) detectaram até o momento 58 planetas (Schneider, 2017). Há, no entanto, algumas vantagens a respeito dessa técnica em comparação com as demais. O limite de detecção se estende até exoplanetas com massas menores que a terrestre e num intervalo de semieixo orbital entre 1 e 6 *ua*, região dentro da zona habitável para estrelas do tipo solar (Gaudi, 2012). Ainda, devido à sua sensibilidade a distâncias da ordem de kiloparsecs, permite estudar melhor a distribuição galáctica da ocorrência de sistemas planetários.

Missões futuras como o WFIRST (*Wide-Field InfraRed Survey Telescope*) (Green et al., 2012) fará o estudo de 300 milhões de estrelas em direção ao bojo da galáxia, onde espera detectar mais de 2.000 exoplanetas com massas entre  $0,1 - 10.000 M_{\oplus}$ .

### 2.3 O método de trânsito

O método de trânsito é atualmente o mais empregado para melhorar a estatística de exoplanetas. O seu princípio de monitorar o fluxo luminoso estelar ao longo do tempo permite que dezenas de milhares de estrelas possam ser estudadas simultaneamente. A técnica usa por princípio a ocultação do disco estelar (brilhante) pelo disco planetário (opaco) durante o trânsito do planeta em frente à estrela. A geometria do problema é bastante intuitiva e permite obter parâmetros planetários e orbitais em termos do raio estelar.

#### *Probabilidade de detecção*

A natureza do trânsito de um exoplaneta é a mesma dos eclipses solares, um fenômeno bastante familiar que provoca um cone de sombra pela interposição de um corpo celeste entre a estrela e o observador. Se projetarmos esse cone de sombra sobre a esfera celeste, a probabilidade geométrica de se observar um trânsito, a partir de uma posição aleatória, é a fração do ângulo sólido na esfera celeste encoberto pela sombra do eclipse. Em princípio, os trânsitos são observáveis somente quando o alinhamento da órbita do planeta é muito próximo à linha de visada do observador. A probabilidade geométrica do trânsito em um intervalo angular infinitesimal  $di$  é definida como:

$$\frac{d\Omega}{4\pi} = \frac{2\pi \sin i \, di}{4\pi} = \frac{d(\cos i)}{2}, \quad (1)$$



onde  $\sin i$  satisfaz a condição  $(R_\star + R_p)/r$ , sendo  $R_\star$  o raio estelar,  $R_p$  o raio planetário e  $r$  a distância instantânea entre o planeta e a estrela.

A partir dessa condição é produzido o cone chamado *penumbra*, que engloba tanto trânsitos ‘totais’ quanto trânsitos parciais. A região interior do cone, a *antumbra*, satisfaz a condição  $(R_\star - R_p)/r$ . Para o caso da órbita kepleriana, a distância instantânea  $r$  é dada por  $a(1 - e^2)/(1 - e \sin \omega)$ , onde  $a$  é o semieixo maior,  $e$  a excentricidade e  $\omega$  o argumento do periastro. Resolvendo a equação (1), a probabilidade geométrica é,

$$p_{\text{geo}} \left( \cos i < \frac{R_\star + R_p}{r} \right) = \frac{1}{2} \int_{-(R_\star + R_p)/r}^{(R_\star + R_p)/r} = \left( \frac{R_\star + R_p}{a} \right) \left( \frac{1 - e \sin \omega}{1 - e^2} \right). \quad (2)$$

Simplificando para o caso de uma órbita circular e  $R_p \ll R_\star$ , a probabilidade geométrica se reduz a  $R_\star/a$ . A tabela 1 lista as probabilidades de se observar os trânsitos dos planetas do Sistema Solar a partir de uma direção arbitrária. No caso da Terra, os trânsitos são visíveis a partir de somente 0,47% da esfera celeste, enquanto que para Mercúrio essa probabilidade é de 1,2%. A probabilidade geométrica reduz de modo inverso com o semieixo maior da órbita, fazendo com que o método seja mais sensível para planetas em órbitas mais interiores.

De forma mais abrangente, descrever a probabilidade do número de planetas a ser detectados em um levantamento observacional precisa levar em conta, além da probabilidade geométrica, as características da estrela e do levantamento (Pepper; Gould; Depoy, 2003). Beatty e Gaudi (2008) desenvolveram um formalismo para estimar o número de detecções considerando fatores como a função de massa estelar local, janela observacional e razão sinal-ruído,

$$\frac{d^6 N_{\text{det}}}{dR_p dp dM_\star dr dl db} = \rho_\star(r, l, b) r^2 \cos b \frac{dn}{dM_\star} \frac{df(R_p, p)}{dR_p dp} \times P_{\text{det}}(M_\star, e, R_p, p), \quad (3)$$

onde  $\rho_\star$  é a densidade estelar local para as coordenadas galácticas  $r$ ,  $l$  e  $b$ .  $dn/dM_\star$  é a função de massa no momento atual e  $df(R_p, p)/dR_p dp$  é a probabilidade de que a estrela possui em órbita um planeta de raio  $R_p$  e período orbital  $p$ .  $P_{\text{det}}$  é a junção da probabilidade de que o trânsito será observável dada a razão sinal-ruído e a janela

observacional,

$$P_{\text{det}}(M_{\star}, e, R_p, p) = P_{\text{S/N}}(M_{\star}, e, R_p, p) \cdot P_{\text{win}}(p), \quad (4)$$

sendo  $P_{\text{win}}(p)$  a probabilidade conjunta da janela observacional com a probabilidade geométrica  $p_{\text{geo}}$  dada na equação (2). Por essa razão, missões observacionais que utilizam essa técnica observam um grande número de alvos de modo a otimizar o número de detecções.

**Tabela 1 - Parâmetros de trânsito para os planetas do Sistema Solar.**

| Planeta  | Raio<br>[ $R_{\oplus}$ ] | Semieixo<br>maior [ $ua$ ] | Período<br>[ $anos$ ] | Variação de<br>fluxo [%] | Duração<br>[ $h$ ] | Probabilidade<br>de det. [%] |
|----------|--------------------------|----------------------------|-----------------------|--------------------------|--------------------|------------------------------|
| Mercúrio | 0,38                     | 0,39                       | 0,241                 | 0,0012                   | 8,1                | 1,2                          |
| Vênus    | 0,95                     | 0,72                       | 0,615                 | 0,0075                   | 11,0               | $6,4 \times 10^{-1}$         |
| Terra    | 1,00                     | 1,00                       | 1,00                  | 0,0084                   | 13,0               | $4,7 \times 10^{-1}$         |
| Marte    | 0,53                     | 1,52                       | 1,88                  | 0,0024                   | 16,0               | $3,1 \times 10^{-1}$         |
| Júpiter  | 11,02                    | 5,21                       | 11,87                 | 1,01                     | 29,6               | $8,9 \times 10^{-2}$         |
| Saturno  | 9,41                     | 9,58                       | 29,63                 | 0,75                     | 40,1               | $4,8 \times 10^{-2}$         |
| Urano    | 4,02                     | 19,28                      | 84,67                 | 0,14                     | 57,0               | $2,4 \times 10^{-2}$         |
| Netuno   | 3,89                     | 30,14                      | 165,5                 | 0,12                     | 71,3               | $1,5 \times 10^{-2}$         |

Fonte: (Titz-Weider, 2006)

### *Parâmetros de trânsito*

A figura 2 esquematiza um trânsito planetário e a subsequente ocultação do planeta. A forma suave da curva durante o trânsito ocorre em função do escurecimento do limbo, dado que o disco estelar é mais brilhante no centro, uma consequência da variação de temperatura e opacidade com respeito à altitude na atmosfera estelar. Embora os trânsitos sejam, por razões práticas, em geral considerados acromáticos, sua forma tem dependência com o comprimento de onda (Knutson et al., 2007). Portanto, a determinação precisa de um trânsito planetário precisa levar em consideração características estelares. Mandel e Agol (2002) discutem em detalhes a modelagem de trânsitos levando

em consideração os coeficientes de escurecimento do limbo estelar.

Para fins de detecção em curvas de luz pode-se aproximar um trânsito planetário a um elemento de geometria trapezoidal. A partir dessa consideração é possível reduzir o evento do trânsito a seus quatro pontos de contato (fig. 2). Sob esta perspectiva, os elementos observáveis mensuráveis são o período planetário  $p$ , a profundidade do trânsito  $\Delta f$  e, utilizando os pontos de contato, a duração total do trânsito  $t_{14}$  e o tempo em que todo o disco do planeta transita em frente à estrela  $t_{23}$ . Seager e Mallén-Ornelas (2003) apresentaram um solução única para derivar os parâmetros físicos da órbita e o raio do planeta. Generalizando a geometria do problema para o caso de excentricidade zero,  $M_\star \gg M_p$ , ausência de contaminação luminosa por outras fontes e desconsiderando o escurecimento do limbo estelar, o raio planetário em termos do raio estelar é dado por,

$$\frac{\Delta f}{f} \simeq \left( \frac{R_p}{R_\star} \right)^2. \quad (5)$$

A passagem do disco planetário em frente ao disco estelar está sujeito à inclinação do observador com respeito ao plano orbital do planeta. A distância projetada da passagem do planeta com relação ao centro da estrela é definida como o *parâmetro de impacto*,

$$b \equiv \frac{a \cos i}{R_\star} = \left\{ \frac{(1 - \sqrt{\Delta f})^2 - [\text{sen}^2(\pi t_{23}/p)/\text{sen}^2(\pi t_{14}/p)] (1 + \sqrt{\Delta f})^2}{1 - [\text{sen}^2(\pi t_{23}/p)/\text{sen}^2(\pi t_{14}/p)]} \right\}, \quad (6)$$

onde  $i$  é a inclinação do plano orbital com respeito ao observador e  $a$  o semieixo maior.

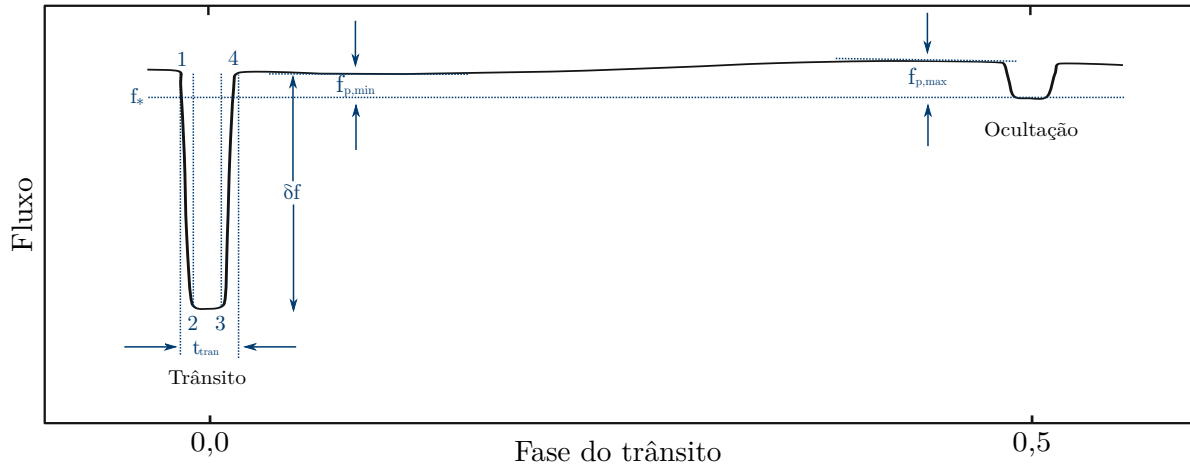
A razão  $a/R_\star$  pode ser obtida diretamente da duração do trânsito (eq. 3 Seager e Mallén-Ornelas (2003)),

$$\frac{a}{R_\star} = \left\{ \frac{(1 + \sqrt{\Delta f})^2 - b^2[1 - \text{sen}^2(t_{14}/p)]}{\text{sen}^2(t_{14}/p)} \right\}^{\frac{1}{2}}. \quad (7)$$

Utilizando a equação anterior e a terceira lei de Kepler, assumindo que  $M_\star \gg M_p$ ,

### Figura 2 - Esquema de trânsito planetário em uma curva de luz.

A ilustração mostra o trânsito de um planeta em uma órbita circular. Para fins didáticos a modulação do fluxo estelar devido à fase do planeta (reflexão pela presença de nuvens e/ou emissão térmica) está ampliada. No diagrama estão indicados o primeiro (1), segundo (2), terceiro (3) e quarto (4) pontos de contato do trânsito. O fluxo basilar da estrela  $f_*$  é visto durante a ocultação.



Fonte: Cameron (2016).

pode-se derivar a densidade estelar a partir da curva de luz, então,

$$\rho_* \equiv \frac{M_*}{R_*^3} = \left( \frac{4\pi^2}{p^2 G} \right) \left( \frac{a}{R_*} \right)^3, \quad (8)$$

e, conhecendo-se a relação massa-raio  $R_* = kM_*^x$ , é possível resolver os cinco parâmetros físicos do sistema:  $R_*$ ,  $M_*$ ,  $i$ ,  $a$  e  $R_p$ .

Embora as equações anteriores descrevam bem o fenômeno de trânsito, uma solução precisa é obtida levando-se em consideração os coeficientes de escurecimento do limbo e a excentricidade da órbita, variando o modelo de trânsito até a obtenção do melhor ajuste com o fluxo estelar observado utilizando técnicas estatísticas de amostragem.

#### *Precisão fotométrica*

A profundidade do trânsito está diretamente relacionada pela razão de raios entre o planeta e a estrela (eq. 5), de modo que a precisão fotométrica depende do tamanho

da estrela observada. Para o caso de uma estrela do tipo solar (*cf.* tabela 1), um planeta do tamanho de Júpiter provoca uma variação em fluxo da ordem de 1% enquanto que um planeta como a Terra introduz uma variação de 0,008%. Estrelas maiores, por sua vez, tornam a detecção muito mais difícil, pois exigem níveis de precisão fotométrica superiores. Já estrelas menores estendem o intervalo de detecção a valores de até 8% (Gillon et al., 2017).

A detecção de trânsitos com missões de base terrestre tem sua precisão fotométrica limitada pela transparência e variações atmosféricas. Em condições de observação ótimas, as detecções estão restringidas à variações da ordem de 0,1% (Gillon et al., 2012; Cameron, 2016). Missões espaciais como CoRoT (Baglin et al., 2006), *Kepler* (Borucki et al., 2010) e, atualmente, *K2* (Howell et al., 2014), além de não ter as limitações atmosféricas, também não estão condicionadas à rotação terrestre, que na prática limita a detectabilidade da duração dos trânsitos, são capazes de precisões fotométricas superiores a 0,01% permitindo a detecção de inúmeros planetas rochosos (Schneider, 2017).

A atividade estelar intrínseca também introduz fatores que reduzem a precisão fotométrica. A presença de manchas na fotosfera introduz modulações na curva de luz. Frequentemente sua amplitude e periodicidade não estão na mesma escala que os trânsitos planetários, permitindo até um certo grau serem filtradas, o que torna o *detrending* das medidas um processo necessário para otimizar a detecção de trânsitos planetários.

### *Falsos positivos*

O fenômeno de trânsito é caracterizado pela ocultação periódica do disco estelar por um companheiro orbital. Há, no entanto, várias classes de objetos que podem simular um trânsito planetário. Na literatura, estudos realizados por Brown (2003) e Evans e Sackett (2010) identificam as classes principais de eventos que possuem características similares à variação de fluxo causada pela passagem de um planeta em frente à sua estrela.

Sistemas de estrelas binárias em órbita inclinada com respeito ao observador podem

provocar trânsitos parciais de dimensão similar a um trânsito planetário, porém, com formato em “V”, o que dificulta a inferência do raio do objeto em trânsito. Sistemas de estrelas binárias com companheiro sub-estelar reproduzem o efeito de um trânsito planetário “tradicional” devido à razão de raios. Já sistemas de estrelas binárias e/ou sistemas hierárquicos triplos de fundo diluídas na PSF (função de espalhamento de ponto) registrada da curva de luz podem produzir pequenas variações em fluxo compatíveis com um trânsito planetário. E, embora menos frequentes, manchas estelares também podem imitar o efeito de um trânsito.

## 2.4 O método de velocidade radial

Um dos fenômenos perceptíveis e mensuráveis associado ao movimento orbital de um planeta em torno de sua estrela hospedeira é a perturbação resultante dessa interação gravitacional. Assim como o planeta, a estrela hospedeira percorre um movimento orbital elíptico em torno do centro de massa do sistema planetário ou multi-planetário. A amplitude dessa perturbação é determinada pelo inverso da razão de massas  $a_*/a_p = M_p/M_*$  (Carroll; Ostlie, 1996), permitindo deduzir a presença de planetas pelo movimento reflexo da estrela.

O método de velocidade radial faz uso do efeito Doppler observado nas linhas de absorção do espectro estelar. Em comparação com um espectro de referência, a observação do deslocamento espacial das linhas espectrais para o vermelho ou para o azul indicam, respectivamente, o movimento radial da estrela se afastando ou se aproximando do observador. A medida dessa velocidade radial pode ser feita comparando-se o deslocamento das linhas espectrais medidas ( $\Delta\lambda$ ) com seus respectivos valores de referência ( $\lambda_0$ ) pela equação

$$v_r = \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} c. \quad (9)$$

A partir da solução do problema de dois corpos (*cf.* Murray e Correia (2010)),

pode-se expressar a velocidade radial como função do tempo,

$$v_r(t) = K [\cos(\omega + \nu(t)) + e \cos(w)] + \gamma, \quad (10)$$

onde  $K$  é a velocidade de semi-amplitude,  $e$  a excentricidade,  $\omega$  o argumento do periastro,  $\nu(t)$  a anomalia verdadeira e  $\gamma$  a velocidade sistêmica ou velocidade radial do baricentro. A anomalia verdadeira define a posição real de um corpo em um instante  $t$  como sendo o ângulo entre o instante da passagem pelo periastro e a posição orbital atual. A semi-amplitude  $K$  da velocidade radial observada em um sistema de dois corpos pode ser expressa, a partir dos parâmetros físicos do sistema, como segue (Cumming; Marcy; Butler, 1999)

$$K = \left( \frac{2\pi G}{p} \right)^{\frac{1}{3}} \frac{M_p \sin i}{(M_p + M_\star)^{\frac{2}{3}}} \frac{1}{\sqrt{1 - e^2}}. \quad (11)$$

A inclinação orbital  $i$  do planeta não pode ser determinada a partir da velocidade radial. Assim, a massa planetária é definida como a massa mínima  $M_p \sin i$ . A massa estelar  $M_\star$  pode ser estimada por meio de estudos de espectroscopia ou astrossismologia. Ajustando-se um modelo utilizando as equações 10 e 11 às velocidades medidas  $v(t)$  é possível estimar o período  $p$ , a excentricidade  $e$ , o argumento do periastro  $\omega$ , o tempo de passagem pelo periastro  $t_{per}$ , a massa planetária mínima  $M_p \sin i$  e, com os arranjos matemáticos apropriados (*cf.* Perryman (2011)), o semieixo maior  $a$ .

### *Medidas de Velocidade Radial e fontes de erro*

A estimativa da velocidade radial precisa é feita, em geral, fazendo-se a correlação cruzada entre o espectro observado e uma máscara espectral digital. Esta máscara espectral, de característica espectral o mais próximo possível do tipo espectral da estrela observada, é constituída por zeros, exceto nas regiões com linhas espectrais. Esse tipo de máscara, com alta razão sinal ruído, permite que a função de correlação cruzada seja bas-

tante sensível mesmo em casos de baixa razão sinal-ruído. A precisão da técnica depende do número de linhas espectrais correlacionadas e da estabilidade do perfil instrumental. Hatzes (2016) discute em detalhes o estado da arte na obtenção de espectros para detecção de exoplanetas utilizando diferentes métodos, entre eles, o uso simultâneo de lâmpadas de calibração de Th-Ar e o método com o uso de lâmpadas de gás de Iodo.

A precisão necessária para medir a velocidade radial induzida por um planeta com massa equivalente a  $1 M_J$  orbitando uma estrela do tipo solar é de aproximadamente  $12,5 \text{ m/s}$ , estabelecendo um limite rígido em termos de precisão para detectar exoplanetas. Modernos espectrógrafos como o HARPS (High Accuracy Radial velocity Planet Searcher) (Mayor et al., 2003) são capazes de atingir precisão da ordem de  $0,5 \text{ m/s}$  (Lovis et al., 2008), região que engloba a detecção de exoplanetas com dimensões terrestres de curto período. Como exemplo, Proxima Centauri-b, possui  $K \simeq 1.14 \text{ m/s}$  e  $M \sin i \simeq 1.13 M_{\oplus}$  (Anglada-Escudé et al., 2016). Tal estabilidade nas observações vem de um extraordinário controle das condições *in situ* nas quais os espectros são obtidos.

Entretanto, há outros fatores que dificultam ou limitam atingir a precisão necessária para verificar a existência do sinal planetário. Por um lado, a magnitude visual dos alvos a serem observados impõe um limite à precisão necessária (Bouchy; Pepe; Queloz, 2001). Por outro lado, a atividade magnética intrínseca da estrela introduz informação sistemática que, em geral, é de difícil resolução. A taxa de rotação média das estrelas aumenta para estrelas mais jovens e a presença de manchas em uma estrela ativa pode simular o efeito de velocidade radial cuja amplitude é semelhante a aquela provocada por um planeta. Igualmente, o número de linhas espectrais varia inversamente com a temperatura efetiva da estrela, de modo que a maioria das detecções foram feitas em estrelas de tipo espectral F6 ou mais tardias (*cf.* figura 1.14 em Hatzes (2016)).



## 3 A MISSÃO COROT

### 3.1 Visão geral

A missão CoRoT integrou um programa de pequenos satélites da agência espacial francesa CNES (*Centre National d'Etudes Spatiales*), num consórcio entre França, Áustria, Bélgica, Brasil, ESA (*European Space Agency*), Alemanha e Espanha. Com peso total de 600 kg, o satélite utilizava uma plataforma PROTEUS (CNES–Alcatel) de órbita polar baixa (cerca de 900 km de altitude) (Baglin et al., 2006) e operou de Janeiro de 2007 a Novembro de 2012. O experimento foi projetado para a busca de exoplanetas por meio de trânsitos e para o estudo da sismologia estelar (análise de pulsações não-radiais das estrelas). Para isso, as medidas fotométricas são de alta precisão ( $\Delta F/F \sim 10^{-6}$ ) permitindo atingir uma resolução em frequência de até 0,1  $\mu\text{Hz}$  (Auvergne, 2003).

O satélite consistia de um telescópio equipado com quatro câmeras CCD (do inglês, dispositivo de carga acoplada) com 2k×2k pixels separadas em dois módulos, um para cada objetivo científico. Dois detectores dedicados à sismologia (para estudar estrelas mais brilhantes) e os outros dois dedicados à detecção de trânsitos (estrelas mais fracas). A abertura do telescópio de 27 cm possuía um campo de visão total de  $2^{\circ},70 \times 3^{\circ},05$  (Bodin, 2006). Originalmente, o campo de visão efetivo no canal de exoplanetas abrangia uma área de  $1^{\circ},4 \times 2^{\circ},8$  permitindo o registro de cerca de 12.000 alvos (Auvergne et al., 2009).

A missão foi desenhada para fazer observações de longa duração em duas regiões do céu, uma em direção ao centro galáctico ( $\alpha = 18^{\text{h}}50^{\text{m}}$ ) e outra em direção ao antcentro galáctico ( $\alpha = 18^{\text{h}}50^{\text{m}}$ ). A maioria das estrelas do campo de exoplanetas possuíam magnitude visual entre  $11 < V < 16$ , e foram, a priori, monitoradas com taxa de amostragem de 512 s. Porém, até 2.000 estrelas tinham a possibilidade de ser monitoradas com taxa de amostragem de 32 s, no chamado “modo de alarme” (Surace et al., 2008; Bonomo et al., 2012).

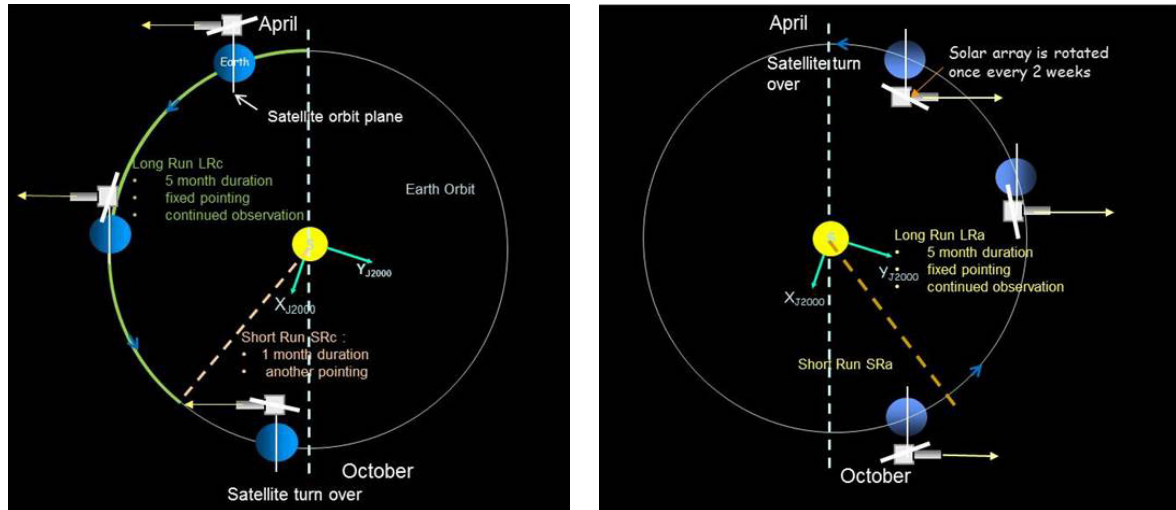
A produção científica realizada por cientistas brasileiros envolvidos na missão é de grande importância. Mais de 70 pesquisadores participaram da missão desde seu comissionamento englobando o desenvolvimento e validação de parte dos softwares de bordo do satélite e de processamento de dados até a produção de ciência em diversas áreas que eram focos de estudo da missão. Em números, a produção técnica e científica conta com mais de 120 artigos de autores brasileiros publicados em periódicos revisados, 4 capítulos de livros, 19 teses de doutoramento e 26 dissertações de mestrado.

Grandes avanços foram feitos no contexto da astrossismologia a partir das medidas obtidas com o CoRoT. O grande número de alvos observados permitiu realizar uma investigação das propriedades intrínsecas das estrelas (como massa e raio) a partir de uma amostragem estatisticamente significativa (Hekker et al., 2009; Mosser et al., 2010). Entre outras descobertas, verificou-se que as oscilações em gigantes vermelhas seguem um padrão universal (Mosser et al., 2011). Contribuições significativas também foram feitas em estudos de evolução a partir das propriedades das amplitudes das oscilações. Além disso, uma análise astrossísmica de estrelas com planetas produziu parâmetros melhorados tanto para a estrela quanto para o planeta (Gaulme et al., 2010; Ballot et al., 2011). Uma discussão detalhada sobre os avanços em pulsações e oscilações estelares relacionadas ao CoRoT pode ser encontrada em Grotzsch-Noels e Deheuvels (2016).

No que se refere a exoplanetas, 34 é o número de descobertas anunciadas até o momento pela missão CoRoT (*cf.* tabela 2). Em sua grande maioria esses exoplanetas fazem parte da classe de planetas gigantes que orbitam muito próximo a suas estrelas hospedeiras. Há, no entanto, ao menos dois objetos, CoRoT-15b (Bouchy et al., 2011) e CoRoT-33b (Csizmadia et al., 2015), classificados como anãs marrons. O exoplaneta CoRoT-3b (Deleuil et al., 2008), que também possui características de anã marrom, ainda não tem sua natureza bem estabelecida. Dentre as descobertas é importante salientar a primeira super-terra, CoRoT-7b (Léger et al., 2009; Queloz et al., 2009; Hatzes et al., 2011), estabelecendo um novo marco para as detecções por meio de trânsitos. Igualmente, o exoplaneta CoRoT-20b (Moutou et al., 2014), um planeta ultradenso de raio  $4,88 \pm 0,17 R_{\oplus}$ , ainda desafia os modelos de formação planetária. A precisão do CoRoT mostrou

### Figura 3 - Apontamentos da missão CoRoT.

Direção de apontamento e órbita do satélite CoRoT ao longo do ano. À esquerda, durante o inverno do hemisfério Sul, o apontamento em direção ao centro da galáxia. À direita, durante o verão no hemisfério Sul, em direção ao anticentro galáctico. Em outubro e abril, o reposicionamento do satélite durante os *Short Runs*.



Fonte: Baglin, Chaintreuil e Vandermarcq (2016).

ser capaz ainda de medir eclipses secundários (Alonso et al., 2009) e variações das fases das curvas de luz (Snellen; de Mooij; Albrecht, 2009), permitindo restringir os valores de albedo planetário e fazer estudos da distribuição térmica planetária. De forma geral, os planetas descobertos pela missão foram organizados em três classes (Guillot; Havel, 2016): (i) planetas que são menores que o esperado para gigantes gasosos de composição solar pura a partir de modelos teóricos “padrão”, e que portanto, precisam de elementos pesados para explicar seu enriquecimento; (ii) planetas maiores que o esperado, mas que poderiam ser explicados se parte da energia estelar incidente fosse internamente dissipada ( $\sim 1\%$ ) e, (iii) planetas inflados que exigiriam taxas de dissipação ainda maiores para explicar seu tamanho.

### 3.2 Observações do CoRoT

As observações do CoRoT foram definidas conforme o programa principal da missão, agregando sempre que possível, programas paralelos com o objetivo de otimizar a janela observacional. Os critérios de seleção para as regiões observadas eram razoavelmente similares para os campos *sismo* e *exo*. Prioridade máxima para estrelas de sequência principal, FGKM de classe de luminosidade V e IV; a seguir, estrelas de classe de luminosidade III e, no campo *sismo* em particular, variáveis *Delta Scuti* e *Gamma Doradus* já conhecidas ou suspeitas e, finalmente, estrelas do tipo OBA, de classe de luminosidade V e estrelas peculiares (Michel et al., 2006).

No campo *exo* especialmente os alvos principais são estrelas de sequência principal combinadas com baixa contaminação de máscara. Estrelas do tipo solar são os melhores alvos para a detecção de exoplanetas (Michel et al., 2008; Hekker et al., 2009), fazendo com que a porcentagem de estrelas do tipo solar seja importante para maximizar a eficiência de detecção. Em geral, o número de máscaras disponíveis para monitorar estrelas no campo de exoplanetas superava o número de bons candidatos, permitindo estender as prioridades observacionais (Baglin; Chaintreuil; Vandermarcq, 2016)

A tabela 8 (Apêndice A) mostra em detalhes os períodos observacionais de cada *run*, o número de objetos observados e a direção dos alvos. As diretrizes observacionais específicas de cada levantamento podem ser encontradas em Baglin, Chaintreuil e Vandermarcq (2016). O número de interrupções observacionais é mínima, de modo que os dados, no longo termo, podem ser chamados contínuos. Entretanto, as medidas coletadas durante passagem do satélite sobre a SSA (acrônimo inglês para Anomalia Magnética do Atlântico Sul) são bastante afetadas pela incidência de raios cósmicos (Pinheiro da Silva et al., 2008). Cerca de 8% dos registros de cada *run* ocorreram durante a passagem pela SSA (*cf.* tab. 8).

### 3.3 Ruído e processamento de dados

Várias são as calibrações necessárias para atingir os níveis de precisão pré-estabelecidos para a missão. As fontes de ruído que a calibração trata incluem o ruído de Poisson, *dark current*, ruído de leitura, eficiência de transferência e eficiência quântica, apontamento do satélite, impactos de radiação, mudanças de temperatura no equipamento e fontes de luz de fundo (Samadi et al., 2006; Auvergne et al., 2009).

Correções mais avançadas são feitas a partir da determinação global dos efeitos sistemáticos restantes ainda presentes nas curvas de luz. Em sua versão mais recente de *pipeline* essas correções são feitas utilizando um algoritmo baseado em informações de exposição (posição no CCD e abertura fotométrica), assumindo que esses efeitos não tem origem no sinal astrofísico (Guterman; Mazeh; Faigler, 2015). Ao longo da missão, outras propostas vinham sendo empregadas para a remoção de efeitos sistemáticos assumindo, no entanto, que os efeitos apresentam padrões em conjuntos de observações (Tamuz; Mazeh; Zucker, 2005).

Em termos de ruído, as curvas de luz do CoRoT são principalmente afetadas em função de *jitter* (De Oliveira Fialho et al., 2007) e por descontinuidades introduzidas nos dados pela ocorrência de *hot pixels*. As medidas fornecidas pelo satélite frequentemente sofrem com a presença de carga espúria adicionada ao fluxo integrado conforme estimado por Mislis et al. (2010). É, principalmente, o resultado do impacto de partículas altamente energizadas.

Pinheiro da Silva et al. (2008) mostraram que, no caso CoRoT, este fenômeno está intimamente relacionado à baixa órbita terrestre do satélite, uma vez que essas partículas são originadas de interações de raios cósmicos na atmosfera superior da Terra. De fato, a passagem sobre a Anomalia do Atlântico Sul produz a maior taxa de radiação. Essas variações súbitas nos dados, comumente referidas como “jumps” na literatura, podem ser um dano transitório, sofrendo decaimento após algum tempo, ou podem gerar uma variação permanente quando o impacto altera as propriedades fundamentais do sensor.

Um estudo dos *runs* iniciais mostrou que a variância nos dados estava em bom

acordo com os valores estabelecidos no comissionamento do projeto (Aigrain et al., 2009). Ademais, as propriedades de ruído do CoRoT são descritas em vários trabalhos (Mazeh et al., 2009; Cabrera et al., 2009; Bonomo et al., 2012) e mostram que suas características exigem métodos de filtragem adicionais para diminuir seus efeitos no processo de detecção de trânsitos. Por isso, um procedimento padrão é fazer uso de técnicas de filtragem e *detrending* (Mazeh; Tamuz; Zucker, 2007; Ofir et al., 2010; Kim et al., 2009; Kovács; Bakos, 2008; Mislis et al., 2010), de modo a otimizar a detectabilidade de candidatos a exoplanetas, uma vez que, ela está limitada pelo nível de ruído que ocorre em escalas de duração dos trânsitos (Pont; Zucker; Queloz, 2006).

### 3.4 Curvas de luz obtidas com o CoRoT

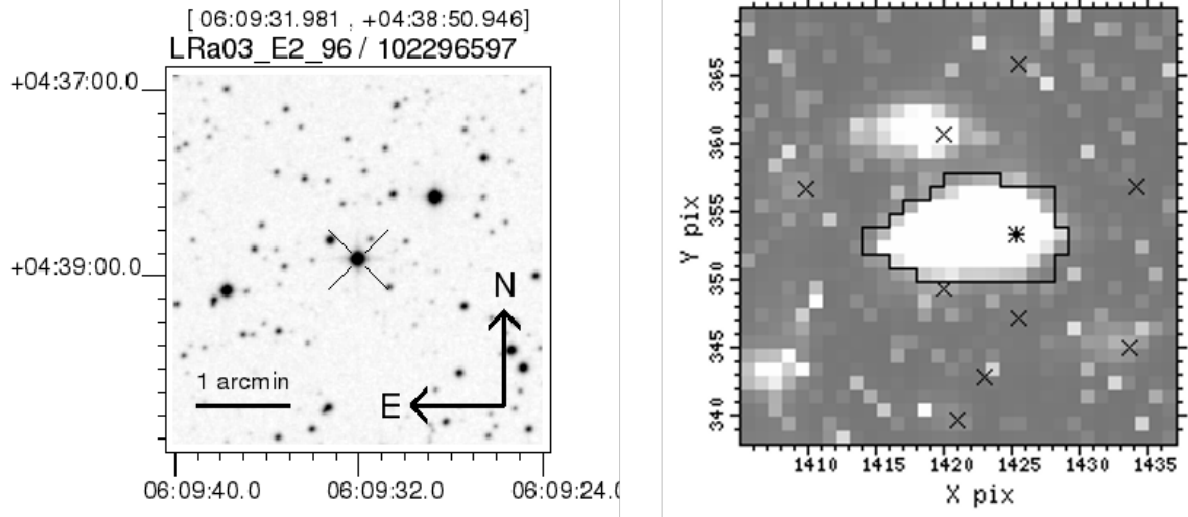
As curvas de luz do CoRoT estão organizadas nos canais monocromático (MON) e cromático (CHR). Isso é possível devido ao uso de um prisma bi-refringente posicionado em frente aos detetores (Barge et al., 2006). A luz ao passar pelo prisma é defletida, formando uma PSF alongada, com cerca de 20% dos fótons na região azulada e cerca de 65% na região avermelhada (Rouan et al., 1999). A leitura da informação em três bandas, aqui denominadas informalmente como “vermelho”, “verde” e “azul”, é obtida diretamente a partir da máscara de leitura para cada alvo.

O canal MON é composto de estrelas de baixa magnitude onde o fluxo é integrado sobre as três bandas. As vantagens de se utilizar a informação em diferentes bandas está associada à natureza geométrica e quase acromática dos trânsitos. Em princípio, espera-se observar o trânsito nos três canais e em profundidades iguais, podendo-se descartar de antemão possíveis contaminações de estrelas do campo não resolvidas e que estão diluídas no fluxo registrado.

Os modos de observação foram estabelecidos em *Long* (LR) e *Short Runs* (SR). Os LRs tinham duração de até 150 dias de observação quase ininterrupta, otimizando a detecção de planetas de maior período. Os SRs tinham duração entre 20 e 60 dias, e

#### Figura 4 - Máscara de observação no campo de exoplanetas.

A figura à esquerda mostra o campo observado (fora de escala) para o alvo CoRoT ID 102296597. À direita uma secção do CCD do campo de exoplanetas mostrando a máscara utilizada para registrar o fluxo. No detalhe, a PSF alongada em função da passagem da luz pelo biprisma.



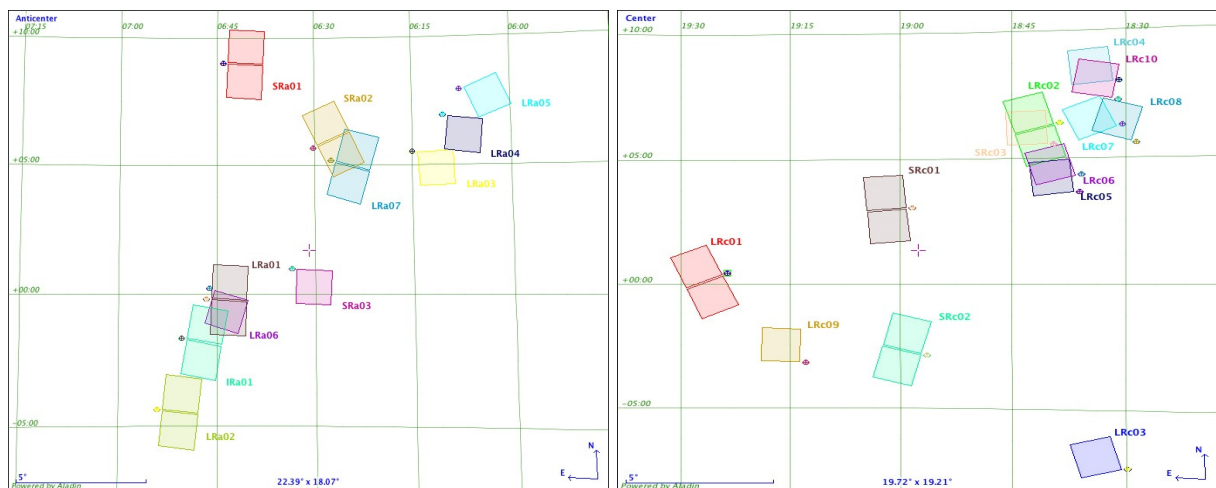
Fonte: EXODAT (Deleuil et al., 2009).

eram fruto do reposicionamento dos painéis solares e do satélite a cada 6 meses (fig. 3), embora complementassem o número de estrelas observadas no canal de astrossismologia. Em 2009, devido à falha de dois detectores, houve uma redução no campo de visão em 50%, afetando a duração dos campos observados e do número de estrelas monitoradas. A estratégia adotada foi utilizar os LRs com períodos menores ( $\sim 80$  dias), de modo que a rotação do campo não afetasse as observações astrossismológicas (Baglin; Chaintreuil; Vandermarcq, 2016).

Durante toda a missão foram obtidas 176.802 curvas de luz, porém, dado que vários casos os alvos foram observados mais de uma vez, o número total corresponde a 163.665 estrelas. Dentre *Short* e *Long Runs*, foram 26 campos estudados durante a missão (fig. 5).

### Figura 5 - Campos observados pela missão CoRoT.

Posição das estrelas do campo de exoplanetas observados pelo CoRoT. A figura à direita mostra os campos na direção do anticentro e a figura à esquerda mostra os campos observados em direção ao centro galáctico.



Fonte: Deleuil et al. (2016).



Tabela 2 - Planetas confirmados da missão CoRoT.

| Planeta    | Massa<br>[ $M_J$ ]                     | Raio<br>[ $R_J$ ]                       | Período orbital<br><i>dias</i> | Semieixo maior<br>[ <i>ua</i> ] | <i>e</i>                               | Inclinação<br>[ $^\circ$ ] | $\omega$<br>[ $^\circ$ ] | Referência                |
|------------|--|---|--------------------------------|---------------------------------|--|----------------------------|--------------------------|---------------------------|
| CoRoT-1 b  | 1,0 ± 0,1                              | 1,49 ± 0,08                             | 1,508956 ± 0,000006            | 0,0254 ± 0,0004                 |  | 85,1 ± 0,5                 |                          | (Barge et al., 2008)      |
| CoRoT-2 b  | 3,3 ± 0,2                              | 1,47 ± 0,03                             | 1,742996 ± 0,000002            | 0,0281 ± 0,0009                 |  | 87,8 ± 0,1                 |                          | (Alonso et al., 2008)     |
| CoRoT-3 b  | 22 ± 1                                 | 1,01 ± 0,07                             | 4,25680 ± 0,00001              | 0,057 ± 0,003                   |  | 85,9 ± 0,8                 |                          | (Deleuil et al., 2008)    |
| CoRoT-4 b  | 0,72 ± 0,08                            | 1,19 ± 0,05                             | 9,2021 ± 0,0004                | 0,090 ± 0,001                   |  | 90,0 ± 0,1                 |                          | (Moutou et al., 2008)     |
| CoRoT-5 b  | 0,47 <sup>+0,05</sup> <sub>-0,02</sub> | 1,33 ± 0,05                             | 4,037896 ± 0,000002            | 0,0495 ± 0,0003                 | 0,09 ± 0,04                            | 85,8 ± 1,4                 | 232 ± 48                 | (Rauer et al., 2009)      |
| CoRoT-6 b  | 3,0 ± 0,3                              | 1,17 ± 0,04                             | 8,886593 ± 0,000004            | 0,086 ± 0,002                   | 0,10                                   | 89,1 ± 0,3                 |                          | (Fridlund et al., 2010)   |
| CoRoT-7 b  | 0,01 ± 0,00                            | 0,14 ± 0,05                             | 0,853359 ± 0,00002             | 0,0172 ± 0,0003                 | 0,12 ± 0,07                            | 80,1 ± 0,3                 |                          | (Léger et al., 2009)      |
| CoRoT-7 c  | 0,04 ± 0,00                            |   | 3,698 ± 0,003                  | 0,0460 <sup>†</sup>             | 0,12 ± 0,06                            |                            |                          | (Queiroz et al., 2009)    |
| CoRoT-8 b  | 0,22 ± 0,03                            | 0,57 ± 0,02                             | 6,21229 ± 0,00003              | 0,063 ± 0,001                   |  | 88,4 ± 0,1                 |                          | (Bordé et al., 2010)      |
| CoRoT-9 b  | 0,84 ± 0,07                            | 0,94 ± 0,04                             | 95,274 ± 0,001                 | 0,407 ± 0,005                   | 0,13 ± 0,04                            | 89,9 ± 0,5                 | 37 ± 37                  | (Deeg et al., 2010)       |
| CoRoT-10 b | 2,8 ± 0,1                              | 0,97 ± 0,05                             | 13,2406 ± 0,0002               | 0,106 ± 0,002                   | 0,53 ± 0,04                            | 88,6 ± 0,2                 | 219 ± 6                  | (Bonomo et al., 2010)     |
| CoRoT-11 b | 2,3 ± 0,3                              | 1,43 ± 0,03                             | 2,99433 ± 0,00002              | 0,0435 ± 0,0004                 |  | 81,4 ± 0,2                 |                          | (Gandolfi et al., 2012)   |
| CoRoT-12 b | 0,92 ± 0,07                            | 1,4 ± 0,1                               | 2,82804 ± 0,00001              | 0,0402 ± 0,0009                 | 0,07 ± 0,04                            | 85,5 ± 0,8                 | 105 ± 27                 | (Gillon et al., 2012)     |
| CoRoT-13 b | 1,31 ± 0,07                            | 0,89 ± 0,01                             | 4,03519 ± 0,00003              | 0,051 ± 0,003                   |  | 88,02 ± 0,04               |                          | (Cabrera et al., 2010)    |
| CoRoT-14 b | 7,60 ± 0,60                            | 1,09 ± 0,07                             | 1,5121 ± 0,0001                | 0,027 ± 0,002                   |  | 79,6 ± 0,8                 |                          | (Tingley et al., 2011)    |
| CoRoT-15 b | 63 ± 4                                 | 1,12000 <sup>+0,3</sup> <sub>-0,2</sub> | 3,06036 ± 0,00003              | 0,05 ± 0,01                     |  | 86,7 ± 3,2                 |                          | (Bouchy et al., 2011)     |
| CoRoT-16 b | 0,5 ± 0,1                              | 1,17 ± 0,14                             | 5,3523 ± 0,0002                | 0,062 ± 0,002                   | 0,3 ± 0,1                              | 85,0 ± 1,2                 | 168 ± 21                 | (Ollivier et al., 2012)   |
| CoRoT-17 b | 2,4 ± 0,2                              | 1,02 ± 0,07                             | 3,7681 ± 0,0003                | 0,046 ± 0,001                   |  | 88,3 ± 1,5                 |                          | (Csizmadia et al., 2011)  |
| CoRoT-18 b | 3,5 ± 0,4                              | 1,3 ± 0,2                               | 1,900069 ± 0,000003            | 0,030 ± 0,002                   |  | 86,5 ± 0,9                 |                          | (Hébrard et al., 2011)    |
| CoRoT-19 b | 1,11 ± 0,06                            | 1,29 ± 0,05                             | 3,89713 ± 0,00002              | 0,0518 ± 0,0008                 | 0,05 ± 0,05                            | 87,6 ± 0,4                 | 86 ± 60                  | (Guenther et al., 2012)   |
| CoRoT-20 b | 4,2 ± 0,2                              | 0,84 ± 0,04                             | 9,24285 ± 0,00005              | 0,090 ± 0,002                   | 0,56 ± 0,01                            | 88,2 ± 0,5                 | 56 ± 2                   | (Deleuil et al., 2012)    |
| CoRoT-21 b | 2,3 ± 0,3                              | 1,3 ± 0,1                               | 2,7247 ± 0,0001                | 0,042 ± 0,001                   |  | 86,8 ± 2,1                 |                          | (Pätzold et al., 2012)    |
| CoRoT-22 b | 0,04 <sup>+0,04</sup> <sub>-0,03</sub> | 0,44 ± 0,03                             | 9,7560 ± 0,0001                | 0,092 ± 0,001                   | 0,08 <sup>+0,30</sup> <sub>-0,04</sub> | 89,7 ± 0,9                 | 210 ± 70                 | (Moutou et al., 2014)     |
| CoRoT-23 b | 2,8 ± 0,3                              | 1,1 ± 0,1                               | 3,6314 ± 0,0001                | 0,048 ± 0,004                   | 0,16 ± 0,02                            | 85,7 ± 1,5                 | 52 ± 9                   | (Rouan et al., 2012)      |
| CoRoT-24 b | < 0,02                                 | 0,33 ± 0,04                             | 5,1134 ± 0,0006                | 0,056 ± 0,002                   |  | 86,5 ± 2,0                 |                          | (Alonso et al., 2014)     |
| CoRoT-24 c | 0,09 ± 0,04                            | 0,44 ± 0,04                             | 11,759 ± 0,006                 | 0,098 ± 0,003                   |  | 89,0 ± 1,0                 |                          | (Alonso et al., 2014)     |
| CoRoT-25 b | 0,27 ± 0,04                            | 1,1 <sup>+0,3</sup> <sub>-0,1</sub>     | 4,86069 ± 0,00006              | 0,058 ± 0,003                   |  | 84,5 ± 0,8                 |                          | (Almenara et al., 2013)   |
| CoRoT-26 b | 0,52 ± 0,05                            | 1,26 <sup>+1,3</sup> <sub>-0,07</sub>   | 4,20474 ± 0,00005              | 0,053 ± 0,001                   |  | 86,8 ± 1,0                 |                          | (Almenara et al., 2013)   |
| CoRoT-27 b | 10,4 ± 0,6                             | 1,01 ± 0,04                             | 3,57532 ± 0,00006              | 0,048 ± 0,007                   |  | 86,7 ± 0,9                 |                          | (Parviainen et al., 2014) |
| CoRoT-28 b | 0,48 ± 0,09                            | 0,96 ± 0,07                             | 5,2085 ± 0,0004                | 0,059 ± 0,003                   | 0,05 <sup>+0,06</sup> <sub>-0,04</sub> |                            | 126 ± 140                | (Cabrera et al., 2015)    |
| CoRoT-29 b | 0,9 ± 0,2                              | 0,9 ± 0,2                               | 2,850570 ± 0,000006            | 0,039 ± 0,002                   | 0,08 ± 0,08                            | 87,3 ± 2,7                 | 87 ± 49                  | (Cabrera et al., 2015)    |
| CoRoT-30 b | 2,8 ± 0,2                              | 1,02 ± 0,08                             | 9,0601 ± 0,0002                | 0,084 ± 0,001                   | 0,01 <sup>+0,03</sup> <sub>-0,01</sub> | 90,0 ± 0,6                 | 178 ± 100                | (Schneider, 2017)         |
| CoRoT-31 b | 0,85 ± 0,05                            | 1,50 ± 0,5                              | 4,6294 ± 0,0008                | 0,06 ± 0,01                     | 0,02 <sup>+0,16</sup> <sub>-0,02</sub> | 83,2 ± 2,3                 | 306 ± 108                | (Schneider, 2017)         |
| CoRoT-32 b | 0,15 ± 0,10                            | 0,57 <sup>+0,06</sup> <sub>-0,05</sub>  | 6,71837 ± 0,00001              | 0,071 ± 0,001                   |  | 89,0 ± 0,5                 |                          | (Bouffleur et al., 2018)  |
| CoRoT-33 b | 59,2 <sup>+1,9</sup> <sub>-1,8</sub>   | 1,1 ± 0,5                               | 5,8191 ± 0,00002               | 0,06 ± 0,01                     | 0,070 ± 0,002                          | 85,5 ± 0,5                 | 179,3 ± 0,9              | (Csizmadia et al., 2015)  |

†Valor adotado.

## 4 A MODIFIED COROT DETREND ALGORITHM (MCDA)

Toda medida realizada carrega associada intrinsecamente um fator de erro estatístico. Outras formas de imprecisão também podem ser adicionadas devido à sistemática dos processos. Às rotinas aplicadas com o objetivo de corrigir efeitos sistemáticos presentes nas medidas chamamos *detrending*. Portanto, compreender a origem desses erros de forma clara é fundamental para a decisão de como interpretá-los e tratá-los, tornando assim possível obter o máximo de sinal a partir das medidas. Na busca e determinação de parâmetros físicos e orbitais de exoplanetas esta é uma fase essencial do processo, pois a precisão da variação fotométrica que se deseja, em geral, deve ser superior a 0,1%. A presença de componentes que afetam a medida, inevitavelmente, estabelece limites além dos quais não há mais como separar o que é sinal do que é ruído.

As curvas de luz estão sujeitas a diferentes tipos de interferência. Os registros obtidos a partir de observatórios espaciais não têm a limitação atmosférica que deforma a frentes de onda luminosas. No entanto, estão sujeitos a outros tipos de variações sazonais como períodos orbitais no caso de satélites em órbitas terrestres, flutuações térmicas, etc.

O ruído presente nas curvas de luz têm várias origens. Em partes de caráter aleatório, outras vezes causado por contaminação luminosa, cintilação (no caso de observações terrestres) e impacto de partículas de alta energia; origens especificamente sistemáticas, quando devido a defeitos do detector como, por exemplo, píxeis inoperantes e/ou *hot pixels*; ou ainda, embora não seja ruído, a variabilidade estelar oriunda da atividade intrínseca representa, no caso das detecções de exoplanetas, um efeito sistemático que também precisa ser tomado em conta (Rauer; Erikson, 2007).

A correção desse tipo de efeito é algo que ainda vem sendo aprimorado, sobretudo em pesquisas de planetas extrassolares por meio de trânsito. Existem na literatura algumas propostas de algoritmos para correção desses efeitos baseados na minimização

de resíduos (Mazeh; Tamuz; Zucker, 2007; Ofir et al., 2010), utilização de estrelas de referência pouco variáveis (Kim et al., 2009), minimização de resíduos e reconstrução do sinal (Kovács; Bakos, 2008) ou a utilização da informação estatística da própria curva de luz (Mislis et al., 2010), método que aprimoramos nesse trabalho e que é aplicável somente a curvas multi-cromadas.

Um dos erros que tem se mostrado mais difícil de ser corrigido é aquele originário da incidência de partículas de alta energia. O deslocamento provocado na curva de luz devido ao aquecimento do pixel tem comportamento tal que não se pode facilmente associar uma função de decaimento que se aplique a todos os eventos. Sua duração é variável podendo ocasionar a alteração permanente ou o dano do sensor (Pinheiro da Silva et al., 2008).

As curvas de luz do CoRoT apresentam perturbações características de variações súbitas e cujos deslocamentos se dão de maneira aleatória. O problema é complexo justamente porque nem sempre é possível saber previamente quais características se devem a sinais reais, como trânsitos ou atividade estelar, ou a efeitos sistemáticos. Mislis et al. (2010) mostram em um estudo estatístico das curvas de luz do CoRoT que, para os dados cromáticos do *run* IRa01<sup>1</sup>, variações súbitas aparecem em mais de 50% das curvas de luz e em todos os filtros, sendo que, em 0,82% dos casos eles ocorrem no mesmo instante. Essa característica mostra que a maioria dos deslocamentos podem, a priori, ser corrigidos por meio de comparações com o sinal dos outros canais, no caso de curvas cromáticas.

A seguir, descrevemos a implementação de nossa técnica, bem como sua validação, baseando-nos no método proposto por Mislis et al. (2010). Para diferenciar nossa técnica que utiliza estatística robusta para otimizar as correções na curva de luz bruta, a chamaremos de MCDA – *Modified CoRoT Detrend Algorithm*.

---

<sup>1</sup> O *run* IRa01 foi o levantamento inicial da missão CoRoT com duração de 60,8 dias e observou estrelas em direção ao anticentro galáctico.

#### 4.1 O Algoritmo

Nosso objetivo é aumentar a sensibilidade do algoritmo na presença de discontinuidades. Portanto, nossas maiores modificações com respeito ao CDA são, primeiramente, a substituição do ajuste polinomial de terceira ordem por uma média móvel robusta. Assim, o valor médio da seção da curva de luz é tomado com respeito ao seu valor central, com um número igual de medidas em ambos os lados,

$$\bar{x}_{i_{rob}} = \frac{1}{n} \sum_{m=i-\frac{n}{2}}^{i+\frac{n}{2}} x_m, \quad \forall \quad |x_i - \mu_x| \leq \sigma_{corte} \quad (12)$$

onde  $n$  é um valor arbitrário em relação à amostragem, e corresponde ao tamanho da janela utilizada para calcular a média ou o número de medidas utilizadas para obter o valor médio robusto. Ainda,  $\mu_x$  é o valor médio da curva de luz e  $\sigma_{corte}$  corresponde à dimensão do desvio definido para descartar valores que estão além desse limite com respeito ao valor médio.

A retificação de sinais em séries temporais sempre produz, em um certo ponto, a introdução de atenuação sistemática, por isso, é importante evitar a sobreposição da duração dos trânsitos com a largura temporal da média móvel. No caso do CoRoT, considerando-se a dependência da duração dos trânsitos com o semieixo maior e, consequentemente, com o período orbital, espera-se trânsitos com durações de até 5 horas. Sinais de alta frequência não são filtrados pela técnica.

O segundo passo consiste em minimizar a propagação de erro estatístico utilizando uma abordagem robusta na detecção dos *jumps* mais significantes na curva de luz. Para isso, as curvas de luz são inicialmente subdivididas em intervalos  $i$  com duração de 1 dia. Para comparar a variância entre os diferentes intervalos, cada subconjunto  $i$  é normalizado com respeito à média robusta relativa ao seu canal, R (vermelho), G (verde) ou B (azul),

$$[R', G', B']_i = \frac{[R, G, B]_i}{\bar{x}_{rob[R, G, B]}} \quad (13)$$

Na sequência, para cada canal, são selecionados aleatoriamente 5 subconjuntos, e então, é calculado o desvio padrão robusto.

$$\bar{\sigma}_{rob_{[R',G',B']_i}} = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 \sqrt{\frac{1}{l-1} \sum_{j=k_i}^{k_i+l} \left( [R',G',B']_j - \bar{x}_{rob_{[R,G,B]_i}} \right)^2}, \quad (14)$$

onde  $i$  indica cada subconjunto de dados,  $j$  cada elemento do subconjunto e  $l$  o número de elementos dentro do subconjunto. A normalização dos subconjuntos permite fazer inferências e comparações diretas entre os três canais de cores.

Para comparar a estatística de cada subconjunto escolhido, calculamos a significância de cada  $\bar{x}_{rob_{[R,G,B]_i}}$  com respeito a curva de luz como um todo, ou seja, uma estimativa da variação estatística em cada cor, então, o desvio padrão robusto de cada canal é dado por,

$$\sigma_{rob_{[R',G',B']}} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \left( [R',G',B']_i - \bar{x}_{res_{[R,G,B]}} \right)^2}, \quad (15)$$

onde  $n$  é o conjunto de elementos que estão dentro do limite em desvio padrão estabelecido em nossa análise robusta. Para comparar esses resultados globalmente, seguimos como no método originalmente proposto, calculando o desvio relativo de cada canal de cor de modo a determinar em qual canal o maior desvio está localizado,

$$\sigma_{rel_{[R',G',B']}} = \frac{\sigma_{rob_{[R',G',B']}}}{\bar{\sigma}_{rob_{[R',G',B']}}}. \quad (16)$$

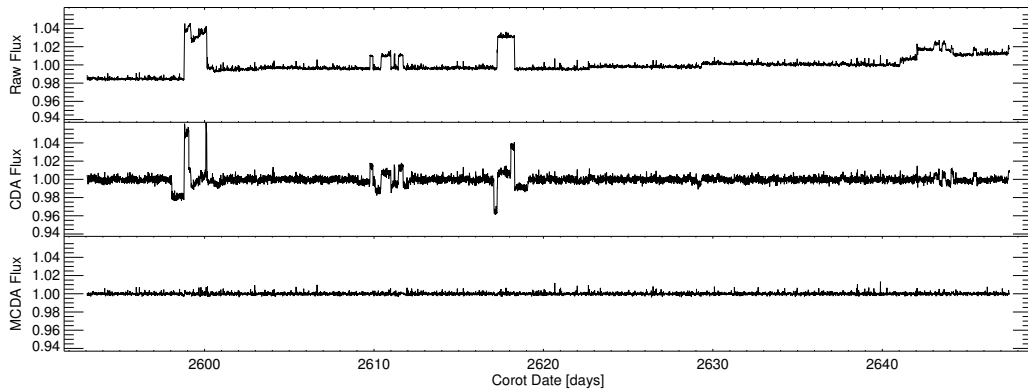
Finalmente, os desvios relativos em cada cor são ranqueados. Para amenizar a presença das discontinuidades, o canal com o maior desvio passa a ser substituído pelo valor médio entre o canal com maior e o com menor desvio, como segue,

$$C_{corr} = \frac{C_{high\sigma_{rel}} + C_{low\sigma_{rel}}}{2}. \quad (17)$$

Essa operação fecha o primeiro ciclo de *detrending*. O processo é repetido enquanto houver diferença no desvio padrão relativo das curvas de luz. Por fim, cada canal é

### Figura 6 - Comparação entre o fluxo original e o fluxo retificado.

No topo, uma curva de luz arbitrária do CoRoT mostra a presença de descontinuidades no fluxo normalizado original. A figura central mostra a curva de luz corrigida com o uso do algoritmo CDA. A parte inferior mostra a correção usando o método MCDA descrito neste trabalho.



multiplicado por seu respectivo valor médio, restaurando a curva para seu valor médio original.

## 4.2 Performance e validação

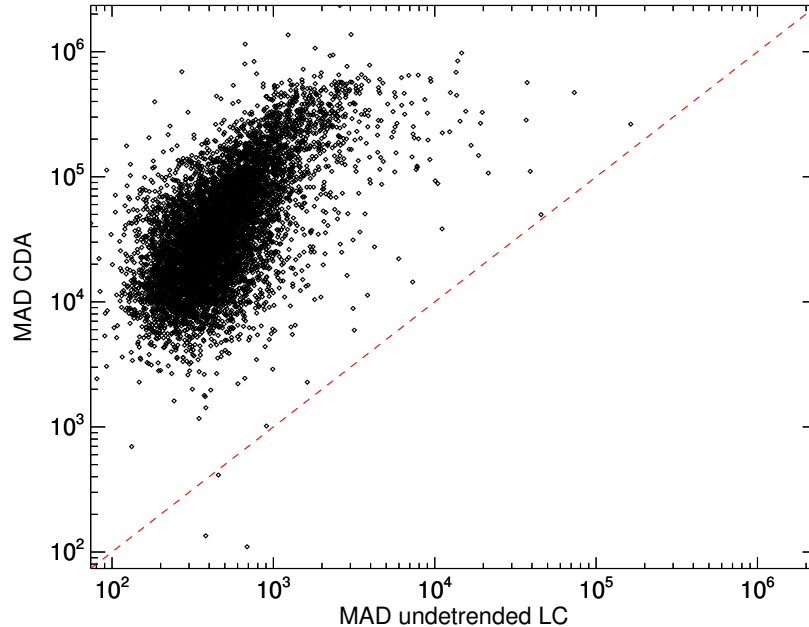
Mostramos agora o desempenho de nossa técnica usando os dados fornecidos pela missão CoRoT. Nossa análise é restrita às curvas de luz de CHR, onde é possível discriminar eventos de trânsito (quase acromáticos) dos de atividade estelar (fortemente cromática), entre outras características (Auvergne et al., 2009).

Para fazer uma avaliação robusta de quanto conseguimos reduzir a dispersão nos dados devido à presença de descontinuidades, realizamos a mediana dos desvios absolutos da mediana (MAD) (Hoaglin; Mosteller; Tuckey, 2000), que é um estimador robusto da dispersão estatística. Usando essas estimativas, podemos avaliar qualitativa e quantitativamente o quanto o nosso método de *detrend* reduz a dispersão nos dados quando comparado às medidas brutas e ao *detrend* realizado pelo CDA.

Na figura 6 mostramos uma curva de luz arbitrária da base de dados do CoRoT com a presença de *jumps*. O fluxo original sofre tanto de pequenos deslocamentos locais quanto

### Figura 7 - Mediana dos desvios absolutos da mediana - CDA

A figura mostra a mediana dos desvios absolutos da mediana (MAD) de cada curva de luz para a *run* LRa01 após a retificação dos dados usando o CDA descrito em Mislis et al. (2010) em função dos dados brutos.

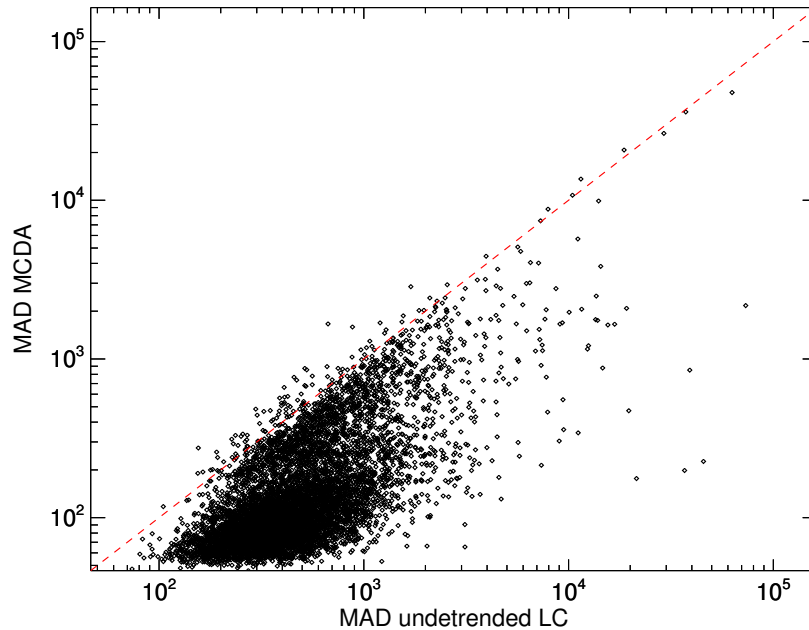


de desvios permanentes nas medições. O CDA mostrou ser eficaz para lidar com os desvios de longo termo, mas pouco sensível com variações de curto prazo. É provavelmente o efeito de uma performance menos eficaz do ajuste polinomial nas proximidades dos *jumps*, onde as variações são mais acentuadas. Por outro lado, o MCDA conseguiu remover todas as descontinuidades de curto e longo prazo, como pode ser visto no gráfico inferior da figura. A eficácia da técnica, no entanto, depende fortemente de premissas anteriores, como, por exemplo, os parâmetros adotados para realizar a média móvel robusta na curva de luz (Eq. 12).

De todos os *runs* disponíveis, LRa01 é especialmente interessante por seu número de alvos, e também foi amplamente estudado para determinar as propriedades do ruído dos dados da missão (Aigrain et al., 2009). Então, para comparar os métodos e testar sua eficácia, mostramos nas figuras 7 e 8 a MAD das curvas de luz depois de analisadas pelo CDA versus a MAD dos dados brutos em contraste com o MCDA. É notório que o MCDA foi capaz de baixar a MAD para quase 100% dos 7.470 alvos CHR. Em alguns casos, no entanto, parece ter adicionado um pouco de ruído às curvas de luz.

### Figura 8 - Mediana dos desvios absolutos da mediana - MCDA

A figura exibe os resultados da MAD usando este algoritmo. É notável que o MCDA é capaz de reduzir mais a dispersão estatística devido à *jumps* e variabilidade estelar.



O uso de uma abordagem robusta para avaliar a estatística do desvio permite que o MCDA trabalhe muito melhor com a dispersão global dos dados, aumentando a confiança de que os conjuntos escolhidos a serem corrigidos realmente sofrem descontinuidades. Por outro lado, o menor desempenho da CDA surge da maneira como as tendências são filtradas, como por exemplo, a variabilidade estelar, em combinação com o fato de que as descontinuidades nos dados desviam a distribuição de probabilidade da normalidade, tornando os estimadores estatísticos “comuns” menos sensíveis. Todos os *runs* estudados mostraram uma melhora na redução da dispersão, semelhante ao LRA01, em comparação com as curvas de luz originais. Isso mostra que a técnica está realmente contribuindo para aumentar as detecções nas curvas de luz. Esses trânsitos não seriam proeminentes antes devido ao sinal dominante dos saltos.

Uma vez que o procedimento de correção do método baseia-se na média da cor mais afetada com o canal menos afetado, um pequeno aumento na ocorrência de falsos positivos deve ser esperado, como sinais que primeiro apareceriam apenas em um único canal sendo impressos agora em outros canais. No entanto, é algo perfeitamente gerenciável, uma vez



que a modelagem dos candidatos é preferencialmente feita com as curvas de luz originais, onde tais falsos positivos podem ser descartados. Por outro lado, a técnica ajuda a reduzir a ocorrência de falsos negativos, especialmente os casos em que os trânsitos são rasos e estariam perdidos no ruído se as descontinuidades não fossem devidamente processadas com antecedência.

## 5 DETECÇÃO DE TRÂNSITOS

Como já mencionado anteriormente, trânsitos são causados pela passagem de um corpo opaco em frente a sua estrela hospedeira e cujo plano orbital está alinhado com a linha de visada do observador. Trânsitos planetários caracterizam-se por terem forma similar a uma caixa ou função passo, embora, com bordas suaves devido ao escurecimento do limbo estelar. Rauer e Erikson (2007) e Winn (2010) explicam em detalhes o fenômeno de trânsitos bem como os principais equívocos que podem surgir a partir da geometria ou forma, assim como casos que produzem efeitos similares aos trânsitos planetários como, por exemplo, sistemas de estrelas binárias de fundo diluídas na PSF do alvo estudado (*cf.* Cap. 1). Neste capítulo descrevemos os métodos e técnicas empregados para fazer a busca de trânsitos planetários.

O escopo deste trabalho abordou o estudo de todas as curvas de luz cromáticas do CoRoT, que abrange um total de 65.655 curvas de luz do campo de exoplanetas. Para isso, nossa amostragem levou em conta todos os levantamentos da missão, a saber, em ordem cronológica: IRa01, SRc01, LRc01, LRa01, SRa01, LRc02, SRc02, SRa02, LRa02, LRc03, LRc04, LRa03, SRa03, LRc05, LRc06, LRa04, LRa05, LRc07, SRc03, LRc08, SRa04, SRa05, LRa06, LRc09, LRc10 e LRa07 (tab. 8). As curvas de luz foram obtidas do *IAS CoRoT Public Archive*<sup>2</sup>. Os dados que utilizamos dos levantamentos iniciais foram processados com a versão de pipeline 1.x e os mais recentes já estavam disponíveis com a versão 2.x.

---

<sup>2</sup> <http://idoc-corot.ias.u-psud.fr>

### 5.1 *Detrending* das curvas de luz

Inicialmente, realizamos o *detrend* de todas as curvas de luz utilizando o algoritmo MCDA descrito no capítulo anterior. Dado o grande número de curvas de luz a ser analisadas, utilizamos um algoritmo escrito em linguagem C (Kernighan, 1988), de modo a otimizar o tempo de processamento. O algoritmo em si é bastante eficiente, levando poucos segundos para processar uma curva de luz com mais de 300.000 medidas em um computador padrão de 5 núcleos de processamento.

Os parâmetros adotados para fazer o *detrend* das curvas de luz consistem no tamanho da caixa temporal utilizada para fazer a média móvel e na robustez atribuída ao cálculo estatístico. As curvas de luz do CoRoT possuem dois modos de amostragem, 32 e 512 s. Dessa forma, utilizamos uma largura de caixa constante no tempo, mas variável no número de elementos, para evitar ao máximo a atenuação de sinais de trânsito durante a retificação.

A amostragem das curvas de luz do CoRoT tem, no máximo, 150 dias de duração, o que coloca a maioria das descobertas possíveis na região de planetas de curto período orbital. A duração dos trânsitos nestes casos é, em média, da ordem de 3 a 5 horas. Para evitar a atenuação de trânsitos, a largura da caixa temporal adotada para realizar a média móvel foi de 24 horas, com um desvio padrão de corte no uso da estatística robusta de  $0,5\sigma$ . O problema de bordos que se origina nesse tipo de análise foi abordado repetindo o valor do primeiro e último pontos para as regiões inexistentes nas bordas (para  $i[0 : n - 1]$ , se  $i - k < 0$ ,  $i = 0$ ; se  $i + k > n - 1$ ,  $i = n - 1$ ).

Os resultados foram, então, armazenados em um novo arquivo *fits* para futura análise com o algoritmo de busca de trânsitos. O resultado da retificação das curvas, além de corrigir discontinuidades, destrói a informação da modulação estelar, produzindo um produto que só é aplicável para a detecção de trânsitos. O nível das correções produzidas pelo MCDA é limitado pelas restrições adotadas na suavização da curva utilizando média móvel. De fato, sinais de alta frequência, de duração próximas às durações esperadas dos trânsitos ou menores, não são filtradas. Porém, modulações e outros atributos de longo

termo são eficientemente filtradas.

## 5.2 O algoritmo de busca de trânsitos

Trânsitos planetários são eventos periódicos e várias são as abordagens em termos de algoritmos de busca que podem ser empregadas no domínio de frequências para detecção desses sinais. No entanto, uma das técnicas mais bem consolidadas na detecção de sinais tipo trânsito é o algoritmo *Box-fitting Least Squares* (BLS) (Kovács; Zucker; Mazeh, 2002), uma vez que é construído a partir da geometria do evento. Até o momento, a técnica tem se mostrado ser a mais eficiente para detecções, tanto em condições de baixa razão sinal-ruído quanto para a análise de grandes volumes de dados, como comparado por Aigrain e Irwin (2004).

O princípio do algoritmo BLS assume que o sinal é estritamente periódico, com período  $P_0$ , e cuja função pode ter unicamente dois valores discretos,  $L$  (Low, ou “em trânsito”) e  $H$  (High, ou “fora de trânsito”). Assim, o modelo de função caixa que descreve a forma do trânsito pode ser descrito como,

$$f(x) = \begin{cases} L, & \text{se } x_i \in t \\ H, & \text{em todo o resto.} \end{cases}, \quad (18)$$

onde  $H$  é o fluxo médio fora da região do trânsito e  $H - L$  é a profundidade do trânsito durante o período  $t$ .

Para uma dada configuração de pontos, o algoritmo busca encontrar o modelo que minimiza o resíduo para os estimadores  $P_0$ ,  $q$  (fração de trânsito),  $L$ ,  $H$  e  $t_0$  (época do trânsito). Assumindo que o ruído é gaussiano e a média do sinal é zero, então,

$$H = -\frac{Lq}{(1-q)}, \quad (19)$$

para cada período teste, reduzindo para quatro o número de parâmetros.

Para cada período teste realiza-se uma permutação da série original, ou seja, a série temporal dobrada em fase para este período teste. Este novo conjunto de dados,  $\tilde{x}_i$ , é a série permutada com seu respectivo peso  $\tilde{\omega}_i = \sigma_i^{-2}(\sum_{j=1}^n \sigma^{-2})^{-1}$ . Ajusta-se, então, à série uma função caixa com os parâmetros  $\hat{L}$  (no intervalo  $[i_1, i_2]$ ) e  $\hat{H}$  (no intervalo  $[1, i_1]$  e  $(i_2, n]$ ).

A expressão a ser minimizada para um dado intervalo  $([i_1, i_2])$  é, então,

$$S = \sum_{i=1}^{i_1-1} \tilde{\omega}_i (\tilde{x}_i - \hat{H})^2 + \sum_{i=i_2+1}^n \tilde{\omega}_i (\tilde{x}_i - \hat{H})^2 + \sum_{i=i_1}^{i_2} \tilde{\omega}_i (\tilde{x}_i - \hat{L})^2. \quad (20)$$

Seja a fração da série no estado  $\hat{L}$  caracterizada por  $r = \sum_{i=i_1}^{i_2} \tilde{\omega}_i$ . Reranjando a equação anterior,  $\hat{L}$  e  $\hat{H}$  podem ser expressados como,

$$\hat{L} = \frac{s}{r} \quad \text{e} \quad \hat{H} = -\frac{s}{1-r}, \quad \text{onde} \quad s = \sum_{i=i_1}^{i_2} \tilde{\omega}_i \tilde{x}_i. \quad (21)$$

Expandindo-se os termos da equação (20) e substituindo-se as equações (21) em (20), podemos reescrever a expressão que minimiza o erro como,

$$S = \sum_{i=1}^n \tilde{\omega}_i \tilde{x}_i^2 - \frac{s^2}{r(1-r)}. \quad (22)$$

Analisando o segundo membro da equação (22), verifica-se que o primeiro termo não depende do período. Assim, é possível estimar o desvio partindo unicamente do segundo termo, que está sujeito ao intervalo  $[i_1, i_2]$ . Dessa forma, o ajuste que minimiza a função é,

$$SR = \text{MAX} \left\{ \left[ \frac{s^2(i_1, i_2)}{r(i_1, i_2)[1 - r(i_1, i_2)]} \right]^{\frac{1}{2}} \right\}. \quad (23)$$

Por fim, a significância do ajuste pode ser estimada comparando-se a energia de cada pico encontrado com respeito ao nível de ruído global, ou seja, razão de sinal-ruído para cada período teste,

$$SDE = \frac{F_{bls}(x)}{\sigma_{F_{bls}}}. \quad (24)$$

### 5.2.1 Busca e detecção de trânsitos

A busca de trânsitos foi realizada utilizando o algoritmo BLS, implementado, igualmente em linguagem C. Utilizamos como entrada para a detecção de trânsitos as curvas de luz corrigidas por meio de nossa técnica MCDA. Para cada curva de luz, o intervalo de períodos teste pesquisado foi de  $0,5 \text{ dia}$  a  $\Delta t$ , onde  $\Delta t$  é o período de observação da curva de luz. Embora o critério formal para a detecção de um trânsito esteja definido em no mínimo três ocorrências (Rauer; Erikson, 2007), curvas de luz cromáticas do CoRoT podem ser analisadas a partir dos três canais, de modo que a detecção consistente nas três cores podem indicar a presença de um candidato mesmo a partir de um trânsito único. Embora mais observações se façam necessárias nesses casos, a análise na duração do trânsito pode estabelecer limites observacionais para um posterior *follow up* do candidato.

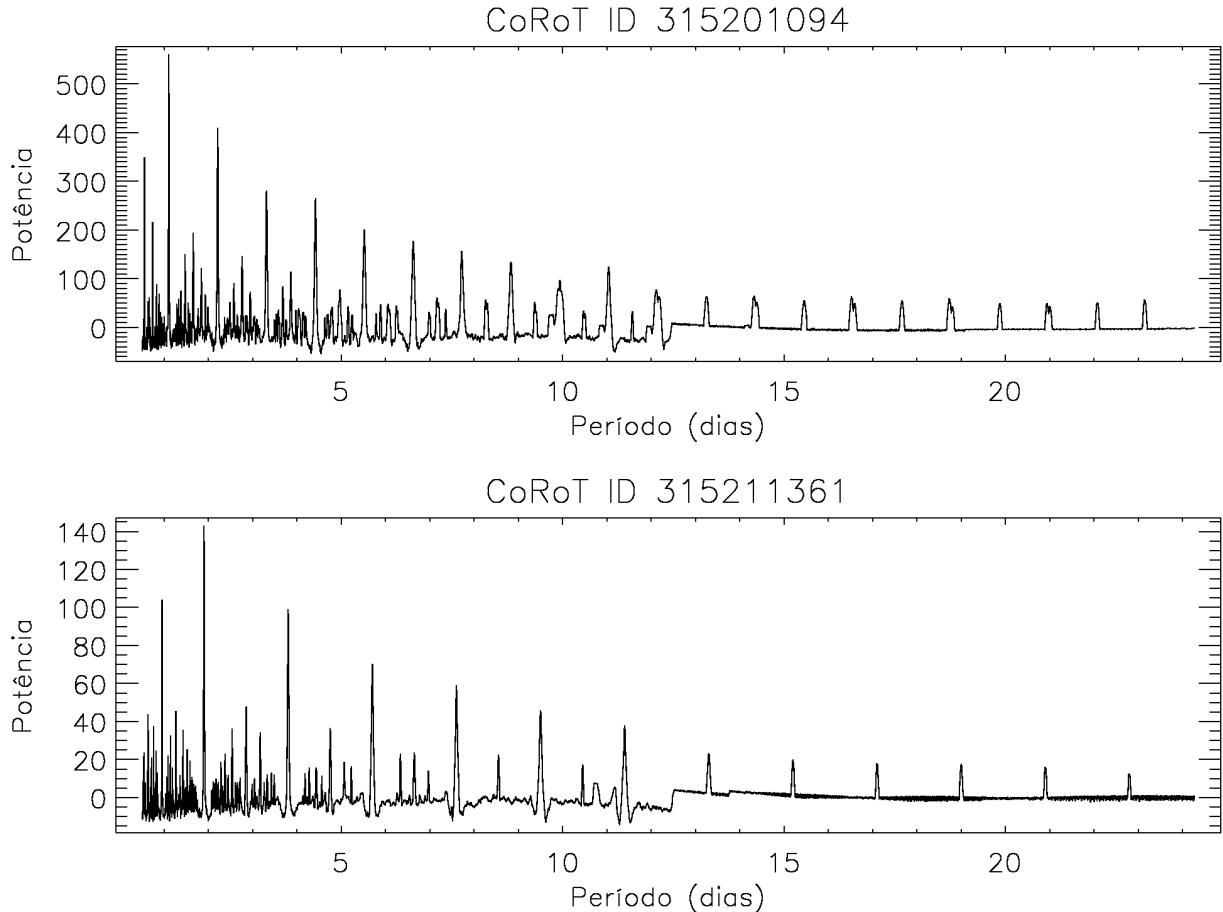
Os demais parâmetros de busca foram mantidos constantes. O intervalo de frações de trânsito  $q$  estabelecido foi estimado à partir da fração de trânsito esperada para os planetas do CoRoT para o intervalo de raios  $0,5 < R_{\odot} < 2,5$  e massas  $0,5 < M_{\odot} < 2,5$ , partindo da aproximação  $q \simeq R_{\star}/\pi a$ . O número de *bins* utilizados para a dobra em fase foi de 1.200, permitindo uma resolução entre  $1 \text{ min}$  e  $1,5 \text{ h}$  para *Long Runs* e podendo chegar a  $3 \text{ h}$  no caso de trânsitos únicos. Os resultados foram armazenados em forma de espectro de potência em um arquivo *fits*. Adicionamos ao *header* do arquivo informações relativas ao melhor ajuste encontrado, estatística do periodograma, bem como informações relativas ao alvo, como versão do pipeline (*Nx*) e ID (identificador) do CoRoT.

Um fenômeno bastante comum que introduz erros sistemáticos em periodogramas se deve ao fato de que, conforme o número de elementos dentro de cada *bin* começa a se tornar escasso para períodos cada vez mais longos, efeitos de janela podem introduzir falsos picos de detecção (Fruth et al., 2012). Ademais, o empobrecimento da amostragem de cada *bin* reduz a razão sinal-ruído, introduzindo tendências de longo termo no espectro de potência. Essa classe de eventos pode frustrar a imediata detecção de picos devidos a trânsitos reais pouco proeminentes.

Esse tipo de artefato sistemático foi atenuado normalizando-se o periodograma com

**Figura 9 - Periodogramas obtidos com o algoritmo BLS.**

Na figura superior podemos ver o periodograma produzido pela atividade de um sistema de estrelas binárias. Como comparação, na parte inferior, vê-se o espectro de potência produzido por uma estrela acompanhada de um planeta, neste caso o CoRoT-18b.



um ajuste de média móvel basilar ( $\mu - \sigma$ ), para então, identificar os picos que concentram maior energia.

Além disso, embora o MCDA seja bastante eficiente na remoção de modulações com períodos  $> 1$  dia, sinais devidos puramente a periodicidades de alta frequência não apresentam distinções significativas em periodogramas quando comparados a eventos relativos a trânsitos reais (figura 9). A resolução desse tipo de fenômeno é explicado a seguir, através de um protocolo de análise semi-automatizado, utilizado na elaboração da lista de pré-candidatos a exoplaneta.

### 5.3 Elaboração de Candidatos

A primeira etapa na elaboração da lista de pré-candidatos consistiu em analisar os espectros de potência gerados para cada curva de luz. Após o *detrending* do periodograma utilizamos uma rotina automatizada para fazer uma pré-seleção imparcial dos eventos mais significativos. Inicialmente, para cada periodograma, foram selecionados os três picos mais proeminentes para uma reanálise comparativa da curva de luz. Este procedimento foi adotado, pois é comum a potência do período real ser inferior a aquela de um outro harmônico, devido à presença de ruído ou de algum outro efeito sistemático.

A seguir, para cada um dos picos selecionados, realizou-se um ajuste de três pontos utilizando um polinômio de Lagrange e calculou-se o máximo da função para otimizar o período associado ao pico. Então, utilizando a curva de luz correspondente, para cada período realizou-se as seguintes tarefas: (i) dobra na fase do período para cada canal; (ii) teste de trânsito: ajuste de uma função caixa; (iii) teste de binaridade: ajuste de duas função caixa variáveis. Tendo realizado essa análise para os três períodos testados, comparou-se os resíduos do melhor ajuste em combinação com a eficiência de detecção SDE, de modo a eliminar casos estatisticamente irrelevantes. Cada alvo foi pré-classificado com base no melhor ajuste, recebendo uma etiqueta. A figura 10 descreve o funcionamento do algoritmo.

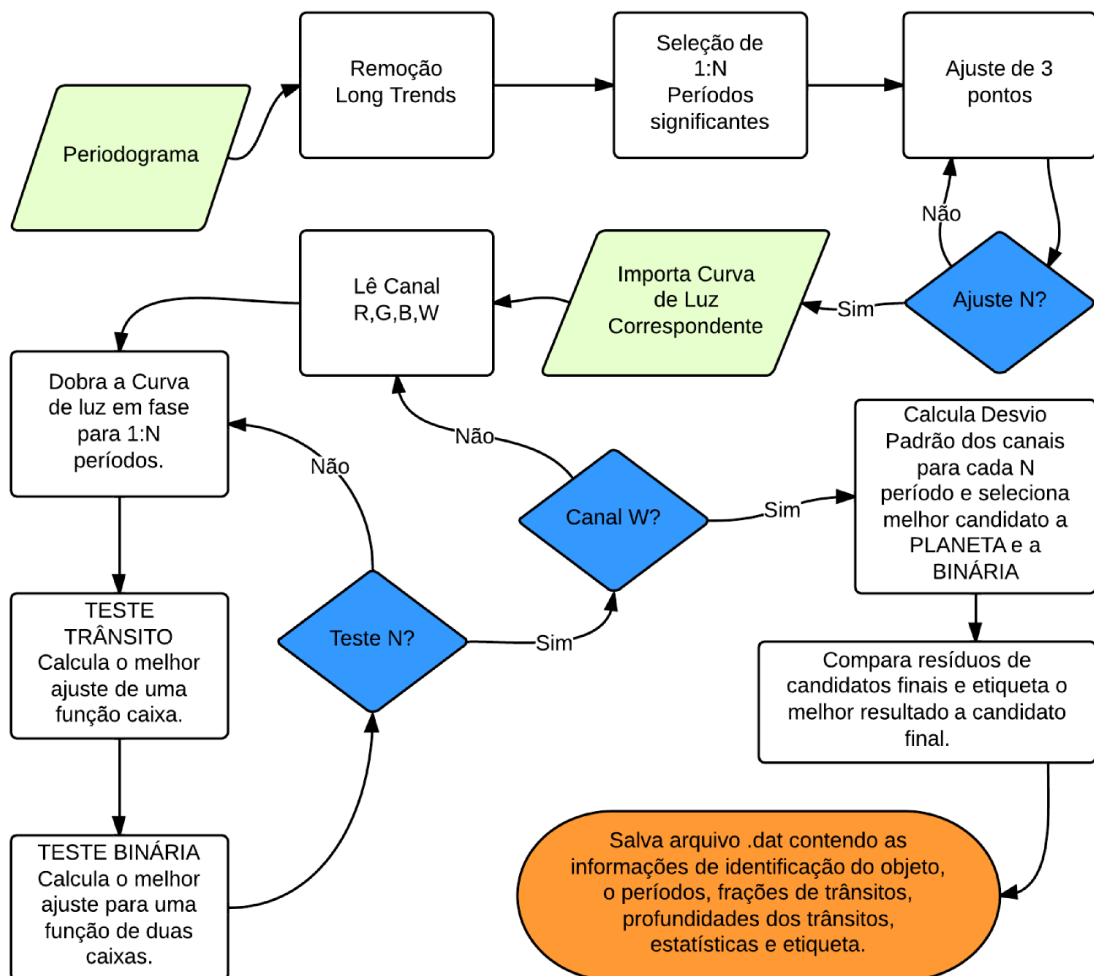
Nesta primeira análise foi possível eliminar 33 % das curvas de luz que não possuíam nenhuma informação relevante, restando 43.869 curvas classificadas como possíveis trânsitos ou com características de atividade estelar. Mais precisamente, 5.471 casos foram marcados como pré-candidatos a trânsito, 31.224 casos marcados como pré-candidatos a sistemas binários e 7.174 casos marcados como sinal oriundo de possível atividade estelar.

Em um estudo sobre as propriedades de detecção do algoritmo BLS em função do ruído, Kovács, Zucker e Mazeh (2002) estabelecem um limite inferior para o qual a eficiência de detecção passa a ter pouca ou nenhuma relevância estatística ( $SDE > 6$ ). Utilizando um limite um pouco mais conservador, selecionamos somente os casos classificados cuja eficiência de detecção (eq. 24) é maior ou igual a 5, para realizar a



**Figura 10 - Fluxograma da rotina de pré-análise de periodogramas.**

Esquema do processo automático de pré-seleção de alvos utilizando a informação estatística presente nos três canais. N é o número de picos selecionados no espectro de potência; R, G, B e W correspondem aos fluxos dos canais vermelho, verde, azul e branco respectivamente.



inspeção visual dos pré-candidatos. Aplicando este filtro, nossa lista ficou reduzida para 15.045 casos, 23 % dos alvos analisados. Desses, 870 casos marcados como pré-candidatos a trânsito, 11.734 casos marcados como pré-candidatos a sistemas binários e 2.441 casos classificados como sinal de modulação estelar.

### 5.3.1 *Inspeção Visual*

Um dos aspectos que precisam ser levados em conta com respeito ao MCDA são as distorções introduzidas nos ingressos e egressos de trânsitos. Outro ponto importante a ser levado em consideração é a possibilidade do algoritmo de *detrend* introduzir sinais de trânsitos nas curvas corrigidas devido ao seu princípio de operação, incidindo em casos falso positivos. Daí a importância da inspeção visual ser realizada com as curvas de luz originais.

Para cada pré-candidato, realizou-se a inspeção de cada curva de luz tendo em conta os seguintes fatores:

- Ocorrência dos trânsitos nos três canais;
- Ocorrência de trânsitos secundários;
- Profundidade dos trânsitos (*cf.* tabela 1);
- Formato dos trânsitos ('V' vs. 'U');
- Trânsitos em curvas de luz moduladas.

A partir da inspeção visual selecionamos 159 alvos como pré-candidatos a exoplaneta. Em nossa amostra de candidatos a exoplaneta, todos os 18 casos cromáticos do CoRoT já publicados à época foram encontrados (tabela 2), bem como o exoplaneta CoRoT-33b (Cabrera et al., 2015). Outros 58 casos faziam parte de listas de candidatos já publicados em periódicos (Moutou et al., 2009; Carpano et al., 2009; Cabrera et al., 2009; Carone et al., 2012; Erikson et al., 2012), resumindo nossa lista para a determinação dos

parâmetros para 82 alvos. Consideramos, no entanto, alguns casos em que os trânsitos são parciais, mas que demandam uma análise mais precisa uma vez que nesses casos a razão de raios não fica definida conforme a aproximação na equação 5.

### 5.3.2 *Determinação de parâmetros físicos e orbitais*

O BLS é otimizado para a detecção de sinais do tipo função passo, de modo que os parâmetros obtidos através desse tipo de ajuste não estabelecem uma determinação fidedigna o suficiente para determinar os demais parâmetros físicos e orbitais do candidato a exoplaneta. Por isso, uma abordagem mais precisa é necessária, pois a partir do período e da duração dos trânsitos é que se determinam os demais parâmetros, como o semieixo maior e o raio planetário, elementos chave para estabelecer a natureza do trânsito, pois isso afeta a determinação de parâmetros adicionais estelares e planetários através de modelagem de curvas de luz.

Para realizar a determinação precisa dos parâmetros de trânsito foram utilizadas as equações de [Seager e Mallén-Ornelas \(2003\)](#), por meio do ajuste de uma função trapezoidal que descreve bem os quatro pontos de contato do trânsito, bem como sua profundidade. A função foi ajustada utilizando-se um algoritmo de Levenberg-Marquardt ([Markwardt, 2009](#)), cuja convergência é rápida quando os parâmetros iniciais dados estão próximos do mínimo da função. A estimativa dos erros foi feita por meio de ajuste de mínimos quadrados.

Para fazer os ajustes foram utilizadas as curvas de luz brutas. Os deslocamentos foram tratados manualmente, enquanto que tendências de longo termo foram suavizadas utilizando um filtro Savitzky-Golay ([SAVITZKY; GOLAY, 1964](#)). Os candidatos foram analisados nos três canais em separado, bem como com o fluxo integrado. Neste processo foram comparados os trânsitos pares e ímpares para determinar se os candidatos de fato não possuíam trânsitos secundários pouco evidentes, ou se poderiam ser uma indicação de sistemas binários.

Além dos parâmetros de trânsito, também foram determinados o semieixo maior, o parâmetro de impacto, a inclinação da órbita e a densidade média da estrela, todos em termos do raio estelar. Esse estudo preliminar permite refinar melhor os resultados e investir o tempo nos alvos mais interessantes. A determinação desses parâmetros à partir da curva de luz pode ser feita utilizando-se as equações citadas anteriormente. Há também outras suítes que fazem os ajustes em curvas de luz de modo a determinar por meio de simulações de Monte Carlo (TAP - *Transit Analysis Package*).

Apesar de a lista parecer bastante promissora, a confirmação do candidato precisa descartar muitos cenários. Nas tabelas 3 e 4 podemos notar que há casos em que as inclinações orbitais são proeminentes. Sistemas visíveis a inclinações muito grandes tendem a ser objetos subestelares. Pode-se ainda, assumindo que as estrelas estudadas são estrelas de sequência principal, fazer uma estimativa das características estelares e planetárias a partir das densidades estelares obtidas por meio de curvas de luz.

### 5.3.3 *Ranqueamento de candidatos*

O ranqueamento de candidatos tenta fazer uso da maior quantidade possível de informações a respeito dos alvos e, sempre que possível e sendo significativo, confirma o exoplaneta dadas as suas características. Em geral, costuma-se se chamar de candidatos somente aqueles casos que passaram pelos testes de falsos positivo e que aguardam por confirmação, seja por velocidade radial, seja por outras técnicas.

No próximo capítulo mostramos detalhadamente o estudo de três casos de candidatos a exoplaneta de modo a buscarmos estabelecer suas naturezas. A realidade, é que é bastante difícil estabelecer um corte confiável do que seria o limite a partir do qual se concorda que trata-se realmente de um exoplaneta. Em geral se define uma probabilidade de falso alarme abaixo de 4,5% feita com a abordagem de alguma técnica estatística.

Para finalizar os comentários acerca de candidatos, apresentamos um dos resultados colaterais desta tese através do apêndice C. Nele está reproduzida uma lista de ótimos

Tabela 3 - Candidatos de maior interesse – parte 1

| Anticentro Galáctico |                       |                 |                     |               |             |                                    |                        |  |  |  |
|----------------------|-----------------------|-----------------|---------------------|---------------|-------------|------------------------------------|------------------------|--|--|--|
| <i>CoRoT ID</i>      | <i>Período [dias]</i> | $\Delta F$      | $R_p/R_*$ [ $R_J$ ] | $a$ [ $R_*$ ] | $i$ [graus] | $\sim \bar{\rho}$ [ $\rho_\odot$ ] | $\sim T_{dur}$ [horas] |  |  |  |
| 223977153            | 6,722 ± 0,002         | 0,996 ± 0,006   | 0,057 ± 0,002       | 11,6 ± 0,4    | 86,6 ± 4,2  | 0,464                              | 3,561                  |  |  |  |
| 223929023            | 4,306 ± 0,005         | 0,995 ± 0,005   | 0,070 ± 0,003       | 5 ± 1         | 83,3 ± 0,8  | 0,091                              | 5,970                  |  |  |  |
| 604988128            | 4,2985 ± 0,0003       | 0,9879 ± 0,0007 | 0,110 ± 0,029       | 4,0 ± 0,5     | 83 ± 4      | 0,052                              | 8,101                  |  |  |  |
| 617963863            | 20,05 ± 0,01          | 0,989 ± 0,007   | 0,104 ± 0,005       | 18,8 ± 0,7    | 87,8 ± 0,9  | 0,222                              | 6,911                  |  |  |  |
| 221656539            | 15,19 ± 0,01          | 0,984 ± 0,005   | 0,125 ± 0,008       | 15,7 ± 0,2    | 87 ± 1      | 0,231                              | 6,956                  |  |  |  |
| 221675115            | 2,65 ± 0,02           | 0,981 ± 0,001   | 0,136 ± 0,007       | 6,57 ± 0,08   | 88,7 ± 0,5  | 0,545                              | 3,481                  |  |  |  |
| 110751369            | 7,65 ± 0,07           | 0,995 ± 0,001   | 0,09 ± 0,02         | 14,6 ± 1,5    | 86,6 ± 0,6  | 0,693                              | 2,583                  |  |  |  |
| 605303115            | 4,489 ± 0,005         | 0,900 ± 0,001   | 0,180 ± 0,001       | 7,5 ± 0,3     | 86,3 ± 0,5  | 0,285                              | 4,923                  |  |  |  |
| 110747600            | 2,22 ± 0,01           | 0,977 ± 0,001   | 0,151 ± 0,008       | 2,4 ± 0,8     | 64,4 ± 0,08 | 0,041                              | 3,211                  |  |  |  |
| 110666175            | 8,760 ± 0,006         | 0,99 ± 0,05     | 0,090 ± 0,005       | 6,6 ± 0,5     | 82 ± 3      | 0,051                              | 5,923                  |  |  |  |
| 604990808            | 10,12 ± 0,10          | 0,945 ± 0,004   | 0,234 ± 0,002       | 19,7 ± 0,1    | 87,3 ± 0,6  | 1,009                              | 3,228                  |  |  |  |
| 620738598            | 13,290 ± 0,004        | 0,970 ± 0,004   | 0,175 ± 0,002       | 17,2 ± 0,5    | 89,6 ± 0,4  | 0,389                              | 6,900                  |  |  |  |
| 617282423            | 1,29167 ± 0,00008     | 0,952 ± 0,005   | 0,219 ± 0,02        | 2,6 ± 0,1     | 68,9 ± 0,1  | 0,140                              | 3,276                  |  |  |  |
| 221613770            | 2,17704 ± 0,00002     | 0,90 ± 0,02     | 0,32 ± 0,05         | 5,3 ± 0,27    | 78 ± 1      | 0,50                               | 1,764                  |  |  |  |
| 602585513            | 4,0139 ± 0,0001       | 0,884 ± 0,001   | 0,34 ± 0,09         | 3,23 ± 0,20   | 69,8 ± 0,9  | 0,028                              | 7,666                  |  |  |  |
| 110665432            | 11,73556 ± 0,0004     | 0,884 ± 0,025   | 0,340 ± 0,005       | 9,50 ± 0,03   | 82,7 ± 0,7  | 0,084                              | 5,446                  |  |  |  |
| 110854820            | 3,4096 ± 0,003        | 0,997 ± 0,006   | 0,05 ± 0,03         | 4 ± 2         | 77 ± 4      | 0,079                              | 3,084                  |  |  |  |

Tabela 4 - Candidatos de maior interesse – parte 2

| CoRoT ID  | Período [dias]    | $\Delta F$        | Centro Galáctico    |                  |                |                                    |                        | $\sim T_{dur}$ [horas] |
|-----------|-------------------|-------------------|---------------------|------------------|----------------|------------------------------------|------------------------|------------------------|
|           |                   |                   | $R_p/R_*$ [ $R_J$ ] | $a$ [ $R_*$ ]    | $i$ [graus]    | $\sim \bar{\rho}$ [ $\rho_\odot$ ] | $\sim T_{dur}$ [horas] |                        |
| 652180991 | $5,21 \pm 0,03$   | $0,99 \pm 0,08$   | $0,05 \pm 0,07$     | $6,0 \pm 0,7$    | $85,8 \pm 0,5$ | $0,147$                            | 5,623                  |                        |
| 631423419 | $1,95 \pm 0,07$   | $0,999 \pm 0,006$ | $0,02 \pm 0,02$     | $5,01 \pm 0,06$  | $85,7 \pm 0,6$ | $0,634$                            | 2,481                  |                        |
| 104775636 | $8,24 \pm 0,08$   | $0,990 \pm 0,005$ | $0,09 \pm 0,07$     | $10,00 \pm 0,05$ | $86,4 \pm 0,5$ | $0,232$                            | 4,911                  |                        |
| 680074530 | $19,88 \pm 0,09$  | $0,992 \pm 0,004$ | $0,07 \pm 0,05$     | $20 \pm 2$       | $89 \pm 2$     | $0,272$                            | 6,593                  |                        |
| 105150726 | $25,22 \pm 0,05$  | $0,97 \pm 0,04$   | $0,1 \pm 0,07$      | $12,7 \pm 1$     | $86,5 \pm 0,6$ | $0,042$                            | 13,973                 |                        |
| 632686576 | $8,26 \pm 0,09$   | $0,93 \pm 0,05$   | $0,55 \pm 0,04$     | $6,5 \pm 0,4$    | $76 \pm 5$     | $0,055$                            | 4,913                  |                        |
| 310234635 | $12,120 \pm 0,07$ | $0,97 \pm 0,08$   | $0,17 \pm 0,01$     | $17,41 \pm 1,5$  | $89 \pm 1$     | $0,483$                            | 6,129                  |                        |
| 105119303 | $5,70 \pm 0,10$   | $0,987 \pm 0,005$ | $0,11 \pm 0,02$     | $3 \pm 2$        | $65 \pm 6$     | $0,004$                            | 14,837                 |                        |
| 104236607 | $7,72 \pm 0,08$   | $0,88 \pm 0,06$   | $0,3 \pm 0,04$      | $19 \pm 3$       | $86,4 \pm 0,9$ | $1,785$                            | 1,674                  |                        |
| 104848249 | $5,71 \pm 0,09$   | $0,99 \pm 0,06$   | $0,04 \pm 0,08$     | $5,2 \pm 0,2$    | $87,0 \pm 0,5$ | $0,059$                            | 8,487                  |                        |
| 659719532 | $14,45 \pm 0,04$  | $0,69 \pm 0,05$   | $0,5 \pm 0,1$       | $12 \pm 8$       | $84 \pm 1$     | $0,130$                            | 4,186                  |                        |
| 659714295 | $11,22 \pm 0,09$  | $0,97 \pm 0,09$   | $0,1 \pm 0,1$       | $17,3$           | $89,2 \pm 0,8$ | $0,557$                            | 5,676                  |                        |

alvos candidatos a estrelas binárias. Ao separarmos os sinais de trânsitos em busca de exoplanetas, um número ainda maior de trânsitos vinha de outras estrelas. Separamos, inicialmente,  $\sim 780$  casos de estrelas com características de binaridade que, eram na sua maioria, do tipo eclipsante. Cerca de 400 desses alvos não estão citados em bases indexadas e oferecem um boas perspectivas para estudos inéditos. Nele estão listados os períodos obtidos a partir dos softwares de pré classificação, bem como, nos casos em que estão facilmente definidos, a duração e a profundidade do trânsito.

## 6 RESULTADOS

Neste capítulo apresentamos a caracterização completa de três candidatos com o auxílio de medidas de velocidade radial. Para tanto, realizamos a modelagem dos trânsitos modelando os coeficientes de escurecimento do limbo e um estudo aprofundado da variabilidade fotométrica das curvas de luz e realizamos a síntese estelar das estrelas hospedeiras a partir dos espectros obtidos. Igualmente, para assegurar que o sinal astrofísico das curvas de luz é realmente originário da estrela alvo, realizamos um estudo de contaminação de fundo utilizando a comparação em magnitudes de estrelas de campo presentes na máscara observada.

### 6.1 Análise de contaminação dos campos

O estudo da contaminação por estrela binárias eclipsantes de fundo é um procedimento necessário na análise e confirmação de exoplanetas e, em geral, é realizada por meio de *follow up* fotométrico. A presença de um sistema binário de fundo pode provocar a origem do sinal astrofísico, causando uma identificação falso positiva do exoplaneta, quando houver a ausência de medidas espectroscópicas que confirmem o período fotométrico.

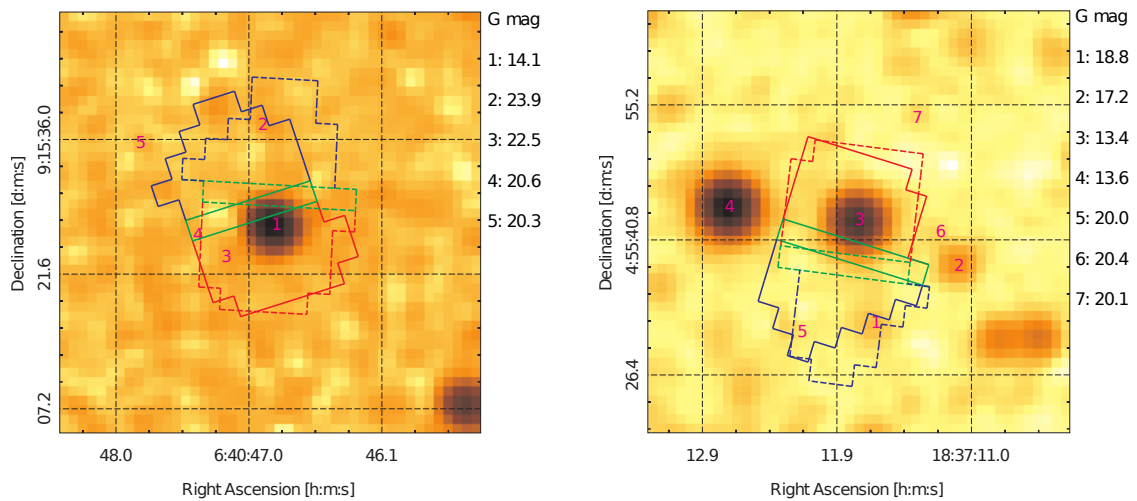
A eficiência quântica média dos detectores do CoRoT opera entre 400 e 900 *nm*, com eficiência máxima de  $\sim 90\%$  em torno de 600 *nm* (Lapeyrere et al., 2006; Levacher, 2006). Utilizamos os dados de catálogo disponibilizados pela missão Gaia (Gaia Collaboration et al., 2016b; Gaia Collaboration et al., 2016a), bem como medidas do catálogo *Sloan Digital Sky Survey Ninth Release* – SDSS9 (Ahn et al., 2012) para identificar quais estrelas estavam presentes dentro das máscaras observadas para cada alvo. A figura 11 ilustra os três campos e os alvos encontrados com suas magnitudes indicadas na banda G, que se justapõe com a região de resposta espectral dos detectores do CoRoT.

Dois dos nossos candidatos (CoRoT-32a e ID 104848249) foram observados em dois



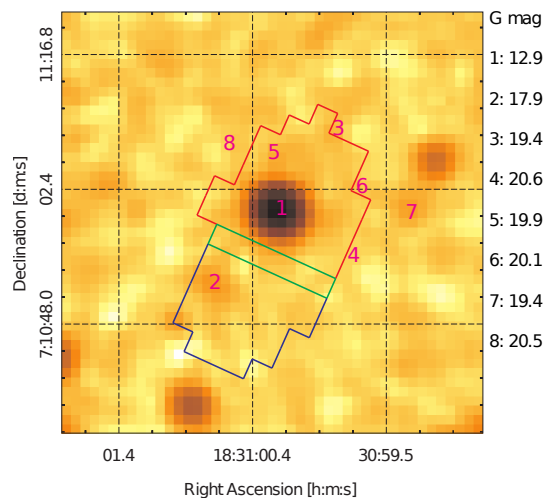
**Figura 11 - Estrelas presentes nos campos observados observados.**

Campos do levantamento 2MASS (Skrutskie et al., 2006) detalhando onde cada alvo foi observado pela missão CoRoT. (a) CoRoT-32a: o alvo é identificado como a fonte número 1. Uma linha tracejada delinea a máscara usada durante o *Run* SRa01 enquanto que a linha contínua corresponde à máscara no *Run* SRa05. (b) CoRoT ID 104848249: a estrela está marcada como a fonte número 3. A máscara tracejada corresponde ao *Run* LRc05 e a máscara contínua ao *Run* LRc06. (c) Campo com a estrela CoRoT ID 652345526 indicada como a fonte número 1. Esse campo foi observado durante o *Run* LRc07. Cada máscara está dividida em três regiões correspondentes aos três canais CHR registrados pelo CoRoT e estão indicados com as cores correspondentes: vermelho, verde e azul. As magnitudes das fontes de contaminação dentro e nos arredores das máscaras estão listadas ao lado direito de cada imagem e foram obtidas dos catálogos SDSS9 (a) e Gaia (b e c).



(a)

(b)



(c)

*Runs* do CoRoT e em máscaras diferentes, o que em princípio já constitui um *follow up*, uma vez que os trânsitos foram detectados em ambos os levantamentos para os dois casos. Para descartar as fontes que pudessem ser suficientemente brilhantes a ponto de simular artefatos de trânsito, detalhamos todas as estrelas conhecidas e que estão presentes dentro da máscara observada de cada objeto e estimamos a contribuição de fluxo total dos objetos contaminantes utilizando a relação entre fluxo e magnitude aparente dada pela equação  $F_1/F_2 = 10^{-0,4(M_1-M_2)}$ , onde  $M$  é a magnitude aparente e  $F$  o fluxo normalizado. A análise em detalhe realizada, acompanha mais adiante o estudo de cada objeto.

## 6.2 Modelagem da variabilidade fotométrica

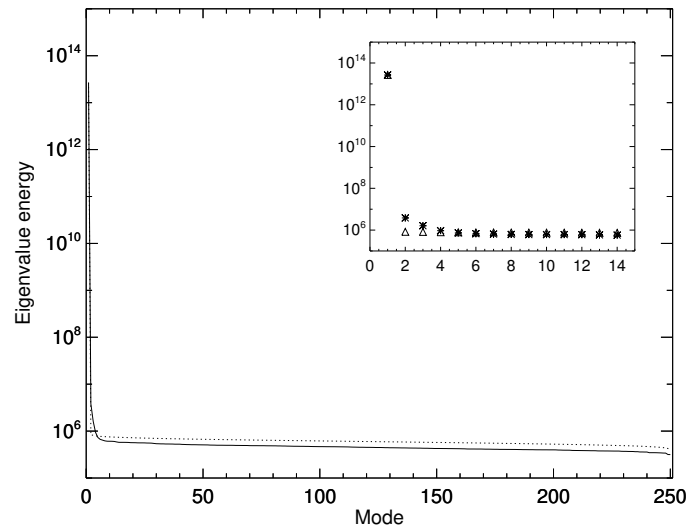
É sabido e esperado que técnicas de *detrend* introduzem distorções na forma dos trânsitos, comprometendo, em certo nível, a informação acerca da profundidade e da duração do evento e, conseqüentemente, a determinação dos parâmetros de trânsito. Para fazer o melhor uso da informação, realizamos um *detrend* personalizado em cada curva de luz dos candidatos analisados, com o objetivo de separar da melhor forma possível o sinal de trânsito da variabilidade presente nas medições.

### 6.2.1 Análise do Espectro singular

A Análise de Espectro Singular (AES) é uma técnica baseada na divisão de uma série temporal em suas partes constituintes de tendências, periodicidade e estruturas residuais. Não assume, a priori, nenhum modelo paramétrico e tem sido bem empregada em estudos de periodicidades não triviais em séries temporais de Climatologia e Astronomia. Para isso, faz uso da decomposição da série temporal original em subconjuntos de dados secundários, construindo uma série multidimensional a partir da qual o espectro singular é produzido – a decomposição espectral da série multidimensional em seu conjunto de

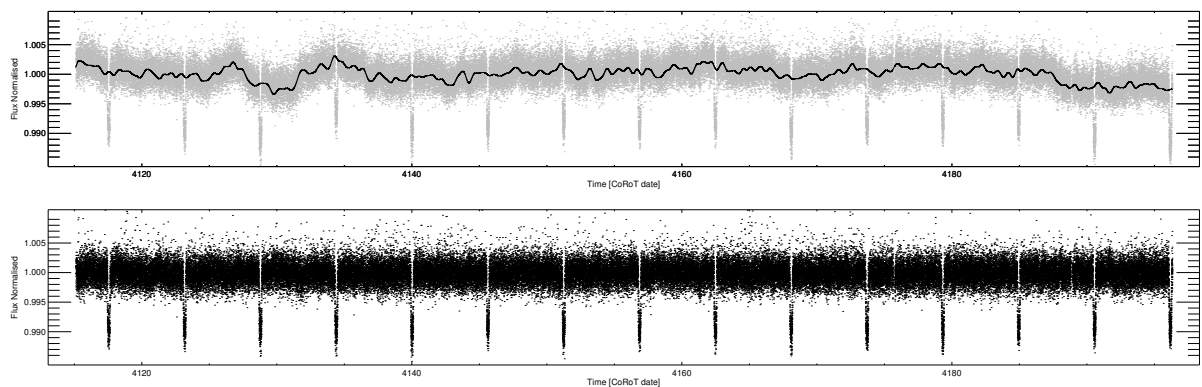
**Figura 12 - Análise do Espectro Singular do alvo CoRoT ID 652345526.**

A linha preenchida mostra os autovalores dos 250 modos calculados usando a curva de luz corrigida. A linha pontilhada representa a média dos autovalores após 100 simulações de Monte Carlo. O gráfico ampliado mostra os componentes significativos (estrelas) que estão acima do nível de ruído (triângulos).



**Figura 13 - Reconstrução do espectro singular para o alvo CoRoT ID 652345526.**

Foram utilizados os cinco autovalores que se distinguem do nível de ruído para reconstruir a variabilidade da curva de luz, excluindo os trânsitos. A imagem superior mostra a curva de luz original e a reconstrução do sinal representada em preto. Na parte inferior, os trânsitos corrigidos da variabilidade.



autovalores (Elsner; Tsonis, 1996; GHIL et al., 2002).

Mais detalhadamente, a AES funciona em dois estágios: a decomposição e a reconstrução. No processo de *decomposição* de valores as medidas são divididas em subséries de dados. Ou seja, a série unidimensional de comprimento  $N$  é reestruturada em uma série multidimensional decomposta em  $L$  componentes (*window lenght*) e  $K$  vetores defasados no tempo. Decompõe-se, então, a matriz trajetória em seus valores singulares (SDV - *singular value decomposition*). A *reconstrução* consiste no ranqueamento dos autovalores e a escolha de um limite. A nova série é reconstruída utilizando os autovalores mais relevantes.

Para construir o espectro singular de cada alvo, primeiramente removemos os trânsitos presentes nas curvas de luz. Inicialmente, correções foram realizadas quando havia nas medidas fortes descontinuidades (*jumps*) com um claro perfil sistemático. A curva foi suavizada utilizando um filtro Savitzky-Golay e os trânsitos foram localizados fazendo uso de um ajuste trapezoidal, identificando a época, o ingresso e o egresso de cada evento. Em seguida, removeu-se os trânsitos (com uma margem de 10 % para mais e para menos em duração do trânsito) da curva original. As lacunas foram interpoladas utilizando ruído gaussiano de amplitude similar à variância presente na curva de luz em conjunto com uma função polinomial.

A AES é uma rotina bastante dispendiosa em termos computacionais. Por isso, as medidas foram re-amostradas para uma cadência de 512 s. Utilizando esta curva de luz corrigida e sem trânsitos fizemos a AES da série temporal e determinamos os componentes significativos para reconstruir o sinal. A partir dessa abordagem também podemos, até certo ponto, remover a variabilidade convolvida com os trânsitos e assim reduzir o impacto do *detrend* nos parâmetros de trânsito.

A reconstrução do sinal dos componentes da AES foi realizada utilizando os autovalores mais significativos para cada uma das curvas de luz. Portanto, para medir quais autovalores poderiam ser distinguidos de puro ruído, realizamos 100 repetições de Monte Carlo embaralhando os dados, como empregado anteriormente por Emilio et al. (2010), de maneira a estabelecer um valor de corte. A figura 12 mostra os autovalores para 250 mo-

dos em contraste com a média dos autovalores obtidos com as simulações de Monte-Carlo. A figura 13 exibe a reconstrução do sinal com base nos autovalores calculados no gráfico anterior e a curva de luz retificada da variabilidade somente com os sinais de trânsito.

### 6.3 Análise espectroscópica

#### 6.3.1 Medidas de velocidade radial

A partir da nossa lista de estrelas suspeitas de possuírem exoplanetas, localizamos espectros em alta resolução para onze alvos alocados no arquivo do espectrógrafo HARPS (*High Accuracy Radial velocity Planet Searcher*). Os arquivos, de status público, foram obtidos a partir do *ESO Science Archive Facility* (Retzlaff et al., 2014). HARPS é um espectrógrafo de dispersão de alta resolução alimentado por uma fibra instalada no foco principal do telescópio de 3,6 m no observatório de La Silla. Seu objetivo principal é a busca de exoplanetas fazendo medidas de velocidade radial de alta precisão (1 m/s) (Mayor et al., 2003). A estabilidade térmica ( $\Delta t \sim 0,01 C$ ) e mecânica ( $\Delta P \sim 0,01 mbar$ ) garante com o perfil do instrumento seja constante durante longos períodos de tempo.

A tabela 5 lista as observações dos três alvos de interesse obtidas com o HARPS, que foram realizadas entre 2010 e 2013.

Os espectros disponíveis no banco de dados do ESO já estão reduzidos e calibrados em comprimento de onda através do pipeline do HARPS usando uma lâmpada de Ar-Th com uma segunda fibra. Neles, a velocidade radial foi medida em cada espectro extraído por meio de uma CCF (função de correlação cruzada) ponderada com uma máscara digital

**Tabela 5 - Medidas espectroscópicas do HARPS obtidas a partir do *ESO Archive*.**

| CoRoT ID  | Número de espectros | Intervalo das observações |
|-----------|---------------------|---------------------------|
| CoRoT-32a | 21                  | 23/01/2010 – 05/02/2012   |
| 104848249 | 11                  | 17/06/2012 – 28/09/2013   |
| 652345526 | 06                  | 14/06/2012 – 09/07/2012   |

de tipo espectral G2, que tem valores nulos exceto na posição de linhas espectrais.

A incerteza nas medidas de velocidade radial deve-se, principalmente, a contribuições de fótons e ruído de leitura, erro de calibração em comprimento de onda e erro de deriva instrumental (Fischer et al., 2016), e são medidas a partir da dispersão da função de correlação. As CCFs são calculadas para cada ordem do espectro separadamente. Outra medida, o espalhamento do bissetor, investiga se a variação no bissetor das linhas está correlacionado com as medidas de velocidade radial que, quando for o caso, é atribuído à atividade intrínseca da estrela, uma vez que a velocidade radial induzida por um planeta não causa variações no perfil da linha (Baştürk et al., 2011; Figueira et al., 2013).

### 6.3.2 Determinação de parâmetros estelares

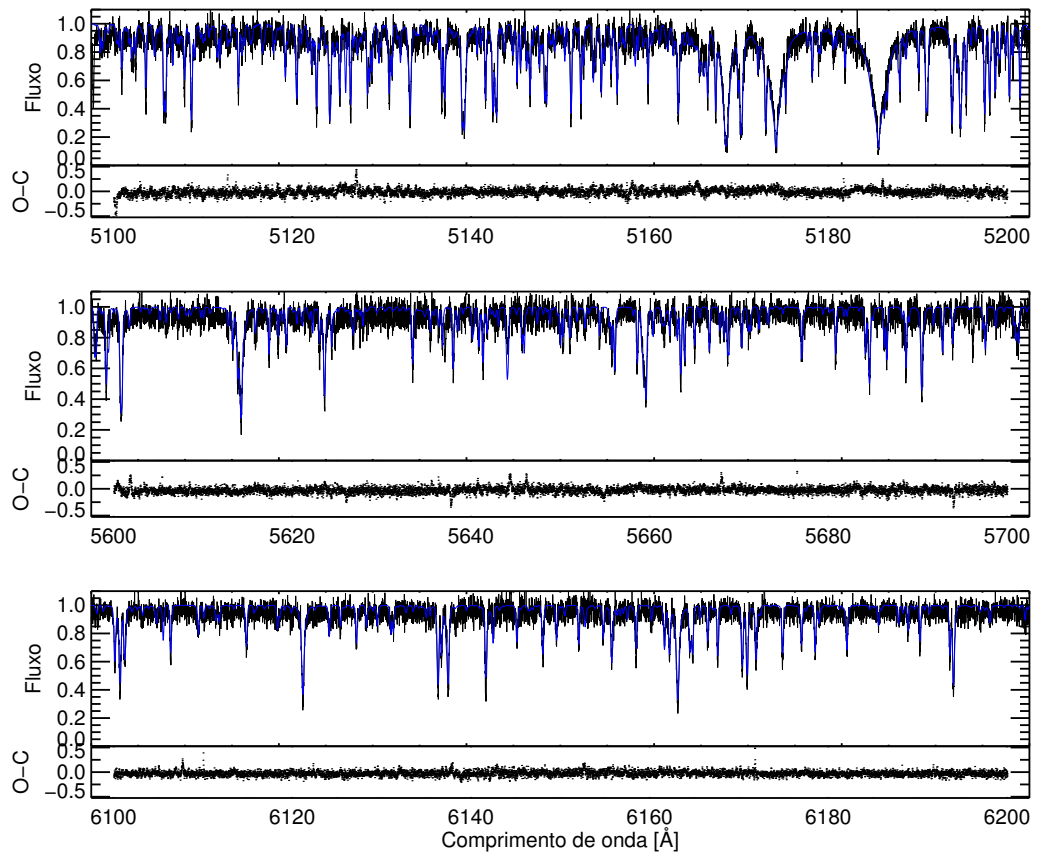
Para a obtenção dos parâmetros estelares utilizamos um espectro *master* construído a partir da soma de todos os espectros disponíveis para cada alvo selecionado. O espectro *master* foi, então, analisado para a obtenção da síntese espectral utilizando a suíte SME – *Spectroscopy Made Easy* (Valenti; Piskunov, 1996). O SME é construído de modo a combinar espectros sintéticos com os perfis de linha observados, utilizando uma otimização de parâmetros por meio de um algoritmo de minimização de resíduos de Levenberg-Marquardt. Os espectros sintéticos são calculados a partir de parâmetros iniciais fornecidos pelo usuário, variando internamente e em diferentes direções os parâmetros globais, com o auxílio de um conjunto de modelos atmosféricos que podem ser interpolados para o espaço de parâmetros que se quer determinar.

Analisamos para cada alvo três regiões do espectro fazendo ajustes simultâneos: 5100 – 5200 Å, 5600 – 5700 Å e 6100 – 6200 Å. A figura 14 mostra a síntese espectral obtida para a estrela CoRoT-32a. Para realizar os ajustes, utilizamos como entrada uma lista com cerca de 1000 linhas obtida a partir do *Viena Atomic Line Database* (VALD) (Heiter et al., 2008), um dos requisitos do SME.

Derivamos, a partir do SME, os seguintes parâmetros estelares: temperatura efe-

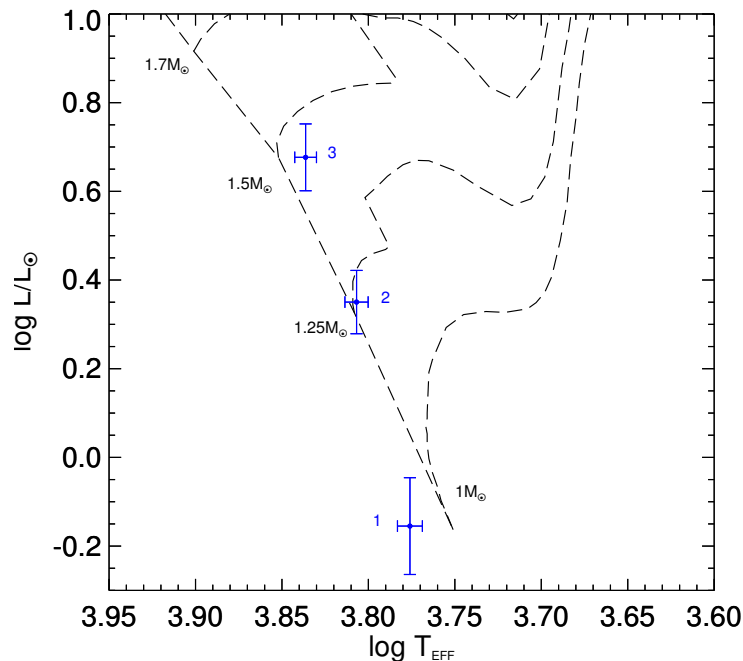
**Figura 14 - Síntese espectral para a estrela CoRoT-32a.**

Síntese espectral realizada utilizando um espectro *master* integrado a partir das observações do HARPS. A linha azul corresponde à síntese espectral.



**Figura 15 - Trajetórias evolutivas para as estrelas de massa solar selecionadas usando os modelos de Genebra.**

As cruces representam os parâmetros derivados com o algoritmo SME e Exofast para o nosso conjunto de estrelas. [1] CoRoT-32a; [2] CoRoT ID 104848249 and [3] CoRoT ID 652345526. Veja a tabela 6.



tiva, gravidade superficial, abundâncias, velocidade de macro e micro-turbulência e  $v_{\text{sen}}(i)$ . O conjunto de incertezas fornecidas pelo SME são puramente numéricos e, em geral, subestimam os valores de incerteza real. Por isso, realizamos para cada parâmetro ajustado 100 simulações de Monte Carlo, variando os parâmetros aleatoriamente entre 5 – 15 % partindo do melhor ajuste encontrado e assumimos como incerteza nas medidas o valor de  $1\sigma$  na dispersão de cada parâmetro. A tabela 6 sumariza as características estelares dos alvos encontrados.

A determinação dos valores tabelados para a Massa, Raio e Luminosidade das estrelas foi determinado em conjunto com o algoritmo Exofast (Eastman; Gaudi; Agol, 2013), que leva em conta as características orbitais do trânsito, restringindo o espaço de parâmetros para a determinação precisa da massa e do raio estelar utilizando para isso as relações de Torres, Andersen e Giménez (2010), construídas a partir de um conjunto de algumas centenas de estrelas que possuem parâmetros físicos determinados com incertezas



menores que 3%, e que são válidas para estrelas de sequência principal. Como pode ser visto na figura 15, os resultados para os parâmetros estelares concordam com os valores esperados para estrelas de massas similares e metalicidade solar calculadas com as trajetórias evolutivas dos modelos de Geneva (Schaller et al., 1992).

#### 6.4 Modelagem da curva de luz e determinação dos parâmetros físicos e orbitais

O Exofast é um conjunto de rotinas que podem ser usadas para ajustar simultaneamente trânsitos fotométricos e medidas de velocidade radial. A suíte que faz os ajustes de modelos de trânsitos utiliza as equações de Mandel e Agol (2002) e busca minimizar os resíduos utilizando uma abordagem MCMC (Markov Chain Monte Carlo). A rotina leva em conta os ajustes dos coeficientes de escurecimento do limbo, tanto lineares quanto quadráticos. De modo a produzir ajustes ótimos, o algoritmo ainda leva em conta o comprimento de onda médio em que a curva de luz foi registrada. A modelagem das curvas de velocidade radial fazem uso de uma rotina de minimização similar, utilizando o ajuste de órbitas keplerianas. Ambas as técnicas podem ser utilizadas em conjunto ou separadas.

**Tabela 6 - Parâmetros estelares obtidos a partir do algoritmo Exofast.**

| Parâmetro                              | CoRoT-32a              | ID 104848249           | ID 652345526           |
|--|------------------------|------------------------|------------------------|
| Massa ( $M_{\odot}$ ) . . . . .        | $1.08^{+0.08}_{-0.07}$ | $1.18^{+0.08}_{-0.07}$ | $1.41 \pm 0.09$        |
| Raio ( $R_{\odot}$ ) . . . . .         | $0.79^{+0.08}_{-0.09}$ | $1.22 \pm 0.09$        | $1.6 \pm 0.1$          |
| Luminosidade ( $L_{\odot}$ ) . . . . . | $0.7 \pm 0.2$          | $2.24 \pm 0.4$         | $4.75^{+0.9}_{-0.8}$   |
| Gravidade superficial (cgs) . . . . .  | $4.67^{+0.11}_{-0.08}$ | $4.21^{+0.07}_{-0.06}$ | $4.13^{+0.05}_{-0.07}$ |
| Temperatura efetiva (K) . . . . .      | $5970 \pm 100$         | $6410 \pm 100$         | $6860 \pm 100$         |
| Metalicidade . . . . .                 | $0.0 \pm 0.2$          | $-0.2 \pm 0.2$         | $0.0 \pm 0.2$          |
| Velocidade de Rotação (km/s)           | $3.2 \pm 1.0$          | $23 \pm 1$             | $21 \pm 1$             |
| Classe Espectral . . . . .             | G0VI                   | F7V                    | F4V                    |
| Magnitude na banda G . . . . .         | $14.108 \pm 0.003^b$   | $13.433 \pm 0.001^c$   | $12.870 \pm 0.001^c$   |

<sup>a</sup> As velocidades rotacionais foram calculadas com o algoritmo SME.

<sup>b</sup> Magnitudes obtidas do catálogo SDSS9 (Ahn et al., 2012).

<sup>c</sup> Magnitudes obtidas do catálogo Gaia (Gaia Collaboration et al., 2016b; Gaia Collaboration et al., 2016a).

Após a modelagem da variabilidade fotométrica e o isolamento do sinal de trânsito, utilizamos o algoritmo para determinar os parâmetros precisos do trânsito. Fizemos uso em alguns momentos do ajuste combinado, porém, dadas as características e escassez dos dados de velocimetria, optamos por fazer um estudo personalizado da presença da semi-amplitude induzida pelo planeta, ou não, utilizando e comparando diferentes abordagens estatísticas.

As medidas da velocidade radial dos alvos estudados foram obtidas em espaçamentos de tempo muito irregulares. Esse tipo de comportamento em séries temporais introduz picos espúrios no espectro de potência. A análise de frequências das medidas de velocidade radial foram feitas utilizando o algoritmo CLEANEST (Foster, 1996) e Period04 (Lenz; Breger, 2005). CLEANEST é uma técnica de análise eficaz para detectar sinais em séries temporais com espaçamento de tempo irregular. Ele usa estatísticas baseadas no periodograma modificado Lomb-Scargle (Scargle, 1982) e na transformada de Fourier discreta *date-compensated* (Ferraz-Mello, 1981). O espectro de potência segue uma distribuição  $\chi^2$  com um valor esperado de um e dois graus de liberdade por frequência ajustada.

O Period04 é uma ferramenta escrita em JAVa/C++ para buscar frequências em séries temporais astronômicas não equi-espaçadas e permite estimar as incertezas dos parâmetros ajustados por meio de simulações de Monte Carlo. Ambos os algoritmos forneceram resultados consistentes. Para atestar a presença de outras frequências realizamos um teste F. Esta estatística testa se a proporção da soma de resíduos ao quadrado diminui significativamente mais do que a variação relativa dos graus de liberdade de um modelo simples para um mais complexo.

A seguir, discutimos os alvos em detalhes e os resultados obtidos. Os parâmetros do sistema planetário foram calculados usando o algoritmo Exofast (Eastman; Gaudi; Agol, 2013) como explicado anteriormente.

## 6.5 O exoplaneta CoRoT-32b

O objeto CoRoT-32a – uma estrela com coordenadas  $\alpha = 06:40:46,843$  e  $\delta = +09:15:26,752$  – foi observada em dois *runs* durante a missão. Mais detalhes sobre os parâmetros estelares podem ser encontrados na tabela 6. As primeiras medidas foram realizadas no *Run* SRa01, durante o mês de março de 2008. O segundo levantamento foi feito durante a campanha SRa05, de novembro de 2011 a janeiro de 2012.

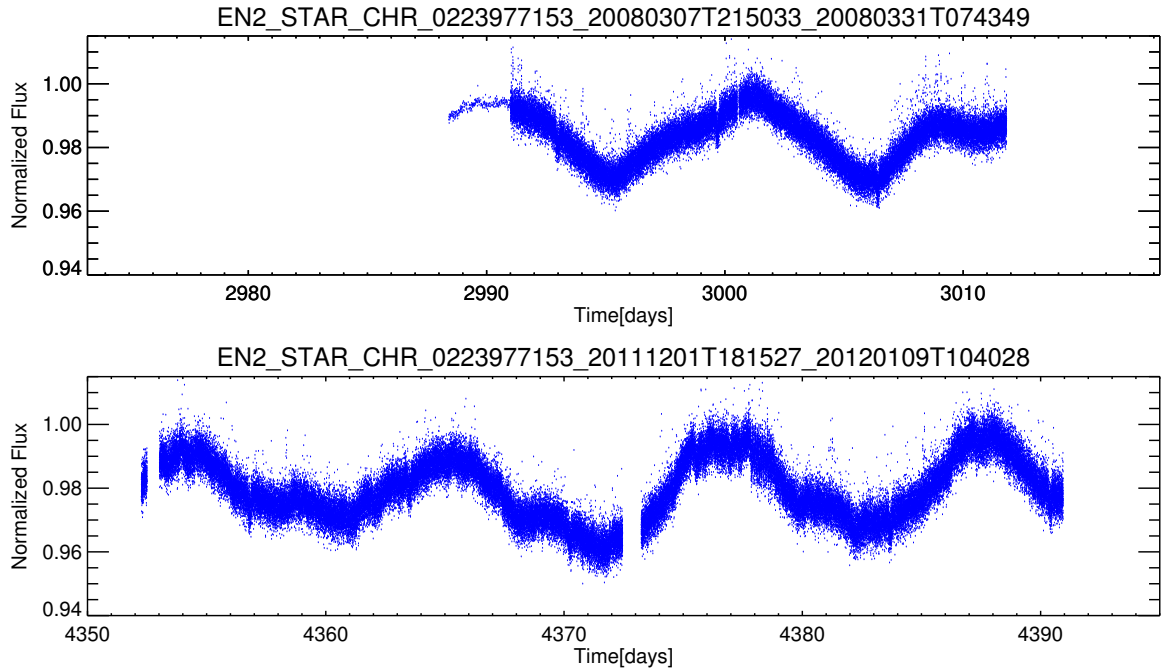
No que se refere à contaminação da máscara observada, é importante mencionar estudos anteriores. [Guenther et al. \(2013\)](#) realizaram medições de alta resolução angular e espectroscopia no infravermelho, mas não encontraram nenhuma estrela muito próxima ao alvo resolvida espacialmente. Em outro estudo, [Klagyivik et al. \(2013\)](#) fizeram uma pesquisa de variabilidade no campo CoRoT SRa01 e classificaram a estrela como uma variável Gamma Doradus de período  $0,915 \pm 0,005$  *dias* e amplitude  $0,015 \pm 0,008$  *mag*. Nós, entretanto, em nenhuma das duas curvas de luz fotométricas disponíveis fomos capazes de encontrar esse período e, em nossa análise espectral com o SME, utilizando espectros do HARPS, a classificamos como G0VI.

Para reforçar a análise de binárias eclipsantes diluídas no campo, analisamos a profundidade dos trânsitos nos três canais separadamente e comparamos as profundidades com todas as fontes do catálogo SDSS9 em sobreposição com a máscara da estrela. Medimos as profundidades dos trânsitos e encontramos para  $\Delta f$  os seguintes valores:  $0,0027 \pm 0,0004$  (vermelho),  $0,0029 \pm 0,0007$  (verde) e  $0,0028 \pm 0,0009$  (azul).

A figura 11 (a) mostra as fontes contaminantes presentes na máscara durante os dois *runs*. Transformamos as magnitudes para fluxo relativo e utilizamos a profundidade do trânsito como uma estimativa do que seria o limite de contaminação em magnitude aparente. Nesse caso, uma variação de fluxo de 0,3% define um limite de  $20,45 \pm 0,08$  *mag*. Nenhuma das fontes presentes na máscara foi suficientemente brilhante para, num evento de variabilidade ou binaridade, imitar o trânsito observado. A contaminação total em função da estrela, dentro da máscara, quando todas as contribuições são somadas, é de  $0,06 \pm 0,02$  %.

**Figura 16 - Curvas de luz do alvo CoRoT-32a.**

Superior: medidas do *Run* SRa01 realizadas durante março de 2008. Inferior: medições da campanha SRa05 de novembro de 2011 a janeiro de 2012.

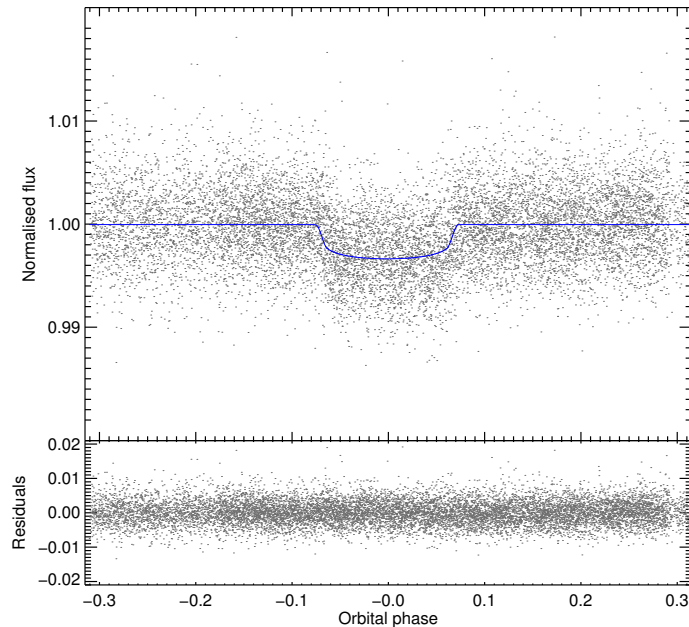


Esta estrela apresenta uma forte atividade no visível nas curvas de luz observada em ambas as épocas (veja figura 16). Uma modulação de  $\sim 11,4$  dias nos dados fotométricos é melhor explicada como tendo origem na rotação estelar. Quando estudamos os dados espectroscópicos, a mesma frequência de rotação é encontrada nas medidas de velocidade radial. O valor de  $v_{\text{sen}}(i)$  espectroscópico encontrado pelo algoritmo SME resultou em  $3,2 \pm 1,0$  km/s. Quando tomamos em conta os parâmetros físicos determinados para esta estrela, com raio estimado em  $0,79^{+0,08}_{-0,09} R_{\odot}$ , o período de rotação (supondo  $i = 90^{\circ}$ ) encontrado é de  $14 \pm 6$  dias. Em acordo com a determinação espectroscópica e dentro do erro  $1\sigma$  do período de rotação fotométrico encontrado.

Assumindo que esta rotação é de origem estelar, modelamos essa frequência até o segundo harmônico e a subtraímos dos dados de velocidade radial como sugerido por (Boisse et al., 2011), levando em consideração a diferença de fase em cada conjunto de dados. As primeiras 8 medições para esta estrela são separadas por 692 dias das últimas 13 medidas. Assim, é razoável assumir que a configuração das manchas estelares seja

### Figura 17 - Fase orbital do exoplaneta CoRoT-32b.

No painel superior os trânsitos estão dobrados na fase do período. A linha azul mostra o melhor ajuste obtido a partir dos parâmetros físicos calculados. No painel inferior, os resíduos do modelo.



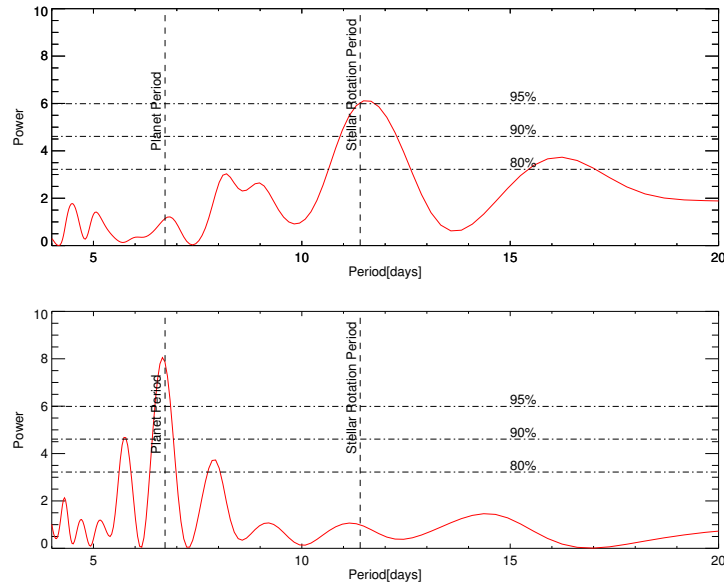
diferente em cada conjunto, o que tornará a amplitude e a fase diferentes para a rotação. Observamos esse comportamento nas fases ao fazer o espectro de potência individual para cada um dos dois conjuntos de dados. Outro indicativo é que o período de rotação encontrado nas medidas de fotometria também tem fases diferentes.

Fizemos então um ajuste de mínimos quadrados de maneira simultânea em ambos os conjuntos de dados fixando o período de rotação, mas diferentes fases e amplitudes, com uma única fase e amplitude para o segundo período (trânsito) presente nos dados fotométricos, também levando em conta a velocidade sistêmica adicionando uma constante.

A figura 18 mostra, no painel superior, o espectro CLEANEST das 21 medidas de velocidade radial da estrela CoRoT-32a. Os períodos rotacional e planetário são mostrados em linhas tracejadas verticais e os níveis significativos são mostrados em linhas horizontais tracejadas. O período de rotação apareceu como mais de 95% de significância no espectro de potência CLEANEST. A precisão encontrada nesta frequência concorda com as medidas fotométricas dentro de três algarismos significativos.

Para testar se de fato as frequências estão associadas à atividade da estrela, obser-

**Figura 18 - Análise das medidas de velocidade radial com o espectro CLEANEST.** Superior: espectro CLEANEST das 21 medidas de velocidade radial da estrela CoRoT-32a. A rotação e o período do planeta são mostrados em linhas tracejadas verticais e os níveis significativos são mostrados em linhas horizontais tracejadas. O período de rotação apareceu como mais de 95% de significância no espectro de potência. Inferior: espectro residual após subtrair o sinal de rotação resultante do nosso ajuste de mínimos quadrados às medidas de velocidade radial. O mesmo período de  $\sim 6,7$  dias encontrado nas medidas fotométricas aparece com 98% de significância no espectro de potência.



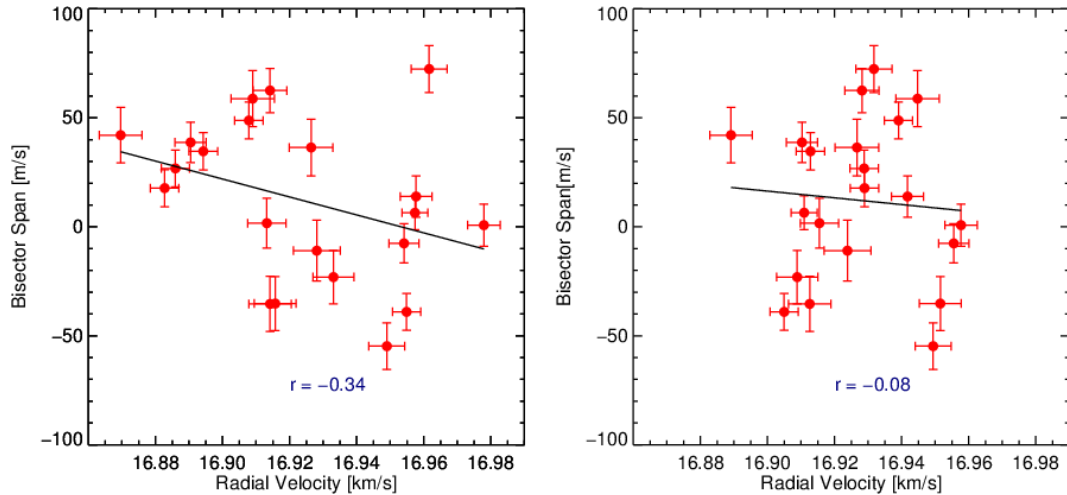
vamos o comportamento do espalhamento do bissetor. Um forte indicador de atividade originada da estrela é a anti-correlação observada quando o espalhamento do bissetor é plotado em função das medidas de velocidade radial (painel esquerdo da figura 19). Ao subtrairmos a frequência principal e seus harmônicos observa-se a redução na anti-correlação, mostrando que de fato estamos subtraindo a informação introduzida pela rotação da estrela, que é ativa, nas medidas de velocidade radial.

O painel inferior na figura 18 mostra o espectro residual CLEANEST depois de subtrair o sinal de rotação resultante do nosso ajuste de mínimos quadrados às medições de velocidade radial. O mesmo período de  $\sim 6,7$  dias encontrado nas medidas fotométricas aparece com 98% de significância no espectro potência CLEANEST. Também subtraímos o sinal de rotação do gráfico do espalhamento do bissetor para mostrar a redução na anti-correlação (painel direito da figura 19).

Embora o resultado obtido com o espectro CLEANEST seja estatisticamente signi-

**Figura 19 - Espalhamento do bissetor para as medidas de CoRoT-32a.**

À esquerda: anti-correlação entre o espalhamento do bissetor e as medidas de velocidade radial indicando que as medidas são afetadas por atividade estelar. À direita: o mesmo gráfico depois de subtrair um modelo rotacional estelar.



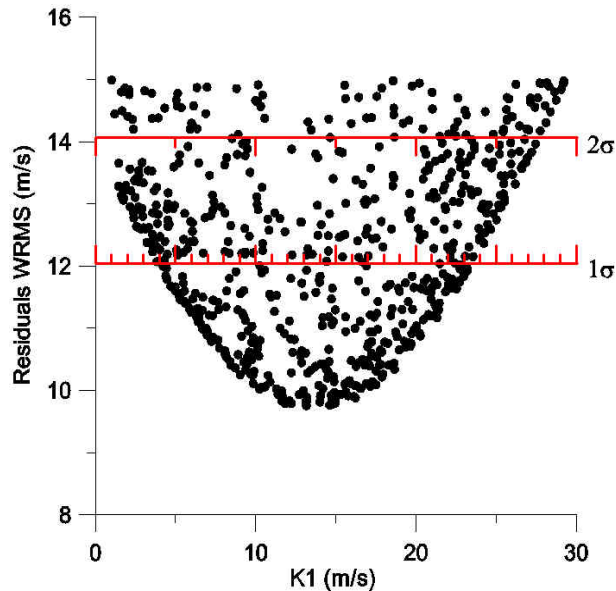
ficativo, testamos sua significância analisando a propagação nos resíduos ponderados dada a hipótese da presença de um planeta (*cf.* Beaugé, Ferraz-Mello e Michtchenko (2012)). Nós realizamos  $10^6$  simulações de Monte Carlo para comparar o melhor resíduo ponderado para dois modelos: (a) apenas a modulação rotacional devido à atividade estelar está presente nos dados de velocidade radial e (b) modulação rotacional mais a atração gravitacional de um planeta. Neste teste, usamos apenas o último conjunto de observações HARPS (13 medidas) para maximizar os graus de liberdade, descartando as diferenças de amplitude rotacional e fase entre os dois conjuntos de dados.

A análise levou em consideração o tempo dos trânsitos e os períodos determinados a partir da fotometria e utilizamos apenas a frequência rotacional fundamental. Antes do teste, um estudo sobre a excentricidade orbital também foi feito e, em função da falta de dados, é igualmente provável ter valores de  $e = 0$  até valores  $e = 0,2$ . Assim, assumimos um modelo orbital circular mais simples. A melhor solução encontrada para o modelo  $a$  minimizou a solução em torno de  $13,8 m/s$ . Quando comparamos os resultados com  $b$  vemos uma redução nos resíduos cair para  $9,4 m/s$ . A melhoria observada fica próxima de  $2\sigma$ , o que nos daria uma probabilidade de falso alarme não muito distante de  $4,5\%$ .

Na figura 21 mostramos as medidas de velocidade radial e a melhor solução orbi-

**Figura 20 - Resíduo ponderado para o caso de modulação rotacional com a presença de um planeta.**

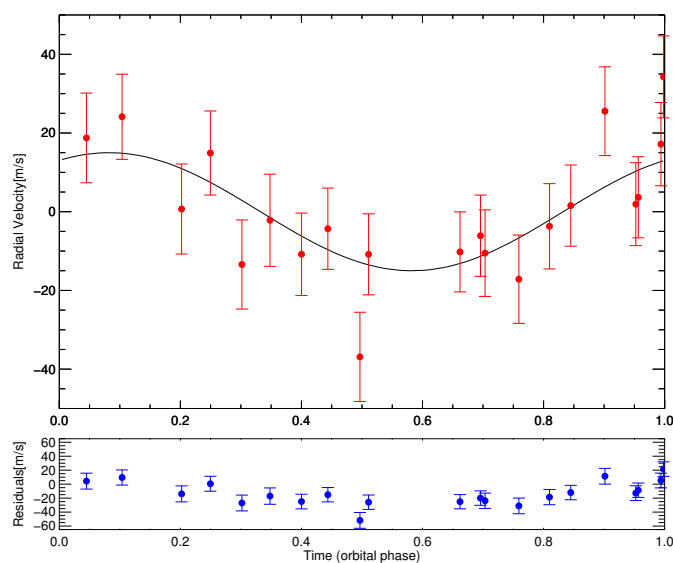
Velocidade de semi-amplitude versus o resíduo ponderado: distribuição dos resultados obtidos com as simulações de Monte Carlo supondo um modelo composto por rotação estelar e a presença de um planeta. O modelo composto unicamente pela frequência contendo a rotação estelar minimiza os resíduos (wrms) em torno de  $13,8\text{m/s}$ . A inclusão do planeta no modelo minimiza o wrms em  $9,4\text{m/s}$ , o que corresponde a uma melhora próxima de  $2\sigma$ .



Fonte: comunicação particular de Dr. Sylvio Ferraz-Mello.

**Figura 21 - Curva de velocidade radial para o CoRoT-32b.**

Painel superior: melhor solução para as medidas de velocidade radial do CoRoT-32b após a subtração do período de rotação e seus dois primeiros harmônicos (ver tabela 7). Painel inferior: resíduos após a subtração do modelo.





tal. Um planeta gigante quente foi encontrado em torno da estrela. A tabela 7 mostra os parâmetros planetários calculados com o algoritmo Exofast. A velocidade de semi-amplitude do planeta encontrada com erros realistas é de  $14 \pm 10 \text{ m/s}$  e corresponde a um companheiro orbital com  $0,15 \pm 0,1 M_J$  e raio  $0,57^{+0,06}_{-0,05} R_J$ , com um período orbital de  $6,71837 \pm 0,00001$  dias encontrados tanto nas medidas fotométricas quanto espectroscópicas.

A alta precisão da determinação do período se deve ao fato de que os dois conjuntos de dados permitiram o ajuste ao modelo de trânsitos dentro de um intervalo de mais de 200 órbitas. A figura 17 mostra a curva de luz dobrada em fase para a estrela CoRoT-32a. O planeta orbita sua estrela hospedeira, que tem massa comparável ao nosso Sol, em um semieixo maior menor que a órbita de Mercúrio.

## 6.6 CoRoT ID 104848249

A figura 23 mostra a curva de luz dobrada em fase para o CoRoT ID 104848249, observado durante as campanhas LRc05 e LRc06. A estrela tem coordenadas  $\alpha = 18:37:11,798$  e  $\delta = +04:55:42,726$  e sua magnitude aparente na banda R é 13,7. O período de observação na fotometria é de 168,3 dias, com um curto intervalo de interrupção, e ocorreu de abril a setembro de 2010.

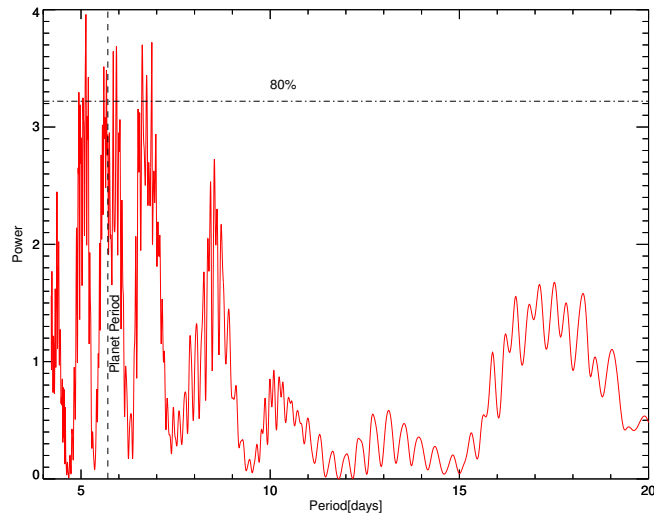
A análise separada dos trânsitos nos três canais para avaliar a contaminação da máscara revelou profundidades de  $0,0025 \pm 0,0001$  (vermelho),  $0,0025 \pm 0,0002$  (verde) e  $0,0028 \pm 0,0002$  (azul). Usando a informação de fotometria da missão Gaia, estimamos o limite de contaminação para esta profundidade de trânsito em  $19,74 \pm 0,04 \text{ mag}$  na banda G.

A figura 11 (b) mostra dois contaminantes dentro da máscara durante *Run* LRc05 e um contaminante durante a execução do *Run* LRc06. Ambos os casos são, em termos de brilho, próximos à borda limite de contaminação, bem como localizados nas extremidades do canal azul. Uma comparação entre as profundidades dos trânsitos e suas incertezas

Tabela 7 - Parâmetros planetários para os sistemas CoRoT-32b, CoRoT ID 104848249 e CoRoT ID 652345526.

| Parâmetro                                | Unidade   | CoRoT-32b                       | 104848249 cand.         | 652345526 cand.           |
|--|---|---------------------------------|-------------------------|---------------------------|
| <b>Parâmetros Planetários:</b>           |   |                                 |                         |                           |
| $P$                                      | Período (dias)  | $6,71837 \pm 0,00001$           | $5,70852 \pm 0,00007$   | $5,61618 \pm 0,00004$     |
| $a$                                      | Semieixo maior ( $ua$ )                                       | $0,071 \pm 0,001$               | $0,066 \pm 0,001$       | $0,069 \pm 0,002$         |
| $M_P$                                    | Massa ( $M_J$ )   | $0,15 \pm 0,10$                 |                         |                           |
| $R_P$                                    | Raio ( $R_J$ )  | $0,57^{+0,06}_{-0,05}$          | $0,65 \pm 0,06$         | $1,4 \pm 0,1$             |
| $\rho_P$                                 | Densidade (cgs)   | $1,1^{+1,3}_{-0,8}$             |                         |                           |
| $\log(gp)$                               | Gravidade superficial   | $3,1^{+0,6}_{-0,3}$             |                         |                           |
| $T_{eq}$                                 | Temperatura de equilíbrio (K)                                 | $938^{+65}_{-52}$               | $1330 \pm 49$           | $1560 \pm 65$             |
| $\langle F \rangle$                      | Fluxo incidente ( $10^9 \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ ) | $0,18^{+0,05}_{-0,04}$          | $0,7 \pm 0,1$           | $1,4 \pm 0,2$             |
| <b>Parâmetros de Velocidade Radial:</b>  |   |                                 |                         |                           |
| $K$                                      | Velocidade radial (m/s)                                       | $14 \pm 10$                     |                         |                           |
| <b>Parâmetros de trânsito primário:</b>  |   |                                 |                         |                           |
| $T_C$                                    | Época do trânsito (BJD)                                       | $2455901,811^{+0,002}_{-0,001}$ | $2455299,387 \pm 0,001$ | $2455662,5203 \pm 0,0004$ |
| $R_P/R_*$                                | Raio do planeta em raios estelares                            | $0,054 \pm 0,002$               | $0,0552 \pm 0,0009$     | $0,095 \pm 0,002$         |
| $u_1$                                    | coef. linear de esc. do limbo                                 | $0,35 \pm 0,05$                 | $0,29 \pm 0,05$         | $0,22 \pm 0,05$           |
| $u_2$                                    | coef. quad. de esc. do limbo                                  | $0,28 \pm 0,05$                 | $0,29 \pm 0,05$         | $0,30 \pm 0,05$           |
| $i$                                      | Inclinação (graus)  | $89,0 \pm 0,5$                  | $87,9 \pm 0,2$          | $87,4^{1,0}_{-0,7}$       |
| $b$                                      | Parâmetro de impacto  | $0,4^{+0,1}_{-0,2}$             | $0,43 \pm 0,02$         | $0,44^{+0,08}_{-0,14}$    |
| $\delta$                                 | Profundidade do trânsito                                      | $0,0029 \pm 0,0002$             | $0,0030 \pm 0,0001$     | $0,0091 \pm 0,0003$       |
| $\tau$                                   | Duração do ingresso/egresso (dias)                            | $0,006 \pm 0,001$               | $0,010 \pm 0,001$       | $0,020 \pm 0,003$         |
| $T_{14}$                                 | Duração total (dias)  | $0,104^{+0,009}_{-0,007}$       | $0,151 \pm 0,009$       | $0,187 \pm 0,006$         |
| <b>Parâmetros do eclipse secundário:</b> |   |                                 |                         |                           |
| $T_S$                                    | Época do eclipse (BJD)  | $2455905,170^{+0,002}_{-0,001}$ | $2455302,240 \pm 0,001$ | $2455665,3284 \pm 0,0004$ |

**Figura 22 - Análise das medidas de velocidade radial com o espectro CLEANEST.** Espectro CLEANEST de 11 medidas de velocidade radial para o CoRoT ID 104848249. O período fotométrico é mostrado em linhas tracejadas verticais e os níveis significativos são mostrados em linhas horizontais tracejadas.



sugere fortemente que eles são realmente originários da estrela alvo deixando pouco espaço para o caso de uma contaminação de fundo. A contaminação total dentro da máscara como uma função da estrela alvo é estimada em  $0,9 \pm 0,4\%$  no *Run* LRc05 e  $0,7 \pm 0,3\%$  no *Run* LRc06.

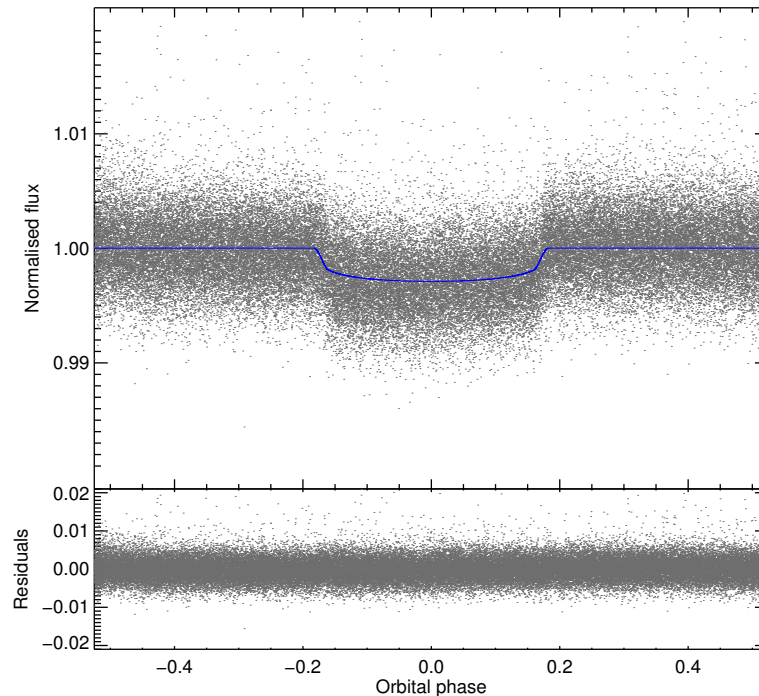
Os parâmetros de melhor ajuste para o modelo de trânsito estão listados na tabela 7. O candidato tem um período de  $5,70852 \pm 0,00007$  dias e, utilizando os parâmetros estelares, determinamos um raio de  $0,65 \pm 0,06 R_J$  com semieixo maior de  $0,066 \pm 0,001$  ua.

Onze medidas de velocidade radial estavam disponíveis no *ESO Science Archive Facility*, totalizando uma cobertura de 467,7 dias. A figura 22 mostra o espectro CLEANEST das medidas de velocidade radial para esta estrela. O espectro de potência é dominado pela função da janela. O período fotométrico de 5,7 dias aparece no espectro CLEANEST entre um grupo de frequências onde o pico mais forte tem mais de 80% de significância.

O intervalo máximo de semi amplitude encontrado nos dados é de cerca de  $660$  m/s e pode indicar a presença de um companheiro de até  $6 M_J$ . A ausência de anti-correlação entre o espalhamento do bissetor e a velocidade radial não sugere uma atividade este-

**Figura 23 - A curva de luz dobrada em fase para o CoRoT ID 104848249.**

No painel superior os trânsitos estão dobrados na fase do período. A linha azul mostra o melhor ajuste obtido a partir dos parâmetros físicos calculados. No painel inferior, os resíduos do modelo.



lar perturbadora nos dados de velocidade radial. Mais medições são necessárias para confirmar sem margem de dúvida a natureza do trânsito.

## 6.7 CoRoT ID 652345526

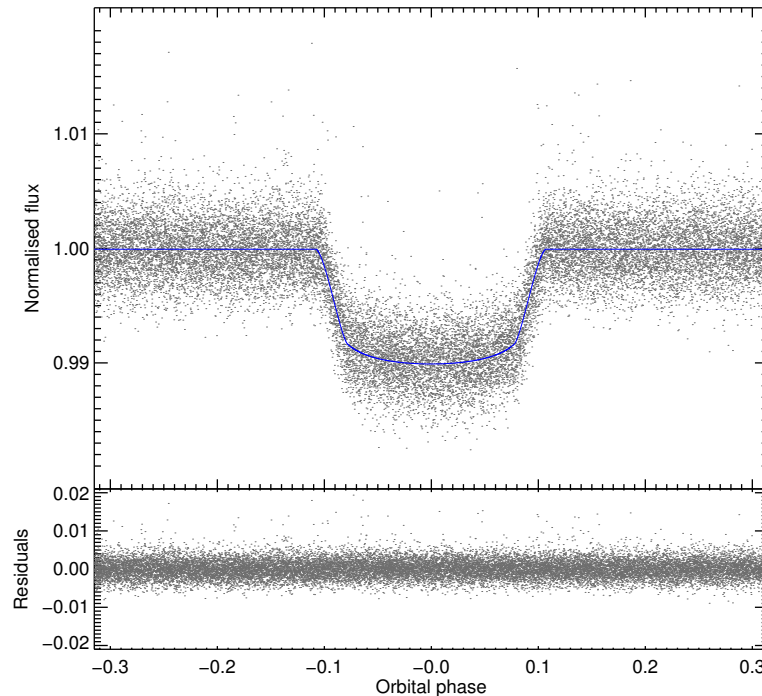
A fotometria para este alvo foi tomada durante *Run* LRC07 nas coordenadas  $\alpha = 18:31:00,241$  e  $\delta = +07:11:00,125$ . É uma estrela fraca com magnitude aparente na banda R de 13,0 e quinze trânsitos foram observados durante esta cobertura temporal.

A análise de trânsito nas três cores é bastante consistente. Medimos uma profundidade de  $0,0086 \pm 0,0006$  no canal vermelho,  $0,009 \pm 0,001$  no canal verde e  $0,008 \pm 0,001$  no canal azul. Do catálogo Gaia, a magnitude na banda G é de  $12,870 \pm 0,001$ , e um limite estimado de contaminação de  $17,97 \pm 0,04$  mag.

A figura 11 (c) mostra dois contaminantes dentro da máscara observada com um caso (objeto 2) onde a magnitude medida se sobrepõe ao limite de contaminação. Mas o

**Figura 24 - A curva de luz dobrada em fase para o CoRoT ID 652345526.**

No painel superior os trânsitos estão dobrados na fase do período. A linha azul mostra o melhor ajuste obtido a partir dos parâmetros físicos calculados. No painel inferior, os resíduos do modelo.



nível de incerteza, uma ordem de magnitude menor, encontrado na dispersão do sinal de trânsito no canal vermelho antagoniza o fato de que a maior parte do sinal seja oriunda do canal azul. A quantidade de fluxo contaminante dentro da máscara como uma função da estrela alvo é estimada em  $1,0 \pm 0,6\%$ .

O período encontrado para este candidato é de  $5,61618 \pm 0,00004$  dias. Tem  $1,4 \pm 0,1 R_J$  e orbita sua estrela mãe a uma distância de  $0,069 \pm 0,002$  ua. A figura 24 mostra a curva de luz dobrada em fase e os resíduos do modelo ajustado. Mais informações sobre os parâmetros de trânsito e complemento são dadas na tabela 7. Apenas seis medidas de velocidade radial estavam disponíveis no *ESO Science Archive Facility*, cobrindo um intervalo de 21,9 dias para esta estrela. Não poderíamos tirar mais conclusões sobre a natureza do candidato. Além disso, não vimos fortes indícios de atividade estelar dada a velocidade de rotação estelar.

## 7 CONCLUSÃO

Nessa tese fizemos um estudo do processo de detecção e confirmação de exoplanetas. Desenvolvemos uma modificação em um algoritmo de correção de mudanças súbitas em curvas de luz cromáticas do satélite CoRoT (Convection, Rotation and planetary Transits). Por meio de estatísticas robustas e um melhor manejo da variabilidade de curto prazo, mostramos que nossa implementação diminui as variações sistemáticas de curvas de luz e melhora a probabilidade de detecção de exoplanetas quando comparado ao algoritmo original. Todas as curvas de luz cromáticas do satélite CoRoT (um total de 65.655) foram analisadas nessa tese com nosso algoritmo. A totalidade dos exoplanetas CoRoT em curvas cromáticas anteriormente publicados, foram redescobertos e dezenas de novos candidatos de trânsito foram encontrados. Onze dos nossos candidatos possuíam medições espectroscópicas das estrelas hospedeiras e foram recuperados do *ESO Science Archive Facility*. Calculamos os parâmetros estelares para três das estrelas hospedeiras candidatas que possuíam um número maior de observações espectroscópicas utilizando o pacote *Spectroscopy Made Easy* e, dentre eles, as medidas de velocidade radial permitiram confirmar um novo exoplaneta.

O candidato CoRoT ID 104848249 tem período de  $5.70852 \pm 0.00007$  e orbita uma estrela anã com  $1,22 \pm 0,09 R_{\odot}$ . O candidato CoRoT ID 652345526 tem período orbital de  $5,61618 \pm 0,00004$  dias no entorno de uma estrela F4V com  $1,6 \pm 0,1 R_{\odot}$ . Tanto o CoRoT ID 104848249 quanto o CoRoT ID 652345526 precisam de mais medidas de velocidade radial para confirmar a real natureza de seus trânsitos. Um novo planeta gigante e quente, CoRoT-32b, foi encontrado em torno de uma estrela ativa. Com um período de  $6,71837 \pm 0,00001$  dias ele possui massa de  $0,15 \pm 0,10 M_J$  e raio de  $0,57^{+0,06}_{-0,05} R_J$ . Esta estrela foi observada em dois *Runs* do CoRoT: SRa01 e SRa05.

## REFERÊNCIAS

- Abe, F. et al. The Moa Project. In: Ferlet, R.; Maillard, J.-P.; Raban, B. (Ed.). *Variables Stars and the Astrophysical Returns of the Microlensing Surveys*. [S.l.: s.n.], 1997. p. 75.
- Absil, O.; Mawet, D. Formation and evolution of planetary systems: the impact of high-angular resolution optical techniques. *A&A Rev.*, v. 18, p. 317–382, jul. 2010.
- Ahn, C. P. et al. The Ninth Data Release of the Sloan Digital Sky Survey: First Spectroscopic Data from the SDSS-III Baryon Oscillation Spectroscopic Survey. *ApJS*, v. 203, p. 21, dez. 2012.
- Aigrain, S.; Irwin, M. Practical planet prospecting. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 350, p. 331–345, maio 2004.
- Aigrain, S. et al. Noise properties of the CoRoT data. A planet-finding perspective. *Astronomy & Astrophysics*, v. 506, p. 425–429, out. 2009.
- Almenara, J. M. et al. Transiting exoplanets from the CoRoT space mission. XXIV. CoRoT-25b and CoRoT-26b: two low-density giant planets. *A&A*, v. 555, p. A118, jul. 2013.
- Alonso, R. et al. The secondary eclipse of CoRoT-1b. *A&A*, v. 506, p. 353–358, out. 2009.
- Alonso, R. et al. Transiting exoplanets from the CoRoT space mission. II. CoRoT-Exo-2b: a transiting planet around an active G star. *A&A*, v. 482, p. L21–L24, maio 2008.
- Alonso, R. et al. Transiting exoplanets from the CoRoT space mission. XXVI. CoRoT-24: a transiting multiplanet system. *Astronomy & Astrophysics*, v. 567, p. A112, jul. 2014.
- Anglada-Escudé, G. et al. A terrestrial planet candidate in a temperate orbit around Proxima Centauri. *Nature*, v. 536, p. 437–440, ago. 2016.
- Auvergne, M. COROT-high-precision stellar photometry on a low Earth orbit: solutions to minimize environmental perturbations. *Proceedings of SPIE*, v. 15, p. 170–180, feb 2003. ISSN 0277786X.
- Auvergne, M. et al. The CoRoT satellite in flight: description and performance. *A&A*, v. 506, p. 411–424, out. 2009.
- Baştürk, Ö. et al. Bisectors of the HARPS cross-correlation function. The dependence on stellar atmospheric parameters. *A&A*, v. 535, p. A17, nov. 2011.
- Baglin, A. et al. CoRoT: a high precision photometer for stellar evolution and exoplanet finding. In: *36th COSPAR Scientific Assembly*. [S.l.: s.n.], 2006. (COSPAR Meeting, v. 36), p. 3749.
- Baglin, A.; Chaintreuil, S.; Vandermarcq, O. II.1 The CoRoT observations. In: \_\_\_\_\_. *The CoRoT Legacy Book: The Adventure of the Ultra High Precision Photometry from Space*. [S.l.: s.n.], 2016. p. 29.

- Ballot, J. et al. Accurate p-mode measurements of the G0V metal-rich CoRoT target HD 52265. *A&A*, v. 530, p. A97, jun. 2011.
- Barge, P. et al. Transiting exoplanets from the CoRoT space mission. I. CoRoT-Exo-1b: a low-density short-period planet around a G0V star. *A&A*, v. 482, p. L17–L20, maio 2008.
- Barge, P. et al. Photometric Search for Transiting Planets. In: Fridlund, M. et al. (Ed.). *The CoRoT Mission Pre-Launch Status - Stellar Seismology and Planet Finding*. [S.l.: s.n.], 2006. (ESA Special Publication, v. 1306), p. 83.
- Beatty, T. G.; Gaudi, B. S. Predicting the Yields of Photometric Surveys for Transiting Extrasolar Planets. *ApJ*, v. 686, p. 1302–1330, out. 2008.
- Beaugé, C.; Ferraz-Mello, S.; Michtchenko, T. A. Multi-planet extrasolar systems – detection and dynamics. *Research in Astronomy and Astrophysics*, v. 12, p. 1044–1080, ago. 2012.
- Bodin, P. The CoRoT Instrument. In: Fridlund, M. et al. (Ed.). *The CoRoT Mission Pre-Launch Status - Stellar Seismology and Planet Finding*. [S.l.: s.n.], 2006. (ESA Special Publication, v. 1306), p. 153.
- Boisse, I. et al. Disentangling between stellar activity and planetary signals. *A&A*, v. 528, p. A4, abr. 2011.
- Bonomo, A. S. et al. Detection of Neptune-size planetary candidates with CoRoT data. Comparison with the planet occurrence rate derived from Kepler. *A&A*, v. 547, p. A110, nov. 2012.
- Bonomo, A. S. et al. Transiting exoplanets from the CoRoT space mission. X. CoRoT-10b: a giant planet in a 13.24 day eccentric orbit. *A&A*, v. 520, p. A65, set. 2010.
- Bordé, P. et al. Transiting exoplanets from the CoRoT space mission. XI. CoRoT-8b: a hot and dense sub-Saturn around a K1 dwarf. *A&A*, v. 520, p. A66, set. 2010.
- Borucki, W. J. et al. Kepler Planet-Detection Mission: Introduction and First Results. *Science*, v. 327, p. 977, fev. 2010.
- Borucki, W. J. et al. Characteristics of Planetary Candidates Observed by Kepler. II. Analysis of the First Four Months of Data. *The Astrophysical Journal*, v. 736, p. 19, jul. 2011.
- Borucki, W. J. et al. The Kepler mission: a wide-field-of-view photometer designed to determine the frequency of Earth-size planets around solar-like stars. In: Blades, J. C.; Siegmund, O. H. W. (Ed.). *Future EUV/UV and Visible Space Astrophysics Missions and Instrumentation*. [S.l.: s.n.], 2003. (Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series, v. 4854), p. 129–140.
- Bouchy, F. et al. Transiting exoplanets from the CoRoT space mission. XV. CoRoT-15b: a brown-dwarf transiting companion. *A&A*, v. 525, p. A68, jan. 2011.
- Bouchy, F.; Pepe, F.; Queloz, D. Fundamental photon noise limit to radial velocity measurements. *A&A*, v. 374, p. 733–739, ago. 2001.



- Bouffeur, R. C. et al. A modified CoRoT detrend algorithm and the discovery of a new planetary companion. *MNRAS*, v. 473, p. 710–720, jan. 2018.
- Brown, T. M. Expected Detection and False Alarm Rates for Transiting Jovian Planets. *ApJ*, v. 593, p. L125–L128, ago. 2003.
- Cabrera, J. et al. Transiting exoplanets from the CoRoT space mission . XIII. CoRoT-13b: a dense hot Jupiter in transit around a star with solar metallicity and super-solar lithium content. *A&A*, v. 522, p. A110, nov. 2010.
- Cabrera, J. et al. Transiting exoplanets from the CoRoT space mission. XXVII. CoRoT-28b, a planet orbiting an evolved star, and CoRoT-29b, a planet showing an asymmetric transit. *A&A*, v. 579, p. A36, jul. 2015.
- Cabrera, J. et al. Planetary transit candidates in CoRoT-LRc01 field. *Astronomy & Astrophysics*, v. 506, p. 501–517, out. 2009.
- Cameron, A. C. Extrasolar Planetary Transits. *Methods of Detecting Exoplanets: 1st Advanced School on Exoplanetary Science*, v. 428, p. 89, 2016.
- Carone, L. et al. Planetary transit candidates in the CoRoT LRa01 field. *Astronomy & Astrophysics*, v. 538, p. A112, fev. 2012.
- Carpano, S. et al. Planetary transit candidates in Corot-IRa01 field. *Astronomy & Astrophysics*, v. 506, p. 491–500, out. 2009.
- Carroll, B. W.; Ostlie, D. A. *An Introduction to Modern Astrophysics*. [S.l.: s.n.], 1996.
- Claudi, R. Direct Imaging of Faint Companions. *Methods of Detecting Exoplanets: 1st Advanced School on Exoplanetary Science*, v. 428, p. 183, 2016.
- Csizmadia, S. et al. Transiting exoplanets from the CoRoT space mission. XXVIII. CoRoT-33b, an object in the brown dwarf desert with 2:3 commensurability with its host star. *Astronomy & Astrophysics*, v. 584, p. A13, dez. 2015.
- Csizmadia, S. et al. Transiting exoplanets from the CoRoT space mission. XVII. The hot Jupiter CoRoT-17b: a very old planet. *A&A*, v. 531, p. A41, jul. 2011.
- Cumming, A.; Marcy, G. W.; Butler, R. P. The Lick Planet Search: Detectability and Mass Thresholds. *ApJ*, v. 526, p. 890–915, dez. 1999.
- De Oliveira Fialho, F. et al. Jitter Correction Algorithms for the COROT Satellite Mission: Validation with Test Bench Data and MOST On-Orbit Photometry. *PASP*, v. 119, p. 337–346, mar. 2007.
- Deeg, H. J. et al. A transiting giant planet with a temperature between 250K and 430K. *Nature*, v. 464, p. 384–387, mar. 2010.
- Deleuil, M. et al. Transiting exoplanets from the CoRoT space mission. XX. CoRoT-20b: A very high density, high eccentricity transiting giant planet. *A&A*, v. 538, p. A145, fev. 2012.

- Deleuil, M. et al. Transiting exoplanets from the CoRoT space mission . VI. CoRoT-Exo-3b: the first secure inhabitant of the brown-dwarf desert. *Astronomy & Astrophysics*, v. 491, p. 889–897, dez. 2008.
- Deleuil, M. et al. Exo-Dat: An Information System in Support of the CoRoT/Exoplanet Science. *AJ*, v. 138, p. 649–663, ago. 2009.
- Deleuil, M. et al. III.1 Transit features detected by the CoRoT/Exoplanet Science Team. In: \_\_\_\_\_. *The CoRoT Legacy Book: The Adventure of the Ultra High Precision Photometry from Space*. [S.l.: s.n.], 2016. p. 117.
- Demianski, M.; Proszynski, M. Does PSR0329 plus 54 have companions. *Nature*, v. 282, p. 383–385, nov. 1979.
- Eastman, J.; Gaudi, B. S.; Agol, E. EXOFAST: A Fast Exoplanetary Fitting Suite in IDL. *PASP*, v. 125, p. 83, jan. 2013.
- Elsner, J. B.; Tsonis, A. A. *Singular Spectrum Analysis: A new tool in Time Series Analysis*. 1. ed. [S.l.]: Springer US, 1996.
- Emilio, M. et al. Photometric variability of the Be star CoRoT-ID 102761769. *Astronomy & Astrophysics*, v. 522, p. A43, nov. 2010.
- Erikson, A. et al. Planetary transit candidates in the CoRoT-SRc01 field. *Astronomy & Astrophysics*, v. 539, p. A14, mar. 2012.
- Evans, T. M.; Sackett, P. D. An a Priori Investigation of Astrophysical False Positives in Ground-Based Transiting Planet Surveys. *ApJ*, v. 712, p. 38–51, mar. 2010.
- Ferraz-Mello, S. Estimation of Periods from Unequally Spaced Observations. *AJ*, v. 86, p. 619, abr. 1981.
- Figueira, P. et al. Line-profile variations in radial-velocity measurements. Two alternative indicators for planetary searches. *A&A*, v. 557, p. A93, set. 2013.
- Fischer, D. A. et al. State of the Field: Extreme Precision Radial Velocities. *PASP*, v. 128, n. 6, p. 066001, jun. 2016.
- Foster, G. Time Series Analysis by Projection. I. Statistical Properties of Fourier Analysis. *AJ*, v. 111, p. 541, jan. 1996.
- Fressin, F. et al. The False Positive Rate of Kepler and the Occurrence of Planets. *The Astrophysical Journal*, v. 766, p. 81, abr. 2013.
- Fridlund, M. et al. The Search for Worlds Like Our Own. *Astrobiology*, v. 10, p. 5–17, jan. 2010.
- Fruth, T. et al. Improved Variable Star Search in Large Photometric Data Sets: New Variables in CoRoT Field LRA02 Detected by BEST II. *AJ*, v. 143, p. 140, jun. 2012.
- Gaia Collaboration et al. Gaia Data Release 1. Summary of the astrometric, photometric, and survey properties. *A&A*, v. 595, p. A2, nov. 2016.
- Gaia Collaboration et al. The Gaia mission. *A&A*, v. 595, p. A1, nov. 2016.

- Gandolfi, D. et al. Doppler tomography of transiting exoplanets: a prograde, low-inclined orbit for the hot Jupiter CoRoT-11b. *A&A*, v. 543, p. L5, jul. 2012.
- Gaudi, B. S. Microlensing Surveys for Exoplanets. *ARA&A*, v. 50, p. 411–453, set. 2012.
- Gaulme, P. et al. HD 46375: seismic and spectropolarimetric analysis of a young Sun hosting a Saturn-like planet. *A&A*, v. 524, p. A47, dez. 2010.
- GHIL, M. et al. Advanced Spectral Methods for Climatic Time Series. *Reviews of Geophysics*, v. 40, n. 1, p. 1003, 2002.
- Gillon, M. et al. Seven temperate terrestrial planets around the nearby ultracool dwarf star TRAPPIST-1. *Nature*, v. 542, p. 456–460, fev. 2017.
- Gillon, M. et al. The TRAPPIST survey of southern transiting planets. I. Thirty eclipses of the ultra-short period planet WASP-43 b. *A&A*, v. 542, p. A4, jun. 2012.
- Green, J. et al. Wide-Field InfraRed Survey Telescope (WFIRST) Final Report. *ArXiv e-prints*, ago. 2012.
- Grotzsch-Noels, A.; Deheuvels, S. IV.1 Insights on the internal structure of stars as provided by seismology. In: \_\_\_\_\_. *The CoRoT Legacy Book: The Adventure of the Ultra High Precision Photometry from Space*. [S.l.: s.n.], 2016. p. 181.
- Guenther, E. W. et al. Transiting exoplanets from the CoRoT space mission. XXI. CoRoT-19b: a low density planet orbiting an old inactive F9V-star. *A&A*, v. 537, p. A136, jan. 2012.
- Guenther, E. W. et al. High angular resolution imaging and infrared spectroscopy of CoRoT candidates. *A&A*, v. 556, p. A75, ago. 2013.
- Guillot, T.; Havel, M. III.3 CoRoT's planets: A family portrait. In: \_\_\_\_\_. *The CoRoT Legacy Book: The Adventure of the Ultra High Precision Photometry from Space*. [S.l.: s.n.], 2016. p. 129.
- Guterman, P.; Mazeh, T.; Faigler, S. Exposure-based Algorithm for Removing Systematics out of the CoRoT Light Curves. In: Martins, F. et al. (Ed.). *SF2A-2015: Proceedings of the Annual meeting of the French Society of Astronomy and Astrophysics*. [S.l.: s.n.], 2015. p. 277–281.
- Hatzes, A. P. The Radial Velocity Method for the Detection of Exoplanets. *Methods of Detecting Exoplanets: 1st Advanced School on Exoplanetary Science*, v. 428, p. 3, 2016.
- Hatzes, A. P. et al. The Mass of CoRoT-7b. *ApJ*, v. 743, p. 75, dez. 2011.
- Hébrard, G. et al. Transiting exoplanets from the CoRoT space mission. XVIII. CoRoT-18b: a massive hot Jupiter on a prograde, nearly aligned orbit. *A&A*, v. 533, p. A130, set. 2011.
- Heiter, U. et al. VALD – an atomic and molecular database for astrophysics. In: *Journal of Physics Conference Series*. [S.l.: s.n.], 2008. (Journal of Physics Conference Series, v. 130), p. 012011.

- Hekker, S. et al. Characteristics of solar-like oscillations in red giants observed in the CoRoT exoplanet field. *A&A*, v. 506, p. 465–469, out. 2009.
- Hoaglin, D. C.; Mosteller, F.; Tuckey, J. W. *Understanding Robust and Exploratory Data Analysis*. [S.l.]: Wiley-Interscience, 2000. ISBN 0471384917.
- Howell, S. B. et al. The K2 Mission: Characterization and Early Results. *Publications of the Astronomical Society of Pacific*, v. 126, p. 398–408, abr. 2014.
- Kernighan, B. W. *The C Programming Language*. 2nd. ed. [S.l.]: Prentice Hall Professional Technical Reference, 1988. ISBN 0131103709.
- Kim, D.-W. et al. Detrending time series for astronomical variability surveys. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 397, p. 558–568, jul. 2009.
- Klagyivik, P. et al. Variability Survey in the CoRoT SRa01 Field: Implications of Eclipsing Binary Distribution on Cluster Formation in NGC 2264. *ApJ*, v. 773, p. 54, ago. 2013.
- Knutson, H. A. et al. Using Stellar Limb-Darkening to Refine the Properties of HD 209458b. *ApJ*, v. 655, p. 564–575, jan. 2007.
- Kovács, G.; Bakos, G. A. Application of the trend filtering algorithm in the search for multiperiodic signals. *Communications in Asteroseismology*, v. 157, p. 82–86, dez. 2008.
- Kovács, G.; Zucker, S.; Mazeh, T. A box-fitting algorithm in the search for periodic transits. *Astronomy & Astrophysics*, v. 391, p. 369–377, ago. 2002.
- Lapeyrere, V. et al. Calibration of flight model CCDs for CoRoT mission. *MNRAS*, v. 365, p. 1171–1179, fev. 2006.
- Lazio, T. J. W.; Farrell, W. M. Radio Detection of Extrasolar Planets: Present and Future Prospects. In: Rucker, H. O.; Kurth, W.; Mann, G. (Ed.). *Planetary Radio Emissions VI*. [S.l.: s.n.], 2006. p. 603.
- Léger, A. et al. Transiting exoplanets from the CoRoT space mission. VIII. CoRoT-7b: the first super-Earth with measured radius. *Astronomy & Astrophysics*, v. 506, p. 287–302, out. 2009.
- Lenz, P.; Breger, M. Period04 User Guide. *Communications in Asteroseismology*, v. 146, p. 53–136, jun. 2005.
- Levacher, P. Performance de L'Instrument. In: Fridlund, M. et al. (Ed.). *The CoRoT Mission Pre-Launch Status - Stellar Seismology and Planet Finding*. [S.l.: s.n.], 2006. (ESA Special Publication, v. 1306), p. 217.
- Lovis, C. et al. Pushing Down the Limits of RV Precision with HARPS. In: Fischer, D. et al. (Ed.). *Extreme Solar Systems*. [S.l.: s.n.], 2008. (Astronomical Society of the Pacific Conference Series, v. 398), p. 455.
- Lurie, J. C. et al. The Solar Neighborhood. XXXIV. A Search for Planets Orbiting Nearby M Dwarfs Using Astrometry. *AJ*, v. 148, p. 91, nov. 2014.

- Mandel, K.; Agol, E. Analytic Light Curves for Planetary Transit Searches. *The Astrophysical Journal Letters*, v. 580, p. L171–L175, dez. 2002.
- Markwardt, C. B. Non-linear Least-squares Fitting in IDL with MPFIT. In: Bohlender, D. A.; Durand, D.; Dowler, P. (Ed.). *Astronomical Data Analysis Software and Systems XVIII*. [S.l.: s.n.], 2009. (Astronomical Society of the Pacific Conference Series, v. 411), p. 251.
- Mayor, M. et al. The HARPS search for southern extra-solar planets XXXIV. Occurrence, mass distribution and orbital properties of super-Earths and Neptune-mass planets. *ArXiv e-prints*, set. 2011.
- Mayor, M. et al. Setting New Standards with HARPS. *The Messenger*, v. 114, p. 20–24, dez. 2003.
- Mayor, M.; Queloz, D. A Jupiter-mass companion to a solar-type star. *Nature*, v. 378, p. 355–359, nov. 1995.
- Mazeh, T. et al. Removing systematics from the CoRoT light curves. I. Magnitude-dependent zero point. *Astronomy & Astrophysics*, v. 506, p. 431–434, out. 2009.
- Mazeh, T.; Tamuz, O.; Zucker, S. The sys-rem detrending algorithm: Implementation and testing. In: Afonso, C.; Weldrake, D.; Henning, T. (Ed.). *Transiting Extrapolar Planets Workshop*. [S.l.: s.n.], 2007. (Astronomical Society of the Pacific Conference Series, v. 366), p. 119.
- Michel, E. et al. The Seismology Programme of CoRoT. In: Fridlund, M. et al. (Ed.). *The CoRoT Mission Pre-Launch Status - Stellar Seismology and Planet Finding*. [S.l.: s.n.], 2006. (ESA Special Publication, v. 1306), p. 39.
- Michel, E. et al. First asteroseismic results from CoRoT. *Communications in Asteroseismology*, v. 156, p. 73–87, dez. 2008.
- Mislis, D. et al. An algorithm for correcting corot raw light curves. *Astronomy & Astrophysics*, v. 522, p. A86, nov. 2010.
- Morton, T. D.; Johnson, J. A. On the Low False Positive Probabilities of Kepler Planet Candidates. *The Astrophysical Journal*, v. 738, p. 170, set. 2011.
- Mosser, B. et al. Red-giant seismic properties analyzed with CoRoT. *A&A*, v. 517, p. A22, jul. 2010.
- Mosser, B. et al. The universal red-giant oscillation pattern. An automated determination with CoRoT data. *A&A*, v. 525, p. L9, jan. 2011.
- Moutou, C. et al. CoRoT-22 b: a validated 4.9  $R_{\oplus}$  exoplanet in 10-d orbit. *MNRAS*, v. 444, p. 2783–2792, nov. 2014.
- Moutou, C. et al. Transiting exoplanets from the CoRoT space mission. V. CoRoT-Exo-4b: stellar and planetary parameters. *A&A*, v. 488, p. L47–L50, set. 2008.
- Moutou, C. et al. Planetary transit candidates in the CoRoT initial run: resolving their nature. *Astronomy & Astrophysics*, v. 506, p. 321–336, out. 2009.

- Murray, C. D.; Correia, A. C. M. Keplerian Orbits and Dynamics of Exoplanets. In: \_\_\_\_\_. *Exoplanets*. [S.l.: s.n.], 2010. p. 15–23.
- Nichols, J. D. Magnetosphere-ionosphere coupling at Jupiter-like exoplanets with internal plasma sources: implications for detectability of auroral radio emissions. *MNRAS*, v. 414, p. 2125–2138, jul. 2011.
- Ofir, A. et al. The SARS algorithm: detrending CoRoT light curves with Sysrem using simultaneous external parameters. *MNRAS*, v. 404, p. L99–L103, maio 2010.
- Ollivier, M. et al. Transiting exoplanets from the CoRoT space mission. XXII. CoRoT-16b: a hot Jupiter with a hint of eccentricity around a faint solar-like star. *A&A*, v. 541, p. A149, maio 2012.
- Ollivier, M. et al. Structure and evolution of an exoplanet. In: *Planetary Systems*. [S.l.]: Springer, 2009. p. 199–246.
- Parviainen, H. et al. Transiting exoplanets from the CoRoT space mission. XXV. CoRoT-27b: a massive and dense planet on a short-period orbit. *Astronomy & Astrophysics*, v. 562, p. A140, fev. 2014.
- Pätzold, M. et al. Transiting exoplanets from the CoRoT space mission. XXIII. CoRoT-21b: a doomed large Jupiter around a faint subgiant star. *A&A*, v. 545, p. A6, set. 2012.
- Pepper, J.; Gould, A.; Depoy, D. L. Using All-Sky Surveys to Find Planetary Transits. *Acta Astron.*, v. 53, p. 213–228, set. 2003.
- Perryman, M. *The Exoplanet Handbook*. [S.l.: s.n.], 2011.
- Pinheiro da Silva, L. et al. Radiation effects on space-based stellar photometry: theoretical models and empirical results for CoRoT Space Telescope. *MNRAS*, v. 384, p. 1337–1343, mar. 2008.
- Pont, F.; Zucker, S.; Queloz, D. The effect of red noise on planetary transit detection. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 373, p. 231–242, nov. 2006.
- Queloz, D. et al. The CoRoT-7 planetary system: two orbiting super-Earths. *A&A*, v. 506, p. 303–319, out. 2009.
- Rauer, H.; Erikson, A. The transit method. In: \_\_\_\_\_. *Extrasolar Planets. Formation, Detection and Dynamics*. [S.l.: s.n.], 2007. p. 205.
- Rauer, H. et al. Transiting exoplanets from the CoRoT space mission. VII. The “hot-Jupiter”-type planet CoRoT-5b. *A&A*, v. 506, p. 281–286, out. 2009.
- Retzlaff, J. et al. Data products in the ESO Science Archive Facility. In: *Observatory Operations: Strategies, Processes, and Systems V*. [S.l.: s.n.], 2014. (Proc. SPIE, v. 9149), p. 914903.
- Reuyl, D.; Holmberg, E. On the Existence of a Third Component in the System 70 Ophiuchi. *Publications of the Leander McCormick Observatory*, v. 9, p. 121–125, 1947.

- Rouan, D. et al. Searching for exosolar planets with the COROT space mission. *Physics and Chemistry of the Earth C*, v. 24, p. 567–571, out. 1999.
- Rouan, D. et al. Transiting exoplanets from the CoRoT space mission . XIX. CoRoT-23b: a dense hot Jupiter on an eccentric orbit. *A&A*, v. 537, p. A54, jan. 2012.
- Samadi, R. et al. Extraction of the Photometric Information: Corrections. In: Fridlund, M. et al. (Ed.). *The CoRoT Mission Pre-Launch Status - Stellar Seismology and Planet Finding*. [S.l.: s.n.], 2006. (ESA Special Publication, v. 1306), p. 317.
- SAVITZKY, A.; GOLAY, M. J. E. Smoothing and differentiation of data by simplified least squares procedures. *Analytical Chemistry*, v. 36, n. 8, p. 1627–1639, 1964. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1021/ac60214a047>.
- Scargle, J. D. Studies in astronomical time series analysis. II - Statistical aspects of spectral analysis of unevenly spaced data. *ApJ*, v. 263, p. 835–853, dez. 1982.
- Schaller, G. et al. New grids of stellar models from 0.8 to 120 solar masses at  $Z = 0.020$  and  $Z = 0.001$ . *Astronomy and Astrophysics Supplement*, v. 96, p. 269–331, dez. 1992.
- Schneider, J. *The Extrasolar Planets Encyclopaedia*. 2017. Acessado em 28 de junho de 2017. Disponível em: <http://exoplanet.eu/>.
- Seager, S.; Mallén-Ornelas, G. A Unique Solution of Planet and Star Parameters from an Extrasolar Planet Transit Light Curve. *The Astrophysical Journal*, v. 585, p. 1038–1055, mar. 2003.
- Skrutskie, M. F. et al. The Two Micron All Sky Survey (2MASS). *AJ*, v. 131, p. 1163–1183, fev. 2006.
- Snellen, I. A. G.; de Mooij, E. J. W.; Albrecht, S. The changing phases of extrasolar planet CoRoT-1b. *Nature*, v. 459, p. 543–545, maio 2009.
- Struve, O. Proposal for a project of high-precision stellar radial velocity work. *The Observatory*, v. 72, p. 199–200, out. 1952.
- Surace, C. et al. The oversampling mode for CoRoT exo-field observations. In: *Advanced Software and Control for Astronomy II*. [S.l.: s.n.], 2008. (Proc. SPIE, v. 7019), p. 70193B.
- Tamuz, O.; Mazeh, T.; Zucker, S. Correcting systematic effects in a large set of photometric light curves. *MNRAS*, v. 356, p. 1466–1470, fev. 2005.
- Tingley, B. et al. Transiting exoplanets from the CoRoT space mission. XVI. CoRoT-14b: an unusually dense very hot Jupiter. *A&A*, v. 528, p. A97, abr. 2011.
- Titz-Weider, R. Auf der Suche nach Planeten um andere Sonnen: Astrophysik. *Physik in unserer Zeit*, WILEY-VCH Verlag, v. 37, n. 6, p. 286–294, 2006. ISSN 1521-3943. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1002/piuz.200601117>.
- Torres, G.; Andersen, J.; Giménez, A. Accurate masses and radii of normal stars: modern results and applications. *A&A Rev.*, v. 18, p. 67–126, fev. 2010.

- Udalski, A. The Optical Gravitational Lensing Experiment. Real Time Data Analysis Systems in the OGLE-III Survey. *Acta Astron.*, v. 53, p. 291–305, dez. 2003.
- Valenti, J. A.; Piskunov, N. Spectroscopy made easy: A new tool for fitting observations with synthetic spectra. *A&AS*, v. 118, p. 595–603, set. 1996.
- van Belle, G. T. et al. Direct Imaging of Planet Transit Events. In: Haghighipour, N. (Ed.). *Formation, Detection, and Characterization of Extrasolar Habitable Planets*. [S.l.: s.n.], 2014. (IAU Symposium, v. 293), p. 378–381.
- Walker, G. et al. The MOST Asteroseismology Mission: Ultraprecise Photometry from Space. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, v. 115, p. 1023–1035, set. 2003.
- WINN, J. N. Transits and occultations. *ArXiv e-prints*, jan. 2010.
- Wolszczan, A.; Frail, D. A. A planetary system around the millisecond pulsar PSR1257 + 12. *Nature*, v. 355, p. 145–147, jan. 1992.



Tabela 8 - Detalhamento quantitativo dos *runs* do CoRoT

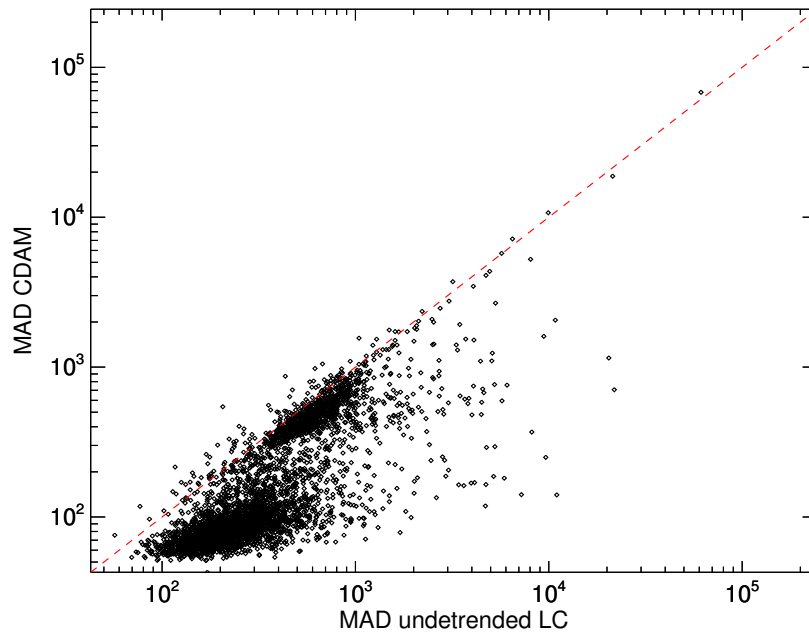
| Run   | Obtenção de Medidas <sup>†</sup> |  | Fim [UT]            | Número de Alvos |         | Passagem da<br>pela SSA [%] | Dir. de Apontamento (J2000) |              |                |
|-------|----------------------------------|--|---------------------|-----------------|---------|-----------------------------|-----------------------------|--------------|----------------|
|       | Início [UT]                      |  |                     | [exo]           | [sismo] |                             | $\alpha$ [°]                | $\delta$ [°] | Rot. axial [°] |
| IRa01 | 31/01/2007 11:06:34              |  | 02/04/2007 07:12:15 | 9.880           | 10      | 8,73                        | 102,60                      | -1,70        | 9,60           |
| SRc01 | 11/04/2007 15:08:03              |  | 08/05/2007 21:36:03 | 6.975           | 10      | 8,71                        | 284,59                      | 3,08         | 5,48           |
| LRc01 | 11/05/2007 13:14:38              |  | 15/10/2007 06:35:03 | 11.408          | 10      | 8,73                        | 290,89                      | 0,43         | 24,24          |
| LRa01 | 18/10/2007 08:57:27              |  | 03/03/2008 09:49:37 | 11.408          | 10      | 8,74                        | 101,66                      | -0,20        | 1,92           |
| SRa01 | 05/03/2008 22:34:28              |  | 31/03/2008 07:13:34 | 7.470           | 10      | 8,75                        | 101,04                      | 9,02         | 2,32           |
| LRc02 | 11/04/2008 20:55:30              |  | 07/09/2008 23:04:08 | 11.408          | 10      | 8,74                        | 279,66                      | 6,40         | 16,72          |
| SRc02 | 12/09/2008 23:15:46              |  | 06/10/2008 06:43:00 | 11.408          | 10      | 8,84                        | -2,86                       | -14,64       |                |
| SRa02 | 08/10/2008 22:44:37              |  | 12/11/2008 08:14:40 | 10.265          | 10      | 8,76                        | 97,55                       | 5,66         | -26,36         |
| LRa02 | 13/11/2008 22:49:47              |  | 08/03/2009 10:33:47 | 11.408          | 10      | 8,72                        | 103,52                      | -4,38        | 6,00           |
| LRc03 | 01/04/2009 20:53:29              |  | 02/07/2009 03:53:59 | 5.661           | 5       | 8,76                        | 277,47                      | -7,25        | 16,24          |
| LRc04 | 04/07/2009 03:03:45              |  | 29/09/2009 10:03:58 | 5.716           | 5       | 8,73                        | 277,72                      | 8,02         | 6,56           |
| LRa03 | 01/10/2009 21:02:23              |  | 01/03/2010 08:37:27 | 5.289           | 5       | 8,73                        | 93,75                       | 5,50         | -3,84          |
| SRa03 | 02/03/2010 21:17:26              |  | 29/03/2010 08:09:56 | 4.130           | 5       | 8,78                        | 98,40                       | 0,99         | 2,16           |
| LRc05 | 06/04/2010 21:13:38              |  | 05/07/2010 05:44:28 | 5.683           | 5       | 8,74                        | 279,00                      | 3,66         | 6,77           |
| LRc06 | 08/07/2010 16:46:47              |  | 24/09/2010 08:08:54 | 5.689           | 5       | 8,75                        | 278,95                      | 4,35         | 16,85          |
| LRa04 | 28/09/2010 00:14:23              |  | 16/12/2010 05:09:13 | 4.216           | 5       | 8,16                        | 92,57                       | 5,8          | 5,8            |
| LRa05 | 17/12/2010 19:26:27              |  | 22/09/2011 07:47:10 | 4.602           | 5       | 8,00                        | 91,93                       | 7,95         | -23,49         |
| LRc07 | 06/04/2011 15:57:50              |  | 28/06/2011 19:21:49 | 5.682           | 5       | 8,01                        | 277,60                      | 6,29         | 23,97          |
| SRc03 | 01/07/2011 18:30:50              |  | 05/07/2011 05:33:48 | 642             | -       | -                           | 279,86                      | 5,57         | 2,37           |
| LRc08 | 06/07/2011 14:59:43              |  | 30/09/2011 06:24:56 | 5.685           | 5       | 8,01                        | 277,14                      | 5,60         | -16,03         |
| SRa04 | 04/10/2011 19:06:58              |  | 28/11/2011 07:23:13 | 5.554           | 5       | 7,95                        | 96,17                       | -3,84        | 1,79           |
| SRa05 | 29/11/2011 18:14:02              |  | 09/01/2012 10:40:28 | 4.159           | 5       | 8,02                        | 101,12                      | 10,07        | -18,60         |
| LRa06 | 10/01/2012 18:24:40              |  | 29/03/2012 09:27:14 | 5.715           | 5       | 7,99                        | 101,55                      | 0,22         | 16,03          |
| LRc09 | 10/04/2012 20:51:32              |  | 05/07/2012 04:55:34 | 5.683           | 5       | 7,77                        | 288,22                      | -3,18        | -1,15          |
| LRc10 | 06/07/2012 14:22:07              |  | 01/10/2012 07:25:30 | 5.276           | 5       | 7,98                        | 277,74                      | 7,28         | -9,63          |
| LRa07 | 02/10/2012 19:59:38              |  | 02/11/2012 20:08:49 | 4.839           | 6       | -                           | 96,87                       | 5,19         | 15,23          |

<sup>†</sup>Baseado nas medidas do campo *sismo*. Os períodos de observação do campo *exo* são, em média, ligeiramente mais curtos.

**APÊNDICE B – PERFORMANCE DO MCDA NOS DE MAIS RUNS DO CoRoT**

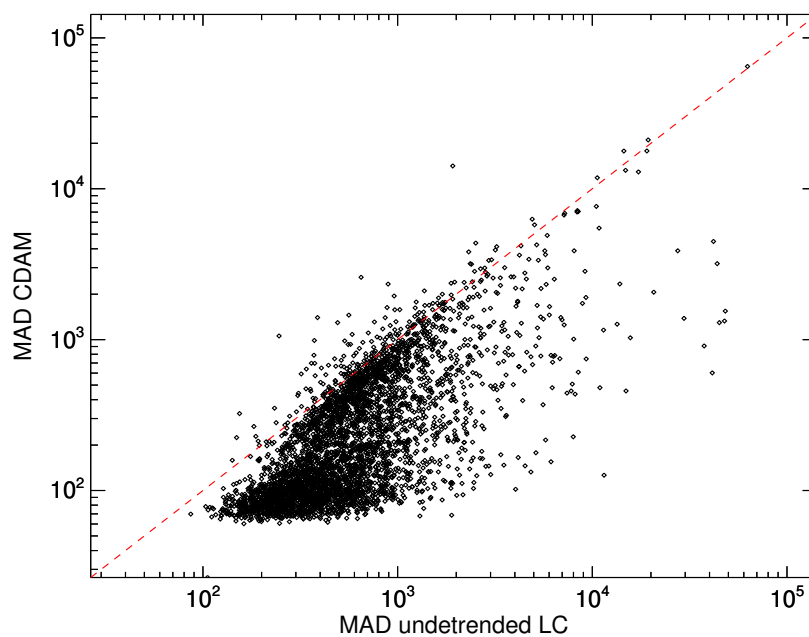
**Figura 25 - MCDA – Run IRa01.**

A figura compara a mediana dos desvios absolutos da mediana (MAD) das medidas brutas em função da MAD obtida após os dados serem processados pelo algoritmo MCDA descrito nesta tese para o *run* em questão.



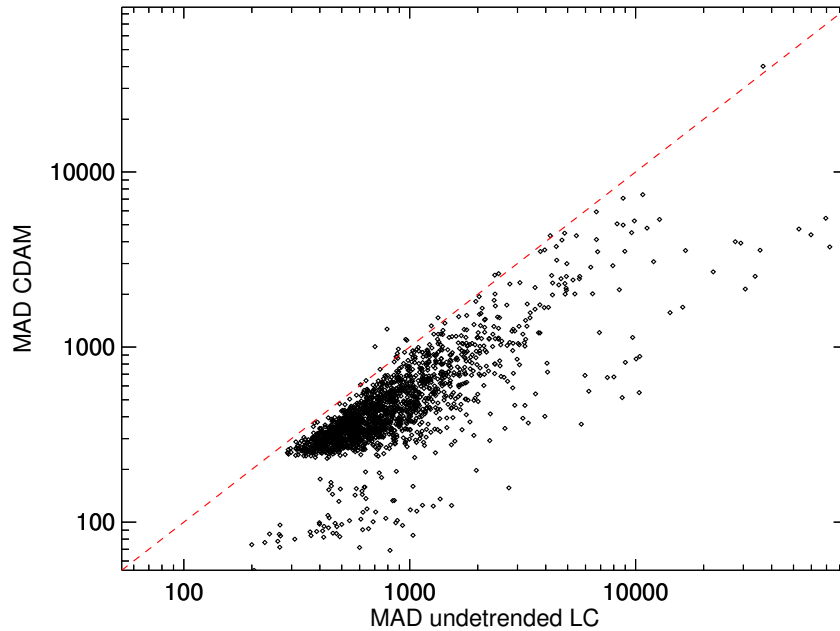
**Figura 26 - MCDA – Run LRa02.**

A figura compara a mediana dos desvios absolutos da mediana (MAD) das medidas brutas em função da MAD obtida após os dados serem processados pelo algoritmo MCDA descrito nesta tese para o *run* em questão.



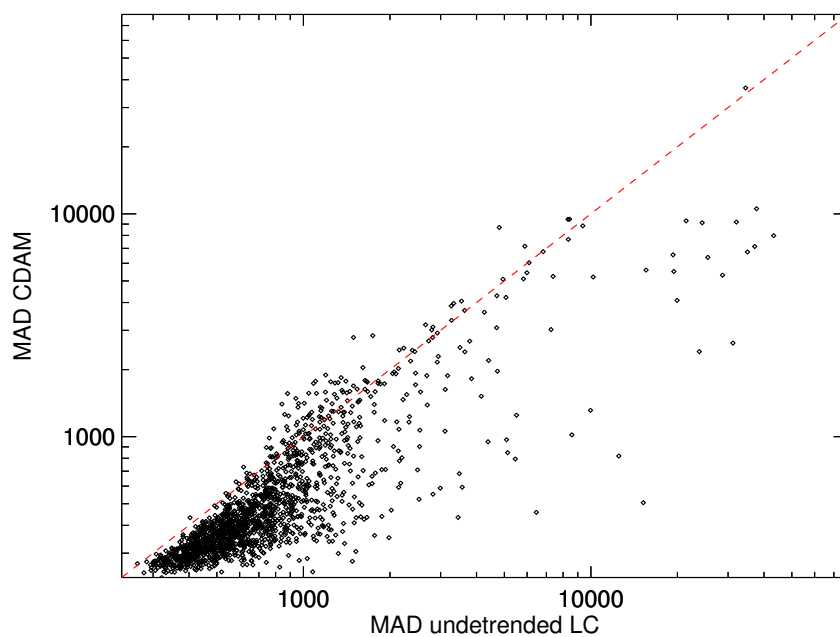
**Figura 27 - MCDA – Run LRa03.**

A figura compara a mediana dos desvios absolutos da mediana (MAD) das medidas brutas em função da MAD obtida após os dados serem processados pelo algoritmo MCDA descrito nesta tese para o *run* em questão.



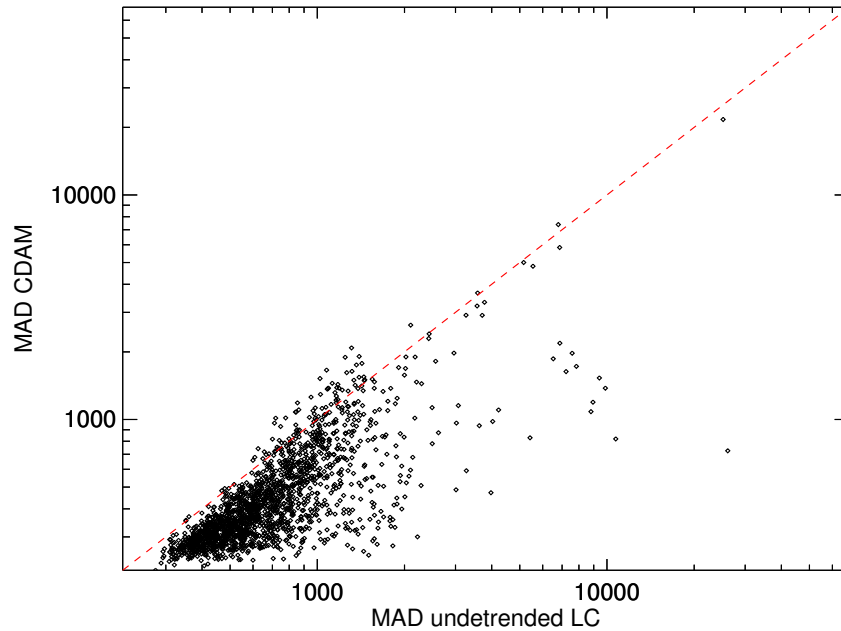
**Figura 28 - MCDA – Run LRa04.**

A figura compara a mediana dos desvios absolutos da mediana (MAD) das medidas brutas em função da MAD obtida após os dados serem processados pelo algoritmo MCDA descrito nesta tese para o *run* em questão.



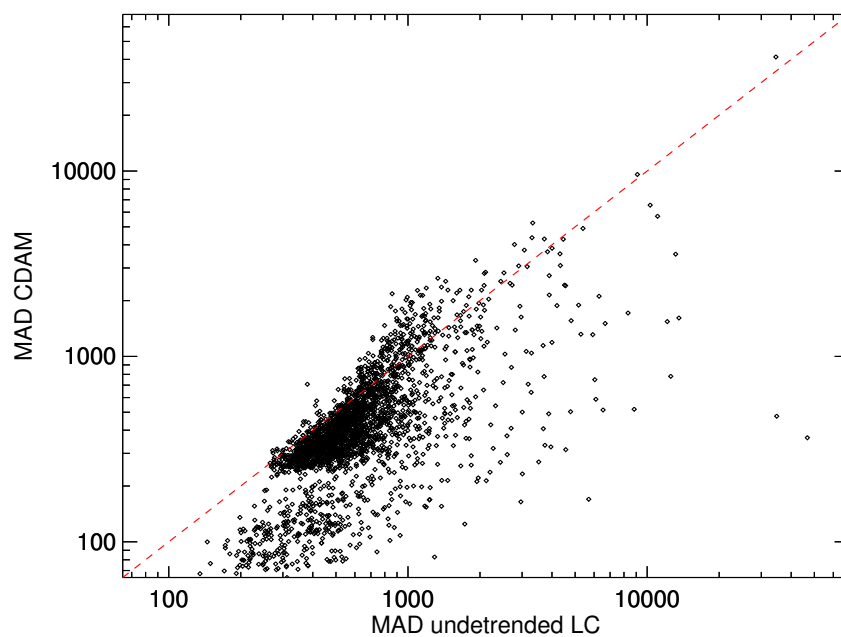
**Figura 29 - MCDA – Run LRa05.**

A figura compara a mediana dos desvios absolutos da mediana (MAD) das medidas brutas em função da MAD obtida após os dados serem processados pelo algoritmo MCDA descrito nesta tese para o *run* em questão.



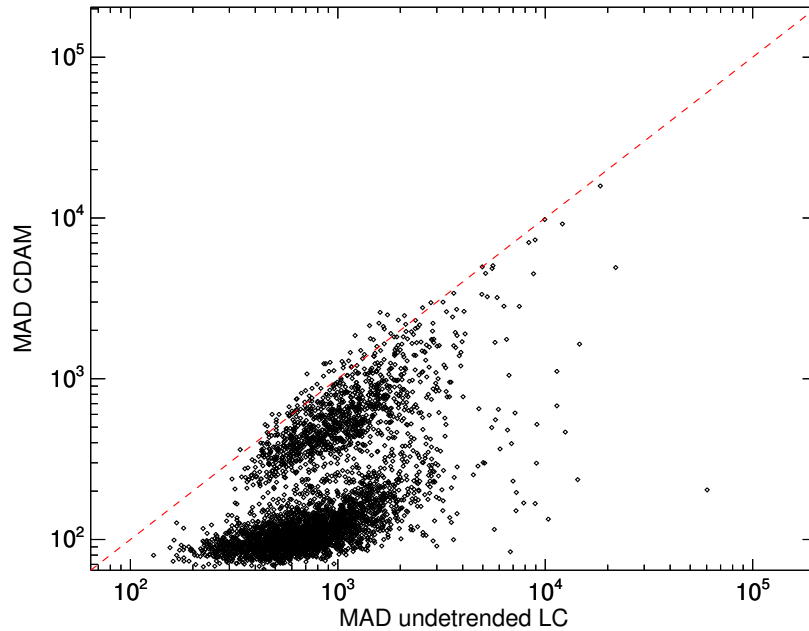
**Figura 30 - MCDA – Run LRa06.**

A figura compara a mediana dos desvios absolutos da mediana (MAD) das medidas brutas em função da MAD obtida após os dados serem processados pelo algoritmo MCDA descrito nesta tese para o *run* em questão.



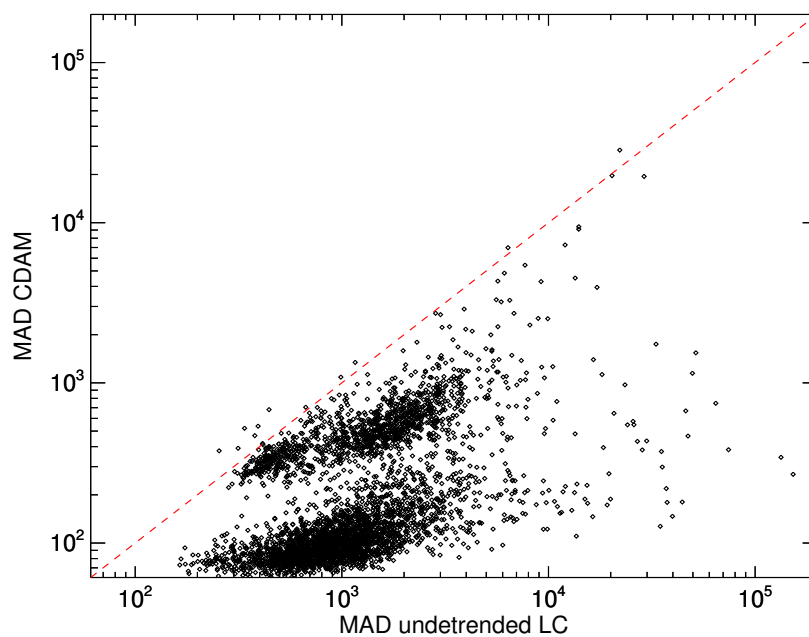
**Figura 31 - MCDA – Run LRc01.**

A figura compara a mediana dos desvios absolutos da mediana (MAD) das medidas brutas em função da MAD obtida após os dados serem processados pelo algoritmo MCDA descrito nesta tese para o *run* em questão.



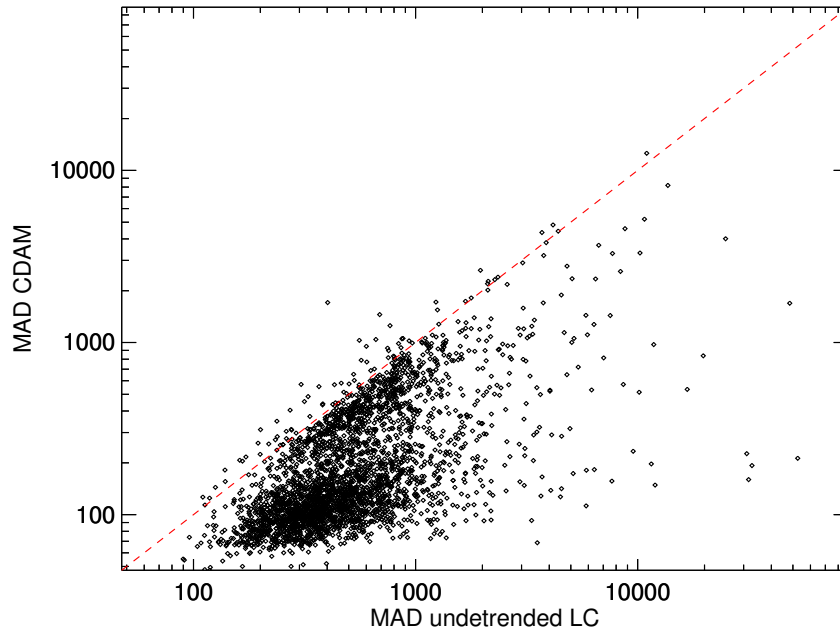
**Figura 32 - MCDA – Run LRc02.**

A figura compara a mediana dos desvios absolutos da mediana (MAD) das medidas brutas em função da MAD obtida após os dados serem processados pelo algoritmo MCDA descrito nesta tese para o *run* em questão.



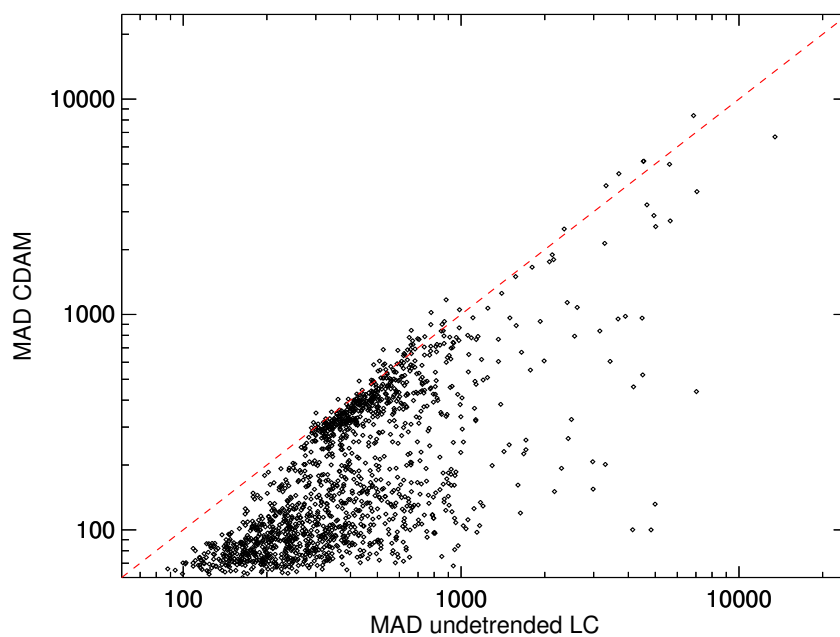
**Figura 33 - MCDA – Run LRc03.**

A figura compara a mediana dos desvios absolutos da mediana (MAD) das medidas brutas em função da MAD obtida após os dados serem processados pelo algoritmo MCDA descrito nesta tese para o *run* em questão.



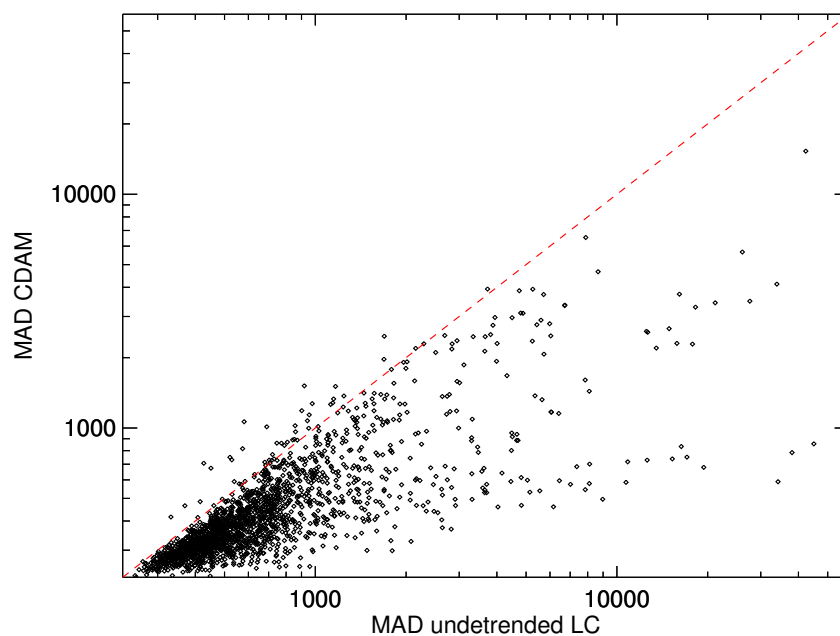
**Figura 34 - MCDA – Run LRc04.**

A figura compara a mediana dos desvios absolutos da mediana (MAD) das medidas brutas em função da MAD obtida após os dados serem processados pelo algoritmo MCDA descrito nesta tese para o *run* em questão.



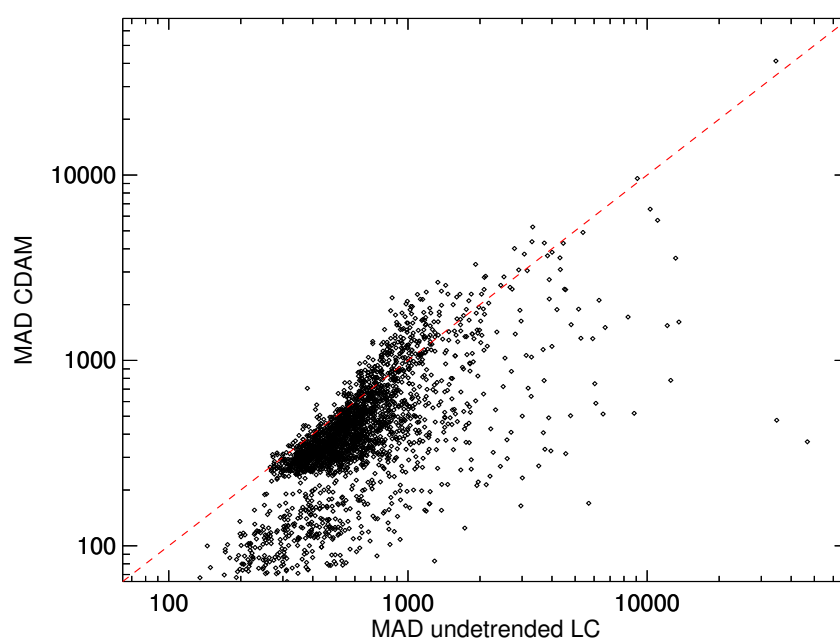
**Figura 35 - MCDA – Run LRc05.**

A figura compara a mediana dos desvios absolutos da mediana (MAD) das medidas brutas em função da MAD obtida após os dados serem processados pelo algoritmo MCDA descrito nesta tese para o *run* em questão.



**Figura 36 - MCDA – Run LRa06.**

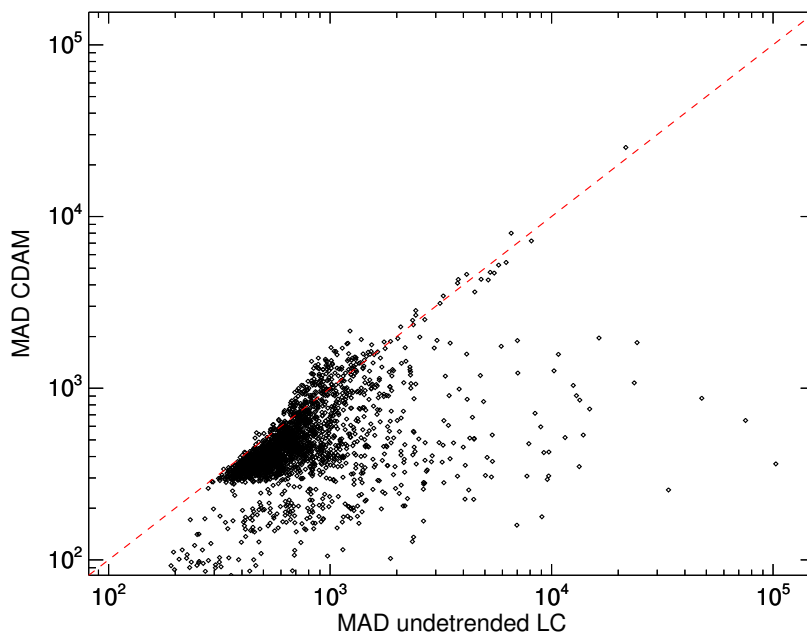
A figura compara a mediana dos desvios absolutos da mediana (MAD) das medidas brutas em função da MAD obtida após os dados serem processados pelo algoritmo MCDA descrito nesta tese para o *run* em questão.





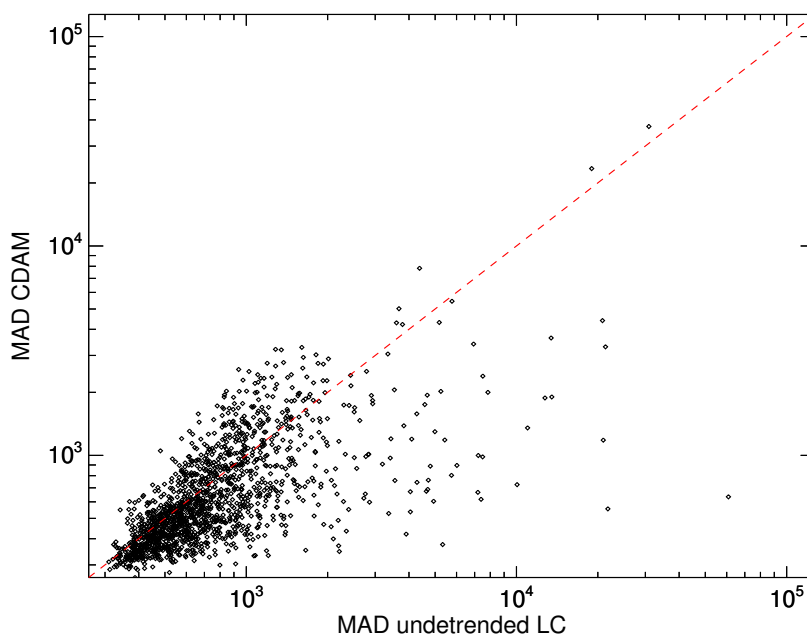
**Figura 37 - MCDA – Run LRa07.**

A figura compara a mediana dos desvios absolutos da mediana (MAD) das medidas brutas em função da MAD obtida após os dados serem processados pelo algoritmo MCDA descrito nesta tese para o *run* em questão.



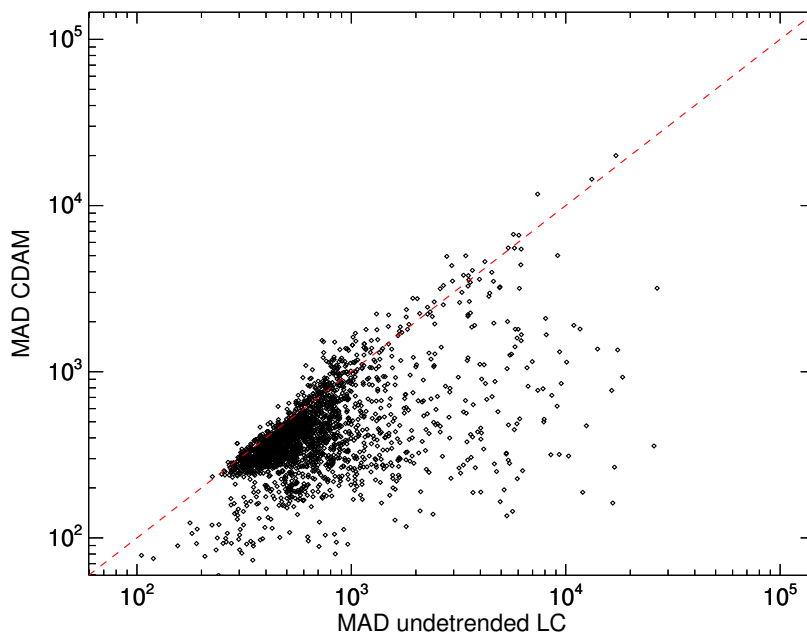
**Figura 38 - MCDA – Run LRa08.**

A figura compara a mediana dos desvios absolutos da mediana (MAD) das medidas brutas em função da MAD obtida após os dados serem processados pelo algoritmo MCDA descrito nesta tese para o *run* em questão.



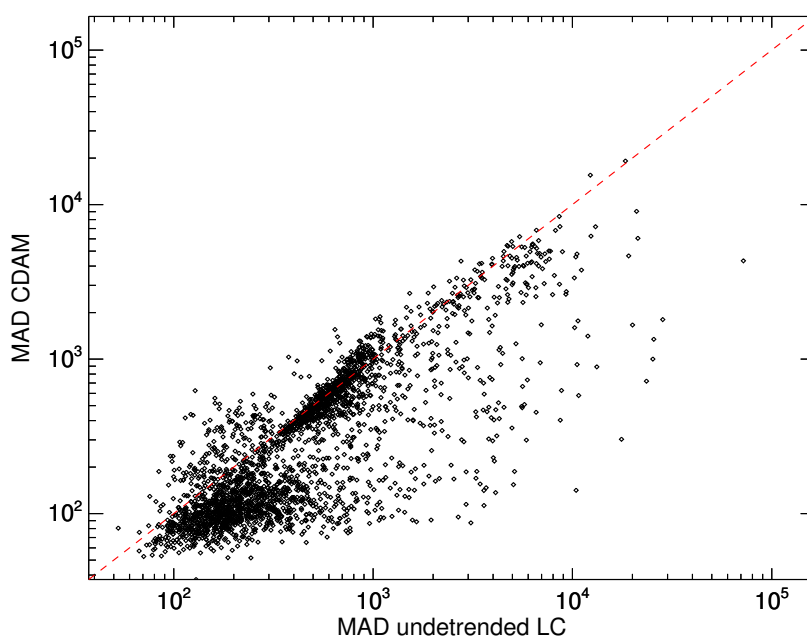
**Figura 39 - MCDA – *Run* LRc09.**

A figura compara a mediana dos desvios absolutos da mediana (MAD) das medidas brutas em função da MAD obtida após os dados serem processados pelo algoritmo MCDA descrito nesta tese para o *run* em questão.



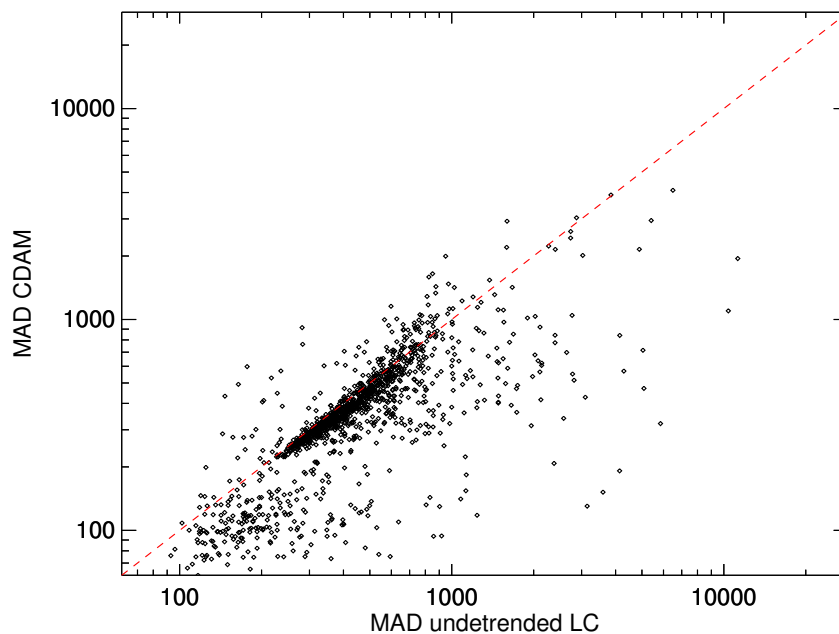
**Figura 40 - MCDA – *Run* SRa01.**

A figura compara a mediana dos desvios absolutos da mediana (MAD) das medidas brutas em função da MAD obtida após os dados serem processados pelo algoritmo MCDA descrito nesta tese para o *run* em questão.



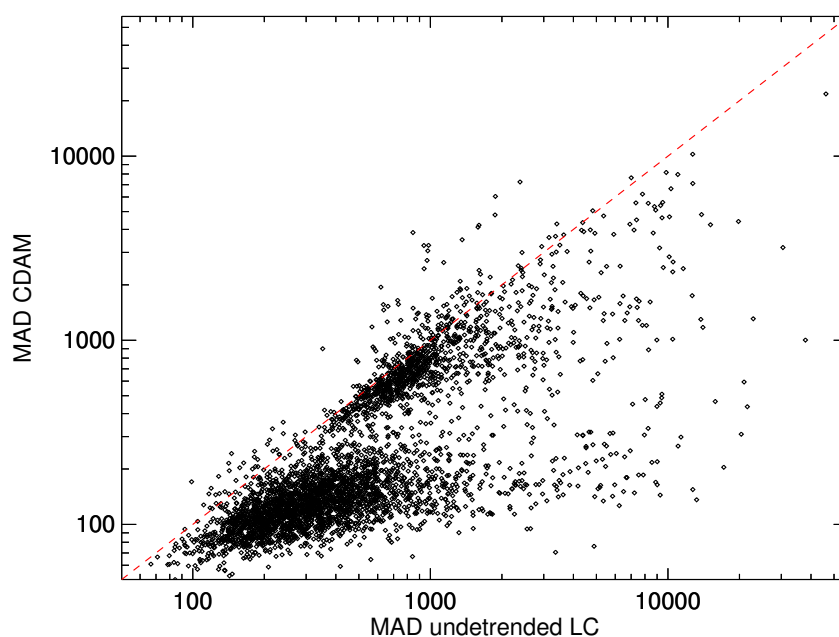
**Figura 41 - MCDA – *Run* SRc01.**

A figura compara a mediana dos desvios absolutos da mediana (MAD) das medidas brutas em função da MAD obtida após os dados serem processados pelo algoritmo MCDA descrito nesta tese para o *run* em questão.



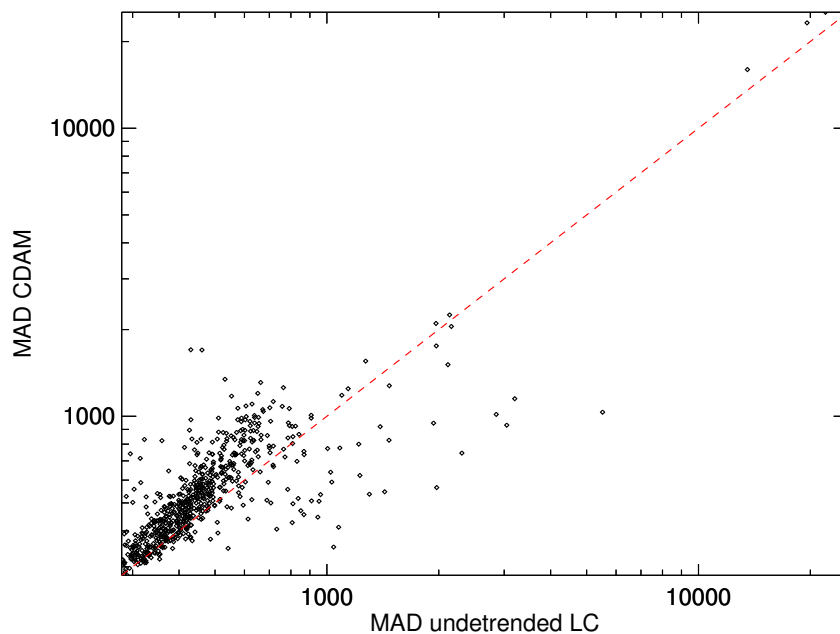
**Figura 42 - MCDA – *Run* LRc02.**

A figura compara a mediana dos desvios absolutos da mediana (MAD) das medidas brutas em função da MAD obtida após os dados serem processados pelo algoritmo MCDA descrito nesta tese para o *run* em questão.



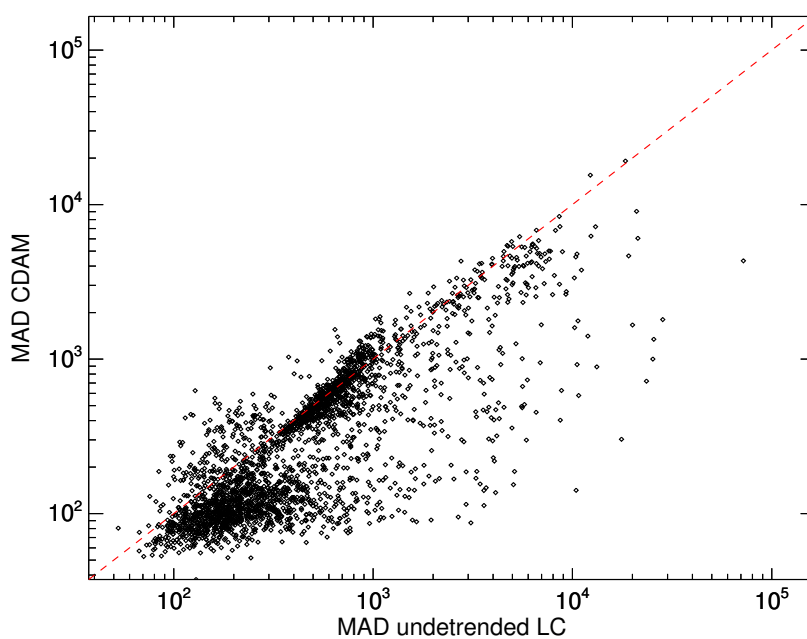
**Figura 43 - MCDA – Run SRc03.**

A figura compara a mediana dos desvios absolutos da mediana (MAD) das medidas brutas em função da MAD obtida após os dados serem processados pelo algoritmo MCDA descrito nesta tese para o *run* em questão.



**Figura 44 - MCDA – Run SRa01.**

A figura compara a mediana dos desvios absolutos da mediana (MAD) das medidas brutas em função da MAD obtida após os dados serem processados pelo algoritmo MCDA descrito nesta tese para o *run* em questão.



## APÊNDICE C – LISTA DE CANDIDATOS A SISTEMAS BINÁRIOS.

Este apêndice lista 456 alvos de candidatos a estrelas binárias eclipsantes obtidos durante a seleção de candidatos a exoplanetas e seus respectivos períodos aproximados de variabilidade fotométrica.

| CoRoT ID  | Período fotométrico<br><i>(dias)</i> | Duração do Trânsito<br><i>quando houver (dias)</i> | Profundidade<br><i>relativo a trânsitos (%)</i> |
|-----------|--------------------------------------|--|---|
| 101173963 | $1,66 \pm 0,02$                      | $0,05 \pm 0,03$                                    | $0,950 \pm 0,09$                                |
| 102285983 | $3,68 \pm 0,04$                      | $0,19 \pm 0,06$                                    | $0,900 \pm 0,16$                                |
| 102289286 | $1,39 \pm 0,01$                      | $0,11 \pm 0,02$                                    | $0,910 \pm 0,04$                                |
| 102292514 | $1,74 \pm 0,02$                      | $0,12 \pm 0,03$                                    | $0,970 \pm 0,09$                                |
| 102301321 | $26,1 \pm 0,3$                       | –  | –   |
| 102303551 | $0,644 \pm 0,006$                    | $0,02 \pm 0,01$                                    | $0,990 \pm 0,01$                                |
| 102305956 | $3,84 \pm 0,04$                      | $0,18 \pm 0,06$                                    | $0,800 \pm 0,25$                                |
| 102307740 | $0,536 \pm 0,005$                    | $0,053 \pm 0,009$                                  | $0,900 \pm 0,0016$                              |
| 102309256 | $6,84 \pm 0,07$                      | –  | –   |
| 102321991 | $2,91 \pm 0,03$                      | $0,08 \pm 0,05$                                    | $0,900 \pm 0,16$                                |
| 102326005 | $0,881 \pm 0,009$                    | $0,02 \pm 0,01$                                    | $0,990 \pm 0,09$                                |
| 102326301 | $1,49 \pm 0,01$                      | $0,02 \pm 0,02$                                    | $0,900 \pm 0,25$                                |
| 102332227 | $0,636 \pm 0,006$                    | $0,06 \pm 0,01$                                    | $0,987 \pm 0,0016$                              |
| 102332850 | $0,644 \pm 0,006$                    | $0,02 \pm 0,01$                                    | $0,990 \pm 0,04$                                |
| 102341633 | $1,44 \pm 0,01$                      | $0,14 \pm 0,02$                                    | $0,950 \pm 0,04$                                |
| 102358229 | $1,61 \pm 0,02$                      | $0,07 \pm 0,03$                                    | $0,970 \pm 0,09$                                |
| 102363572 | $6,2 \pm 0,06$                       | –  | –   |
| 102368251 | $32,7 \pm 0,3$                       | –  | –   |
| 102570914 | $26,6 \pm 0,3$                       | $0,1 \pm 0,4$                                      | $0,000 \pm 100$                                 |
| 102573510 | $1,06 \pm 0,01$                      | $0,1 \pm 0,02$                                     | $0,990 \pm 0,01$                                |
| 102577917 | $0,326 \pm 0,003$                    | $0,031 \pm 0,005$                                  | $0,993 \pm 0,0016$                              |

| CoRoT ID  | Período fotométrico | Duração do Trânsito  | Profundidade             |
|-----------|---------------------|----------------------|--------------------------|
|           | (dias)              | quando houver (dias) | relativo a trânsitos (%) |
| 102578195 | $3,37 \pm 0,03$     | $0,08 \pm 0,06$      | $0,900 \pm 0,36$         |
| 102579996 | $28,6 \pm 0,3$      | –                    | –                        |
| 102595682 | $0,97 \pm 0,01$     | $0,08 \pm 0,02$      | $0,950 \pm 0,01$         |
| 102602947 | $0,944 \pm 0,009$   | $0,09 \pm 0,02$      | $0,990 \pm 0,01$         |
| 102609164 | $1,89 \pm 0,02$     | $0,07 \pm 0,03$      | $0,970 \pm 0,09$         |
| 102610389 | $2,12 \pm 0,02$     | $0,04 \pm 0,04$      | $0,900 \pm 0,16$         |
| 102612276 | $0,908 \pm 0,009$   | $0,07 \pm 0,02$      | $0,670 \pm 0,01$         |
| 102614893 | $12,2 \pm 0,1$      | –                    | –                        |
| 102617617 | $0,514 \pm 0,005$   | $0,051 \pm 0,009$    | $0,988 \pm 0,0009$       |
| 102617969 | $0,632 \pm 0,006$   | $0,06 \pm 0,01$      | $0,995 \pm 0,0036$       |
| 102619084 | $1,05 \pm 0,01$     | $0,1 \pm 0,02$       | $0,950 \pm 0,01$         |
| 102620997 | $0,733 \pm 0,007$   | $0,07 \pm 0,01$      | $0,992 \pm 0,0049$       |
| 102623416 | $0,428 \pm 0,004$   | $0,042 \pm 0,007$    | $0,991 \pm 0,0009$       |
| 102638391 | $0,851 \pm 0,009$   | $0,08 \pm 0,01$      | $0,911 \pm 0,0064$       |
| 102641637 | $1,82 \pm 0,02$     | $0,18 \pm 0,03$      | $0,994 \pm 0,0064$       |
| 102642448 | $1,82 \pm 0,02$     | $0,11 \pm 0,03$      | $0,960 \pm 0,04$         |
| 102644420 | $0,946 \pm 0,009$   | $0,04 \pm 0,02$      | $0,960 \pm 0,04$         |
| 102644420 | $0,808 \pm 0,008$   | $0,07 \pm 0,01$      | $0,992 \pm 0,0064$       |
| 102648679 | $1,86 \pm 0,02$     | $0,06 \pm 0,03$      | $0,900 \pm 0,16$         |
| 102673845 | $2,57 \pm 0,03$     | $0,06 \pm 0,04$      | $0,900 \pm 0,25$         |
| 102675118 | $2,57 \pm 0,03$     | $0,08 \pm 0,04$      | $0,900 \pm 0,16$         |
| 102680507 | $0,514 \pm 0,005$   | $0,051 \pm 0,009$    | $0,987 \pm 0,0016$       |
| 102693162 | $2,56 \pm 0,03$     | –                    | –                        |
| 102706845 | $1,89 \pm 0,02$     | $0,15 \pm 0,03$      | $0,940 \pm 0,09$         |
| 102724855 | $1,74 \pm 0,02$     | $0,08 \pm 0,03$      | $0,970 \pm 0,04$         |
| 102727198 | $1,28 \pm 0,01$     | $0,12 \pm 0,02$      | $0,940 \pm 0,01$         |
| 102735868 | $0,99 \pm 0,01$     | $0,09 \pm 0,02$      | $0,972 \pm 0,0064$       |

| <b>CoRoT ID</b> | <b>Período fotométrico</b><br><i>(dias)</i> | <b>Duração do Trânsito</b><br><i>quando houver (dias)</i> | <b>Profundidade</b><br><i>relativo a trânsitos (%)</i> |
|-----------------|---|---|--|
| 102737586       | 0,576 ± 0,006                               | 0,05 ± 0,01   | 0,932 ± 0,0036   |
| 102748636       | 1,67 ± 0,02                                 | 0,11 ± 0,03   | 0,980 ± 0,01   |
| 102760539       | 0,603 ± 0,006                               | 0,06 ± 0,01   | 0,930 ± 0,0036   |
| 102770255       | 10,5 ± 0,1                                  | –   | –  |
| 102782687       | 2,38 ± 0,02                                 | 0,05 ± 0,04   | 0,900 ± 0,49   |
| 102786471       | 8,39 ± 0,08                                 | –   | –  |
| 102795835       | 2,62 ± 0,03                                 | 0,2 ± 0,04  | 0,990 ± 0,04   |
| 102849367       | 1,03 ± 0,01                                 | 0,07 ± 0,02   | 0,910 ± 0,01   |
| 102862363       | 0,82 ± 0,008                                | 0,06 ± 0,01   | 0,994 ± 0,0064   |
| 102868457       | 0,718 ± 0,007                               | 0,07 ± 0,01   | 0,988 ± 0,0081   |
| 102870613       | 0,644 ± 0,006                               | 0,02 ± 0,01   | 0,990 ± 0,01   |
| 102887503       | 1,88 ± 0,02                                 | 0,11 ± 0,03   | 0,980 ± 0,04   |
| 102940819       | 3,82 ± 0,04                                 | 0,1 ± 0,06  | 0,700 ± 0,36   |
| 102942436       | 0,873 ± 0,009                               | 0,07 ± 0,01   | 0,905 ± 0,0081   |
| 103798065       | 1,45 ± 0,01                                 | 0,06 ± 0,02   | 0,960 ± 0,04   |
| 103808729       | 0,611 ± 0,006                               | 0,06 ± 0,01   | 0,807 ± 0,0064   |
| 103828310       | 0,466 ± 0,005                               | 0,046 ± 0,008   | 0,438 ± 0,0016   |
| 104054053       | 1,14 ± 0,01                                 | 0,07 ± 0,02   | 0,930 ± 0,04   |
| 104100631       | 2,09 ± 0,02                                 | 0,06 ± 0,03   | 0,900 ± 0,25   |
| 104108751       | 0,733 ± 0,007                               | 0,07 ± 0,01   | 0,900 ± 0,01   |
| 104116792       | 0,891 ± 0,009                               | 0,08 ± 0,01   | 0,925 ± 0,0064   |
| 104123826       | 2,08 ± 0,02                                 | 0,15 ± 0,03   | 0,990 ± 0,09   |
| 104169954       | 0,707 ± 0,007                               | 0,07 ± 0,01   | 0,985 ± 0,0016   |
| 104190253       | 0,745 ± 0,007                               | 0,07 ± 0,01   | 0,806 ± 0,0064   |
| 104349981       | 0,502 ± 0,005                               | 0,05 ± 0,008  | 0,421 ± 0,0025   |
| 104536137       | 0,44 ± 0,004                                | 0,043 ± 0,007   | 0,913 ± 0,0016   |
| 104584620       | 0,36 ± 0,004                                | 0,035 ± 0,006   | 0,915 ± 0,0009   |

| CoRoT ID  | Período fotométrico | Duração do Trânsito  | Profundidade             |
|-----------|---------------------|----------------------|--------------------------|
|           | (dias)              | quando houver (dias) | relativo a trânsitos (%) |
| 104632443 | $3,81 \pm 0,04$     | $0,11 \pm 0,06$      | $0,900 \pm 0,36$         |
| 104643687 | $0,99 \pm 0,01$     | $0,09 \pm 0,02$      | $0,890 \pm 0,01$         |
| 104649068 | $2,97 \pm 0,03$     | $0,14 \pm 0,05$      | $0,900 \pm 0,16$         |
| 104674520 | $1,15 \pm 0,01$     | $0,11 \pm 0,02$      | $0,936 \pm 0,0064$       |
| 104742596 | $0,697 \pm 0,007$   | $0,06 \pm 0,01$      | $0,937 \pm 0,0049$       |
| 104749071 | $0,96 \pm 0,01$     | $0,05 \pm 0,02$      | $0,780 \pm 0,01$         |
| 104775636 | $1,29 \pm 0,01$     | $0,12 \pm 0,02$      | $0,970 \pm 0,01$         |
| 104775636 | $0,644 \pm 0,006$   | –                    | –                        |
| 104862714 | $4,12 \pm 0,04$     | $0,14 \pm 0,07$      | $0,900 \pm 0,64$         |
| 104909254 | $8,25 \pm 0,08$     | –                    | –                        |
| 104923342 | $7,94 \pm 0,08$     | –                    | –                        |
| 104975308 | $15,9 \pm 0,2$      | –                    | –                        |
| 105012729 | $7,97 \pm 0,08$     | –                    | –                        |
| 105065745 | $0,271 \pm 0,003$   | $0,026 \pm 0,005$    | $0,993 \pm 0,0016$       |
| 105134234 | $1,97 \pm 0,02$     | $0,19 \pm 0,03$      | $0,980 \pm 0,04$         |
| 105204965 | $2,01 \pm 0,02$     | $0,04 \pm 0,03$      | $0,900 \pm 0,36$         |
| 105215276 | $4,69 \pm 0,05$     | $0,08 \pm 0,08$      | $0,870 \pm 0,09$         |
| 105299142 | $0,849 \pm 0,008$   | $0,08 \pm 0,01$      | $0,990 \pm 0,01$         |
| 105313879 | $0,524 \pm 0,005$   | $0,052 \pm 0,009$    | $0,973 \pm 0,0016$       |
| 105318706 | $0,524 \pm 0,005$   | $0,052 \pm 0,009$    | $0,942 \pm 0,0016$       |
| 105329964 | $12,5 \pm 0,1$      | $0,1 \pm 0,2$        | $0,970 \pm 0,04$         |
| 105343369 | $12,5 \pm 0,1$      | $0,1 \pm 0,2$        | $0,970 \pm 0,04$         |
| 105369614 | $5,47 \pm 0,05$     | $0,09 \pm 0,09$      | $0,870 \pm 0,01$         |
| 105384555 | $0,53 \pm 0,005$    | $0,052 \pm 0,009$    | $0,982 \pm 0,0016$       |
| 105386846 | $0,454 \pm 0,005$   | $0,044 \pm 0,008$    | $0,995 \pm 0,0036$       |
| 105394377 | $0,478 \pm 0,005$   | $0,036 \pm 0,008$    | $0,978 \pm 0,0049$       |
| 105404481 | $4,95 \pm 0,05$     | $0,09 \pm 0,08$      | $0,900 \pm 0,25$         |



| CoRoT ID  | Período fotométrico | Duração do Trânsito  | Profundidade             |
|-----------|---------------------|----------------------|--------------------------|
|           | (dias)              | quando houver (dias) | relativo a trânsitos (%) |
| 105439402 | $2,37 \pm 0,02$     | $0,08 \pm 0,04$      | $0,990 \pm 0,09$         |
| 105477027 | $0,731 \pm 0,007$   | $0,07 \pm 0,01$      | $0,963 \pm 0,0025$       |
| 105523688 | $0,327 \pm 0,003$   | $0,032 \pm 0,005$    | $0,968 \pm 0,0004$       |
| 105599373 | $144 \pm 1$         | –                    | –                        |
| 105607694 | $1,23 \pm 0,01$     | $0,12 \pm 0,02$      | $0,978 \pm 0,0064$       |
| 105625280 | $1,21 \pm 0,01$     | $0,09 \pm 0,02$      | $0,970 \pm 0,01$         |
| 105680194 | $0,508 \pm 0,005$   | $0,05 \pm 0,008$     | $0,983 \pm 0,0009$       |
| 105776852 | $6,14 \pm 0,06$     | $0,1 \pm 0,1$        | $0,900 \pm 0,25$         |
| 105812602 | $3,19 \pm 0,03$     | $0,01 \pm 0,05$      | $0,800 \pm 0,81$         |
| 105846511 | $0,878 \pm 0,009$   | $0,07 \pm 0,01$      | $0,820 \pm 0,01$         |
| 105851935 | $90,8 \pm 0,9$      | –                    | –                        |
| 105895502 | $1,35 \pm 0,01$     | $0,08 \pm 0,02$      | $0,780 \pm 0,04$         |
| 105898878 | $1,54 \pm 0,02$     | $0,07 \pm 0,03$      | $0,980 \pm 0,04$         |
| 105958570 | $0,76 \pm 0,008$    | $0,07 \pm 0,01$      | $0,966 \pm 0,0049$       |
| 105976157 | $0,668 \pm 0,007$   | $0,06 \pm 0,01$      | $0,979 \pm 0,0049$       |
| 106041174 | $8,89 \pm 0,09$     | $0,1 \pm 0,1$        | $0,990 \pm 0,04$         |
| 106054338 | $1,59 \pm 0,02$     | $0,08 \pm 0,03$      | $0,860 \pm 0,09$         |
| 106073467 | $0,626 \pm 0,006$   | $0,06 \pm 0,01$      | $0,990 \pm 0,0049$       |
| 106085712 | $0,53 \pm 0,005$    | $0,052 \pm 0,009$    | $0,970 \pm 0,0009$       |
| 106099419 | $1,23 \pm 0,01$     | $0,1 \pm 0,02$       | $0,930 \pm 0,04$         |
| 106137695 | $1,1 \pm 0,01$      | $0,11 \pm 0,02$      | $0,960 \pm 0,01$         |
| 110682322 | $3,11 \pm 0,03$     | $0,17 \pm 0,05$      | $0,900 \pm 0,16$         |
| 110744261 | $0,357 \pm 0,004$   | $0,035 \pm 0,006$    | $0,956 \pm 0,0009$       |
| 110746236 | $2,08 \pm 0,02$     | $0,04 \pm 0,03$      | $0,800 \pm 0,25$         |
| 110757380 | $1,57 \pm 0,02$     | $0,06 \pm 0,03$      | $0,720 \pm 0,04$         |
| 110758377 | $1 \pm 0,01$        | $0,03 \pm 0,02$      | $0,990 \pm 0,04$         |
| 110829335 | $1,92 \pm 0,02$     | $0,1 \pm 0,03$       | $0,900 \pm 0,16$         |

| CoRoT ID  | Período fotométrico | Duração do Trânsito  | Profundidade             |
|-----------|---------------------|----------------------|--------------------------|
|           | (dias)              | quando houver (dias) | relativo a trânsitos (%) |
| 110836615 | $0,644 \pm 0,006$   | $0,03 \pm 0,01$      | $0,990 \pm 0,01$         |
| 211609975 | $0,371 \pm 0,004$   | $0,037 \pm 0,006$    | $0,995 \pm 0,0009$       |
| 211610754 | $4,94 \pm 0,05$     | –                    | –                        |
| 211621841 | $8,95 \pm 0,09$     | –                    | –                        |
| 211628195 | $1,05 \pm 0,01$     | $0,09 \pm 0,02$      | $0,970 \pm 0,01$         |
| 211630768 | $4,94 \pm 0,05$     | –                    | –                        |
| 211637500 | $8,95 \pm 0,09$     | –                    | –                        |
| 211642960 | $1,14 \pm 0,01$     | $0,08 \pm 0,02$      | $0,970 \pm 0,01$         |
| 211643238 | $9,8 \pm 0,1$       | –                    | –                        |
| 211659572 | $0,873 \pm 0,009$   | $0,08 \pm 0,01$      | $0,995 \pm 0,0025$       |
| 211660389 | $1,13 \pm 0,01$     | $0,11 \pm 0,02$      | $0,980 \pm 0,01$         |
| 211660546 | $6,3 \pm 0,06$      | –                    | –                        |
| 211663277 | $1,22 \pm 0,01$     | $0,01 \pm 0,02$      | $0,990 \pm 0,09$         |
| 211663518 | $0,95 \pm 0,01$     | –                    | –                        |
| 211668952 | $0,541 \pm 0,005$   | $0,054 \pm 0,009$    | $0,959 \pm 0,0009$       |
| 211669440 | $9,34 \pm 0,09$     | –                    | –                        |
| 221604373 | $0,339 \pm 0,003$   | $0,033 \pm 0,006$    | $0,987 \pm 0,0016$       |
| 221604723 | $0,536 \pm 0,005$   | $0,053 \pm 0,009$    | $0,952 \pm 0,0016$       |
| 221607381 | $0,846 \pm 0,008$   | $0,02 \pm 0,01$      | $0,990 \pm 0,04$         |
| 221613770 | $2,31 \pm 0,02$     | $0,07 \pm 0,04$      | $0,900 \pm 0,16$         |
| 221619740 | $3,07 \pm 0,03$     | $0,11 \pm 0,05$      | $0,990 \pm 0,04$         |
| 221625883 | $2,18 \pm 0,02$     | $0,04 \pm 0,04$      | $0,900 \pm 0,16$         |
| 221629509 | $0,66 \pm 0,007$    | $0,06 \pm 0,01$      | $0,914 \pm 0,0025$       |
| 221630866 | $1,58 \pm 0,02$     | $0,09 \pm 0,03$      | $0,990 \pm 0,04$         |
| 221631780 | $0,589 \pm 0,006$   | $0,05 \pm 0,01$      | $0,985 \pm 0,0025$       |
| 221636970 | $0,348 \pm 0,003$   | $0,034 \pm 0,006$    | $0,650 \pm 0,0016$       |
| 221644003 | $0,731 \pm 0,007$   | $0,01 \pm 0,01$      | $0,990 \pm 0,04$         |

| CoRoT ID  | Período fotométrico | Duração do Trânsito  | Profundidade             |
|-----------|---------------------|----------------------|--------------------------|
|           | (dias)              | quando houver (dias) | relativo a trânsitos (%) |
| 221646011 | 0,725 ± 0,007       | 0,07 ± 0,01          | 0,987 ± 0,0025           |
| 221646787 | 7,2 ± 0,07          | 0 ± 0,1              | 0,800 ± 0,25             |
| 221649057 | 1,1 ± 0,01          | 0,04 ± 0,02          | 0,990 ± 0,01             |
| 221649266 | 1,63 ± 0,02         | 0,1 ± 0,03           | 0,910 ± 0,04             |
| 221650319 | 5,79 ± 0,06         | 0,1 ± 0,1            | 0,900 ± 0,25             |
| 221651647 | 0,863 ± 0,009       | 0,08 ± 0,01          | 0,980 ± 0,01             |
| 221651996 | 2,2 ± 0,02          | 0,09 ± 0,04          | 0,920 ± 0,09             |
| 221652087 | 0,99 ± 0,01         | 0,06 ± 0,02          | 0,970 ± 0,01             |
| 221652902 | 0,303 ± 0,003       | 0,03 ± 0,005         | 0,938 ± 0,0009           |
| 221660905 | 0,348 ± 0,003       | 0,034 ± 0,006        | 0,913 ± 0,0016           |
| 221661707 | 0,523 ± 0,005       | 0,048 ± 0,009        | 0,989 ± 0,0049           |
| 221662736 | 0,312 ± 0,003       | 0,031 ± 0,005        | 0,995 ± 0,0009           |
| 221663085 | 2,11 ± 0,02         | 0,12 ± 0,04          | 0,950 ± 0,04             |
| 221666058 | 0,28 ± 0,003        | 0,027 ± 0,005        | 0,991 ± 0,0004           |
| 221666872 | 1,33 ± 0,01         | 0,06 ± 0,02          | 0,990 ± 0,04             |
| 221671949 | 0,69 ± 0,007        | 0,05 ± 0,01          | 0,980 ± 0,01             |
| 221672091 | 0,547 ± 0,005       | 0,033 ± 0,009        | 0,990 ± 0,01             |
| 221675115 | 0,303 ± 0,003       | 0,03 ± 0,005         | 0,956 ± 0,0004           |
| 221685038 | 0,502 ± 0,005       | 0,05 ± 0,008         | 0,994 ± 0,0064           |
| 221688103 | 2,65 ± 0,03         | 0,1 ± 0,04           | 0,900 ± 0,16             |
| 221689571 | 2,08 ± 0,02         | 0,14 ± 0,03          | 0,920 ± 0,09             |
| 221696254 | 3,88 ± 0,04         | 0,12 ± 0,06          | 0,990 ± 0,04             |
| 221698620 | 1,95 ± 0,02         | 0,12 ± 0,03          | 0,980 ± 0,04             |
| 221699985 | 1,28 ± 0,01         | 0,1 ± 0,02           | 0,980 ± 0,01             |
| 221702600 | 2,01 ± 0,02         | 0 ± 0,03             | 0,900 ± 0,25             |
| 221704769 | 5,14 ± 0,05         | 0,07 ± 0,09          | 0,700 ± 0,64             |
| 221707281 | 5,83 ± 0,06         | 0,1 ± 0,1            | 0,900 ± 0,64             |

| CoRoT ID  | Período fotométrico | Duração do Trânsito  | Profundidade             |
|-----------|---------------------|----------------------|--------------------------|
|           | (dias)              | quando houver (dias) | relativo a trânsitos (%) |
| 221712994 | 5,01 ± 0,05         | 0,25 ± 0,08          | 0,900 ± 0,36             |
| 223929249 | 1,09 ± 0,01         | 0,04 ± 0,02          | 0,800 ± 0,04             |
| 223929831 | 0,277 ± 0,003       | 0,027 ± 0,005        | 0,981 ± 0,0004           |
| 223934244 | 1,22 ± 0,01         | 0,05 ± 0,02          | 0,990 ± 0,01             |
| 223935677 | 0,374 ± 0,004       | 0,037 ± 0,006        | 0,993 ± 0,0009           |
| 223935942 | 0,601 ± 0,006       | 0,06 ± 0,01          | 0,981 ± 0,0009           |
| 223936083 | 0,351 ± 0,004       | 0,033 ± 0,006        | 0,992 ± 0,0025           |
| 223937373 | 1,82 ± 0,02         | –                    | –                        |
| 223937598 | 1,36 ± 0,01         | –                    | –                        |
| 223938697 | 0,518 ± 0,005       | 0,051 ± 0,009        | 0,825 ± 0,0016           |
| 223938778 | 0,867 ± 0,009       | 0,08 ± 0,01          | 0,984 ± 0,0049           |
| 223938819 | 0,644 ± 0,006       | 0,02 ± 0,01          | 0,980 ± 0,01             |
| 223941278 | 1,29 ± 0,01         | 0,02 ± 0,02          | 0,990 ± 0,04             |
| 223941828 | 16,4 ± 0,2          | –                    | –                        |
| 223941881 | 1,26 ± 0,01         | 0,09 ± 0,02          | 0,972 ± 0,0081           |
| 223942686 | 2,05 ± 0,02         | 0,12 ± 0,03          | 0,970 ± 0,04             |
| 223945374 | 0,443 ± 0,004       | 0,043 ± 0,007        | 0,995 ± 0,0025           |
| 223945778 | 1,91 ± 0,02         | 0,15 ± 0,03          | 0,980 ± 0,09             |
| 223946171 | 0,897 ± 0,009       | 0,05 ± 0,01          | 0,940 ± 0,01             |
| 223947077 | 3,85 ± 0,04         | 0,1 ± 0,06           | 0,900 ± 0,49             |
| 223947077 | 2,86 ± 0,03         | 0,04 ± 0,05          | 0,900 ± 0,36             |
| 223949716 | 0,38 ± 0,004        | 0,038 ± 0,006        | 0,934 ± 0,0009           |
| 223950412 | 1,97 ± 0,02         | 0,19 ± 0,03          | 0,950 ± 0,04             |
| 223950412 | 1,14 ± 0,01         | 0,09 ± 0,02          | 0,940 ± 0,01             |
| 223954651 | 1,06 ± 0,01         | 0,1 ± 0,02           | 0,986 ± 0,0049           |
| 223954895 | 1,06 ± 0,01         | 0,1 ± 0,02           | 0,973 ± 0,0025           |
| 223956532 | 1 ± 0,01            | 0,02 ± 0,02          | 0,990 ± 0,04             |

| CoRoT ID  | Período fotométrico | Duração do Trânsito  | Profundidade             |
|-----------|---------------------|----------------------|--------------------------|
|           | (dias)              | quando houver (dias) | relativo a trânsitos (%) |
| 223958206 | 0,573 ± 0,006       | 0,02 ± 0,01          | 0,990 ± 0,01             |
| 223963519 | 0,725 ± 0,007       | 0,07 ± 0,01          | 0,874 ± 0,0025           |
| 223963528 | 1,1 ± 0,01          | 0,09 ± 0,02          | 0,910 ± 0,01             |
| 223965101 | 0,609 ± 0,006       | –                    | –                        |
| 223965902 | 0,854 ± 0,009       | 0,06 ± 0,01          | 0,990 ± 0,0081           |
| 223967324 | 1,22 ± 0,01         | 0,02 ± 0,02          | 0,990 ± 0,04             |
| 223968804 | 1,9 ± 0,02          | 0,05 ± 0,03          | 0,900 ± 0,16             |
| 223970350 | 1,89 ± 0,02         | 0,18 ± 0,03          | 0,996 ± 0,0081           |
| 223974557 | 1,29 ± 0,01         | 0,12 ± 0,02          | 0,994 ± 0,0036           |
| 223977531 | 0,274 ± 0,003       | 0,027 ± 0,005        | 0,991 ± 0,0004           |
| 223978746 | 2,01 ± 0,02         | 0,02 ± 0,03          | 0,900 ± 0,16             |
| 223978884 | 0,619 ± 0,006       | 0,06 ± 0,01          | 0,961 ± 0,0016           |
| 223979980 | 1,36 ± 0,01         | 0,02 ± 0,02          | 0,990 ± 0,09             |
| 223984380 | 0,644 ± 0,006       | 0,01 ± 0,01          | 0,970 ± 0,04             |
| 223987553 | 0,576 ± 0,006       | 0,05 ± 0,01          | 0,993 ± 0,0009           |
| 223988293 | 0,644 ± 0,006       | 0,02 ± 0,01          | 0,990 ± 0,01             |
| 223989566 | 1,55 ± 0,02         | 0,15 ± 0,03          | 0,990 ± 0,0049           |
| 223993566 | 0,609 ± 0,006       | –                    | –                        |
| 223994455 | 0,589 ± 0,006       | 0,05 ± 0,01          | 0,976 ± 0,0016           |
| 223998341 | 0,59 ± 0,006        | 0,05 ± 0,01          | 0,969 ± 0,0025           |
| 223999277 | 1 ± 0,01            | 0,02 ± 0,02          | 0,990 ± 0,04             |
| 223999491 | 1,44 ± 0,01         | 0,09 ± 0,02          | 0,960 ± 0,04             |
| 224005111 | 1,22 ± 0,01         | 0,01 ± 0,02          | 0,990 ± 0,09             |
| 224005929 | 1,59 ± 0,02         | 0,08 ± 0,03          | 0,940 ± 0,04             |
| 224009552 | 2,34 ± 0,02         | 0,08 ± 0,04          | 0,800 ± 0,16             |
| 224010211 | 1,18 ± 0,01         | 0,08 ± 0,02          | 0,770 ± 0,01             |
| 224013042 | 1,35 ± 0,01         | 0,1 ± 0,02           | 0,974 ± 0,0081           |

| CoRoT ID  | Período fotométrico | Duração do Trânsito  | Profundidade             |
|-----------|---------------------|----------------------|--------------------------|
|           | (dias)              | quando houver (dias) | relativo a trânsitos (%) |
| 224013042 | 1,07 ± 0,01         | 0,02 ± 0,02          | 0,990 ± 0,04             |
| 300000952 | 0,757 ± 0,008       | 0,07 ± 0,01          | 0,901 ± 0,0081           |
| 300001287 | 1,51 ± 0,02         | 0,09 ± 0,03          | 0,890 ± 0,04             |
| 300001375 | 1,7 ± 0,02          | 0,07 ± 0,03          | 0,930 ± 0,04             |
| 300001601 | 0,644 ± 0,006       | 0,02 ± 0,01          | 0,990 ± 0,01             |
| 300001933 | 1,23 ± 0,01         | 0,07 ± 0,02          | 0,940 ± 0,01             |
| 300002334 | 5,63 ± 0,06         | –                    | –                        |
| 300003189 | 2,31 ± 0,02         | 0,06 ± 0,04          | 0,900 ± 0,36             |
| 300003226 | 0,425 ± 0,004       | 0,042 ± 0,007        | 0,983 ± 0,0016           |
| 310125819 | 0,749 ± 0,007       | 0,07 ± 0,01          | 0,994 ± 0,0016           |
| 310127478 | 0,54 ± 0,005        | 0,054 ± 0,009        | 0,741 ± 0,0036           |
| 310136336 | 0,671 ± 0,007       | 0,05 ± 0,01          | 0,990 ± 0,01             |
| 310136658 | 3,2 ± 0,03          | 0,07 ± 0,05          | 0,900 ± 0,36             |
| 310144545 | 2,72 ± 0,03         | 0,09 ± 0,05          | 0,900 ± 0,16             |
| 310145771 | 4,57 ± 0,05         | 0,11 ± 0,08          | 0,900 ± 0,64             |
| 310149664 | 1,52 ± 0,02         | 0,15 ± 0,03          | 0,990 ± 0,0049           |
| 310149868 | 7,39 ± 0,07         | –                    | –                        |
| 310151999 | 1,18 ± 0,01         | 0,08 ± 0,02          | 0,930 ± 0,04             |
| 310153863 | 1,8 ± 0,02          | 0,12 ± 0,03          | 0,980 ± 0,04             |
| 310158867 | 1,72 ± 0,02         | 0,14 ± 0,03          | 0,900 ± 0,01             |
| 310162113 | 4,11 ± 0,04         | –                    | –                        |
| 310169797 | 60,6 ± 0,6          | –                    | –                        |
| 310173738 | 1,25 ± 0,01         | –                    | –                        |
| 310178417 | 2,05 ± 0,02         | 0,09 ± 0,03          | 0,880 ± 0,09             |
| 310179107 | 1,25 ± 0,01         | –                    | –                        |
| 310180439 | 3,53 ± 0,04         | 0,13 ± 0,06          | 0,900 ± 0,64             |
| 310186778 | 1,14 ± 0,01         | 0,11 ± 0,02          | 0,980 ± 0,04             |

| CoRoT ID  | Período fotométrico | Duração do Trânsito  | Profundidade             |
|-----------|---------------------|----------------------|--------------------------|
|           | (dias)              | quando houver (dias) | relativo a trânsitos (%) |
| 310189059 | 0,583 ± 0,006       | 0,05 ± 0,01          | 0,993 ± 0,0016           |
| 310189182 | 1,1 ± 0,01          | 0,09 ± 0,02          | 0,950 ± 0,01             |
| 310197726 | 1,03 ± 0,01         | 0,1 ± 0,02           | 0,981 ± 0,0036           |
| 310199372 | 0,7 ± 0,007         | 0,05 ± 0,01          | 0,970 ± 0,01             |
| 310200670 | 2,05 ± 0,02         | 0,09 ± 0,03          | 0,990 ± 0,01             |
| 310204288 | 0,434 ± 0,004       | 0,043 ± 0,007        | 0,972 ± 0,0009           |
| 310206747 | 0,309 ± 0,003       | 0,03 ± 0,005         | 0,911 ± 0,0004           |
| 310210811 | 1,6 ± 0,02          | 0,16 ± 0,03          | 0,994 ± 0,0081           |
| 310218987 | 1,5 ± 0,02          | 0,08 ± 0,03          | 0,930 ± 0,04             |
| 310219556 | 3,01 ± 0,03         | –                    | –                        |
| 310222062 | 1,49 ± 0,01         | 0,09 ± 0,02          | 0,970 ± 0,04             |
| 310223520 | 1,73 ± 0,02         | 0,1 ± 0,03           | 0,960 ± 0,04             |
| 310225729 | 4,01 ± 0,04         | –                    | –                        |
| 310230396 | 2,18 ± 0,02         | 0,07 ± 0,04          | 0,900 ± 0,16             |
| 310231580 | 4,46 ± 0,04         | –                    | –                        |
| 310234635 | 1,46 ± 0,01         | 0,13 ± 0,02          | 0,990 ± 0,01             |
| 310254442 | 5,96 ± 0,06         | –                    | –                        |
| 310254692 | 12,1 ± 0,1          | –                    | –                        |
| 310273727 | 34,3 ± 0,3          | –                    | –                        |
| 310283357 | 1,03 ± 0,01         | 0,09 ± 0,02          | 0,990 ± 0,01             |
| 310284765 | 1,02 ± 0,01         | 0,07 ± 0,02          | 0,890 ± 0,01             |
| 310292673 | 13,4 ± 0,1          | –                    | –                        |
| 311580387 | 1,19 ± 0,01         | 0,06 ± 0,02          | 0,960 ± 0,04             |
| 311826478 | 5,26 ± 0,05         | –                    | –                        |
| 312584359 | 1,6 ± 0,02          | 0,05 ± 0,03          | 0,910 ± 0,09             |
| 312630186 | 1,22 ± 0,01         | –                    | –                        |
| 315180882 | 0,601 ± 0,006       | 0,06 ± 0,01          | 0,896 ± 0,0025           |

| CoRoT ID  | Período fotométrico | Duração do Trânsito  | Profundidade             |
|-----------|---------------------|----------------------|--------------------------|
|           | (dias)              | quando houver (dias) | relativo a trânsitos (%) |
| 315187628 | $0,363 \pm 0,004$   | $0,036 \pm 0,006$    | $0,913 \pm 0,0016$       |
| 315189285 | $2,14 \pm 0,02$     | $0,13 \pm 0,04$      | $0,930 \pm 0,09$         |
| 315200199 | $1,22 \pm 0,01$     | $0,1 \pm 0,02$       | $0,790 \pm 0,01$         |
| 315201094 | $10,1 \pm 0,1$      | –                    | –                        |
| 315209037 | $3,01 \pm 0,03$     | –                    | –                        |
| 315209726 | $1,1 \pm 0,01$      | $0,09 \pm 0,02$      | $0,990 \pm 0,01$         |
| 315209864 | $5,94 \pm 0,06$     | –                    | –                        |
| 315218278 | $7,7 \pm 0,08$      | –                    | –                        |
| 315218468 | $1,9 \pm 0,02$      | $0,07 \pm 0,03$      | $0,980 \pm 0,09$         |
| 315218485 | $9,8 \pm 0,1$       | $0 \pm 0,2$          | $0,900 \pm 0,36$         |
| 315227731 | $5,01 \pm 0,05$     | $0 \pm 0,08$         | $0,900 \pm 0,25$         |
| 315227843 | $0,312 \pm 0,003$   | $0,031 \pm 0,005$    | $0,974 \pm 0,0009$       |
| 315229664 | $0,99 \pm 0,01$     | $0,09 \pm 0,02$      | $0,962 \pm 0,0036$       |
| 315230291 | $1,14 \pm 0,01$     | $,09 \pm 0,02$       | $0,850 \pm 0,01$         |
| 315230912 | $0,939 \pm 0,009$   | $0,09 \pm 0,02$      | $0,822 \pm 0,0049$       |
| 315238449 | $5,01 \pm 0,05$     | $0 \pm 0,08$         | $0,988 \pm 0,0016$       |
| 315240818 | $0,613 \pm 0,006$   | $0,06 \pm 0,01$      | $0,990 \pm 0,0009$       |
| 315241256 | $1,28 \pm 0,01$     | $0,04 \pm 0,02$      | $0,980 \pm 0,04$         |
| 315241264 | $5,01 \pm 0,05$     | $0 \pm 0,08$         | $0,995 \pm 0,0009$       |
| 315247312 | $0,413 \pm 0,004$   | $0,041 \pm 0,007$    | $0,995 \pm 0,0016$       |
| 315249585 | $0,536 \pm 0,005$   | $0,053 \pm 0,009$    | $0,984 \pm 0,0009$       |
| 315249779 | $1,21 \pm 0,01$     | $0,12 \pm 0,02$      | $0,869 \pm 0,0036$       |
| 315257285 | $0,559 \pm 0,006$   | $0,055 \pm 0,009$    | $0,868 \pm 0,0036$       |
| 315257900 | $3,01 \pm 0,03$     | $0 \pm 0,05$         | $0,900 \pm 0,49$         |
| 315260074 | $0,933 \pm 0,009$   | $0,04 \pm 0,02$      | $0,990 \pm 0,01$         |
| 315267061 | $0,595 \pm 0,006$   | $0,05 \pm 0,01$      | $0,965 \pm 0,0016$       |
| 315267332 | $5,01 \pm 0,05$     | –                    | –                        |



| CoRoT ID  | Período fotométrico | Duração do Trânsito  | Profundidade             |
|-----------|---------------------|----------------------|--------------------------|
|           | (dias)              | quando houver (dias) | relativo a trânsitos (%) |
| 315267513 | $5,01 \pm 0,05$     | –                    | –                        |
| 315267535 | $3,94 \pm 0,04$     | –                    | –                        |
| 315268948 | $3,85 \pm 0,04$     | $0,09 \pm 0,06$      | $0,900 \pm 0,49$         |
| 315278129 | $0,802 \pm 0,008$   | $0,08 \pm 0,01$      | $0,994 \pm 0,0016$       |
| 315278707 | $6,87 \pm 0,07$     | $0 \pm 0,1$          | $0,900 \pm 0,2025$       |
| 315279787 | $0,636 \pm 0,006$   | $0,06 \pm 0,01$      | $0,966 \pm 0,0025$       |
| 315286518 | $0,309 \pm 0,003$   | $0,03 \pm 0,005$     | $0,919 \pm 0,0009$       |
| 315286878 | $0,499 \pm 0,005$   | $0,042 \pm 0,008$    | $0,980 \pm 0,01$         |
| 315297376 | $0,95 \pm 0,01$     | $0,04 \pm 0,02$      | $0,990 \pm 0,01$         |
| 315297379 | $12,8 \pm 0,1$      | $0 \pm 0,2$          | $0,990 \pm 0,0169$       |
| 315298027 | $5,01 \pm 0,05$     | $0 \pm 0,08$         | $0,990 \pm 0,0256$       |
| 315299354 | $5,01 \pm 0,05$     | $0 \pm 0,08$         | $0,990 \pm 0,0324$       |
| 315299931 | $1,41 \pm 0,01$     | $0,1 \pm 0,02$       | $0,910 \pm 0,04$         |
| 315309466 | $0,383 \pm 0,004$   | $0,038 \pm 0,006$    | $0,917 \pm 0,0016$       |
| 500007008 | $8,16 \pm 0,08$     | –                    | –                        |
| 500007022 | $1,9 \pm 0,02$      | $0,05 \pm 0,03$      | $0,900 \pm 0,16$         |
| 500007246 | $0,927 \pm 0,009$   | $0,07 \pm 0,02$      | $0,988 \pm 0,0081$       |
| 600568529 | $1,91 \pm 0,02$     | –                    | –                        |
| 601281836 | $1,26 \pm 0,01$     | –                    | –                        |
| 601309619 | $1,93 \pm 0,02$     | $0,09 \pm 0,03$      | $0,910 \pm 0,09$         |
| 601310027 | $0,556 \pm 0,006$   | $0,055 \pm 0,009$    | $0,983 \pm 0,0004$       |
| 601364466 | $0,545 \pm 0,005$   | $0,054 \pm 0,009$    | $0,994 \pm 0,0025$       |
| 601396452 | $0,358 \pm 0,004$   | $0,035 \pm 0,006$    | $0,884 \pm 0,0009$       |
| 601833294 | $2,4 \pm 0,02$      | $0,1 \pm 0,04$       | $0,900 \pm 0,16$         |
| 601937455 | $2,83 \pm 0,03$     | –                    | –                        |
| 601957728 | $1,47 \pm 0,01$     | $0,12 \pm 0,02$      | $0,910 \pm 0,01$         |
| 601983689 | $0,366 \pm 0,004$   | $0,036 \pm 0,006$    | $0,967 \pm 0,0009$       |

| CoRoT ID  | Período fotométrico | Duração do Trânsito  | Profundidade             |
|-----------|---------------------|----------------------|--------------------------|
|           | (dias)              | quando houver (dias) | relativo a trânsitos (%) |
| 601994101 | 1,08 ± 0,01         | 0,06 ± 0,02          | 0,880 ± 0,04             |
| 602052565 | 1,16 ± 0,01         | 0,06 ± 0,02          | 0,960 ± 0,04             |
| 602095830 | 0,809 ± 0,008       | 0,08 ± 0,01          | 0,950 ± 0,01             |
| 602117983 | 0,5 ± 0,005         | 0,05 ± 0,008         | 0,788 ± 0,0025           |
| 602353365 | 1,21 ± 0,01         | 0,07 ± 0,02          | 0,900 ± 0,04             |
| 603238136 | 1,11 ± 0,01         | 0,04 ± 0,02          | 0,980 ± 0,09             |
| 603238218 | 0,96 ± 0,01         | 0,07 ± 0,02          | 0,960 ± 0,01             |
| 603260810 | 2,03 ± 0,02         | 0,17 ± 0,03          | 0,990 ± 0,09             |
| 603283407 | 1,58 ± 0,02         | 0,08 ± 0,03          | 0,980 ± 0,09             |
| 603306331 | 0,528 ± 0,005       | 0,052 ± 0,009        | 0,975 ± 0,0004           |
| 603408471 | 0,927 ± 0,009       | 0,07 ± 0,02          | 0,990 ± 0,01             |
| 603420279 | 0,903 ± 0,009       | 0,09 ± 0,02          | 0,936 ± 0,0009           |
| 603900751 | 1,99 ± 0,02         | 0,12 ± 0,03          | 0,900 ± 0,04             |
| 604176238 | 1,39 ± 0,01         | 0,13 ± 0,02          | 0,990 ± 0,04             |
| 604178173 | 0,531 ± 0,005       | 0,053 ± 0,009        | 0,849 ± 0,0036           |
| 604180919 | 0,547 ± 0,005       | 0,036 ± 0,009        | 0,990 ± 0,01             |
| 604181510 | 0,597 ± 0,006       | 0,05 ± 0,01          | 0,919 ± 0,0049           |
| 604183778 | 2,16 ± 0,02         | 0,08 ± 0,04          | 0,900 ± 0,16             |
| 604183822 | 1,63 ± 0,02         | 0,16 ± 0,03          | 0,980 ± 0,01             |
| 604189455 | 2,23 ± 0,02         | 0,18 ± 0,04          | 0,980 ± 0,04             |
| 604189510 | 0,449 ± 0,004       | 0,044 ± 0,007        | 0,939 ± 0,0036           |
| 604195039 | 2,11 ± 0,02         | 0,2 ± 0,04           | 0,970 ± 0,09             |
| 604987247 | 0,617 ± 0,006       | –                    | –                        |
| 604988102 | 0,626 ± 0,006       | 0,06 ± 0,01          | 0,840 ± 0,0064           |
| 604990808 | 0,594 ± 0,006       | 0,05 ± 0,01          | 0,976 ± 0,0064           |
| 605089344 | 0,648 ± 0,006       | 0,06 ± 0,01          | 0,772 ± 0,0025           |
| 605094807 | 5,06 ± 0,05         | 0,05 ± 0,08          | 0,000 ± 4                |

| CoRoT ID  | Período fotométrico | Duração do Trânsito  | Profundidade             |
|-----------|---------------------|----------------------|--------------------------|
|           | (dias)              | quando houver (dias) | relativo a trânsitos (%) |
| 605143223 | $0,644 \pm 0,006$   | $0,02 \pm 0,01$      | $0,990 \pm 0,01$         |
| 605144058 | $0,944 \pm 0,009$   | $0,09 \pm 0,02$      | $0,970 \pm 0,01$         |
| 605144423 | $4,93 \pm 0,05$     | –                    | –                        |
| 605144672 | $4,47 \pm 0,04$     | –                    | –                        |
| 605145237 | $1,92 \pm 0,02$     | $0,19 \pm 0,03$      | $0,950 \pm 0,01$         |
| 605303115 | $1,78 \pm 0,02$     | $0,03 \pm 0,03$      | $0,900 \pm 0,25$         |
| 605305820 | $12 \pm 0,1$        | –                    | –                        |
| 605308383 | $2,24 \pm 0,02$     | $0,13 \pm 0,04$      | $0,900 \pm 0,16$         |
| 605309194 | $14,6 \pm 0,1$      | –                    | –                        |
| 616802827 | $0,897 \pm 0,009$   | $0,08 \pm 0,01$      | $0,893 \pm 0,0081$       |
| 616849567 | $0,262 \pm 0,003$   | $0,01 \pm 0,004$     | $0,967 \pm 0,0004$       |
| 617282423 | $0,743 \pm 0,007$   | $0,07 \pm 0,01$      | $0,989 \pm 0,0016$       |
| 617339401 | $0,656 \pm 0,007$   | $0,06 \pm 0,01$      | $0,667 \pm 0,0049$       |
| 617339654 | $1,29 \pm 0,01$     | $0,07 \pm 0,02$      | $0,980 \pm 0,04$         |
| 617339778 | $2,42 \pm 0,02$     | $0,08 \pm 0,04$      | $0,900 \pm 0,16$         |
| 617367366 | $1,53 \pm 0,02$     | $0,09 \pm 0,03$      | $0,930 \pm 0,04$         |
| 617367932 | $4,08 \pm 0,04$     | $0,14 \pm 0,07$      | $0,900 \pm 0,36$         |
| 617485356 | $17,5 \pm 0,2$      | –                    | –                        |
| 617485645 | $2,97 \pm 0,03$     | $0,1 \pm 0,05$       | $0,900 \pm 0,25$         |
| 617573570 | $0,642 \pm 0,006$   | $0,06 \pm 0,01$      | $0,894 \pm 0,0064$       |
| 617663664 | $6,24 \pm 0,06$     | –                    | –                        |
| 617692511 | $1,14 \pm 0,01$     | $0,1 \pm 0,02$       | $0,970 \pm 0,04$         |
| 620558809 | $4,42 \pm 0,04$     | $0,13 \pm 0,07$      | $0,900 \pm 0,49$         |
| 620589194 | $0,336 \pm 0,003$   | $0,033 \pm 0,006$    | $0,991 \pm 0,0016$       |
| 620647925 | $52,1 \pm 0,5$      | –                    | –                        |
| 620677925 | $0,944 \pm 0,009$   | $0,09 \pm 0,02$      | $0,950 \pm 0,01$         |
| 620708794 | $0,535 \pm 0,005$   | $0,053 \pm 0,009$    | $0,979 \pm 0,0025$       |

| CoRoT ID  | Período fotométrico | Duração do Trânsito  | Profundidade             |
|-----------|---------------------|----------------------|--------------------------|
|           | (dias)              | quando houver (dias) | relativo a trânsitos (%) |
| 620829193 | 1,47 ± 0,01         | 0,14 ± 0,02          | 0,980 ± 0,01             |
| 620859934 | 1,23 ± 0,01         | 0,12 ± 0,02          | 0,940 ± 0,01             |
| 623246673 | 0,556 ± 0,006       | 0,055 ± 0,009        | 0,985 ± 0,0016           |
| 623256307 | 1,17 ± 0,01         | 0,03 ± 0,02          | 0,970 ± 0,04             |
| 629806312 | 0,281 ± 0,003       | 0,028 ± 0,005        | 0,993 ± 0,0009           |
| 631900113 | 4,58 ± 0,05         | 0,14 ± 0,08          | 0,800 ± 0,49             |
| 632887345 | 0,41 ± 0,004        | 0,04 ± 0,007         | 0,990 ± 0,0016           |
| 632889843 | 1,82 ± 0,02         | 0,05 ± 0,03          | 0,960 ± 0,04             |
| 633285197 | 2,13 ± 0,02         | 0,06 ± 0,04          | 0,800 ± 0,16             |
| 633683233 | 1,82 ± 0,02         | 0,11 ± 0,03          | 0,930 ± 0,04             |
| 642320997 | 8,26 ± 0,08         | –                    | –                        |
| 651313210 | 0,493 ± 0,005       | 0,046 ± 0,008        | 0,841 ± 0,0025           |
| 651331676 | 0,931 ± 0,009       | –                    | –                        |
| 651340910 | 1,65 ± 0,02         | 0,08 ± 0,03          | 0,900 ± 0,6724           |
| 651368377 | 1,79 ± 0,02         | 0,09 ± 0,03          | 0,800 ± 0,04             |
| 651399127 | 0,91 ± 0,009        | 0,06 ± 0,02          | 0,930 ± 0,01             |
| 651399168 | 3,84 ± 0,04         | –                    | –                        |
| 651399328 | 0,84 ± 0,008        | 0,08 ± 0,01          | 0,000 ± 4,41             |
| 652229185 | 0,66 ± 0,007        | –                    | –                        |
| 652249189 | 0,628 ± 0,006       | 0,06 ± 0,01          | 0,992 ± 0,0064           |
| 652291865 | 0,851 ± 0,009       | 0,08 ± 0,01          | 0,968 ± 0,0081           |
| 652291865 | 0,427 ± 0,004       | 0,042 ± 0,007        | 0,825 ± 0,0016           |
| 652356513 | 0,819 ± 0,008       | 0,07 ± 0,01          | 0,944 ± 0,0064           |
| 652379003 | 0,819 ± 0,008       | 0,07 ± 0,01          | 0,937 ± 0,0064           |
| 652379041 | 0,507 ± 0,005       | 0,05 ± 0,008         | 0,994 ± 0,0016           |
| 652414218 | 0,42 ± 0,004        | 0,042 ± 0,007        | 0,991 ± 0,0025           |
| 653529149 | 0,413 ± 0,004       | 0,041 ± 0,007        | 0,989 ± 0,0016           |

| CoRoT ID  | Período fotométrico | Duração do Trânsito  | Profundidade             |
|-----------|---------------------|----------------------|--------------------------|
|           | (dias)              | quando houver (dias) | relativo a trânsitos (%) |
| 653549255 | 0,806 ± 0,008       | 0,06 ± 0,01          | 0,989 ± 0,0081           |
| 655049546 | 0,427 ± 0,004       | 0,042 ± 0,007        | 0,940 ± 0,0025           |
| 655092590 | 2,22 ± 0,02         | 0,09 ± 0,04          | 0,900 ± 0,25             |
| 655206509 | 2,01 ± 0,02         | 0,04 ± 0,03          | 0,900 ± 0,16             |
| 657366408 | 0,639 ± 0,006       | 0,06 ± 0,01          | 0,927 ± 0,0016           |
| 657368610 | 1,58 ± 0,02         | –                    | –                        |
| 657372541 | 0,799 ± 0,008       | 0,07 ± 0,01          | 0,830 ± 0,0064           |
| 657374997 | 1,55 ± 0,02         | 0,15 ± 0,03          | 0,980 ± 0,01             |
| 657959859 | 0,96 ± 0,01         | 0,09 ± 0,02          | 0,898 ± 0,0009           |
| 657960164 | 0,931 ± 0,009       | –                    | –                        |
| 657970227 | 0,316 ± 0,003       | 0,031 ± 0,005        | 0,995 ± 0,0016           |
| 658646870 | 0,476 ± 0,005       | 0,047 ± 0,008        | 0,994 ± 0,0036           |
| 658647056 | 0,931 ± 0,009       | –                    | –                        |
| 658647056 | 0,802 ± 0,008       | 0,08 ± 0,01          | 0,980 ± 0,01             |
| 658735358 | 4,4 ± 0,04          | 0,08 ± 0,07          | 0,900 ± 0,81             |
| 659454827 | 4,4 ± 0,04          | 0,09 ± 0,07          | 0,900 ± 0,81             |
| 659461091 | 1,09 ± 0,01         | 0,07 ± 0,02          | 0,920 ± 0,01             |
| 659463032 | 0,931 ± 0,009       | –                    | –                        |
| 659468589 | 5,16 ± 0,05         | –                    | –                        |
| 659468633 | 4,07 ± 0,04         | 0,18 ± 0,07          | 0,900 ± 0,25             |
| 659473077 | 3,32 ± 0,03         | 0,09 ± 0,06          | 0,900 ± 0,36             |
| 659476101 | 40 ± 0,4            | –                    | –                        |
| 659671852 | 1,54 ± 0,02         | 0,1 ± 0,03           | 0,990 ± 0,04             |
| 659704208 | 0,917 ± 0,009       | 0,09 ± 0,02          | 0,915 ± 0,0036           |
| 659704223 | 6,69 ± 0,07         | 0,4 ± 0,1            | 0,900 ± 0,64             |
| 659710137 | 4,98 ± 0,05         | –                    | –                        |
| 659711841 | 0,868 ± 0,009       | 0,08 ± 0,01          | 0,777 ± 0,0049           |

| <b>CoRoT ID</b> | <b>Período fotométrico</b><br><i>(dias)</i> | <b>Duração do Trânsito</b><br><i>quando houver (dias)</i> | <b>Profundidade</b><br><i>relativo a trânsitos (%)</i> |
|-----------------|---|---|--|
| 659719492       | $0,611 \pm 0,006$                           | $0,06 \pm 0,01$   | $0,990 \pm 0,0004$                                     |
| 659719532       | $0,573 \pm 0,006$                           | $0,05 \pm 0,01$   | $0,925 \pm 0,0049$                                     |
| 679160109       | $0,781 \pm 0,008$                           | $0,07 \pm 0,01$   | $0,949 \pm 0,0064$                                     |
| 680273657       | $14,5 \pm 0,1$                              | $0 \pm 0,2$   | $0,980 \pm 0,01$                                       |

**APÊNDICE D – PUBLICAÇÕES ACEITAS**

# A modified CoRoT detrend algorithm and the discovery of a new planetary companion

Rodrigo C. Bouffeur,<sup>1\*</sup> Marcelo Emilio,<sup>2,3</sup> Eduardo Janot-Pacheco,<sup>4</sup>  
 Laerte Andrade,<sup>2</sup> Sylvio Ferraz-Mello,<sup>4</sup> José-Dias do Nascimento Júnior,<sup>5,6</sup>  
 J. Ramiro de La Reza<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Observatório Nacional - MCTIC, Rio de Janeiro, RJ, Brazil

<sup>2</sup> Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, PR, Brazil

<sup>3</sup> Institute for Astronomy, University of Hawaii, USA

<sup>4</sup> Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas - USP, São Paulo, SP, Brazil

<sup>5</sup> Univ. Federal do Rio Grande do Norte, UFRN, Dep. de Física, CP 1641, 59072-970, Natal, RN, Brazil

<sup>6</sup> Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics, Cambridge, Massachusetts 02138, USA

Accepted XXX. Received YYY; in original form ZZZ

## ABSTRACT

We present MCDA, a modification of the CoRoT detrend algorithm (CDA) suitable to detrend chromatic light curves. By means of robust statistics and better handling of short term variability, the implementation decreases the systematic light curve variations and improves the detection of exoplanets when compared with the original algorithm. All CoRoT chromatic light curves (a total of 65,655) were analysed with our algorithm. Dozens of new transit candidates and all previously known CoRoT exoplanets were rediscovered in those light curves using a box-fitting algorithm. For three of the new cases spectroscopic measurements of the candidates' host stars were retrieved from the ESO Science Archive Facility and used to calculate stellar parameters and, in the best cases, radial velocities. In addition to our improved detrend technique we announce the discovery of a hot Neptune-like planet that orbits a  $0.79^{+0.08}_{-0.09} R_{\odot}$  star with a period of  $6.71837 \pm 0.00001$  days and has  $0.57^{+0.06}_{-0.05} R_{J}$  and  $0.15 \pm 0.10 M_{J}$ . We also present the analysis of two cases in which parameters found suggest the existence of possible planetary companions.

**Key words:** methods: data analysis, planets and satellites: detection, stars: fundamental parameters.

## 1 INTRODUCTION

Stellar light curves may carry intrinsically long term trends which are associated to the variability in the stellar flux itself. Other sources of trends appear from space-based photometry measurements as systematic variations requiring special analysis to optimize, for instance, planetary transit detections. Earth-like planets demand high quality measurements since the transit generates variations in the flux measurements of, at most, a few percent. Moreover, in order to perform the best assessment of the data we must be able to deal in the best possible way with the presence of intrinsic stellar variability as well as systematic trends caused by the influence of external error sources. Usually detrend techniques are performed combining mathematical and statistical operations, and their design is closely related

to the chosen detection method as discussed by Moutou et al. (2005), Aigrain & Irwin (2004) and Mislis et al. (2010). For a better understanding of light curves detrending problems see Mazeh et al. (2007), Ofir et al. (2010), Kovács & Bakos (2008) and Kim et al. (2009).

CoRoT<sup>1</sup> (CONvection ROTation and planetary Transits) was a space-based mission focused on precise photometric measurements, allowing both stellar seismology analysis and the detection of new exoplanets by means of the transit method (Auvergne et al. 2009). It consisted of a 27 cm telescope equipped with four CCDs cameras in two different fields, one for each main scientific goal, seismology chan-

<sup>1</sup> The CoRoT space mission, launched on 2006 December 27, was developed and is operated by the CNES, with participation of the Science Programs of ESA, ESA's RSSD, Austria, Belgium, Brazil, Germany and Spain.

\* E-mail: rcbouffeur@on.br



nel (bright stars) and exoplanet channel (faint stars). The CoRoT public data set is composed of tens of thousands of light curves obtained in the chromatic or monochromatic mode and was assembled from January, 2007 to November, 2012 by means of short (SR) and long runs (LR). The pointing targets in this mission were chosen within two main regions in the sky, one towards the galactic center (LRc or SRc,  $\alpha = 18^{\text{h}}50^{\text{m}}$ ) and the other towards the galactic anti-center (LRa or SRa,  $\alpha = 06^{\text{h}}50^{\text{m}}$ ). Most stars monitored in the faint stars field were primarily sampled at a 512 s rate. Up to 2,000 stars could also be monitored at a 32 s rate when triggered the so called “alarm mode” (Surace et al. 2008; Bonomo et al. 2012). The original field coverage comprised in the exoplanet channel during each pointing was about  $1.4 \times 2.8$  square degrees, allowing CoRoT to observe up to 12,000 stars per run.

In this work we present a modification to the CoRoT detrend algorithm (CDA) Mislis et al. (2010). Our detrend filtering technique focuses on the treatment of sudden statistical fluctuations, a feature that strongly affects folding phase transit search methods. Mislis et al. (2010) found for the chromatic (CHR) light curves in CoRoT Initial Run IRa01 that less than 1% of this type of event appear in the three colour channels simultaneously. So, this technique uses a comparison obtained in each colour channel individually to attenuate the presence of discontinuities.

All CHR CoRoT light curves — 65,655 in total — were analysed in this work with our algorithm. All CoRoT previously known exoplanets in those light curves were found and new candidates appeared. In section 2 we describe our algorithm, its performance and validation. Section 3 describes the photometric data, the transit detections and modeling, and section 4 the spectroscopy analysis for the found new candidates. The results are presented in section 5 and our conclusions in section 6.

## 2 ALGORITHM

### 2.1 Description

Mislis et al. (2010) developed a technique to detrend CoRoT light curves from sudden intensity changes. Such changes can be of stellar activity origin, although the vast majority are clearly instrumental in nature (Pinheiro da Silva et al. 2008) and strongly affect folding phase transit search methods. Although space based telescopes can provide high precision stellar measurements due to the lack of atmosphere, there are other sources of error to deal with. The measurements provided by the CoRoT satellite detectors frequently suffer with the presence of spurious charge added to the integrated stellar flux as estimated by Mislis et al. (2010). It is primarily the result of the impact of highly energized particles that overcame the protective shielding onto the detectors. Pinheiro da Silva et al. (2008) showed that in the CoRoT case this phenomenon is closely related to the satellite’s low Earth orbit since these particles are originated from the interactions of cosmic rays in the Earth’s upper atmosphere. Indeed, the passage over the South Atlantic Anomaly produces the highest rate of radiation. These sudden variations in the data, commonly referred to as “jumps” in the literature, can be a transitory damage, suffering decay after a

while, or they can generate a permanent bright pixel when the impact alters fundamental properties of the sensor.

Our main goal is to improve the algorithm sensibility in the presence of discontinuities. Therefore, our main modifications of the CDA algorithm are:

1. We replaced the originally employed third order polynomial fit with a resistant moving average. So, the mean value of the light curve section is taken with respect to its central value with an equal number of measurements on either sides,

$$\overline{MA} = \frac{x_m + x_{m-1} + \dots + x_{m-(n-1)}}{n}, \quad (1)$$

where  $n$  is an arbitrary value with respect to the sampling. At this point care is important to avoid overlapping the box-car size with the typical transit durations as well as to minimize attenuation. In the case of the CoRoT data one expects transits up to around 5 hours. Additionally, high frequency signals are not filtered out.

2. In order to deal with the most significant *jumps* and to minimize the local statistical error propagation (that are method dependent) in the final results, we implemented a robust statistics rather than the one adopted by Mislis et al. (2010). At first, we separated the measurements of the three channels into three independent light curves. This colour decomposition, here informally designated as red, green and blue channels (R,G,B), was obtained reading out the split regions within each stellar mask on the CCD, according to the spread of the white light. Each set was then divided into subsets with one day length. A normalization using the resistant mean for each subset  $i$  was performed

$$[R', G', B']_i = \frac{[R, G, B]_i}{\bar{x}_{res[R, G, B]_i}}. \quad (2)$$

For each colour set we randomly selected five subsets and computed the mean resistant standard deviation

$$\bar{\sigma}_{res[R', G', B']_i} = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 \sqrt{\frac{1}{l-1} \sum_{j=k_i}^{k_i+l} \left( [R', G', B']_j - \bar{x}_{res[R, G, B]_i} \right)^2}, \quad (3)$$

where  $i$  is regarded to each subset,  $j$  to each element within the subsets and  $l$  to the number of elements in the subset. The normalised subsets allows to do direct comparisons regarding statistical inference among the three channels. Also, we need to assess the significance of each  $\bar{\sigma}_{res}$  relative to the light curve as a whole, i.e., estimate the presence of considerable statistical variation on each colour. To do so we first compute the resistant standard deviation of each colour set

$$\sigma_{res[R', G', B']_i} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \left( [R', G', B']_i - \bar{x}_{res[R, G, B]_i} \right)^2}, \quad (4)$$

where  $n$  is the set of elements that lie within the sigma cut established in our robust analysis. We compute then the

relative deviations of each colour set to determine in which set the highest deviation is located,

$$\sigma_{rel[R',G',B']} = \frac{\sigma_{res[R',G',B']}}{\bar{\sigma}_{res[R',G',B']}}. \quad (5)$$

Finally, the relative deviations in each colour are ranked and the channel with the highest deviation is replaced by the average value of the channels with the highest and lowest deviations as follows,

$$C_{corr} = \frac{C_{high\sigma_{rel}} + C_{low\sigma_{rel}}}{2}. \quad (6)$$

This procedure is repeated in a loop while the relative deviations decrease relative to the former ones. After that, no significant statistical information can be used to reduce the presence of jumps.

## 2.2 Performance and validation

### 2.2.1 Application to real data

We show now the performance of our technique using the data provided by the CoRoT mission. The light curves were obtained from the [IAS CoRoT Public Archive](#). The data we used from the initial runs were processed with pipeline version 1.x and more recent ones were already available with pipeline version 2.x.

For the sake of simplicity we call our algorithm MCDA (Modified CoRoT Detrend Algorithm). Our analysis is restricted to the CHR light curves, that were obtained using a dispersive device in front of the exoplanet channel detectors, which allowed to discriminate transits events (quasi-achromatic) from stellar activity (strongly chromatic), among other characteristics ([Auvergne 2003](#)).

To do a confident assessment on how much we were able to reduce the dispersion on the data due to the presence of discontinuities we performed the median of absolute deviations from the median (MAD) ([Hoaglin et al. 2000](#)), which is a robust estimator of statistical dispersion. Using these estimates we are able to assess qualitatively and quantitatively how well our detrending method performs when our results are compared to the raw measurements as well as to the detrending performed by the CDA.

In figure 1 we show an arbitrary light curve from the CoRoT data set with the presence of *jumps*. The original flux suffers as much from sudden displacements as from permanent deviations in the measurements. CDA turns out to be very effective to deal with long trend deviations, but less so with short term variations. It is probably the effect of a poor performance of the polynomial fit at the sharp changes in the vicinity of the *jumps*. On the other hand, MCDA was able to remove all the short and long term discontinuities as it can be seen in the bottom plot of the figure. The effectiveness of the technique, however, depends heavily on former assumptions as, for instance, the parameters adopted to perform the smoothing of the light curve (Eq. 1).

Of all runs available, LRa01 is especially interesting for its number of targets and also for had been widely studied to determine the noise properties of the mission's data ([Aigrain et al. 2009](#)). So, to compare the methods and test their effectiveness, we show in Fig. 2 the MAD of the light

curves after applying CDA versus the MAD of the raw data, and the same for MCDA. It is easy to see that MCDA was able to lower the MAD to almost 100% of the 7,470 CHR targets. In a few cases it seems to have added a little noise to the light curves.

The use of a robust approach to assess the deviation's statistics allows MCDA to handle much better the global dispersion of the data, assuring to a higher degree that the chosen sets to be corrected indeed suffer from *jumps*. On the other hand, the lower performance of CDA comes from the way trends are filtered out, such as stellar variability, in combination with the fact that discontinuities in the data deviates the probability distribution from normality, making standard statistical estimators less sensitive.

All the 24 runs studied showed a high improvement on the reduction of the dispersion similar to the run LRa01 in comparison to the original light curves. This shows that the technique is indeed contributing to enhance the detections in the light curves. These transits would not be prominent before due to the dominant signal of the jumps.

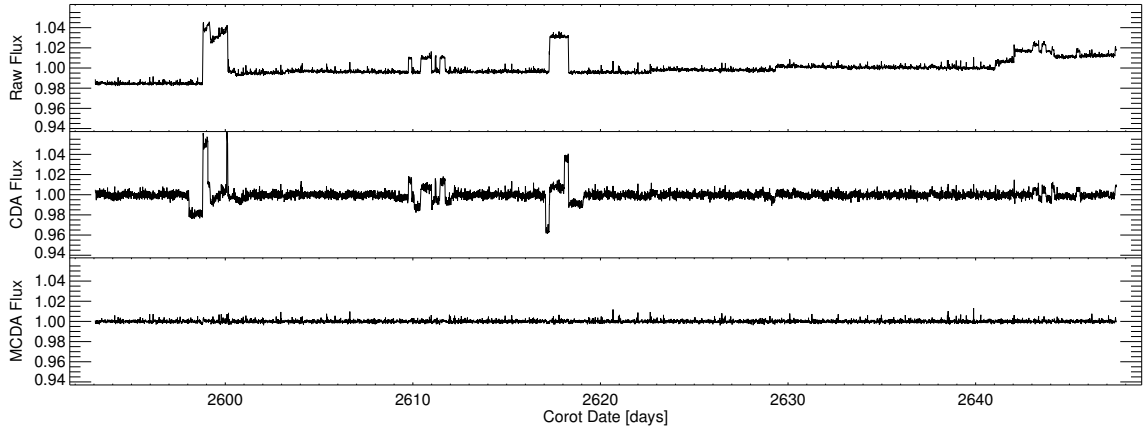
Since the method's procedure for correction is based on averaging the most affected colour with the least affected channel, a little increase on the occurrence of false positives could be expected, like signals that first appeared only in a single colour being imprinted now in other channels. This is however perfectly manageable since modeling of the candidates is preferably done with the raw light curves, where such false positives can be ruled out. On the other hand, the technique helps to lower the occurrence of false negatives, especially the cases where the transits are shallow and would be missed if the discontinuities were not properly handled in advance.

## 3 PHOTOMETRIC ANALYSIS

### 3.1 Transit detections

Transits are caused by the passage of an opaque body in front of a star in the line of sight of the observer. Planetary transits themselves have usually the shape of a box with soft edges caused by the limb darkening observed on the stellar disk. [Rauer & Erikson \(2007\)](#) and [Winn \(2010\)](#) explain in details the phenomenon of transits and the major misinterpretations that can originate from geometry or shape as well as from mimic situations such as background diluted binaries. Although this is a periodic event and there are many approaches to be employed in the frequency domain to detect these signals, box shaped algorithms such as Box-fitting Least Squares (BLS) ([Kovács et al. 2002](#)) are more reliable to deal with low signal-to-noise ratio and also more efficient to perform transit searches as shown by [Aigrain & Irwin \(2004\)](#).

CoRoT Exo field has in total 176,492 light curves. From those, 65,655 are chromatic and 110,837 are monochromatic. We performed the detrending in the entire CHR data set. After applying MCDA we did the search for periodic transits using the BLS algorithm. The output provided by the BLS algorithm is a periodogram. As defined by [Kovács et al. \(2002\)](#), each spike in the periodogram has a signal detection efficiency (SDE), which is dependent on the number of frequencies used to test for the presence of box-shaped signals.



**Figure 1.** Comparison between the original flux observed with the CoRoT satellite and the results of the applied detrends methods discussed in section 2. At the top a CoRoT light curve shows the presence of discontinuities in the original normalised flux. The middle shows the light curve detrended using the CDA algorithm. The bottom shows the correction using the MCDA method described in this work.

We established a SDE cut and ranked our first generation candidates.

Many false positives can be ruled out at this stage. We tested for each candidate the difference in the depths of odd and even transits in the three channels independently. A visual inspection was carried out on each remaining pre-candidate checking for the occurrence of the transits in the three channels using the raw data. We also checked for the presence of shallow occultations and strong deep V-shaped transits, that are usually featured in binaries, due to the low radius ratio between the companions. To estimate the transit parameters in an optimal way we analysed the singular spectrum of the variability present in the measurements as explained next.

Besides the already published CoRoT planets, we detected 45 still unpublished candidates within the depth limit of 2%. Radial velocity measurements were publicly available in the ESO Science Archive Facility for 11 of these cases, from which we chose three promising cases to present our findings.

### 3.2 Variability Modeling

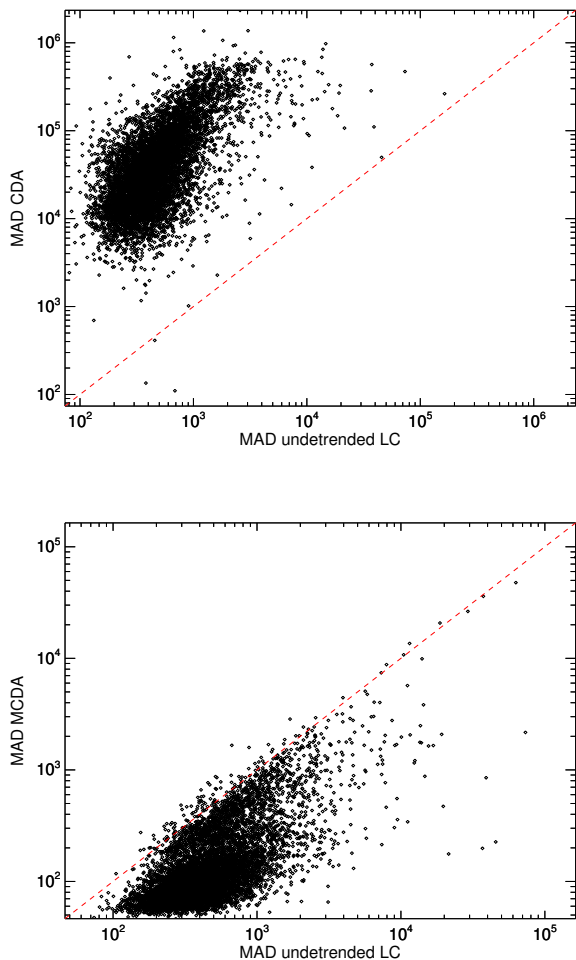
It is well known and expected that detrend techniques introduce distortions in the transit shapes compromising in some level the information on depth and duration of the event, and consequently the determination of transit parameters. To make the best use of the information we performed a custom detrend in each candidate light curve with the aim of disentangling the transit signal from the variability present in the measurements.

The Singular Spectrum Analysis (SSA) is a technique based on the division of a time series into its constituent parts of trends, periodicity and residual structures. It does not assume any parametric model and has been well employed in studies of non trivial periodicities in Climate and Astronomy time series. To this end it makes use of the decomposition of the original time series into sub data sets,

building a multidimensional series from which the singular spectrum is produced – the spectral decomposition of the multidimensional series into its eigenvalues set (Elsner & Tsonis 1996; Ghil et al. 2002).

To isolate the variability present in the light curve we modeled the undetrended light curve without the transits. To remove properly the transits signals we did the following. First, corrections were performed when heavy discontinuities understood as systematics were found. The data was then re-sampled to a 512 s cadence and long trends were treated using a Savitzky-Golay filter (Savitzky & Golay 1964). A trapezoidal function was fitted over the time series folded on the candidate’s period to derive the planetary parameters using the equations derived by Seager & Mallén-Ornelas (2003) and fitted with a Levenberg-Marquardt algorithm (Markwardt 2009). Finally, using the information on duration and epoch for each transit, they were located and removed from the corrected raw light curve and the gaps were interpolated using a polynomial function.

Using this corrected light curve without transits we did the SSA of the time series and determined the significant components to reconstruct the signal. Doing so we are also able to some degree to remove the variability convolved with the transits and thus reduce the impact of the detrend in the transit parameters. The signal reconstruction from the SSA components was done using the eigenvalues that were above the noise level present in the light curve. To measure which eigenvalues could be distinguished from pure noise we performed a 100 times Monte-Carlo simulation shuffling the data for each light curve as employed before by Emilio et al. (2010). Figure 3 shows the eigenvalues for 250 modes and the average eigenvalues found with the Monte-Carlo simulation. Figure 4 exhibits the signal reconstruction based on the eigenvalues calculated on the previous plot and the light curve detrended with only the transits signals.



**Figure 2.** In the top figure we show the median of absolute deviations from the median (MAD) of each light curve for the LRA01 run after detrending the data using the CDA described in [Mislis et al. \(2010\)](#) against the MAD of the raw data set. The bottom figure exhibits the MAD results using our method. It is noticeable that the MCDA provides a higher reduction in the statistical dispersion originated from jumps and stellar variability.

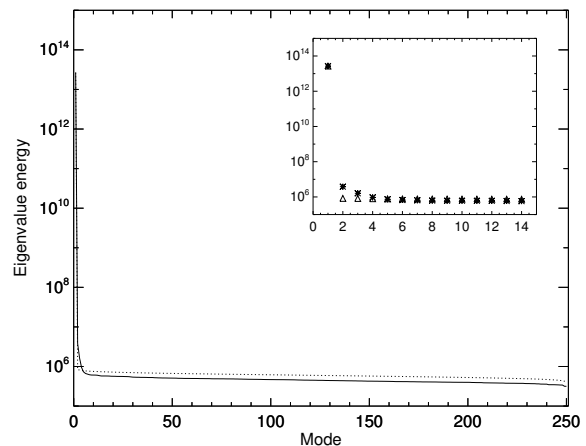
## 4 SPECTROSCOPIC ANALYSIS

### 4.1 Measurements

From the list of host stars from the photometric data suspected or confirmed of having at least one exoplanet, spectroscopic data from the HARPS instrument were retrieved from the [ESO Science Archive Facility](#) ([Retzlaff et al. 2014](#)). HARPS is a fiber-fed cross dispersed spectrograph installed at the coudé west focus of the La Silla 3.6m telescope. Its main goal is the search for exoplanets using the radial velocity method with high accuracy (1 m/s) ([Mayor et al. 2003](#)). Table 1 lists the HARPS observations ranging from 2010 to 2013 for the host stars of interest that were obtained.

### 4.2 Stellar and Planetary Parameters

Spectra available from the ESO data bank are already reduced and wavelength calibrated, using the HARPS



**Figure 3.** Singular spectrum analysis of CoRoT ID 652345526. The filled line shows the eigenvalues of the 250 modes calculated using the corrected light curve. The dotted line represents the average eigenvalues after 100 Monte Carlo simulations shuffling the original data. The zoomed plot shows the significant components (stars) which are over the noise level components (triangles).

pipeline. In it, the radial velocity was measured on each extracted spectrum by means of a weighted cross-correlation with a G2 stellar mask using a Thorium-Argon lamp with a second fiber to track instrumental drifts during the night. The uncertainty in RV measurements are mostly due to contributions by photon and readout noise, wavelength calibration error and instrumental drift error ([Fischer et al. 2016](#)).

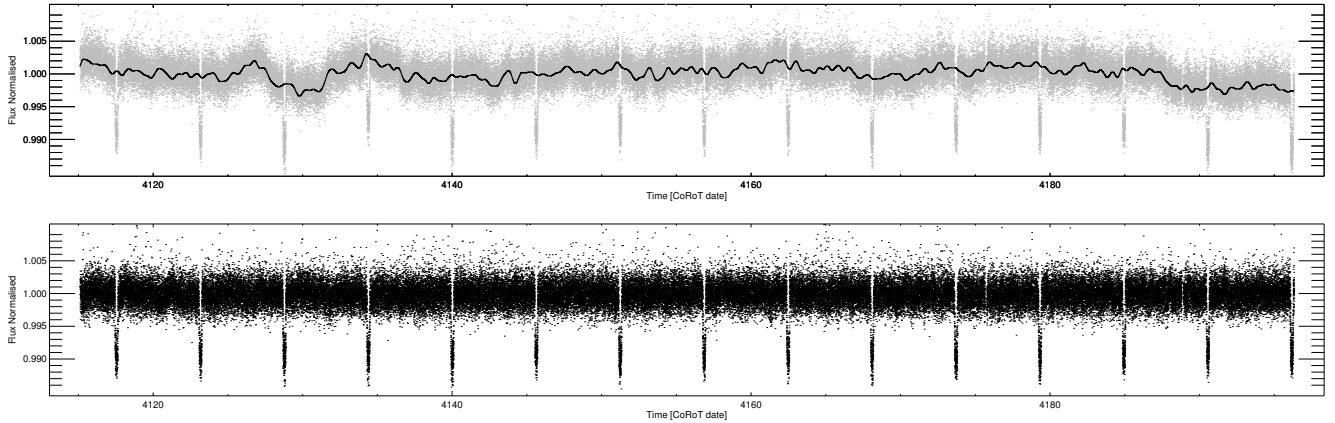
The spectroscopic analysis has been performed in two steps. First, spectra were analyzed with the Spectroscopy Made Easy (SME) package ([Valenti & Piskunov 1996](#)) that derive accurate stellar parameters (temperature, surface gravity, [Fe/H], etc.). SME then produces a spectral synthesis of the star. Figure 5 shows the spectral synthesis for CoRoT ID 223977153 (table 2).

Afterwards,  $T_{\text{eff}}$ ,  $\log g$  and [Fe/H] were used as input for the Exofast algorithm ([Eastman et al. 2013](#)). Exofast is an ensemble of routines that may be used to fit simultaneously exoplanetary photometric transits and radial velocity variations. The code makes a model of the planetary transit taking into account stellar and transit characteristics, giving as output the stellar and the planetary parameters, with the help of accurate mass and radius determination of stars by [Torres et al. \(2010\)](#). We applied the Exofast algorithm to our three stars. The results are given on Tables 2 and 3.

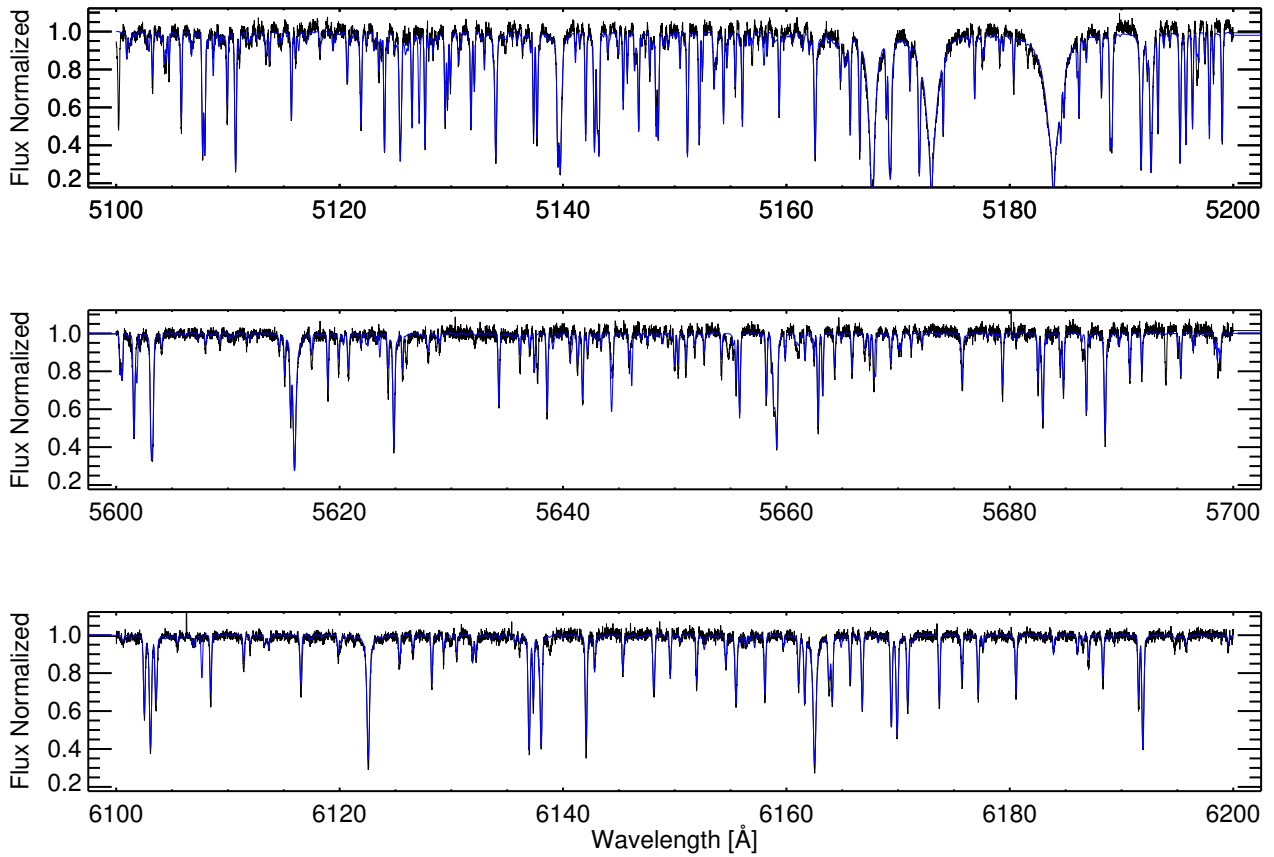
As can be seen in Fig. 6, the results for the stellar parameters agree nicely with those expected for stars of similar masses and solar metallicity computed with the Geneva evolutionary track models ([Schaller et al. 1992](#)).

## 5 RESULTS

The contamination of eclipsing binaries diluted in the observed targets' flux is one major concern in the analysis of transit candidates and is commonly performed with follow up photometry. Two of our targets (CoRoT IDs 223977153



**Figure 4.** Singular spectrum reconstruction for the CoRoT ID 652345526 light curve. There were used the five eigenvalues that are distinguishable from noise level to reconstruct the variability of the light curve excluding the transits. The top image shows the original light curve and signal reconstruction represented by the black line. At the bottom the transits corrected for the variability.

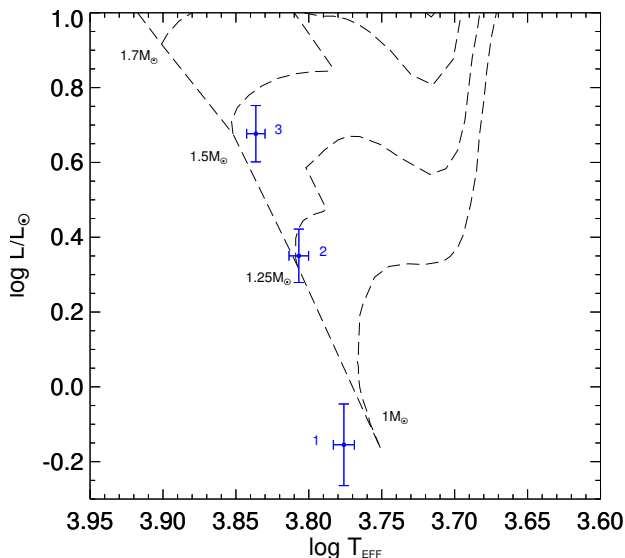


**Figure 5.** Spectral synthesis results using the SME algorithm for CoRoT ID 223977153 done with a master spectrum integrated from the HARPS observed spectra. The blue line corresponds to the final synthesis.



**Table 1.** HARPS spectroscopic data retrieved from the [ESO Science Archive Facility](#) for the host stars presented.

| CoRoT ID  | Number of spectra | Interval of observations |
|-----------|-------------------|--------------------------|
| 223977153 | 21                | 23/01/2010 – 05/02/2012  |
| 104848249 | 11                | 17/06/2012 – 28/09/2013  |
| 652345526 | 06                | 14/06/2012 – 09/07/2012  |



**Figure 6.** Evolutionary tracks for selected solar mass stars using the Geneva stellar models (Schaller et al. 1992). Crosses represent the parameters of our selected stars derived using the Exofast code. [1] CoRoT ID 223977153; [2] CoRoT ID 104848249 and [3] CoRoT ID 652345526. See table 2.

and 104848249) were observed in two CoRoT runs with different masks. In this work we also made use of the unprecedented data released by the Gaia mission (Gaia Collaboration et al. 2016a,b) as well as of the Sloan Digital Sky Survey Ninth Release - SDSS9 catalog (Ahn et al. 2012). To rule out the sources that might be bright enough to mimic transit features we detailed all known stars present inside each object’s observed mask and, taking the spectral response of the CoRoT satellite detectors as reference (Levacher 2006; Auvergne et al. 2009), estimated the total flux contribution of background sources. More details in the following subsections.

The measurements of the radial velocity of our targets were taken in a very irregular time spacing. This introduces false peaks in the power spectrum. We choose then to make the frequency analysis of the radial velocity measurements obtained by HARPS using the CLEANEST Algorithm (Foster 1996) and Period 04 (Lenz & Breger 2005). CLEANEST is a time analysis technique to detect signals in time series with irregular time spacing. It uses statistics based from Lomb-Scargle modified periodogram (Scargle 1982) and the date-compensated discrete Fourier transform (Ferraz-Mello 1981). The Power Spectrum follows a chi-square distribution

with an expected value of one and two degrees of freedom per frequency fitted. Period 04 is a tool written in Java/C++ to find frequencies in astronomical time series containing gaps. It allows the calculation of the uncertainties of the fitted parameters by means of a Monte Carlo simulation. Both algorithms resulted in consistent results. We also performed a F-test. This statistical test if the ratio of the sum of residuals squared decreases significant more than the relative change of the degrees of freedom from a simple model to a more complex one. The planetary system parameters were obtained using the Exofast algorithm Eastman et al. (2013) as explained in the previous section.

### 5.1 CoRoT ID 223977153

The object CoRoT 223977153-a – a faint star with coordinates  $\alpha = 06:40:46.843$  and  $\delta = +09:15:26.752$  – was observed in two runs during the mission. More details on the stellar parameters can be found in Table 2. The first measurements were taken in the SRa01 run during March, 2008. The second set was observed during the SRa05 campaign from November, 2011 to January, 2012.

Previous studies had already been carried out for this target. Guenther et al. (2013) did high angular resolution measurements and infrared spectroscopy, but did not find any candidate companions very close to the star. Klagyivik et al. (2013) performed a variability survey in the CoRoT SRa01 field and classified the star as a Gamma Doradus variable with period of  $0.915 \pm 0.005$  days and amplitude  $0.015 \pm 0.008$  mag. Therefore none of the CoRoT photometric light curves have this period and our SME analysis of the HARPS spectra classify this star as G0VI.

To reinforce the analysis of background eclipsing binaries in addition to Guenther et al. (2013) we analyzed the transits depth in the three channels separately and compared the depths with all sources from the SDSS9 catalog overlapping with the target’s mask. We measured transits’ depths of  $0.0027 \pm 0.0004$  (red),  $0.0029 \pm 0.0007$  (green) and  $0.0028 \pm 0.0009$  (blue). Figure 7 (a) shows the contaminating sources present in the mask during the two runs. We converted the magnitudes into relative fluxes and used the transit depth as an estimate of what would be the apparent magnitude contamination limit. In this case, a 0.3% flux variation sets a limit of  $20.45 \pm 0.08$  mag. None of the sources present in the mask were bright enough to possibly mimic the observed transit. The total contamination as a function of the target star inside the mask is of  $0.06 \pm 0.02\%$ .

This star presents a strong activity visible in the light curves seen in both epochs (see Fig. 8). A modulation of  $\sim 11.4$  days in the photometric data is best explained as due to stellar rotation. The same rotational frequency is found in radial velocity measurements. The  $v \sin(i)$  found by the SME algorithm resulted in  $3.2 \pm 1.0$  km/s, with the estimated radius for this star, the rotation period (supposing  $i = 90^\circ$ ) is  $14 \pm 6$  days. Inside the  $1\sigma$  error of the rotation photometric period found. Fig. 11 top panel shows the CLEANEST spectrum of the 21 radial velocity measurements of the CoRoT 223977153 star. The rotational and the planetary periods are shown in vertical dashed lines and the significant levels are shown in dashed horizontal lines. Rotational period appeared as more than 95% of significance in the CLEANEST power spectrum. The precision found in

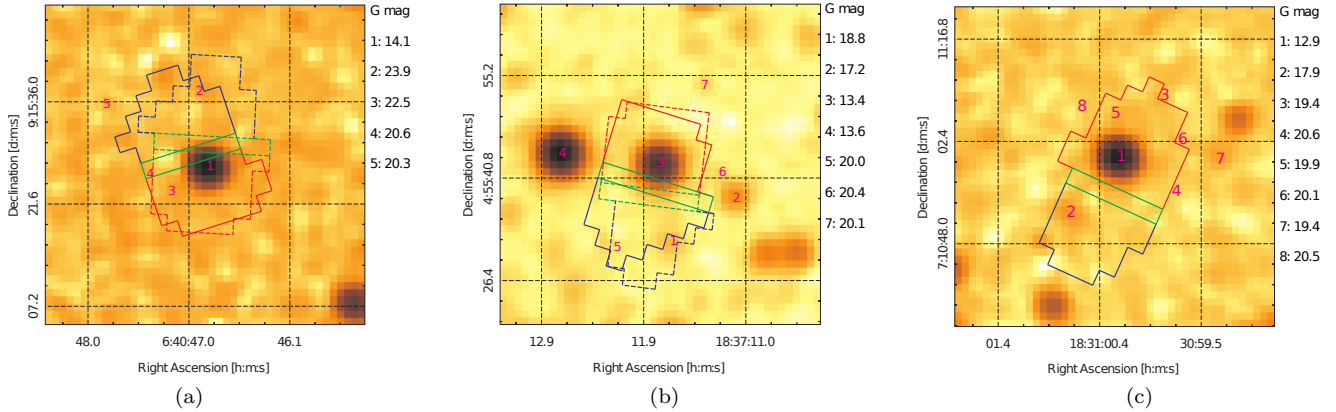
**Table 2.** Stellar Parameters based on calculations provided by the Exofast algorithm.

| Parameter              | Units                            | ID 223977153           | ID 104848249           | ID 652345526           |
|------------------------|----------------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| $M_*$ .....            | Mass ( $M_\odot$ ) .....         | $1.08^{+0.08}_{-0.07}$ | $1.18^{+0.08}_{-0.07}$ | $1.41 \pm 0.09$        |
| $R_*$ .....            | Radius ( $R_\odot$ ) .....       | $0.79^{+0.08}_{-0.09}$ | $1.22 \pm 0.09$        | $1.6 \pm 0.1$          |
| $L_*$ .....            | Luminosity ( $L_\odot$ ) .....   | $0.7 \pm 0.2$          | $2.24 \pm 0.4$         | $4.75^{+0.9}_{-0.8}$   |
| $\log(g_*)$ .....      | Surface gravity (cgs) .....      | $4.67^{+0.11}_{-0.08}$ | $4.21^{+0.07}_{-0.06}$ | $4.13^{+0.05}_{-0.07}$ |
| $T_{\text{eff}}$ ..... | Effective temperature (K) .....  | $5970 \pm 100$         | $6410 \pm 100$         | $6860 \pm 100$         |
| [Fe/H] .....           | Metallicity .....                | $0.0 \pm 0.2$          | $-0.2 \pm 0.2$         | $0.0 \pm 0.2$          |
| $V \sin(i)^a$ .....    | Rotational Velocity (km/s) ..... | $3.2 \pm 1.0$          | $23 \pm 1$             | $21 \pm 1$             |
| Spectral Class .....   | .....                            | G0VI                   | F7V                    | F4V                    |
| Magnitude G band ..... | .....                            | $14.108 \pm 0.003^b$   | $13.433 \pm 0.001^c$   | $12.870 \pm 0.001^c$   |

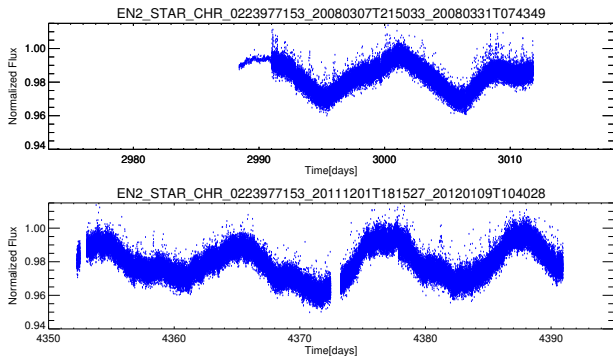
<sup>a</sup> Rotational velocities were calculated with the SME algorithm.

<sup>b</sup> Magnitude obtained from SDSS9 catalog (Ahn et al. 2012).

<sup>c</sup> Magnitude obtained from Gaia catalog (Gaia Collaboration et al. 2016a,b).



**Figure 7.** 2MASS fields (Skrutskie et al. 2006) detailing where each target was observed by the CoRoT mission. (a) CoRoT ID 223977153: the target is identified as source 1. A dashed line delineates the mask used during the SRa01 run while the plain line corresponds to the mask at the run SRa05. (b) CoRoT ID 104848249: star marked as source 3. The dashed mask corresponds to the run LRc05 and the plain mask to the run LRc06. (c) Field with CoRoT ID 652345526 and has the star targeted as source 1. It was observed during the run LRc07. Each mask is divided in three regions corresponding to the three channels read out from the CoRoT frames and are indicated with their corresponding colors: red, green and blue. Magnitudes of contamination sources inside and neighbouring the masks are listed at the right side of each image and they were obtained from the SDSS9 (a) and Gaia (b and c) catalogs.



**Figure 8.** Light curves for CoRoT ID 223977153. Top: Measurements of SRa01 campaign during March, 2008. Bottom: Measurements of SRa05 campaign from November, 2011 to January, 2012.

this frequency agrees with the photometric measurements within three significant figures. Another strong indicator is the anti-correlation observed when the bisector span was

plotted against the radial velocity measurements (left panel of 12).

We modeled this frequency up to its second harmonic and subtracted it from the radial velocity data as suggested by Boisse et al. (2011), taking into account the phase difference in each data set. The first 8 radial measurements for this star is separated by 692 days from the last 13 measurements. The configuration of the star spots is expected to be different from each set, what will make the amplitude and phase different for the rotation. We notice that when making individual power spectrum for each of the two sets of data. The rotation period found in photometry measurements they also have different phases. The best result came when we least-square fit at once both data sets with the same rotation period but different phases and amplitudes and a unique phase and amplitude for the second period found in the photometric data plus a constant. Fig. 11 bottom panel shows the residual CLEANEST spectrum after subtracting the rotation signal resulted from our least-square fit from the radial velocity measurements. The same period of  $\sim 6.7$  days found in the photometric measurements appear as 98%

of significance in the CLEANEST power spectrum. We also subtract the rotation signal from the bisector span plot to show the decrease of the anti-correlation (right panel of 12).

Although the result obtained with the CLEANEST spectrum is statistically significant, we test if it is substantively significant analyzing the spread on the weighted residuals given the hypothesis of the presence of a planet (see Beaugé et al. (2012)). We ran  $10^6$  Monte Carlo realizations to compare the best weighted residual for two models: (a) only rotational modulation due to stellar activity is present in the radial velocity data and (b) rotational modulation plus the gravitational pull of a planet. In this test we used only the last set of the HARPS observations (13 measurements) to maximize the degrees of freedom ruling out the differences in rotational amplitude and phase between the two data sets.

The analysis took into account the time of the transits and the periods determined from photometry and we used only the fundamental rotational frequency. Before the test was performed, a study on orbital eccentricity was also done and, given the lack of data, it is equally likely to have  $e = 0$  as values up to  $e = 0.2$ . Thus, we assume a more simple circular orbital model. The best solution found for the model  $a$  minimized the solution around 13.8 m/s. When we compare the results with  $b$  we see a reduction in the residuals to 9.4 m/s. The improvement observed lies close to  $2\sigma$  which would give us a FAP not far from 4.5%.

In Figure 10 we show the radial velocity measurements and the best orbital solution for CoRoT ID 223977153. A hot giant planet was found around the star. Table 3 shows the planetary parameters computed with the Exofast algorithm. The semi-amplitude velocity of the planet found with realistic errors is  $14 \pm 10$  m/s and corresponds to a body with  $0.15 \pm 0.1 M_J$  and radius  $0.57^{+0.06}_{-0.05} R_J$  with a period of  $6.71837 \pm 0.00001$  days found both in photometric and spectroscopy data. The high precision of the period determination is due to the fact that the two data sets allowed the fitting of the transits within an interval of more than 200 orbits. Figure 9 shows the folded light curve for CoRoT ID 223977153. The planet orbits its host star which has a mass comparable to our Sun at a semi-major axis smaller than Mercury's orbit.

## 5.2 CoRoT ID 104848249

Figure 14 shows the folded light curve for the CoRoT ID 104848249 observed during the campaigns LRc05 and LRc06. The star has coordinates  $\alpha = 18:37:11.798$  and  $\delta = +04:55:42.726$  and its apparent magnitude in the R band is 13.7. The observational span in photometry is of 168.3 days with a short interval of a few days in between, from April to September, 2010.

The separate analysis of the transits in the three channels revealed depths of  $0.0025 \pm 0.0001$  (red),  $0.0025 \pm 0.0002$  (green) and  $0.0028 \pm 0.0002$  (blue). Using the Gaia photometry information we estimated the contamination limit for this transit depth in  $19.74 \pm 0.04$  mag in the G band. Figure 7 (b) shows two contaminants inside the mask during the run LRc05 and one contaminant during the run LRc06. Both the cases are, in terms of brightness, close to the edge of the contamination limit as well as located at the edges of the blue channel. A comparison among the transits' depths

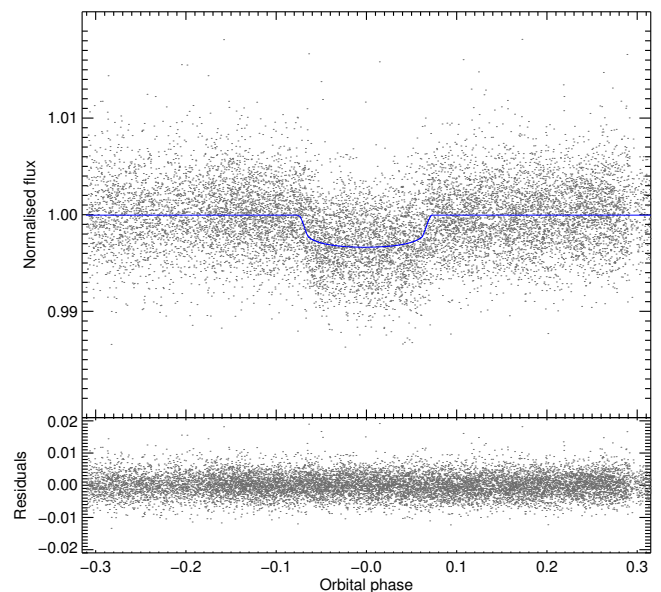


Figure 9. Folded light curve for CoRoT ID 223977153.

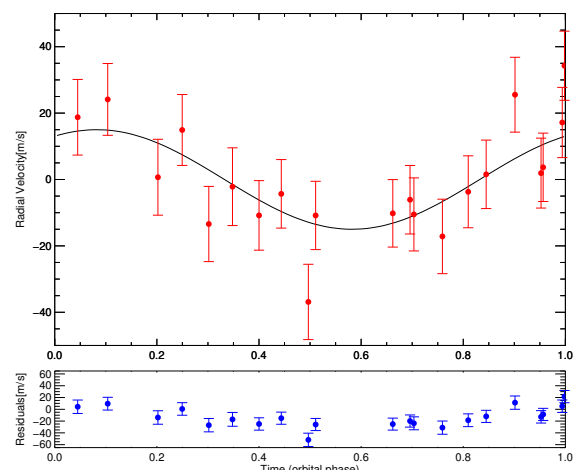


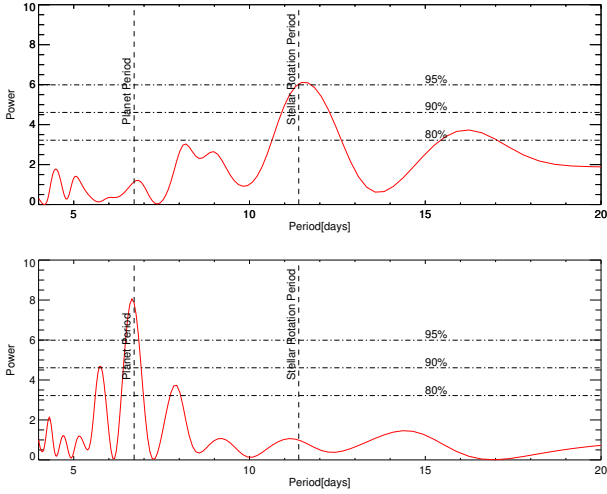
Figure 10. Top: Best solution for the radial velocity measurements of CoRoT ID 223977153 after subtraction of the rotation period and its two first harmonics (see Table 3). Bottom: Residuals after subtracting from the model.

and their uncertainties strongly suggests that they are actually a feature from the target star leaving little room for the case of a background contamination. The total contamination inside the mask as a function of the target star is estimated in  $0.9 \pm 0.4\%$  in the run LRc05 and  $0.7 \pm 0.3\%$  in the run LRc06.

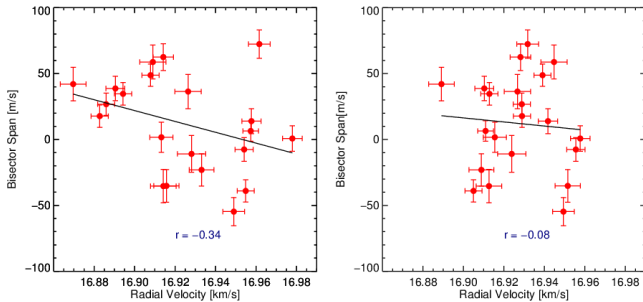
The best fit parameters for the transit model are listed in Table 3. The candidate has period of  $5.70852 \pm 0.00007$  days and given the stellar parameters we calculate a radius of  $0.65 \pm 0.06 R_J$  and the semi-major axis of  $0.066 \pm 0.001$  AU.

Eleven radial velocity measurements were available at ESO Science Archive Facility covering 467.7 days. Fig 13 shows the CLEANEST power spectrum of the radial velocity measurements for this star. The power spectrum is dom-





**Figure 11.** Top: CLEANEST Spectrum of 21 measurements of radial velocity of CoRoT ID 223977153. The rotation and the Planet Period are shown in vertical dashed lines and the significant levels are shown in dashed horizontal lines. Rotational period appeared as more than 95% of significance in the CLEANEST power spectrum. Bottom: Residual CLEANEST Spectrum after subtracting the rotation signal resulted from our least-square fit from the radial velocity measurements. The same period of ~6.7 days found in the photometric measurements appear as 98% of significance in the CLEANEST power spectrum.

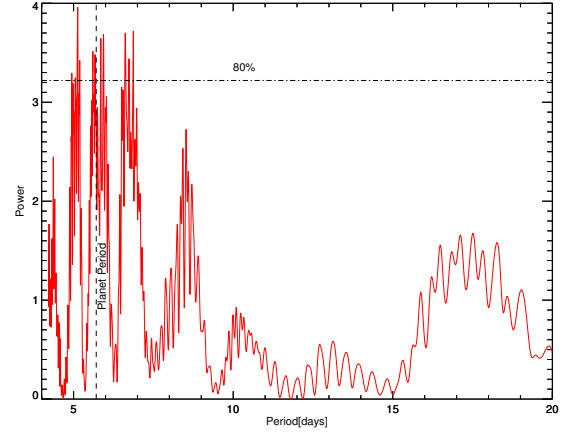


**Figure 12.** Left: Anti-correlation between bisector span and the radial velocity measurements of CoRoT ID 223977153 indicating the radial velocity measurements are affected by the stellar activity. Right: The same plot after subtracting from a stellar rotational model.

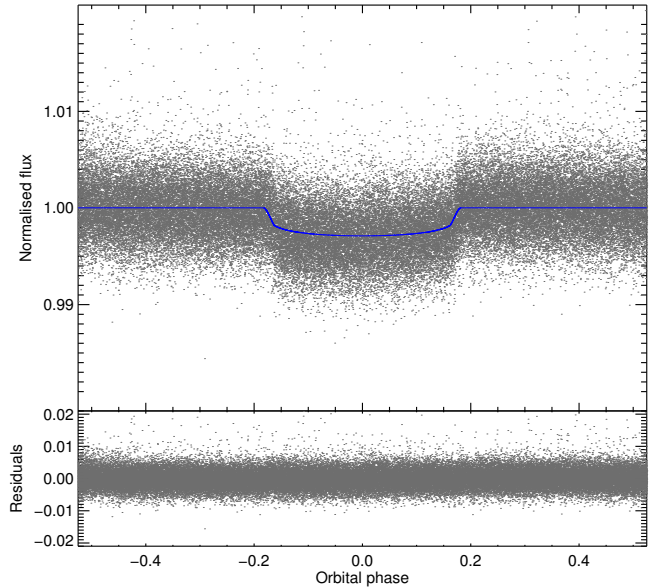
inated by the window function. The photometric period of 5.7 days appear in the CLEANEST spectrum among a group of frequencies where the strongest peak have more than 80% of significance. The maximum semi amplitude span found in the data is around 660 m/s and could indicate the presence of a companion up to  $6 M_J$ . The absence of anti-correlation between the bisector span and radial velocity suggest no perturbing stellar activity in the radial velocity data. More radial velocity measurements are needed to confirm beyond doubt the nature of the companion.

### 5.3 CoRoT ID 65234526

The photometry for this target was taken during the LRC07 run at coordinates  $\alpha = 18:31:00.241$  and  $\delta = +07:11:00.125$ . It is a faint star with apparent magnitude in the R band



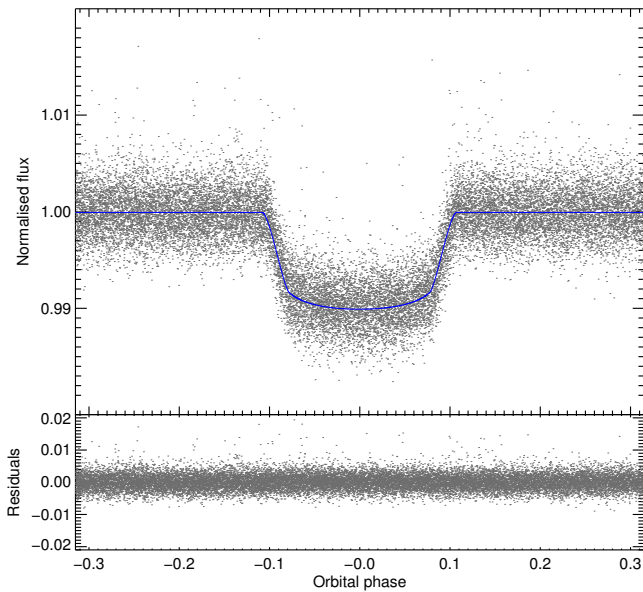
**Figure 13.** CLEANEST Spectrum of 11 measurements of radial velocity of CoRoT ID 104848249. The photometric period is shown in vertical dashed lines and the significant levels are shown in dashed horizontal lines.



**Figure 14.** The folded light curve for CoRoT 104848249.

of 13.0 and fifteen transits were observed during this time coverage.

The transit analysis in the three colors has shown to be very consistent. We measured a depth of  $0.0086 \pm 0.0006$  in the red channel,  $0.009 \pm 0.001$  in the green channel and  $0.008 \pm 0.001$  in the blue channel. From the Gaia catalog we have a magnitude in the G band of  $12.870 \pm 0.001$ , and an estimated contamination limit of  $17.97 \pm 0.04$  mag. The figure 7 (c) shows two contaminants inside the observed mask with one case (object 2) where the measured magnitude overlaps the contamination limit. But the one magnitude level lower uncertainties found in the dispersion of the transit signal in the red channel antagonizes the fact that most of the signal comes from the blue channel. The amount of flux contam-



**Figure 15.** The folded light curve for CoRoT 652345526.

ination inside the mask as a function of the target star is estimated in  $1.0 \pm 0.6\%$ .

The period found for this candidate is of  $5.61618 \pm 0.00004$  days. It has  $1.4 \pm 0.1 R_J$  and orbits the star at a distance of  $0.069 \pm 0.002$  AU. Figure 15 shows the fold phased light curve and the residual from the adjusted model. More information about the transit and companion parameters are given in Table 3. Only six radial velocity measurements were available at the ESO Science Archive Facility covering 21.9 days for this star. We could make no further conclusions on the nature of the candidate. Moreover, we did not see strong indications of stellar activity given the stellar rotational velocity.

## 6 CONCLUSIONS

We presented in this work a modification of the CoRoT Detrend Algorithm. The implementation using robust statistics decreased the systematic light curve variations and improved the detection of exoplanets when comparing with the original algorithm. All CHR CoRoT light curves (a total of 65,655) were analyzed in this work with our algorithm. All CoRoT known exoplanets in those light curves were found and we presented the analysis of three CoRoT photometric candidates. Spectroscopic measurements of the host star candidates were retrieved from the ESO Science Archive Facility public data base. We then derived the stellar parameters using the Spectroscopy Made Easy package and the Exofast algorithm. CoRoT ID 104848249 candidate has a period of  $5.70852 \pm 0.00007$  and orbits a dwarf star with  $1.22 \pm 0.09 R_\odot$ . CoRoT ID 652345526 candidate has a period of  $5.61618 \pm 0.00004$  days and orbits a F4V star with  $1.6 \pm 0.1 R_\odot$ . Both CoRoT ID 104848249 and CoRoT ID 652345526 need more radial velocity measurements to confirm the nature of these transits. A hot giant planet was found around the active star CoRoT ID 223977153. With period of  $6.71837 \pm 0.00001$  it is an exoplanet with mass of

$0.15 \pm 0.10 M_J$  and  $0.57^{+0.06}_{-0.05} R_J$ . This star was observed in two CoRoT runs: SRa01 and SRa05.

## ACKNOWLEDGEMENTS

Based on observations collected at the European Organisation for Astronomical Research in the Southern Hemisphere under ESO programmes 184.C-0639(A) and 188.C-0779(A).

This research has made use of the ExoDat Database, operated at LAM-OAMP, Marseille, France, on behalf of the CoRoT/Exoplanet program.

This work was supported by CAPES. We wish to thank the CoRoT team for the acquisition and reduction of the CoRoT data. We thank D. Mislis for the productive talk during the 2nd CoRoT Symposium in Marseille.

## REFERENCES

- Ahn C. P., et al., 2012, *ApJS*, **203**, 21
- Aigrain S., Irwin M., 2004, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, **350**, 331
- Aigrain S., et al., 2009, *A&A*, **506**, 425
- Auvergne M., 2003, *Proceedings of SPIE*, **15**, 170
- Auvergne M., et al., 2009, *A&A*, **506**, 411
- Beaugé C., Ferraz-Mello S., Michtchenko T. A., 2012, *Research in Astronomy and Astrophysics*, **12**, 1044
- Boisse I., Bouchy F., Hébrard G., Bonfils X., Santos N., Vauclair S., 2011, *A&A*, **528**, A4
- Bonomo A. S., et al., 2012, *Astronomy & Astrophysics*, **547**, A110
- Eastman J., Gaudi B. S., Agol E., 2013, *PASP*, **125**, 83
- Elsner J. B., Tsonis A. A., 1996, *Singular Spectrum Analysis: A new tool in Time Series Analysis*, 1 edn. Springer US
- Emilio M., et al., 2010, *Astronomy & Astrophysics*, **522**, A43
- Ferraz-Mello S., 1981, *AJ*, **86**, 619
- Fischer D. A., et al., 2016, *PASP*, **128**, 066001
- Foster G., 1996, *AJ*, **111**, 541
- Gaia Collaboration et al., 2016a, *A&A*, **595**, A1
- Gaia Collaboration et al., 2016b, *A&A*, **595**, A2
- Ghil M., et al., 2002, *Reviews of Geophysics*, **40**, 1003
- Guenther E. W., et al., 2013, *A&A*, **556**, A75
- Hoaglin D. C., Mosteller F., Tuckey J. W., 2000, *Understanding Robust and Exploratory Data Analysis*. Wiley-Interscience
- Kim D.-W., Protopapas P., Alcock C., Byun Y.-I., Bianco F. B., 2009, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, **397**, 558
- Klagyivik P., et al., 2013, *ApJ*, **773**, 54
- Kovács G., Bakos G. A., 2008, *Communications in Asteroseismology*, **157**, 82
- Kovács G., Zucker S., Mazeh T., 2002, *Astronomy & Astrophysics*, **391**, 369
- Lenz P., Breger M., 2005, *Communications in Asteroseismology*, **146**, 53
- Levacher P., 2006, in Fridlund M., Baglin A., Lochard J., Conroy L., eds, *ESA Special Publication Vol. 1306, The CoRoT Mission Pre-Launch Status - Stellar Seismology and Planet Finding*. p. 217
- Markwardt C. B., 2009, in Bohlender D. A., Durand D., Dowler P., eds, *Astronomical Society of the Pacific Conference Series Vol. 411, Astronomical Data Analysis Software and Systems XVIII*. p. 251 ([arXiv:0902.2850](https://arxiv.org/abs/0902.2850))
- Mayor M., et al., 2003, *The Messenger*, **114**, 20
- Mazeh T., Tamuz O., Zucker S., 2007, in Afonso C., Weldrake D., Henning T., eds, *Astronomical Society of the Pacific Conference Series Vol. 366, Transiting Extrapolar Planets Workshop*. p. 119 ([arXiv:astro-ph/0612418](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0612418))

**Table 3.** Planetary parameters for the systems CoRoT ID 223977153, CoRoT ID 104848249 and CoRoT ID 652345526. The outputs were obtained with the Exofast algorithm.

| Parameter                     | Units   | 223977153-b                     | 104848249 cand.         | 652345526 cand.           |
|-------------------------------|---|---------------------------------|-------------------------|---------------------------|
| Planetary Parameters:         |   |                                 |                         |                           |
| $P$                           | Period (days)   | $6.71837 \pm 0.00001$           | $5.70852 \pm 0.00007$   | $5.61618 \pm 0.00004$     |
| $a$                           | Semi-major axis (AU)  | $0.071 \pm 0.001$               | $0.066 \pm 0.001$       | $0.069 \pm 0.002$         |
| $M_P$                         | Mass ( $M_J$ )  | $0.15 \pm 0.10$                 |                         |                           |
| $R_P$                         | Radius ( $R_J$ )  | $0.57^{+0.06}_{-0.05}$          | $0.65 \pm 0.06$         | $1.4 \pm 0.1$             |
| $\rho_P$                      | Density (cgs)   | $1.1^{+1.3}_{-0.8}$             |                         |                           |
| $\log(g_P)$                   | Surface gravity   | $3.1^{+0.6}_{-0.3}$             |                         |                           |
| $T_{eq}$                      | Equilibrium Temperature (K)                                 | $938^{+65}_{-52}$               | $1330 \pm 49$           | $1560 \pm 65$             |
| $\langle F \rangle$           | Incident flux ( $10^9 \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ ) | $0.18^{+0.05}_{-0.04}$          | $0.7 \pm 0.1$           | $1.4 \pm 0.2$             |
| RV Parameters:                |   |                                 |                         |                           |
| $K$                           | RV semi-amplitude (m/s)                                     | $14 \pm 10$                     |                         |                           |
| Primary Transit Parameters:   |   |                                 |                         |                           |
| $T_C$                         | Time of transit (BJD)                                       | $2455901.811^{+0.002}_{-0.001}$ | $2455299.387 \pm 0.001$ | $2455662.5203 \pm 0.0004$ |
| $R_P/R_*$                     | Radius of planet in stellar radii                           | $0.054 \pm 0.002$               | $0.0552 \pm 0.0009$     | $0.095 \pm 0.002$         |
| $u_1$                         | linear limb-darkening coeff.                                | $0.35 \pm 0.05$                 | $0.29 \pm 0.05$         | $0.22 \pm 0.05$           |
| $u_2$                         | quadratic limb-darkening coeff.                             | $0.28 \pm 0.05$                 | $0.29 \pm 0.05$         | $0.30 \pm 0.05$           |
| $i$                           | Inclination (degrees)                                       | $89.0 \pm 0.5$                  | $87.9 \pm 0.2$          | $87.4^{+1.0}_{-0.7}$      |
| $b$                           | Impact Parameter  | $0.4^{+0.1}_{-0.2}$             | $0.43 \pm 0.02$         | $0.44^{+0.08}_{-0.14}$    |
| $\delta$                      | Transit depth   | $0.0029 \pm 0.0002$             | $0.0030 \pm 0.0001$     | $0.0091 \pm 0.0003$       |
| $\tau$                        | Ingress/egress duration (days)                              | $0.006 \pm 0.001$               | $0.010 \pm 0.001$       | $0.020 \pm 0.003$         |
| $T_{14}$                      | Total duration (days)                                       | $0.104^{+0.009}_{-0.007}$       | $0.151 \pm 0.009$       | $0.187 \pm 0.006$         |
| Secondary Eclipse Parameters: |   |                                 |                         |                           |
| $T_S$                         | Time of eclipse (BJD)                                       | $2455905.170^{+0.002}_{-0.001}$ | $2455302.240 \pm 0.001$ | $2455665.3284 \pm 0.0004$ |

Mislis D., Schmitt J. H. M. M., Carone L., Guenther E. W., Pätzold M., 2010, *Astronomy & Astrophysics*, **522**, A86  
Moutou C., et al., 2005, *Astronomy & Astrophysics*, **437**, 355  
Ofir A., et al., 2010, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, **404**, L99  
Pinheiro da Silva L., Rolland G., Lapeyrere V., Auvergne M., 2008, *MNRAS*, **384**, 1337  
Rauer H., Erikson A., 2007, *The Transit Method*. p. 205  
Retzlaff J., et al., 2014, in *Observatory Operations: Strategies, Processes, and Systems V*. p. 914903, doi:10.1117/12.2055905  
Savitzky A., Golay M. J. E., 1964, *Analytical Chemistry*, **36**, 1627  
Scargle J. D., 1982, *ApJ*, **263**, 835  
Schaller G., Schaerer D., Meynet G., Maeder A., 1992, *Astronomy and Astrophysics Supplement*, **96**, 269  
Seager S., Mallén-Ornelas G., 2003, *The Astrophysical Journal*, **585**, 1038  
Skrutskie M. F., et al., 2006, *AJ*, **131**, 1163  
Surace C., et al., 2008, in *Advanced Software and Control for Astronomy II*. Edited by Bridger. p. 70193B, doi:10.1117/12.789334  
Torres G., Andersen J., Giménez A., 2010, *A&ARv*, **18**, 67  
Valenti J. A., Piskunov N., 1996, *A&AS*, **118**, 595  
Winn J. N., 2010, preprint, (arXiv:1001.2010)

## APPENDIX A: RADIAL VELOCITY DATA

This paper has been typeset from a  $\text{\TeX}/\text{\LaTeX}$  file prepared by the author.

**Table A1.** CoRoT ID 223977153 radial velocities, their errors, and bisector spans.

| BJD           | RV<br>[km s <sup>-1</sup> ] | Error<br>[km s <sup>-1</sup> ] | Bis<br>[km s <sup>-1</sup> ] |
|---------------|-----------------------------|--------------------------------|------------------------------|
| 2455219.59065 | 16.913                      | 0.006                          | 0.002                        |
| 2455223.61076 | 16.914                      | 0.006                          | -0.035                       |
| 2455226.68420 | 16.933                      | 0.006                          | -0.023                       |
| 2455227.63942 | 16.916                      | 0.006                          | -0.035                       |
| 2455228.60403 | 16.909                      | 0.006                          | 0.059                        |
| 2455229.65977 | 16.926                      | 0.007                          | 0.036                        |
| 2455230.64074 | 16.928                      | 0.007                          | -0.011                       |
| 2455231.63879 | 16.870                      | 0.006                          | 0.042                        |
| 2455923.72685 | 16.955                      | 0.004                          | -0.039                       |
| 2455924.74179 | 16.957                      | 0.004                          | 0.006                        |
| 2455925.73421 | 16.962                      | 0.005                          | 0.072                        |
| 2455926.69239 | 16.958                      | 0.005                          | 0.014                        |
| 2455927.70976 | 16.949                      | 0.005                          | -0.055                       |
| 2455928.68951 | 16.914                      | 0.005                          | 0.063                        |
| 2455929.70052 | 16.890                      | 0.005                          | 0.039                        |
| 2455931.68719 | 16.883                      | 0.004                          | 0.018                        |
| 2455932.68897 | 16.886                      | 0.004                          | 0.027                        |
| 2455933.71877 | 16.954                      | 0.004                          | -0.008                       |
| 2455953.59364 | 16.908                      | 0.004                          | 0.049                        |
| 2455960.56329 | 16.978                      | 0.005                          | 0.001                        |
| 2455963.58491 | 16.894                      | 0.004                          | 0.035                        |

**Table A2.** CoRoT ID 104848249 radial velocities, their errors, and bisector spans.

| BJD           | RV<br>[km s <sup>-1</sup> ] | Error<br>[km s <sup>-1</sup> ] | Bis<br>[km s <sup>-1</sup> ] |
|---------------|-----------------------------|--------------------------------|------------------------------|
| 2456096.79074 | 3.062                       | 0.004                          | -0.514                       |
| 2456099.76491 | 3.109                       | 0.005                          | -4.237                       |
| 2456117.56291 | 3.036                       | 0.004                          | -0.389                       |
| 2456119.63506 | 3.551                       | 0.005                          | -0.160                       |
| 2456151.65012 | 2.991                       | 0.005                          | -0.443                       |
| 2456154.59511 | 3.652                       | 0.005                          | -0.173                       |
| 2456158.47338 | 3.131                       | 0.005                          | -0.010                       |
| 2456160.56214 | 3.659                       | 0.006                          | -1.077                       |
| 2456509.64282 | 3.271                       | 0.005                          | 1.163                        |
| 2456539.53156 | 3.357                       | 0.005                          | 26.245                       |
| 2456564.49967 | 3.387                       | 0.004                          | -1.155                       |