

Bruno Eduardo Morgado

# **Estudo Astrométrico dos Satélites Galileanos de Júpiter**

Brasil

2019



Bruno Eduardo Morgado

## **Estudo Astrométrico dos Satélites Galileanos de Júpiter**

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Astronomia do Observatório Nacional, Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovação e Comunicação, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Astronomia.

Observatório Nacional - MCTIC

Programa de Pós-Graduação em Astronomia

Orientador: Dr. Roberto Vieira Martins

Brasil

2019

---

Bruno Eduardo Morgado

Estudo Astrométrico dos Satélites Galileanos de Júpiter/ Bruno Eduardo Morgado. – Brasil, 2019-

230 p. : il. (algumas coloridas) ; 30 cm.

Orientador: Dr. Roberto Vieira Martins

Tese – Observatório Nacional - MCTIC

Programa de Pós-Graduação em Astronomia, 2019.

1. Satélites Galileanos 2. Astrometria 3. Dinâmica I. Orientador Dr. Roberto Vieira Martins II. Observatório Nacional III. Programa de Pós-Graduação em Astronomia IV. Estudo Astrométrico dos Satélites Galileanos de Júpiter

CDU 521.9

---

"ESTUDO ASTROMÉTRICO DOS SATÉLITES GALILEANOS DE JÚPITER"

BRUNO EDUARDO MORGADO

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. Roberto Vieira Martins – ON/MCTIC  
(Orientador)



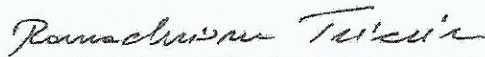
Dr. Alvaro Augusto Alvarez Candal - ON/MCTIC



Dr Fernando Virgilio Roig – ON/MCTIC



Dr. Adrian Rodriguez Colucci – OV/UFRJ



Dr. Ramachrisna Teixeira – IAG/USP

RIO DE JANEIRO – BRASIL

19 DE SETEMBRO DE 2019

*“Falta-nos revelar e divulgar aquilo que parece ser o mais importante da presente matéria:  
quatro PLANETAS nunca vistos desde o princípio do mundo até aos nossos dias[...].  
E convoco todos os astrônomos a que se dediquem a investigar e a determinar os seus  
períodos...”*

***Galileu Galilei – Sidereus Nuncius***

# Agradecimentos

Fazer um doutorado não é uma tarefa fácil, muitas noites em claro foram necessárias, muito esforço e muita dedicação. Essa tarefa seria impossível sem o apoio e a ajuda de inúmeras pessoas. A todas estas pessoas o meu **Muito Obrigado**.

- Ao meu orientador **Dr. Roberto Vieira Martins** que me ensinou muito nesses quatro anos de doutorado. Tenho muito a agradecer por todo o apoio, suporte, dedicação e paciência.
- Ao **Dr. Valery Lainey** pela dedicação e ensinamentos durante o meu doutorado sanduíche. Além disso, por sua colaboração nas diferentes etapas deste projeto.
- Ao **Grupo de Astrometria do Rio** e a todos os seus membros por me mostrar a importância de trabalhar em equipe para se fazer ciência de ponta. Em especial ao **Dr. Altair Ramos Gomes Júnior** pelo apoio e sugestões ao longo deste doutorado.
- A todos os colaboradores e observadores que contribuíram com este projeto e participaram das campanhas observacionais vinculadas à este projeto. Em especial ao **Daniel Iria Machado**, ao **Rafael Sfair** e ao **Marcio Malacarne**.
- Às equipes **ENCELADE**, **PEGASE** e **Lucky Star** por todas as colaborações que permitiram aprimorar e internacionalizar este projeto. Em especial ao **Dr. Bruno Sicardy**, ao **Dr. Vincent Robert** e ao **Dr. William Thuillot**.
- À minha família, em especial, à minha mãe **Maria Cleide**, ao meu pai **Arlindo** e ao meu irmão **Felippe**. Eles me ensinaram a humildade, o sacrifício e o respeito.
- À minha namorada e companheira **Fernanda Barbosa Moro** por todo o apoio e compreensão nos dias bons e ruins. Por estar do meu lado e me ajudar a encontrar a paz sempre que necessário.
- Aos meus amigos, em especial ao **Bruno**, **Andressa**, **Igor**, **Gustavo**, **Isabel**, **Wendell**, **Gisele** e **Larissa** pela amizade sincera e todas as risadas.
- Aos amigos do ON, em especial à **Taysa**, **Carol**, **Walter**, **Guga**, **Simony**, **Plicida**, **Rodrigo** e **Flavia** que tornaram os dias de trabalho mais leves.
- Aos residentes da *Maison du Brésil* entre novembro de 2016 e outubro de 2017, em especial à **Aline**, **Lucio**, **Fabio** e **Leonidas** que foram a minha família durante a minha estadia em Paris.

- Ao **Dr. Vitorvani Soares** que foi o meu primeiro orientador na carreira científica.
- Ao **Observatório Nacional (ON)** e ao **Laboratório Interinstitucional de e-Astronomia (LIneA)** e toda a equipe destas instituições por prover toda a infraestrutura necessária para a realização deste projeto.
- Ao *Observatoire de Paris*, especialmente ao *Institut de Mécanique Céleste et de Calcul des Éphémérides (IMCCE)* e toda a sua equipe por prover toda a infraestrutura necessária ao longo do meu doutorado sanduíche.
- Ao **Laboratório Nacional de Astrofísica (LNA)** e, especialmente, à equipe do **Observatório Pico dos Dias (OPD)** por prover toda a infraestrutura necessária para as noites de observações ao longo desta tese.
- À **CAPES** pelo apoio financeiro na forma de uma bolsa de doutorado e na bolsa de doutorado sanduíche.



# Resumo

Os refinamentos na astrometria e nos modelos dinâmicos permitiram a estimativa precisa de efeitos de baixíssima intensidade como a força de maré. Estes estudos determinam importantes restrições nos efeitos dinâmicos de curto e longo período, chegando até mesmo às formações planetárias. Cabe observar que este recente avanço tem ocorrido, majoritariamente, para o sistema de Saturno e para isso, foi essencial o aporte de informações devido aos dados da Sonda espacial Cassini. Esta sonda foi uma colaboração entre a *National Aeronautics and Space Administration* (NASA), a *European Space Agency* (ESA) e a *Agenzia Spaziale Italiana* (ASI).

No caso de Júpiter, o aporte astrométrico de solo é fundamental pois as únicas missões espaciais previstas são as *Jupiter Icy Moons Explorer* (JUICE) da ESA e a *Europa Clipper* da NASA. Ambas as missões têm previsão de lançamento para a década de 2020. Entretanto, por causa do forte brilho de Júpiter e dos satélites galileanos, a astrometria clássica CCD de solo não é trivial de ser feita. Esta astrometria fornece posições com incertezas da ordem de 150 mili segundo de arco (*mas*), o que representa aproximadamente 450 quilômetros (km) à distância de Júpiter.

Esta dificuldade motiva a busca por métodos alternativos para se fazer uma astrometria dos satélites galileanos de Júpiter com precisões melhores que 30 *mas* ( $\sim 90$  km). Nesta tese exploramos técnicas alternativas que visam a astrometria deste sistema. Exploramos as seguintes técnicas: fenômeno mútuo, aproximação mútua, ocultação estelar e combinação de imagens (do inglês, *stacking image*). Estas técnicas foram aplicadas às observações feitas no Observatório Pico dos Dias (OPD), no *Observatoire de Haute-Provence* (OHP) e em sítios espalhados no Brasil e na América do Sul, dentro de uma colaboração com astrônomos profissionais e amadores.

Neste projeto organizamos três campanhas observacionais: a campanha dos fenômenos mútuos de 2014-2015, a campanha das aproximações mútuas entre 2016 a 2019 e a campanha da ocultação estelar por Europa em março de 2017. A grande maioria das observações aqui tratadas foram feitas utilizando o filtro Metano de banda estreita, centrado em 889 nm com largura de 15 nm. Este filtro eficientemente elimina a luz difusa de Júpiter permitindo uma melhor qualidade da imagem.

Reunimos nesta tese os métodos de redução e análise destas diferentes técnicas e suas aplicações. A campanha dos fenômenos mútuos resultou em 47 curvas de luz observados em 2014-2015, além disso, reanalizamos 25 eventos que foram observados em 2009; a precisão média foi da ordem de 10 *mas* ( $\sim 30$  km). A campanha das aproximações

mútuas resultou em 127 curvas de separação que foram observadas entre 2016 e 2019; a precisão média também foi da ordem de 10 *mas* ( $\sim 30$  km). Analisamos a primeira ocultação estelar por Europa já observada e determinamos uma posição com uma precisão melhor que 1 *mas* ( $\sim 3$  km). Por fim analisamos preliminarmente a técnica da combinação de imagens utilizando dados de 9 noites entre 2018 e 2019, resultando em posições absolutas dos satélites galileanos com precisão média da ordem de 20 *mas* ( $\sim 60$  km).

Os métodos astrométricos analisados neste projeto poderão ser adaptados a outros objetos e as posições aqui obtidas serão utilizadas em novos ajustes orbitais dos satélites galileanos. Esta melhoria da órbita poderá trazer maiores informações sobre os interiores destes objetos através de um estudo da força de maré. Além disso, conhecer com precisão as órbitas destes objetos irá auxiliar na preparação e planejamento das sondas espaciais JUICE e *Europa Clipper*.

**Palavras-chaves:** Satélites Galileanos de Júpiter (Io, Europa, Ganímedes, Calisto) – Campanha Observacional – Análise de Imagens – Astrometria – Fotometria.

# Abstract

Progress in astrometry and in dynamical modeling of planetary systems have made possible the accurate estimation of tidal effects in natural moons and their planets. These studies have provided essential constraints on short and long term dynamics, including interior and formation processes. This improvement has been made mostly within the Saturn system with the results of Cassini space mission. It was a collaborative mission between the National Aeronautics and Space Administration (NASA), the European Space Agency (ESA) and the *Agenzia Spaziale Italiana* (ASI).

In the Jovian system's case, most of the astrometry originate from ground-based observations. At the current time, no space missions are orbiting this system. However, the Jupiter Icy Moons Explorer (JUICE) from ESA and the Europa Clipper from NASA are currently being prepared. Both space missions are scheduled to be launched in the next decade (the 2020s). Even though ground-based astrometry is necessary, the classical CCD methods are unable to obtain accurate positions due to Jupiter brightness. This classical astrometry obtains positions with uncertainties in the 150 milliarcseconds (mas) level, roughly 450 kilometers (km) at Jupiter distance.

This difficult motivates the search for alternative methods to acquire Galilean satellite's positions with uncertainties bellow the 30 mas level ( $\sim 90$  km). In this project, we analyze alternative techniques to obtain the astrometry of this system. We explore the mutual phenomena technique, the mutual approximation, stellar occultation, and stacking image procedure. These techniques were applied to observations made at the *Observatório do Pico dos Dias* (OPD), the *Observatoire de Haute-Provence* (OHP), and observations made at different stations in Brazil and South America. These observations were a collaboration between professionals astronomers and the amateur community.

Within this project, we organized three observational campaigns: The Brazilian mutual phenomena campaign in 2014-2015, the mutual approximation campaign between 2016 and 2019, and the campaign to observe the stellar occultation by Europa in March of 2017. Most observations in this project were made with the narrow band Methane filter centered in 889 nm with a width of 15 nm. This filter efficiently eliminates Jupiter's scattered light, allowing images with higher quality.

In this thesis, we gathered reductions and analyses processes of these astrometric techniques and their application to observations. In the mutual phenomena context, we analyze 47 light curves observed in our campaign in 2014-2015 and re-analyze 25 events observed in 2009; the mean uncertainty was in the 10 mas level ( $\sim 30$  km). In the mutual

approximation context, we analyzed 127 separation curves observed between 2016 and 2019; the mean uncertainty was also around 10 mas ( $\sim 30$  km). Also, we analyzed the first stellar occultation by the Galilean moon Europa ever observed and determined a position with an uncertainty below 1 mas ( $\sim 3$  km). At least, we obtained preliminary results of the stacking image technique applied to the Galilean moons. We analyzed 9 nights of observation between 2018 and 2019, and we determined absolute positions with uncertainties in the 20 mas level ( $\sim 60$  km).

The astrometric methods analyzed in this project can be adapted to other systems, and the positions we furnished will be used in dynamical studies aiming the development of new and more precise ephemerides for the Galilean moons. These improved orbits will contribute to the study of tidal dissipation in this system, ultimately providing more information about the interior of these satellites. Also, these improved orbits will help to prepare JUICE and Europa Clipper space missions.

**Key-words:** Galilean satellites (Io, Europa, Ganymede, Callisto) – Observational Campaign – Image Reduction – Astrometry – Photometry.

# Sumário

	<b>Lista de ilustrações</b>	<b>xv</b>
	<b>Lista de tabelas</b>	<b>xxv</b>
<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
1.1	Propriedades físicas, dinâmicas e informações gerais	1
1.2	Histórico da astrometria dos satélites galileanos	2
1.3	Objetivos do projeto	6
1.4	O filtro metano de banda estreita	7
<b>2</b>	<b>CAMPANHA DOS FENÔMENOS MÚTUOS</b>	<b>11</b>
2.1	Modelando os fenômenos mútuos	13
2.1.1	Ocultações Mútuas	17
2.1.1.1	O perfil de cada satélite	17
2.1.1.2	Determinação da razão de albedos	20
2.1.1.3	Curva de luz simulada de uma ocultação	21
2.1.2	Eclipses Mútuos	22
2.1.2.1	Perfil da sombra: umbra e penumbra	23
2.1.2.2	Efeito de escurecimento de limbo do Sol	25
2.1.2.3	Curva de luz simulada de um eclipse	27
2.2	Observações	28
2.3	Redução e análise	29
2.3.1	Análise da campanha de 2009	31
2.4	Resultados	34
2.4.1	Campanha de de 2014-2015	34
2.4.2	Eclipse de Amalteia (J5)	39
<b>3</b>	<b>CAMPANHA DAS APROXIMAÇÕES MÚTUAS</b>	<b>43</b>
3.1	O método	44
3.2	Predição e simulações	46
3.2.1	Predição	46
3.2.2	Testes e simulações	48
3.2.2.1	Grau do polinômio	48
3.2.2.2	Duração da observação	51
3.2.2.3	SNR × tempo de exposição	52
3.2.2.4	Problemas Observacionais	54

3.2.2.4.1	Lacunas nas observações . . . . .	54
3.2.2.4.2	Ausência de observações . . . . .	54
<b>3.3</b>	<b>Campanhas Observacionais . . . . .</b>	<b>55</b>
<b>3.4</b>	<b>Redução . . . . .</b>	<b>58</b>
3.4.1	Correções astronômicas . . . . .	60
3.4.1.1	Fase solar . . . . .	61
3.4.1.2	Refração atmosférica . . . . .	63
3.4.1.3	Aberração da luz . . . . .	65
3.4.2	<i>Pipeline: Mutual Approximation Reduction (MAR)</i> . . . . .	67
<b>3.5</b>	<b>Resultados . . . . .</b>	<b>68</b>
<b>3.6</b>	<b>Ajuste de efemérides usando as aproximações mútuas . . . . .</b>	<b>77</b>
<b>4</b>	<b>OCULTAÇÃO ESTELAR POR EUROPA – 31-03-2017 . . . . .</b>	<b>79</b>
4.1	Previsão e seleção dos eventos . . . . .	81
4.2	Campanha observacional . . . . .	83
4.3	Redução e análise individual . . . . .	84
4.3.1	Curva de luz do OPD/B&C . . . . .	87
4.3.2	Curva de luz de FOZ . . . . .	89
4.3.3	Curva de luz de OBSPA . . . . .	91
4.4	Redução e análise conjunta . . . . .	92
4.5	Outros eventos . . . . .	96
4.5.1	Ocultação por Europa - 04-06-2019 . . . . .	97
4.5.2	Ocultação por Calisto - 05-06-2019 . . . . .	98
<b>5</b>	<b>COMBINAÇÃO DE IMAGENS . . . . .</b>	<b>103</b>
5.1	Método de combinação de imagens . . . . .	104
5.2	Astrometria clássica CCD . . . . .	110
5.2.1	Catálogo Gaia . . . . .	111
5.3	Observações e redução . . . . .	111
5.4	Resultados preliminares . . . . .	113
5.5	Considerações para o futuro . . . . .	118
<b>6</b>	<b>COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS . . . . .</b>	<b>121</b>
6.1	Fenômenos mútuos × Aproximações mútuas . . . . .	122
6.2	Aproximações mútuas × Combinação de imagens . . . . .	124
6.3	Precisão das efemérides no contexto da missão JUICE . . . . .	126
<b>7</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS . . . . .</b>	<b>129</b>
	<b>REFERÊNCIAS . . . . .</b>	<b>133</b>

<b>APÊNDICES</b>	<b>143</b>
<b>APÊNDICE A – ARTIGOS PUBLICADOS DENTRO DESTE PROJETO . . . . .</b>	<b>145</b>
<b>APÊNDICE B – ARTIGOS PUBLICADOS EM PROJETOS PARALELOS . . . . .</b>	<b>197</b>
<b>APÊNDICE C – MAPA DOS OBSERVADORES . . . . .</b>	<b>211</b>
<b>APÊNDICE D – CURVAS DE LUZ DOS FENÔMENOS MÚTUOS</b>	<b>217</b>
<b>APÊNDICE E – CURVAS DE SEPARAÇÃO DAS APROXIMAÇÕES MÚTUAS . . . . .</b>	<b>221</b>
<b>APÊNDICE F – MAPAS DAS FUTURAS OCULTAÇÕES ESTELARES . . . . .</b>	<b>227</b>





# Lista de ilustrações

Figura 1 – Os satélites galileanos observado pela câmera CCD a bordo da sonda espacial Galileu. . . . .	4
Figura 2 – Na esquerda, imagem de Júpiter feito com o CCD Andor Ikon-L utilizando o Filtro I do sistema Johnson, na direita uma imagem feita com o mesmo detector porém utilizando o filtro Metano centrado em 889 nm, com banda de 15 nm. Ambas imagens foram obtidas com um tempo de exposição de 1 segundo. . . . .	7
Figura 3 – Albedo dos planetas gigantes e Titã para diferentes comprimentos de onda. Note a queda brusca próximo a 890 nm, está é uma região de absorção do gás metano (CH <sub>4</sub> ) existente na atmosfera superior de Júpiter, Saturno e Titã (Karkoschka, 1994). . . . .	8
Figura 4 – Albedo dos satélites galileanos e do anel de Saturno para diferentes comprimentos de onda. Note que, diferente da Figura 3, a queda brusca próxima a 890 nm não é observada (Karkoschka, 1998). . . . .	9
Figura 5 – A curva de transmissão do filtro Metano de banda estreita, centrado em 889 nm com largura de 15 nm. Curva produzida por <i>Omega Optical, Inc.</i>	9
Figura 6 – Imagem de Júpiter, Io (J1), Europa (J2) e Calisto (J4) obtida no telescópio Zeiss de 60 cm de abertura do Observatório Pico dos Dias (OPD), equipado com o filtro Metano de banda estreita. Imagem obtida em 19 de novembro de 2014. Note que o planeta e os satélites apresentam o brilho similar devido ao uso deste filtro. . . . .	10
Figura 7 – Variação da inclinação do plano equatorial de Saturno para um observador na Terra ao longo de 15 anos. Quando os anéis são observados como uma linha significa que a Terra está aproximadamente no plano equatorial de Saturno. . . . .	11
Figura 8 – Declinação planetocêntrica da Terra e do Sol entre 2000 e 2030. Os fenômenos mútuos acontecem sempre que estas declinações estão próximas de zero, isso acontece a cada 6 anos para o sistema joviano. . . . .	12
Figura 9 – Geometria de uma ocultação. Os vetores topocêntricos dos satélites ocultante ( $\vec{P}_1$ ) e ocultado ( $\vec{P}_2$ ) e o vetor topocêntrico do Sol ( $\vec{P}_s$ ) estão em vermelho. As linhas pretas tracejadas são os vetores heliocêntricos dos satélites ( $\vec{P}_{s1}$ e $\vec{P}_{s2}$ ). Estes vetores podem ser facilmente obtidos utilizando as efemérides. Figura fora de escala para visualização. . . . .	14
Figura 10 – Análoga à Figura 9 para um eclipse. . . . .	14

- Figura 11 – Geometria de um evento mútuo e os parâmetros de interesse. Em cinza temos o satélite ocultante (*Sat 1*) e em preto o satélite ocultado (*Sat 2*), a seta preta representa o sentido do movimento relativo entre os centros dos satélites (*Sat 1* – *Sat 2*). O parâmetro de impacto ( $s_0$ ) é a mínima separação entre os satélites. O instante central ( $t_0$ ) é o instante de tempo em que essa mínima separação acontece. A velocidade relativa entre o satélite ocultado e o satélite ocultador pode ser calculada utilizando  $v_0 = \frac{\Delta}{t_f - t_i}$ . É importante ressaltar que cada satélite tem o seu albedo específico  $A_j$ . No caso de um eclipse substituímos o satélite ocultante pela sombra do satélite eclipsante. . . . . 16
- Figura 12 – Reflexão da luz em uma região do satélite. O raio de luz incidente ( $\vec{L}_i$ ) e o raio de luz refletida ( $\vec{L}_e$ ) estão em vermelho. O vetor normal ( $\eta_1$ ) e o vetor tangencial ( $\eta_2$ ) à superfície do satélite estão em preto. Em verde estão os ângulos de incidência e reflectância ( $\psi_i$  e  $\psi_e$ ) e em azul os ângulos ( $\phi_i$  e  $\phi_e$ ) entre as projeções de  $\vec{L}_i$  e  $\vec{L}_e$  no plano e o vetor  $\eta_2$ . 18
- Figura 13 – Perfil 2D de Europa para o dia 19/11/2014 às 07:37 UTC. A direita temos a intensidade do brilho de Europa ao longo da linha central da imagem em quilômetros em relação ao centro do satélite, a não simetria é devido ao ângulo de fase igual a  $10,7^\circ$ . Note que o raio de Europa utilizado foi igual a 1560,8 km. A resolução utilizada foi de 1 *mas* ( $\sim 3,7$  km). . . . . 20
- Figura 14 – Europa oculta Io em 22/02/2015 às 02:07 UTC como vista pelo OPD. Este modelo foi criado utilizando as efemérides *jup310* e a DE435. No gráfico inferior temos a curva de luz normalizada ao longo do evento, os pontos pretos demarcam os instantes (I), (II), (III), (IV), (V), (VI) e (VII). Os perfis de cada um destes pontos estão ilustrados na parte superior do gráfico. A razão de albedo entre Io e Europa para este evento foi igual a 0,960. A resolução utilizada foi de 1 *mas* ( $\sim 3,2$  km). 23
- Figura 15 – Figura fora de escala para visualização. . . . . 24
- Figura 16 – Área do Sol que está sendo observada por uma região ( $x, z$ ) da penumbra. A distância  $\overline{C_0C_{ss}}$  é a distância  $d_{cs}$ . A esquerda temos o modelo e a direita temos a abordagem numérica. . . . . 26
- Figura 17 – Perfil 2D da sombra de Ganimedes para o dia 17/03/2015 às 02:53 UTC. A direita temos a fração da luz do Sol ao longo da linha central da imagem em quilômetros em relação ao centro da sombra. Note que o raio da umbra é igual a 1227,7 km e o raio da penumbra é igual a 4045,4 km. A resolução utilizada foi de 1 *mas* ( $\sim 3,3$  km). . . . . 26

Figura 18 – Perfil 2D da luz do Sol considerando-o homogeneamente brilhante (I) e levando em conta o efeito de escurecimento de limbo (II). A esquerda temos a luminosidade normalizada ao longo da linha central, em azul tracejado o modelo do Sol homogeneamente brilhante e em preto contínuo o modelo que considera o escurecimento de limbo. . . .	27
Figura 19 – Europa eclipsa Ganímedes em 12/04/2015 às 01:46 UTC como vista por FOZ. Este modelo foi criado utilizando as efemérides <i>jup310</i> e a DE435. No gráfico inferior temos a curva de luz normalizada ao longo do evento, os pontos pretos demarcam os instantes (I), (II), (III), (IV), (V), (VI) e (VII). Os perfis de cada um destes pontos estão ilustrados na parte superior do gráfico. A resolução utilizada foi de 1 mas ( $\sim 3,6$ km). . . . .	28
Figura 20 – Número de fenômenos mútuos observados ao longos dos meses, começando em outubro de 2014 até julho de 2015. Em cinza temos os 109 eventos selecionados para observação e em preto os 40 eventos observados.	30
Figura 21 – Europa oculta Io em 22 de fevereiro de 2015 observado pelo OPD, no gráfico superior temos a curva de luz observada (em preto) e a ajustada (em vermelho). No gráfico inferior temos o resíduo no sentido observação menos ajuste. . . . .	34
Figura 22 – Europa eclipsa Ganímedes em 12 de abril de 2015 observado por FOZ.	35
Figura 23 – Ganímedes oculta Io em 29 de abril de 2015 observado pelo OPD. . . .	36
Figura 24 – Ganímedes oculta Io em 29 de abril de 2015 observado pelo GOA. . . .	36
Figura 25 – Imagem de Amalteia e utilização da coronagrafia digital. (i) Imagem tratada de <i>bias</i> e <i>flat-field</i> ; (ii) Imagem com apenas o brilho de Júpiter; e (iii) Imagem após aplicação da coronagrafia digital. As três imagens possuem a mesma, escala e orientação, como descrito na imagem (iii). As três imagens também possuem a mesma escala de cor e a circunferência vermelha chama a atenção para a posição de Amalteia na imagem. . .	40
Figura 26 – Ganímedes eclipsa Amalteia em 02 de março de 2015, no gráfico superior temos a curva de luz observada (em preto), a ajustada (em vermelho) e a curva de luz teórica (em azul). No gráfico inferior temos o resíduo no sentido observação menos ajuste. . . . .	41

Figura 27 – Geometria de uma aproximação mútua e os parâmetros de interesse. Em cinza temos um satélite ( <i>Sat 1</i> ) e em preto o outro ( <i>Sat 2</i> ), a seta preta demarca o sentido do movimento relativo entre os satélites ( <i>Sat 1</i> – <i>Sat 2</i> ). O parâmetro de impacto ( $s_0$ ) é a mínima separação entre os satélites. O instante central ( $t_0$ ) é o instante de tempo em que essa mínima separação acontece. A velocidade relativa entre os satélites pode ser calculada utilizando $v_0 = \frac{\Delta}{t_f - t_i}$ , para um intervalo $\Delta$ adequadamente pequeno. Note que diferente de uma ocultação ambos os satélites estão completamente separados nas imagens. . . . .	44
Figura 28 – Separação entre os satélites galileanos, em segundos de arco, ao longo de uma semana, começando em primeiro de janeiro de 2016. Cada mínimo neste gráfico corresponde a uma aproximação mútua potencial. . . . .	47
Figura 29 – Separação mínima entre os satélites ( $s_0$ ) em segundos de arco ao longo do tempo para as diferentes aproximações mútuas entre 2014 e 2026. Ilustramos apenas os eventos onde o parâmetro de impacto é menor que 30 segundos de arco. Note que as aproximações acontecem ao longo de toda órbita de Júpiter (12 anos). . . . .	48
Figura 30 – Curva de separação utilizando as efemérides e ajuste polinomial do segundo grau, o desvio padrão do resíduo entre o modelo polinomial e as efemérides foi de $\sim 50$ mas. . . . .	50
Figura 31 – Curva de separação utilizando as efemérides e ajuste polinomial do terceiro grau, o desvio padrão do resíduo entre o modelo polinomial e as efemérides foi de $\sim 0,22$ mas. . . . .	50
Figura 32 – Curva de separação utilizando as efemérides e ajuste polinomial do quarto grau, o desvio padrão do resíduo entre o modelo polinomial e as efemérides foi de $\sim 0,016$ mas. Atingindo assim o critério de seleção adequado. . . . .	51
Figura 33 – Simulando a duração de uma aproximação mútua. O eixo $x$ é a duração do evento (em minutos) centrado no instante central ( $\Delta t$ ). O eixo $y$ do painel superior é a incerteza no parâmetro de impacto ( $\sigma s_0$ ) e no painel inferior temos a incerteza no instante central ( $\sigma t_0$ ), ambos em mas. . . . .	52
Figura 34 – Incerteza do parâmetro de impacto ( $\sigma s_0$ ) e do instante central ( $\sigma t_0$ ) em relação a resolução temporal ( $\delta t$ ) para diferentes regimes de ruídos ( $\sigma_{noise}$ ), demarcado pelas diferentes cores e símbolos na legenda. Obviamente o melhor cenário possível é uma alta resolução temporal e um baixo ruído, porém tendo que haver uma escolha o SNR deve ser priorizado. . . . .	53

Figura 35 – Incerteza do parâmetro de impacto ( $\sigma s_0$ ) e do instante central ( $\sigma t_0$ ) em função do momento central de uma lacuna ( $t_{gap}$ ) de duração $\Delta t_{gap}$ , os diferentes símbolos e cores denotam diferentes $t_{gap}$ . Note que o momento em que a lacuna ocorre não afeta de maneira significativa a determinação do instante central. . . . .	55
Figura 36 – Incerteza do parâmetro de impacto ( $\sigma s_0$ ) e do instante central ( $\sigma t_0$ ) em função da diferença entre o instante de começo das observações ( $t_b$ ) e o instante central em minutos ( $t_0$ ). . . . .	56
Figura 37 – Número de aproximações mútuas observadas ao longos dos meses, começando em janeiro até dezembro de 2016. Em cinza temos os 43 eventos selecionados para observação e em preto os 28 eventos observados. . . .	58
Figura 38 – Número de aproximações mútuas observadas ao longos dos meses, começando em janeiro até dezembro de 2017. Em cinza temos os 41 eventos selecionados para observação e em preto os 21 eventos observados. . . .	59
Figura 39 – Número de aproximações mútuas observadas ao longos dos meses, começando em janeiro até dezembro de 2018. Em cinza temos os 30 eventos selecionados para observação e em preto os 19 eventos observados. . . .	59
Figura 40 – Número de aproximações mútuas observadas ao longos dos meses, começando em janeiro até dezembro de 2019. Em cinza temos os 44 eventos selecionados para observação e em preto os 18 eventos observados. . . .	60
Figura 41 – Na esquerda: O ângulo de fase ( $i$ ) é o ângulo entre a direção da luz incidente do Sol no alvo e a direção do observador. Na direita está representado a aplicação do efeito de fase no objeto observado, onde a parte hachurada representa a região não iluminada do objeto. . . . .	61
Figura 42 – Influência da fase solar em um satélite. $N$ denomina o Norte, e $L$ o Leste, o ponto $F$ representa o fotocentro do objeto e $C$ o centro geométrico. O ângulo $Q$ é o ângulo sub-solar que determina a direção da fase no plano tangente à esfera celeste . . . . .	62
Figura 43 – $C(i)$ para diferentes ângulos de fase ( $i$ ), utilizando a lei de reflexão de Lambert e a de Lommel-Seelinger. . . . .	63
Figura 44 – Ângulo de refração atmosférica ( $R(\lambda_0)$ ) para diferentes distâncias zenitais ( $z$ ), para o comprimento de onda ( $\lambda_0$ ) de 889 nm que é o comprimento de onda central do filtro Metano. . . . .	65
Figura 45 – Curva de separação observada pelo OPD para a aproximação entre Io e Europa que ocorreu no dia 19 de abril de 2016. . . . .	68
Figura 46 – Curva de separação observada por FOZ para a aproximação entre Io e Europa que ocorreu no dia 19 de abril de 2016. . . . .	69
Figura 47 – Curva de separação observada pelo GOA para a aproximação entre Io e Europa que ocorreu no dia 19 de abril de 2016. . . . .	69

Figura 48 – Curva de separação observada pela UTFPR para a aproximação entre Io e Europa que ocorreu no dia 19 de abril de 2016. . . . .	70
Figura 49 – Curva de separação observada pelo OHP para a aproximação entre Io e Europa que ocorreu no dia 19 de abril de 2016. . . . .	70
Figura 50 – Curva de separação observada pelo OPD para a aproximação entre Io e Calisto que ocorreu no dia 12 de abril de 2016. Note que aqui o resíduo está entre -0,5 e 0,5 segundos de arco, diferente das Figuras 45, 46, 47, 48 e 49 que estão entre -1,5 e 1,5 segundos de arco. . . . .	73
Figura 51 – Histograma das precisões dos resultados obtidos durante as campanhas das aproximações mútuas de 2016 a 2019. . . . .	73
Figura 52 – Ilustração de uma ocultação. A luz da estrela é ocultada por um objeto do Sistema Solar criando uma sombra sobre a Terra (cinza claro), ao posicionarmos observadores (pontos vermelhos) distribuídos ao longo da região de sombra conseguimos observamos esta ocultação. . . . .	79
Figura 53 – Sobreposição das efemérides de Júpiter com o catálogo Gaia DR1, em coordenadas galácticas. A escala de cinza define a densidade estelar da região, em verde temos as posições de Júpiter entre janeiro de 2009 e janeiro de 2022. Em vermelho temos Júpiter entre 13/12/2018 e 15/11/2020 tendo como plano de fundo a região central da galáxia. . . . .	80
Figura 54 – Geometria no plano do céu de uma ocultação estelar. . . . .	82
Figura 55 – Ocultação estelar de uma estrela de magnitude G 9,5 por Europa em 31 de março de 2017. As linhas azuis demarcam o diâmetro do satélite e as linhas azuis pontilhadas demarcam a incerteza na órbita de 20 <i>mas</i> . Os pontos vermelhos representam o centro da sombra do satélite a cada minuto, o ponto maior é instante de máxima aproximação entre a sombra do objeto e o geocentro ( $t_0$ ). A velocidade deste evento foi de 17,78 km/s e a seta preta no canto inferior direito representa o sentido do movimento da Sombra. . . . .	83
Figura 56 – Mapa da ocultação estelar de uma estrela de magnitude G 9,5 por Europa em 31 de março de 2017 e os sítios que a observaram. Em azul os sítios com cordas positivas e em amarelo os sítios que não conseguiram fazer observações devido ao clima. . . . .	86
Figura 57 – Curva de luz normalizada do evento onde Europa ocultou uma estrela GDR2 de magnitude G 9,5 observada pelo OPD/B&C. . . . .	88
Figura 58 – Ajuste de $\chi^2$ do instante de ingresso e egresso para a curva de luz do OPD/B&C. As linhas verticais pontilhadas demarcam os instantes determinados, as linhas horizontais tracejadas demarcam o $1\sigma$ . . . . .	89

Figura 59 – Curva de luz normalizada do evento onde Europa ocultou uma estrela GDR2 de magnitude G 9,5 observada pelo OPD/B&C, comparação entre o modelo de caixa com o modelo de um trapézio . . . . .	90
Figura 60 – Curva de luz normalizada do evento onde Europa ocultou uma estrela GDR2 de magnitude G 9,5 observada por FOZ. Comparação entre a fotometria oriunda das imagens individuais e das imagens combinadas. A linha amarela demarca a normalização em 1,0, note que aproximadamente entre -5 e -2 todos os pontos da curva de luz combinada estão sistematicamente abaixo desta linha. . . . .	91
Figura 61 – Curva de luz normalizada do evento onde Europa ocultou uma estrela GDR2 de magnitude G 9,5 observada por FOZ. . . . .	92
Figura 62 – Ajuste de $\chi^2$ do instante de ingresso e egresso para a curva de luz de FOZ. As linhas verticais pontilhas demarcam os instantes determinados, as linhas horizontais tracejadas demarcam o $1\sigma$ . . . . .	93
Figura 63 – Curva de luz normalizada do evento onde Europa ocultou uma estrela GDR2 de magnitude G 9,5 observada pelo OBSPA. . . . .	94
Figura 64 – Ajuste de $\chi^2$ do instante de ingresso e egresso para a curva de luz do OBSPA. As linhas verticais pontilhas demarcam os instantes determinados, as linhas horizontais tracejadas demarcam o $1\sigma$ . . . . .	95
Figura 65 – Ajuste de uma elipse nas cordas. . . . .	96
Figura 66 – Ajuste de uma elipse nas cordas. Zoom para evidenciar as incertezas. . . . .	97
Figura 67 – Ajuste por $\chi^2$ e correlação entre os parâmetros da elipse. Na diagonal temos o chi-quadrado por cada um dos parâmetros, as linhas vermelhas tracejadas delimitam o $1\sigma$ . Fora da diagonal temos as correlações, note que existe uma forte correlação entre $g_c$ e a forma da elipse ( $a'$ , $\epsilon'$ ), isso é esperado uma vez que temos cordas apenas no hemisfério Sul da sombra. . . . .	98
Figura 68 – Mapa da ocultação estelar de uma estrela de magnitude G 9,1 por Europa em 04 de junho de 2019 e os sítios que a observaram. Em verde os sítios com dados a serem analisados e em amarelo os sítios que não conseguiram fazer observações devido ao clima. . . . .	100
Figura 69 – Mapa da ocultação estelar de uma estrela de magnitude G 10,2 por Calisto em 05 de junho de 2019 e os sítios que a observaram. Em verde os sítios com dados a serem analisados e em amarelo os sítios que não conseguiram fazer observações devido ao clima. . . . .	101
Figura 70 – Histograma de contagens sobre o CCD utilizando uma imagem individual (azul) e a combinação de duas imagens (vermelho; I), a combinação de três imagens (vermelho; II) e a combinação de cem imagens (vermelho; III). Note que conforme combinamos um maior número de imagens o desvio padrão do fundo do céu é reduzido. . . . .	105

Figura 71 – Comparação entre a imagem individual e a combinação de cem imagens. Os gráficos superiores mostram as contagens ao longo da linha central, em vermelho. Os gráficos laterais mostram as contagens ao longo da coluna central, em amarelo. A região do CCD escolhida é um quadrado de $100 \times 100$ pixels em uma região vazia do CCD. Estas imagens foram obtidas no telescópio B&C de 60 cm utilizando a câmera IKon-L junto com o filtro Metano. O tempo de exposição foi de 4 segundos. Note como o ruído da imagem diminuiu. . . . .	106
Figura 72 – Variação do desvio padrão do fundo do céu ( $\sigma$ ) ao combinarmos $N$ imagens. Os valores reais foram obtidos utilizando as imagens e o valor esperado veio da simplificação $Noise/\sqrt{N}$ . . . . .	106
Figura 73 – Variação da posição de uma estrela guia no campo (em pixels) ao longo de 300 imagens ( $\sim 35$ minutos). Note que a posição da estrela no CCD pode variar de muitos pixels. A cruz vermelha marca a posição da estrela guia na primeira imagem. . . . .	107
Figura 74 – Comparação entre a imagem individual e a combinação de cem imagens. A região do CCD escolhida é um quadrado de $30 \times 30$ pixels em torno de uma estrela guia de magnitude G 10,8. . . . .	108
Figura 75 – Comparação entre a imagem individual e a combinação de cem imagens. A região do CCD escolhida é um quadrado de $30 \times 30$ pixels em torno de uma estrela de magnitude G 14,3. . . . .	108
Figura 76 – Comparação entre a imagem individual e a combinação de cem imagens. A região do CCD escolhida é um quadrado de $30 \times 30$ pixels em torno de Io. . . . .	109
Figura 77 – Imagem individual obtida com o telescópio B&C de 60 cm, câmera IKon-L e filtro Metano na noite do dia 21 de abril de 2019. O tempo de exposição utilizado foi de 4 segundos. O campo é de $12 \times 12$ minutos de arco. Os artefatos que aparecem nessa imagem estão relacionado com uma reflexão interna dos objetos brilhantes (satélites galileanos e Júpiter) devido o filtro Metano, estes artefatos possuem baixíssima contagem se comparado aos objetos brilhantes, não contaminando a determinação dos fotocentros, como pode ser visto na Figura 76. . . . .	114
Figura 78 – Combinação de cem imagens obtidas com o telescópio B&C de 60 cm, câmera IKon-L e filtro Metano na noite do dia 21 de abril de 2019. Máscaras foram aplicadas em cima dos satélites galileanos e de Júpiter. . . . .	115
Figura 79 – Diferença entre as observações e as efemérides em RA e DEC ao longo do tempo para Io obtido na noite do dia 21 de abril de 2019. A esquerda está disponibilizamos os histogramas desses offsets. Os desvios padrões foram $11,3 mas$ para RA e $13,6 mas$ para DEC. . . . .	116



Figura 80 – Análogo à legenda da Figura 79 para Europa. Os desvios padrões foram 13,7 <i>mas</i> para RA e 14,0 <i>mas</i> para DEC. . . . .	117
Figura 81 – Análogo à legenda da Figura 79 para Ganímedes. Os desvios padrões foram 13,4 <i>mas</i> para RA e 13,9 <i>mas</i> para DEC. . . . .	117
Figura 82 – Análogo à legenda da Figura 79 para Calisto. Os desvios padrões foram 11,8 <i>mas</i> para RA e 13,6 <i>mas</i> para DEC. . . . .	118
Figura 83 – Curva de luz obtida das imagens do OPD para a ocultação de Io por Europa que ocorreu no dia 22 de fevereiro de 2015. Note que esta curva inicia 7 minutos antes do instante central, indo até 7 minutos após este instante. . . . .	123
Figura 84 – Curva de separação observada pelo OPD para a aproximação entre Io e Europa que ocorreu no dia 22 de fevereiro de 2015. Este evento culminou em uma ocultação de Io por Europa. Note a lacuna de pontos 12 minutos antes do instante central até 12 minutos após este instante. . . . .	123
Figura 85 – Precisão das efemérides dos satélites galileanos para dois conjuntos de dados. O conjunto 1 contém as posições disponíveis no NSDB até 2016, o conjunto 2 contém o conjunto 1 e posições simuladas entre 2016 e 2029. . . . .	127
Figura 86 – Mapa com as localizações dos participantes da campanha dos fenômenos mútuos de 2014-2015. . . . .	212
Figura 87 – Mapa com as localizações dos participantes brasileiros da campanha das aproximações mútuas de 2016-2019. . . . .	213
Figura 88 – Mapa com a localização do <i>Observatoire de Haute-Provence</i> que colaborou com a campanha das aproximações mútuas. . . . .	214
Figura 89 – Mapa com as localizações dos participantes da campanha para a observação da ocultação estelar por Europa em 31 de março de 2017. . . . .	215
Figura 90 – Curva de luz de um fenômeno mútuo. No gráfico superior, os pontos preto são os fluxos de luz normalizados obtidas das imagens e a linha vermelha é o ajuste do modelo. No gráfico inferior os pontos vermelhos são os resíduos do modelo ajustado no sentido observação menos ajuste. . . . .	217
Figura 91 – Seleção de fenômenos mútuos observados durante a campanha de 2009. . . . .	218
Figura 92 – Seleção de fenômenos mútuos observados durante a campanha de 2014-2015. . . . .	219
Figura 93 – Curva de separação de uma aproximação mútua. No gráfico superior, os pontos preto são as separações obtidas das imagens e a linha amarela é o ajuste polinomial ao quadrado da distância. No gráfico inferior as cruces vermelhas são os resíduos do modelo ajustado no sentido observação menos ajuste. . . . .	221
Figura 94 – Seleção de aproximações mútuas observadas durante a campanha de 2016. . . . .	222
Figura 95 – Seleção de aproximações mútuas observadas durante a campanha de 2017. . . . .	223

Figura 96 – Seleção de aproximações mútuas observadas durante a campanha de 2018.	224
Figura 97 – Seleção de aproximações mútuas observadas durante a campanha de 2019.	225
Figura 98 – Ocultação de uma estrela GDR2 de magnitude G 11,0 por Io em 09 de setembro de 2019 às 02:33 UTC. A velocidade predita deste evento é de 18,1 km/s . . . . .	227
Figura 99 – Ocultação de uma estrela GDR2 de magnitude G 11,3 por Io em 21 de setembro de 2019 às 13:08 UTC. A velocidade predita deste evento é de 26,5 km/s . . . . .	228
Figura 100 – Ocultação de uma estrela GDR2 de magnitude G 10,9 por Calisto em 20 de junho de 2020 às 16:03 UTC. A velocidade predita deste evento é de 18,9 km/s . . . . .	228
Figura 101 – Ocultação de uma estrela GDR2 de magnitude G 11,3 por Europa em 22 de junho de 2020 às 02:09 UTC. A velocidade predita deste evento é de 26,1 km/s . . . . .	229
Figura 102 – Ocultação de uma estrela GDR2 de magnitude G 5,8 por Io em 02 de abril de 2021 às 10:24 UTC. A velocidade predita deste evento é de 16,5 km/s . . . . .	229
Figura 103 – Ocultação de uma estrela GDR2 de magnitude G 11,1 por Ganímedes em 25 de abril de 2021 às 07:55 UTC. A velocidade predita deste evento é de 27,7 km/s . . . . .	230
Figura 104 – Ocultação de uma estrela GDR2 de magnitude G 10,4 por Calisto em 04 de maio de 2021 às 23:01 UTC. A velocidade predita deste evento é de 16,3 km/s . . . . .	230

# Lista de tabelas

Tabela 1 – Características básicas dos satélites galileanos e de Júpiter. . . . .	3
Tabela 2 – Histórico das campanhas dos fenômenos mútuos dos satélites galileanos de Júpiter. . . . .	12
Tabela 3 – Lista de observadores da campanha dos fenômenos mútuos de 2014-2015. . . . .	29
Tabela 4 – Resultados dos 25 eventos observados em 2009. . . . .	32
Tabela 5 – Comparação entre os resultados atualizados da campanha dos fenômenos mútuos de 2009 [1] e os resultados em [2] (Arlot et al., 2014) e em [3] (Dias-Oliveira et al., 2013). . . . .	33
Tabela 6 – Resultados dos 40 eventos observados em 2014-2015. . . . .	37
Tabela 7 – Comparação dos 40 eventos observados em 2014-15. . . . .	38
Tabela 8 – Ganímedes eclipsa Amalteia, OPD (1,60 cm), 02-03-2015. . . . .	41
Tabela 9 – Predição das aproximações mútuas que ocorreram em fevereiro de 2016 para o Observatório Pico dos Dias (OPD). . . . .	49
Tabela 10 – Lista de observadores da campanha das aproximações mútuas de 2016-2019. . . . .	57
Tabela 11 – Resultados APPROX 2016. . . . .	72
Tabela 12 – Resultados APPROX 2017. . . . .	74
Tabela 13 – Resultados APPROX 2018. . . . .	75
Tabela 14 – Resultados APPROX 2019. . . . .	76
Tabela 15 – Ocultações estelares previstas para o período entre 2017 e 2021 . . . . .	82
Tabela 16 – Lista de observadores da ocultação de uma estrela GDR2 por Europa em 31 de março de 2017. . . . .	85
Tabela 17 – Correlação entre os parâmetros da elipse. . . . .	94
Tabela 18 – Diferença entre a posição geocêntrica de Europa obtida nesta ocultação estelar e as efemérides, no sentido observação menos efemérides. . . . .	99
Tabela 19 – Astrometria utilizando a técnica de combinação de imagens. . . . .	113
Tabela 20 – Comparação entre os resultados obtidos analisando os fenômenos mútuos e as aproximações mútuas. . . . .	124
Tabela 21 – Comparação entre a técnica das aproximações mútuas aplicada antes e após a astrometria clássica CCD que só foi possível após a combinação das imagens. . . . .	125
Tabela 22 – Determinação do parâmetro de impacto de uma aproximação mútua utilizando as posições $(\alpha, \delta)$ pós-processadas pelo método da combinação de imagens. . . . .	126
Tabela 23 – Lista de observatórios que colaboraram com este projeto. . . . .	211



# 1 Introdução

Os progressos na astrometria e nas modelagens dinâmicas dos satélites naturais dos planetas gigantes permitiu uma estimativa precisa dos efeitos de maré entre estes satélites e o planeta associado (Lainey et al., 2009; Lainey et al., 2012; Lainey et al., 2017). Estes estudos necessitam de uma astrometria precisa ao longo de muitos anos para restringir os modelos dinâmicos podendo trazer informações até mesmo dos processos de formação destes sistemas (Charnoz et al., 2011; Crida; Charnoz, 2012).

Órbitas precisas de objetos do Sistema Solar também auxiliam na preparação de missões espaciais visando esses objetos (Dirkx et al., 2016; Dirkx et al., 2017). Em especial, no caso das luas galileanas duas missões estão sendo preparadas para serem lançadas na próxima década (2020): a *Europa Clipper* da *National Aeronautics and Space Administration* (NASA)<sup>1</sup> e a missão espacial *JUpiter ICy moons Explorer* (JUICE) da *European Space Agency* (ESA)<sup>2</sup>. Estes estudos necessitam da astrometria de solo destes satélites com uma precisão adequada.

Neste Capítulo apresentamos uma introdução geral ao sistema dos satélites galileanos na Seção 1.1. Na Seção 1.2 apresentamos um histórico da astrometria destes satélites. Os objetivos deste projeto estão detalhados na Seção 1.3. Por fim apresentamos na Seção 1.4 as características do filtro Metano de banda estreita que merece destaque e foi utilizado ao longo de todo este projeto.

Ao longo dessa tese, os Capítulos 2, 3, 4 e 5 exploram diferentes técnicas alternativas para a astrometria deste sistema. No Capítulo 6 apresentamos como podemos comparar estas diferentes técnicas e as nossas considerações finais estão disponíveis no Capítulo 7.

No Apêndice A apresentamos os artigos publicados ao longo deste projeto e no Apêndice B apresentamos os artigos publicados em paralelo à esse projeto. No Apêndice C apresentamos um mapa com a localização dos sítios que contribuíram com este projeto. Os Apêndices D, E e F estão relacionado com os Capítulos 2, 3 e 4 respectivamente.

## 1.1 Propriedades físicas, dinâmicas e informações gerais

Io (JI ou 501) é a mais interna das luas galileanas e o quinto satélite mais interno no sistema joviano. Este é o objeto do Sistema Solar de maior atividade vulcânica (Peale; Cassen; Reynolds, 1979). Este vulcanismo é causado pela forte interação de maré entre Júpiter e esta lua (Lainey et al., 2009).

---

<sup>1</sup> Website: <<https://www.nasa.gov/europa/>>.

<sup>2</sup> Website: <<http://sci.esa.int/juice/>>.

Europa (JII ou 502) é a segunda mais interna das luas galileanas e a primeira das luas de gelo (do inglês *Icy Moons*). O modelo geológico mais aceito para esta lua considera a presença de um oceano de água líquida sob a sua superfície congelada (Anderson et al., 1998). Este modelo é reforçado devido a observação de gêiseres (Roth et al., 2014; Sparks et al., 2016; Sparks et al., 2019; Jia et al., 2018). Esta lua é o alvo da missão espacial *Europa Clipper* da NASA e um dos alvos da missão espacial JUICE da ESA.

Ganímedes (JIII ou 503) é o maior satélite do Sistema Solar e o único com uma magnetosfera própria (Poppe; Fatemi; Khurana, 2018) que se tem conhecimento. Também acredita-se que possua um oceano de água líquida sob a sua superfície congelada (Vance et al., 2014) e a observação de gêiseres também suporta essa teoria (Saur et al., 2015)<sup>3</sup>. Esta lua também é um dos alvos da missão espacial JUICE da ESA.

Calisto (JIV ou 504) é a segunda maior das luas galileanas e a mais distante de Júpiter. É o único dos quatro satélites que não se encontra na ressonância Laplaciana. A teoria clássica da força de maré prevê que este efeito não foi significativo na evolução desta lua, porém, a teoria do *Resonance Locking* (Fuller; Luan; Quataert, 2016) sugere que Calisto possa ter tido um aumento em seu semi-eixo maior devido a esse mecanismo.

Do ponto de vista dinâmico este sistema é rico e complexo (Ferraz-Mello, 1983). A ressonância Laplaciana em que Io, Europa e Ganímedes se encontram, as perturbações pela força de maré, os efeitos causados pela não esfericidade de Júpiter e dos próprios satélites são efeitos que precisam ser levados em consideração no desenvolvimento dos modelos dinâmicos deste sistema (De Sitter, 1928; Lieske, 1987; Lainey et al., 2009). Estes estudos dinâmicos necessitam de posições precisas destes objetos espalhadas ao longo de muitos anos (Arlot; Stavinschi, 2007).

Reunimos na Tabela 1 um conjunto de informações gerais deste sistema, que serão usados ao longo dessa tese, estas informações podem ser encontrados em bancos de dados como o *Planetary Fact Sheet*<sup>4</sup> e em tabelas fornecidas pelo *Jet Propulsion Laboratory* (JPL) vinculado à NASA<sup>5</sup>. Na Figura 1 apresentamos os satélites galileanos como vistos por uma câmera a bordo da Sonda Galileu<sup>6</sup>.

## 1.2 Histórico da astrometria dos satélites galileanos

Os satélites galileanos foram primeiramente observados por Galileu Galilei em 1610 com a utilização de uma luneta. Em seu livro, *Siderius Nuncius – O mensageiro das estrelas*, este autor relata as condições desta descoberta que à época teve uma grande

<sup>3</sup> Veja também o *press release* da NASA. Website: <<https://www.nasa.gov/press/2015/march/nasa-s-hubble-observations-suggest-underground-ocean-on-jupiters-largest-moon>>.

<sup>4</sup> Website: <<https://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/factsheet/>>

<sup>5</sup> Website: <[https://ssd.jpl.nasa.gov/?sat\\_phys\\_par](https://ssd.jpl.nasa.gov/?sat_phys_par)>

<sup>6</sup> Website: <<https://www.jpl.nasa.gov/missions/galileo/>>

Tabela 1 – Características básicas dos satélites galileanos e de Júpiter.

<b>Informações gerais</b>				
	Massa ( $10^{20}$ kg)	Raio (km)	Densidade média ( $g/m^3$ )	Albedo geométrico (V)
Jupiter	$189,8 \times 10^5$	69.911,0	1,326	0,54
Io (501)	893,2	1.821,5	3,530	0,62
Europa (502)	480,0	1.560,8	3,010	0,68
Ganymede (503)	1.481,9	2.631,2	1,940	0,44
Callisto (504)	1.075,9	2.410,3	1,830	0,19

<b>Informações orbitais</b>				
	Semi-eixo maior ( $10^3$ km – $R_J^{(*)}$ )	Período Orbital <sup>(**)</sup> (dias)	Inclinação ( $^\circ$ )	Excentricidade
Io (501)	421,8 – 5,91	1,769138	0,04	0,004
Europa (502)	671,1 – 9,40	3,551181	0,47	0,009
Ganymede (503)	1.070,4 – 14,97	7,154553	0,18	0,001
Callisto (504)	1.882,7 – 26,33	16,689017	0,19	0,007

(\*) –  $R_J$  significa raio de Júpiter.

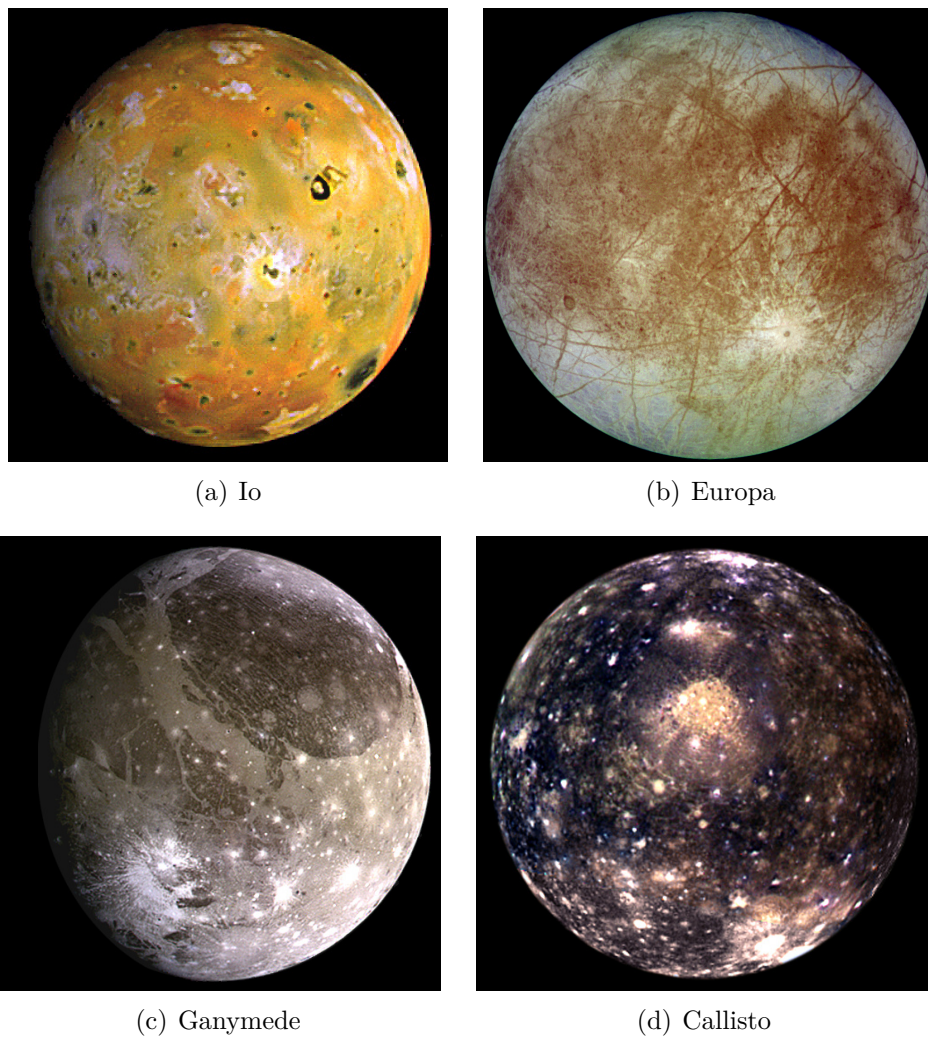
(\*\*) – Os satélites são síncronos, o período orbital é igual ao período de rotação.

importância para a consolidação do heliocentrismo.

A astrometria deste sistema vem sendo realizada por diferentes métodos em diferentes momentos históricos. Inicialmente utilizava-se as placas fotográficas em conjunto com um micro-densitômetro, o que permitia uma posição com precisões da ordem de 300-150 *mas* ( $\sim 900$ -450 km) (Arlot, 1982). Anos após, a técnica de *Trail-scale* foi desenvolvida por D. Pascu (Pascu, 1973) onde se conseguiu obter posições com precisões da ordem de 100 *mas* ( $\sim 300$  km) (Ianna; Seitzer; Levinson, 1979).

Com o desenvolvimento de novos catálogos estelares, mais precisos, e dos detectores CCDs o esperado era que essa precisão melhorasse. Entretanto, a astrometria CCD deste sistema não é trivial. Isso é causado principalmente pelo forte brilho de Júpiter (Mag. V -2) e a sua proximidade a esses satélites (Mag. V 5). Devido a isso, o detector satura rapidamente antes que seja possível obter um número adequado de estrelas de calibração. Dessa forma, as observações CCD por métodos clássicos, utilizando as estrelas para calibração astrométrica, alcançam precisões da ordem de 150-100 *mas* ( $\sim 450$ -300 km) (Kiseleva et al., 2008; Stone; Harris, 2000; Stone, 2000).

Em alguns casos isolados, devido a uma instrumentação específica, é possível obter



(a) Io

(b) Europa

(c) Ganymede

(d) Callisto

Figura 1 – Os satélites galileanos observado pela câmera CCD a bordo da sonda espacial Galileu.

posições com precisões melhores, este é o caso do Astrógrafo do Observatório de *Pulkova*. Este instrumento possui um campo de  $35 \times 35$  minutos de arco e com ele se consegue ter um número suficiente de estrelas para fazer uma astrometria e assim obter precisões da ordem de  $80 \text{ mas}$  ( $\sim 240 \text{ km}$ ) (Narizhnaya, 2015; Narizhnaya, 2016). Um segundo exemplo de sucesso são as observações feitas pelo *Hubble Space Telescope* (HST). A partir delas foi possível obter posições com precisões de  $15 \text{ mas}$  ( $\sim 50 \text{ km}$ ) (Mallama; Aelion; Mallama, 2004).

Por outro lado, de seis em seis anos, Júpiter passa pelo seu equinócio, o que faz com que a Terra (e o Sol) estejam, aproximadamente, contidos no seu plano equatorial que coincide com o plano orbital dos satélites galileanos<sup>7</sup>. Esta geometria específica permite a observação de ocultações e eclipses mútuos entre os satélites galileanos. A partir da observação destes eventos é possível determinar com precisão as posições relativas entre os

<sup>7</sup> Note a baixa inclinação destes satélites na Tabela 1



satélites envolvidos no evento (Emelyanov, 2000). Estas posições muitas vezes alcançam precisões da ordem de 10 *mas* ( $\sim 30$  km) (Emelyanov, 2009; Dias-Oliveira et al., 2013; Arlot et al., 2014; Saquet et al., 2018; Morgado et al., 2019c).

Em resumo, por um lado, temos uma astrometria clássica CCD que não obtém resultados com uma precisão adequada, porém pode ser realizada a qualquer momento. Por outro lado, os fenômenos mútuos produzem resultados de alta precisão, porém apenas a cada seis anos. Essa dicotomia motivou a procura por métodos alternativos na astrometria deste sistema.

Um destes métodos alternativos é baseado no conceito de *Precision Premium* (Peng et al., 2008), sugerido pela primeira vez por D. Pascu (Pascu, 1994). Este conceito se baseia em medir posições relativas entre dois objetos próximos no plano do céu (separações menores que 85 segundos de arco), neste cenário as distorções do campo afetam ambos os objetos de mesma forma, permitindo uma astrometria relativa de maior precisão. Peng e colaboradores utilizam este fato para medir posições relativas entre os satélites. É importante ressaltar que estes autores utilizam as efemérides de dois outros satélites distantes na imagem para determinar os parâmetros do CCD (escala de placa e orientação) e assim medir as posições relativas entre dois satélites próximos. Utilizando esta técnica eles obtêm posições com precisões de 30 *mas* ( $\sim 90$  km) (Peng et al., 2012).

A evolução da astrometria deste sistema vem se dando em duas frentes complementares. A primeira é o desenvolvimento de novos métodos alternativos capazes de obter a astrometria de alta precisão, melhor que 30 *mas* ( $\sim 90$  km), preferencialmente independente das efemérides deste sistema. A segunda é a re-redução de dados históricos, como as placas fotográficas, com novos métodos e catálogos. O objetivo principal deste projeto é atuar no desenvolvimento e análise de novas técnicas alternativas e independentes das efemérides dos satélites, como descrito na Seção 1.3.

No contexto da re-análise de dados históricos, destacamos o trabalho de V. Robert que digitalizou as placas fotográficas antigas do *United States Naval Observatory* (USNO) e obteve uma astrometria com precisão de 65 *mas* ( $\sim 200$  km) (Robert et al., 2011). Além disso este é o objetivo principal do projeto *New Astrometric Reduction of Old Observations* (NAROO)<sup>8</sup> que está iniciando. Este projeto visa a digitalização de placas fotográficas antigas de diferentes observatórios a fim de obter uma astrometria de precisão utilizando novos catálogos estelares, como o catálogo *Gaia*. A previsão é que se obtenha posições com precisões da ordem de 30 *mas* ( $\sim 90$  km).

Por fim, todas as posições obtidas são organizadas no *The Natural Satellites DataBase* (NSDB)<sup>9</sup> (Arlot; Emelyanov, 2009) onde estão disponíveis para que qualquer interessado possa utilizar.

<sup>8</sup> Website: <<https://bibnum.explore.univ-psl.fr/s/naroo/page/accueil>>

<sup>9</sup> Website: <<http://nsdb.imcce.fr/nsdb/home.html>>

### 1.3 Objetivos do projeto

O objetivo desta tese é explorar técnicas alternativas para fazer a astrometria dos satélites galileanos de Júpiter, uma vez que a astrometria clássica produz resultados com precisões da ordem de 100 *mas* ( $\sim 300$  km) (Kiseleva et al., 2008; Stone; Harris, 2000; Stone, 2000).

Entre as técnicas astrométricas com as quais trabalhamos, a mais conhecida é a técnicas dos fenômenos mútuos que vem sendo utilizada regularmente desde 1973 (Arlot; Camichel; Link, 1974; Aksnes; Franklin, 1976). Neste projeto desenvolvemos um método e um código em PYTHON para a redução e análise destes fenômenos. Aplicamos e validamos nosso método nas 25 curvas de luz obtidas por nosso grupo em 2009 que já haviam sido analisadas (Dias-Oliveira et al., 2013; Arlot et al., 2014). Aplicamos este procedimento às 47 curvas de luz que obtivemos durante a campanha de 2014 e 2015. Além disso, analisamos a curva de luz de um evento envolvendo Amalteia, um dos satélites internos de Júpiter. Esta etapa está detalhada no Capítulo 2.

Baseado na mesma geometria dos fenômenos mútuos, desenvolvemos a técnica das aproximações mútuas (Morgado et al., 2016). Está técnica vem sendo explorada por nós desde o meu Mestrado no Observatório do Valongo (OV/UFRJ) (Morgado, 2015). Dentro deste projeto, organizamos uma campanha nacional para observações destas aproximações mútuas onde colaboramos com observadores profissionais e amadores. Nossa campanha contou com observações em 5 sítios espalhados pelo Brasil e com a colaboração do *Observatoire de Haute-Provence* (OHP) localizado na França. Obtivemos um total de 127 observações bem sucedidas entre fevereiro de 2016 e julho de 2019. Os detalhes desta etapa podem ser encontrados no Capítulo 3.

Exploramos, também, a técnica das ocultações estelares. Com ela somos capazes de obter tamanhos e formas com precisões de poucos quilômetros (Braga-Ribas et al., 2013), assim como obter posições com a mesma precisão (Desmars et al., 2019). A precisão desses resultados é comparável com os resultados obtidos a partir da análise de imagens de sondas espaciais (Tajeddine et al., 2015). Aqui apresentamos os resultados da ocultação de uma estrela do catálogo *Gaia* DR2 de magnitude G 9,5 por Europa que aconteceu em 31 de março de 2017. Esta foi a primeira ocultação observada por esta lua, que temos notícia. A descrição completa desta etapa está no Capítulo 4.

Por fim, exploramos a técnica de combinação de imagens (do inglês *stacking image*). Esta técnica vem sendo utilizada em diferentes cenários visando uma melhora na razão sinal sobre ruído das imagens (Wang; Zhao; Li, 2018; Zhu et al., 2018). Em particular neste projeto, esta técnica é usada para que as estrelas necessárias para calibrações astrométricas possam ser medidas suficientemente acima do ruído do fundo do céu. Foi realizado um estudo preliminar desta técnica aplicando-a em 9 noites de observações feitas nos telescópios

de 60 cm do Observatório Pico dos Dias (OPD). Maiores detalhes sobre esta técnica e os resultados preliminares obtidos no contexto de astrometria dos satélites galileanos estão disponíveis no Capítulo 5.

No Capítulo 6 apresentamos uma comparação entre as diferentes técnicas aqui estudadas e as considerações finais deste trabalho estão no Capítulo 7.

Como mencionado, o objetivo geral dessa tese é analisar diferentes técnicas alternativas capazes de determinar as posições dos satélites galileanos independentemente das efemérides deste sistema. Aqui apresentaremos as características dessas diferentes técnicas, como observá-las, métodos de redução, análise e os resultados obtidos.

## 1.4 O filtro metano de banda estreita

O intenso brilho de Júpiter (Mag. V -2) é um desafio na observação dos satélites próximos. Ao observar Júpiter e os satélites galileanos com um telescópio de 60 centímetros de diâmetro utilizando o filtro I do sistema Johnson (centrado em 806 nm com uma banda passante de 149 nm) mesmo exposições de apenas 1 segundo resultam em imagens completamente saturadas, Figura 2. Isso nos obriga a fazer integrações curtíssimas (menores que 100 milissegundos de exposição) ou então utilizarmos filtros estreitos. Das opções, a que se mostrou ideal é a utilização do filtro Metano de banda estreita (centrado em 889 nm com largura de 15 nm), como podemos ver na Figura 2.

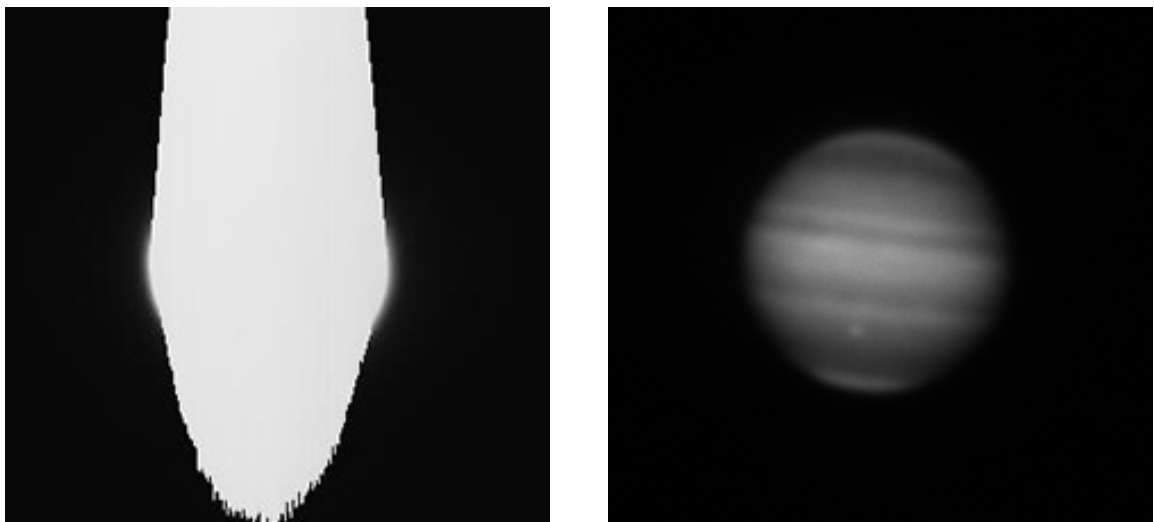


Figura 2 – Na esquerda, imagem de Júpiter feita com o CCD Andor Ikon-L utilizando o Filtro I do sistema Johnson, na direita uma imagem feita com o mesmo detector porém utilizando o filtro Metano centrado em 889 nm, com banda de 15 nm. Ambas imagens foram obtidas com um tempo de exposição de 1 segundo.

Este filtro é o ideal para este tipo de observação por estar em um comprimento de onda específico e nesta região do espectro Júpiter é especialmente menos brilhante, devido

a presença de gás metano ( $\text{CH}_4$ ) nas camadas superiores de sua atmosfera (Karkoschka, 1994; Karkoschka, 1998). A Figura 3 contém a variação do albedo dos planetas gigantes (e de Titã) ao longo dos diferentes comprimentos de onda, note a queda brusca do albedo de Júpiter, Saturno e Titã na região de 889 nm (Karkoschka, 1994).

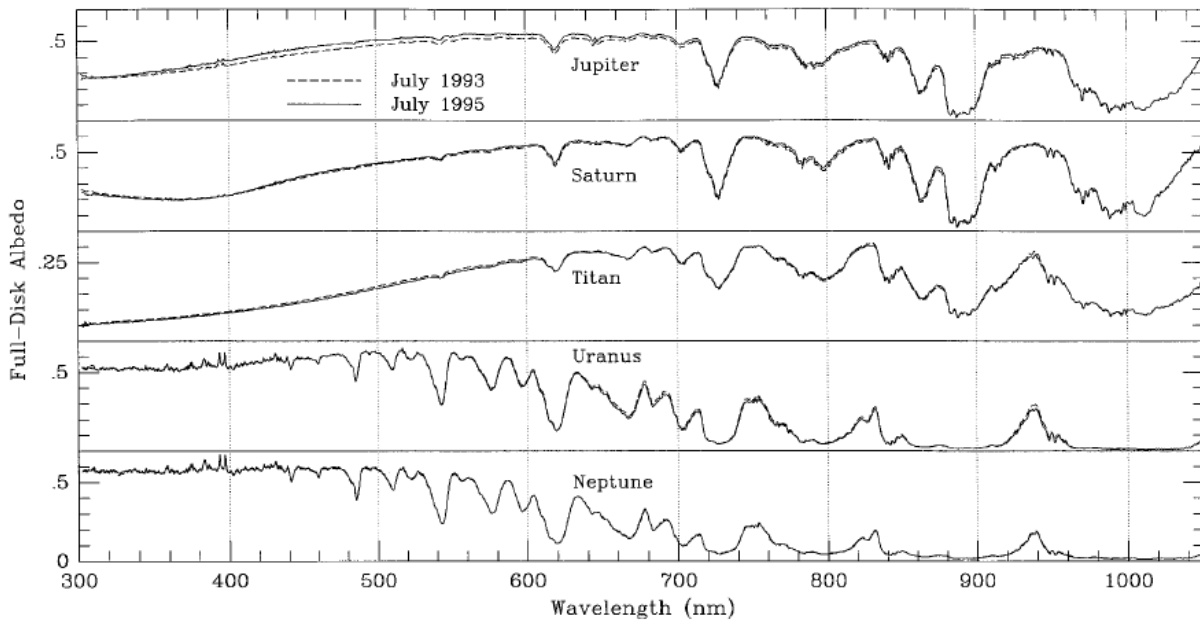


Figura 3 – Albedo dos planetas gigantes e Titã para diferentes comprimentos de onda. Note a queda brusca próximo a 890 nm, está é uma região de absorção do gás metano ( $\text{CH}_4$ ) existente na atmosfera superior de Júpiter, Saturno e Titã (Karkoschka, 1994).

Por outro lado, este efeito não ocorre nos satélites galileanos (Ver Figura 4) (Karkoschka, 1998). Logo, neste comprimento de onda, Júpiter e os satélites galileanos possuem brilho similar, o que nos permite obter imagens onde os satélites estão bem amostrados e sem que Júpiter esteja saturado.

Um conjunto de filtros Metano foram comprados ao longo deste projeto visando as diferentes campanhas observacionais que organizamos, estes filtros foram emprestados aos diferentes observadores com quem colaboramos. A curva de transmissão desse filtro encontra-se na Figura 5. Uma típica imagem obtida por este filtro está ilustrada na Figura 6, esta imagem foi obtida pelo telescópio Zeiss de 60 cm de abertura localizado no Observatório Pico dos Dias (OPD), o tempo de exposição utilizado foi de 4 segundos. A maioria das observações detalhadas neste projeto foram realizadas utilizando estes filtros.

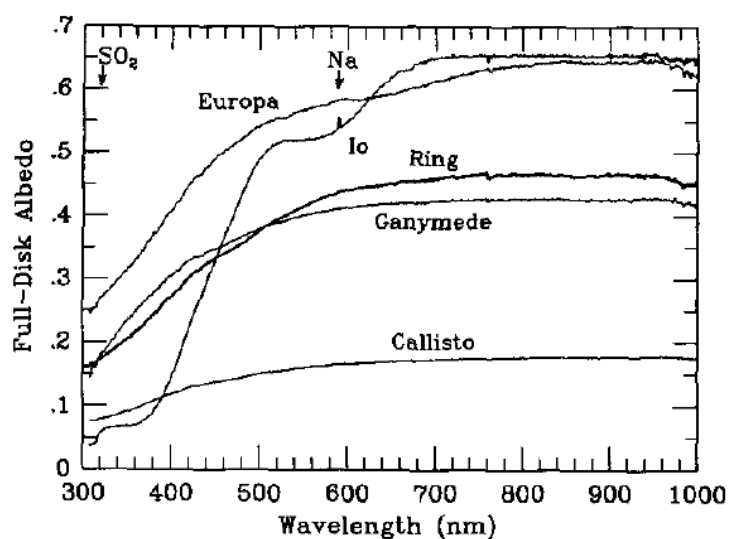


Figura 4 – Albedo dos satélites galileanos e do anel de Saturno para diferentes comprimentos de onda. Note que, diferente da Figura 3, a queda brusca próxima a 890 nm não é observada (Karkoschka, 1998).

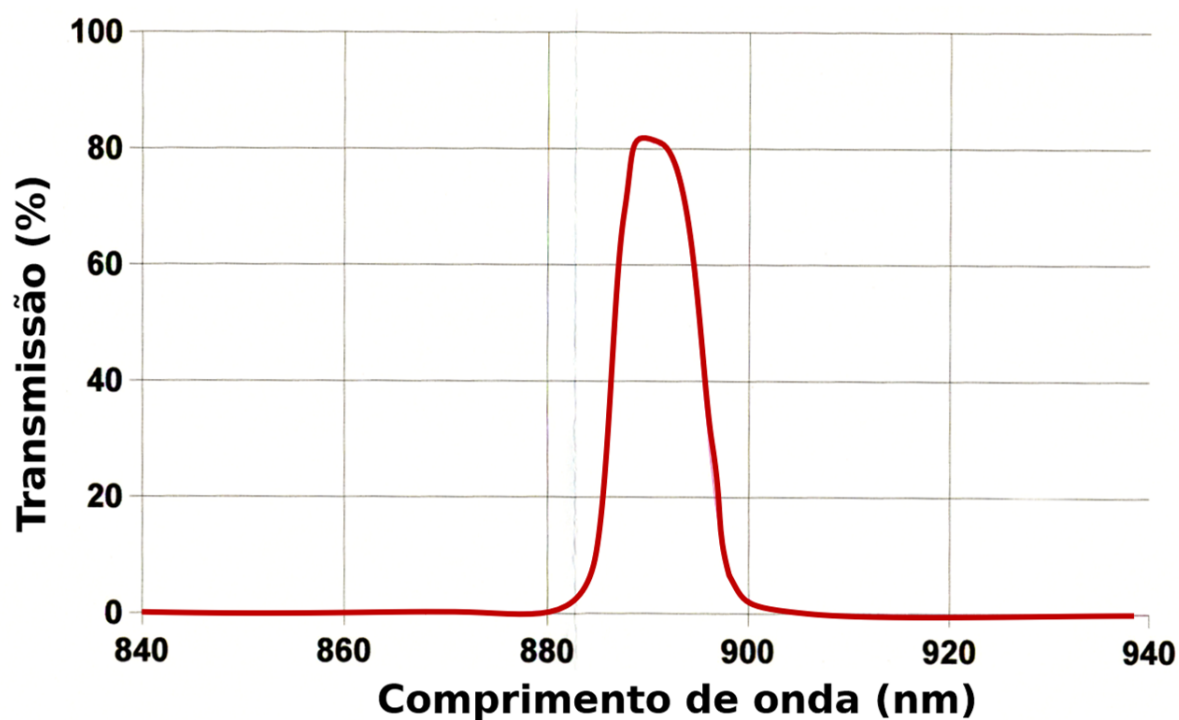


Figura 5 – A curva de transmissão do filtro Metano de banda estreita, centrado em 889 nm com largura de 15 nm. Curva produzida por *Omega Optical, Inc.*



Figura 6 – Imagem de Júpiter, Io (J1), Europa (J2) e Calisto (J4) obtida no telescópio Zeiss de 60 cm de abertura do Observatório Pico dos Dias (OPD), equipado com o filtro Metano de banda estreita. Imagem obtida em 19 de novembro de 2014. Note que o planeta e os satélites apresentam o brilho similar devido ao uso deste filtro.



## 2 Campanha dos fenômenos mútuos

Um fenômeno mútuo no contexto dos satélites naturais é quando um destes satélites oculta ou eclipsa outro para um observador. Estes eventos acontecem sempre que a Terra e o Sol passam pelo plano orbital dos satélites (o equador do primário). Isto acontece duas vezes a cada órbita do planeta em questão (durante os equinócios), no caso de Júpiter, de seis em seis anos. Este alinhamento é facilmente notado para o caso de Saturno, onde a variação da inclinação do seu plano equatorial para um observador na Terra é evidenciada por seus anéis (ver Figura 7)<sup>1</sup>.



Figura 7 – Variação da inclinação do plano equatorial de Saturno para um observador na Terra ao longo de 15 anos. Quando os anéis são observados como uma linha significa que a Terra está aproximadamente no plano equatorial de Saturno.

As épocas que esses eventos acontecem podem ser facilmente previstas ao analisarmos a posição da Terra e do Sol como vistas para um observador no referencial planetocêntrico. Os fenômenos mútuos irão acontecer sempre que a declinação planetocêntrica da Terra e do Sol se tornam próximas de zero. Na Figura 8 temos um gráfico contendo as declinações da Terra (em azul) e do Sol (em vermelho) em relação ao equador de Júpiter entre os anos 2000 e 2030. Note que tivemos fenômenos mútuos em 2003, 2009 e

<sup>1</sup> Website: <<https://apod-on.tumblr.com/post/122573545220/rings-and-seasons-of-saturn>>.



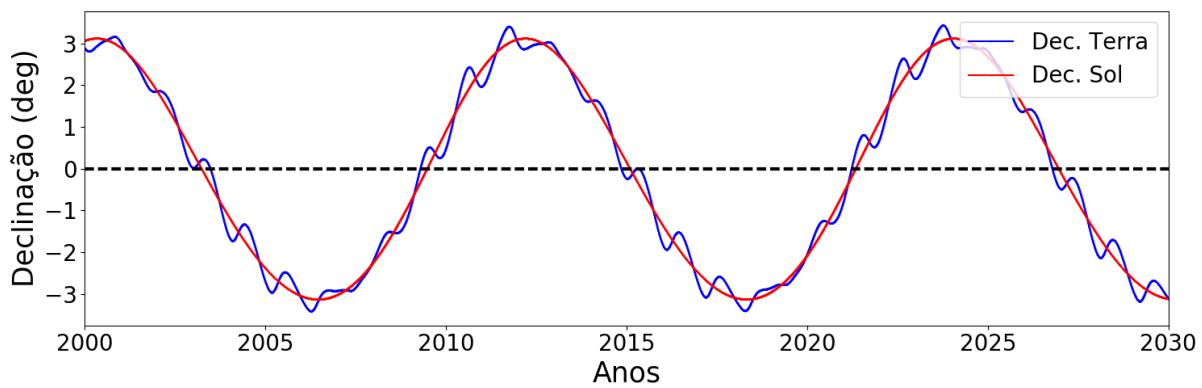


Figura 8 – Declinação planetocêntrica da Terra e do Sol entre 2000 e 2030. Os fenômenos mútuos acontecem sempre que estas declinações estão próximas de zero, isso acontece a cada 6 anos para o sistema joviano.

Tabela 2 – Histórico das campanhas dos fenômenos mútuos dos satélites galileanos de Júpiter.

Ano	Número de observações	Número de sítios	Referência
1973	94	27	(Aksnes; Franklin, 1976)
1979 - 1980	22	11	(Arlot et al., 1982)
1985	167	25	(Arlot et al., 1992)
1990 - 1991	375	55	(Arlot et al., 1997)
1996 - 1997	275	42	(Arlot et al., 2006)
2003	377	42	(Arlot et al., 2009)
2009	457	74	(Arlot et al., 2014)
2014 - 2015	607	74	(Saquet et al., 2018)

2015 e teremos em 2021 e 2027. As previsões dos eventos futuros já foram disponibilizadas pelo IMCCE<sup>2</sup> (Arlot; Emelyanov, 2019)

Com a análise da variação da luz dos satélites durante estas ocultações e eclipses podemos obter posições relativas entre os satélites com precisões tão boas quanto 5 *mas* ( $\sim 15$  km) (Emelyanov, 2009). Devido a isso, desde 1973 campanhas observacionais são organizadas sistematicamente para a obtenção de dados destes fenômenos (Aksnes; Franklin, 1976). O IMCCE vem organizando estas campanhas internacionais e os números oficiais estão organizados na Tabela 2<sup>3</sup>. Eléonore Saquet do IMCCE ficou responsável pela campanha de fenômenos mútuos de 2014-2015 que resultou em um total de 607<sup>4</sup> observações em mais de 70 sítios, os seus resultados possuem uma incerteza média de 24 *mas* ( $\sim 72$  km) (Saquet et al., 2018).

<sup>2</sup> Website: <<http://nsdb.imcce.fr/multisat/nssephme.htm>>

<sup>3</sup> Website: <<http://nsdb.imcce.fr/obsphé/obsphé-en/fjuphému.html>>.

<sup>4</sup> Destas, 10 observações foram obtidas por nossa campanha e fornecidas no contexto de uma colaboração.

Em especial, o grupo de astrometria do Rio de Janeiro teve participação nas campanhas de 2009 (Dias-Oliveira et al., 2013; Arlot et al., 2014) e de 2014-2015 (Saquet et al., 2018; Morgado et al., 2019c), além de participar das campanhas dos fenômenos mútuos dos satélites de Saturno em 2009 (Arlot et al., 2012) e os dos satélites de Urano também em 2009 (Assafin et al., 2009; Arlot et al., 2013).

Neste capítulo apresentamos os resultados de 47 curvas de luz obtidas pela campanha brasileira dos fenômenos mútuos que organizamos entre 2014 e 2015, apresentamos também uma re-redução de 25 eventos observados durante a campanha de 2009 e um evento envolvendo o satélite interno Amalteia (J5) observado em 2015.

A modelagem utilizada está apresentada na Seção 2.1 e as observações estão detalhas na Seção 2.2. Na Seção 2.3 apresentamos o método de redução e análise destes fenômenos e validamos o nosso método aplicando-o nas observações de 2009 (Sec. 2.3.1). Por fim, nossos resultados estão apresentados na Seção 2.4. Um conjunto selecionado de 13 curvas de luz de fenômenos mútuos tratadas neste projeto estão disponíveis no Apêndice D para exemplificação. Estes resultados foram organizados na forma de um artigo aceito na *Planetary and Space Science* em 2019 (Morgado et al., 2019c).

## 2.1 Modelando os fenômenos mútuos

De um ponto de vista geométrico podemos considerar que uma ocultação mútua ocorre quando um satélite encobre outro para um observador na Terra, isto é, temos um alinhamento entre os dois satélites do ponto de vista da Terra (Figura 9). Um eclipse mútuo, por outro lado é quando a sombra de um satélite encobre o outro, dessa forma, o alinhamento agora é do ponto de vista do Sol (Figura 10). Por notação denominamos o satélite ocultante ou eclipsante como *Sat 1* e o satélite ocultado ou eclipsado como *Sat 2*.

É importante ressaltar que esta geometria precisa ser tratada no espaço atemporal, logo é necessário que os vetores posições sejam obtidos para os instantes de tempo corretos. Para um instante de tempo qualquer do ponto de vista do observador ( $t_{obs}$ ), o vetor posição do satélite  $j$  ( $\vec{P}_j$ ) precisa ser obtido para o instante em que a luz refletiu em sua superfície a caminho do observador ( $t_j$ ). O vetor posição do Sol ( $\vec{P}_s$ ) considerado é aquele para o momento em que o fóton o deixou ( $t_{sol}$ ) para refletir no satélite no instante  $t_j$ . Sendo  $c$  a velocidade da luz, construímos um processo iterativo para determinação destes instantes de tempo, porém uma primeira aproximação é descrita pelas Equações (2.1) e (2.2).

$$t_j \simeq t_{obs} - \frac{|\vec{P}_j|}{c}, \quad (2.1)$$

$$t_{sol} \simeq t_{obs} - \frac{|\vec{P}_j| - |\vec{P}_{sj}|}{c}, \quad (2.2)$$

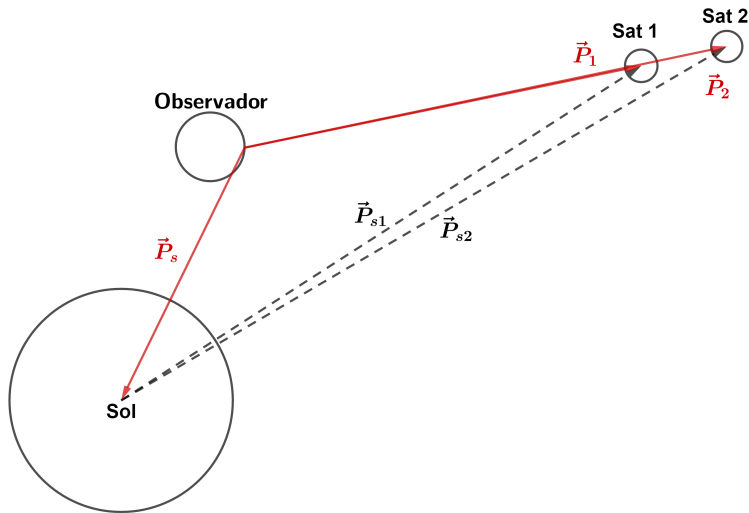


Figura 9 – Geometria de uma ocultação. Os vetores topocêntricos dos satélites ocultante ( $\vec{P}_1$ ) e ocultado ( $\vec{P}_2$ ) e o vetor topocêntrico do Sol ( $\vec{P}_s$ ) estão em vermelho. As linhas pretas tracejadas são os vetores heliocêntricos dos satélites ( $\vec{P}_{s1}$  e  $\vec{P}_{s2}$ ). Estes vetores podem ser facilmente obtidos utilizando as efemérides. Figura fora de escala para visualização.

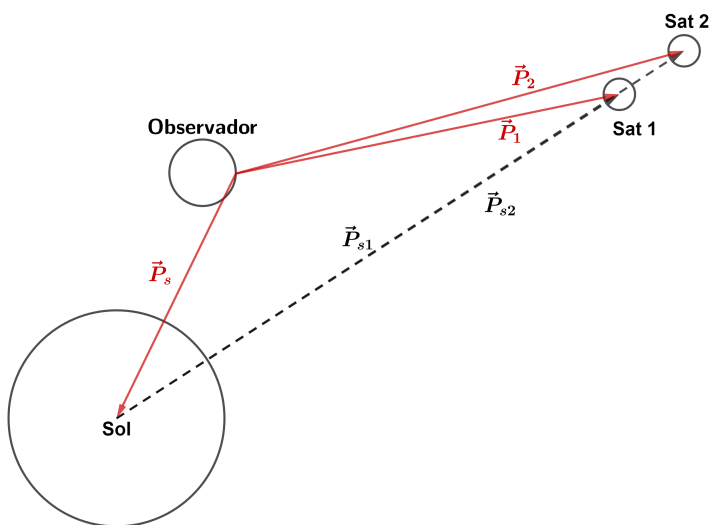


Figura 10 – Análoga à Figura 9 para um eclipse.

onde

$$\vec{P}_{sj} = \vec{P}_s - \vec{P}_j . \quad (2.3)$$

Para o caso de uma ocultação os vetores posições de ambos os satélites são obtidos utilizando os instantes de tempo detalhados nas Equações (2.1) e (2.2). No caso de um eclipse o vetor posição do satélite eclipsado ( $\vec{P}_2$ ) também é obtido da mesma maneira, mas para o satélite eclipsante ( $\vec{P}_1$ ) o tempo ( $t_1$ ) precisa ser considerado de maneira diferenciada. O caminho percorrido pelo fóton passa pelo satélite eclipsante, vai até o eclipsado e retorna ao observador. Para a posição do Sol também temos que considerar o tempo do fóton viajando do satélite eclipsante até o satélite eclipsado. Uma primeira aproximação é descrita pelas Equações (2.4) e (2.5)

$$t_1 \simeq t_{obs} - \frac{|\vec{P}_1| - |\vec{P}_{12}|}{c} , \quad (2.4)$$

$$t_{sol} \simeq t_{obs} - \frac{|\vec{P}_1| - |\vec{P}_{s1}| - |\vec{P}_{12}|}{c} , \quad (2.5)$$

onde

$$\vec{P}_{12} = \vec{P}_1 - \vec{P}_2 . \quad (2.6)$$

Os parâmetros que regem estes eventos podem ser separados em dois grupos: físicos e astrométricos. Os parâmetros físicos são os tamanhos, formas e albedos dos satélites e no caso dos eclipses o raio e iluminação do Sol. Os parâmetros astrométricos são: (i) a mínima separação no plano do céu entre os dois satélites ou no caso de eclipse entre o centro da sombra e o satélite eclipsado, também conhecido como o parâmetro de impacto ( $s_0$ ); (ii) o instante de tempo em que essa mínima separação acontece, o instante central ( $t_0$ ); e (iii) a velocidade relativa no plano do céu entre os satélites, ou entre a sombra do satélite eclipsante e o satélite eclipsado ( $v_0$ ). Estes parâmetros estão ilustrados na Figura 11.

Os parâmetros físicos são considerados como conhecidos, a partir de dados de sondas ou observações prévias. Os parâmetros astrométricos são tratados como parâmetros de interesse e o nosso objetivo é determina-los. Precisamos ainda levar em considerações alguns detalhes, devemos optar por uma lei de reflexão que irá modelar como a luz do Sol é refletida pela superfície dos satélites e um modelo para escurecimento de limbo do Sol. Estas modelagens serão detalhadas nas seções seguintes.

Por fim, antes que possamos detalhar melhor as modelagens individuais das ocultações mútuas (Seção 2.1.1) e de eclipses mútuos (Seção 2.1.2) é necessário definirmos o referencial que utilizaremos. Optamos por centrar nossas coordenadas no *Sat 2*<sup>5</sup>, trabalha-

<sup>5</sup> Satélite ocultado ou eclipsado.

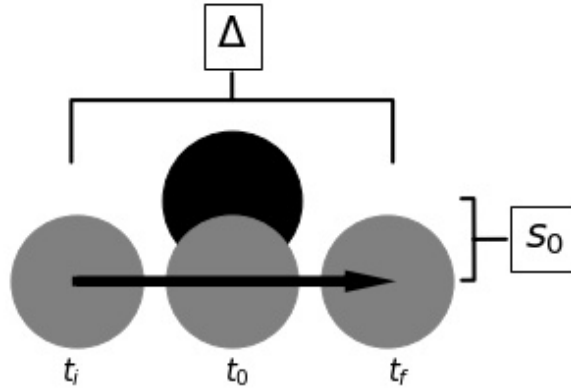


Figura 11 – Geometria de um evento mútuo e os parâmetros de interesse. Em cinza temos o satélite ocultante (*Sat 1*) e em preto o satélite ocultado (*Sat 2*), a seta preta representa o sentido do movimento relativo entre os centros dos satélites (*Sat 1* – *Sat 2*). O parâmetro de impacto ( $s_0$ ) é a mínima separação entre os satélites. O instante central ( $t_0$ ) é o instante de tempo em que essa mínima separação acontece. A velocidade relativa entre o satélite ocultado e o satélite ocultador pode ser calculada utilizando  $v_0 = \frac{\Delta}{t_f - t_i}$ . É importante ressaltar que cada satélite tem o seu albedo específico  $A_j$ . No caso de um eclipse substituímos o satélite ocultante pela sombra do satélite eclipsante.

remos em um referencial 2D (plano do céu) perpendicular ao vetor posição do *Sat 2*, o vetor unitário  $\hat{y}$  possuirá mesma direção que o vetor  $\vec{P}_2$  porém no sentido oposto. Além disso, o vetor unitário  $\hat{z}$  é definido como o vetor ortogonal à direção da velocidade relativa entre o *Sat 1* e o *Sat 2* e o vetor posição  $\vec{P}_2$ . O vetor unitário  $\hat{x}$  é definido como a direção da velocidade relativa entre o *Sat 1* e o *Sat 2* no plano do céu que pode ser calculado como o produto vetorial entre  $\hat{y}$  e  $\hat{z}$ . Estes vetores unitários estão descritos nas Equações (2.7), (2.8) e (2.9). O vetor  $\vec{V}_{rel}$  é o vetor velocidade relativa entre os satélites ( $\vec{V}_{rel} = \vec{V}_1 - \vec{V}_2$ ).

$$\hat{x} = \frac{(\vec{V}_{rel} \times \vec{P}_j) \times \vec{P}_j}{|(\vec{V}_{rel} \times \vec{P}_j) \times \vec{P}_j|}, \quad (2.7)$$

$$\hat{y} = \frac{-\vec{P}_j}{|\vec{P}_j|}, \quad (2.8)$$

$$\hat{z} = \frac{\vec{V}_{rel} \times \vec{P}_j}{|\vec{V}_{rel} \times \vec{P}_j|}. \quad (2.9)$$

### 2.1.1 Ocultações Mútuas

A modelagem de uma ocultação mútua começa com a criação de um perfil para cada satélite iluminado pelo Sol como visto por um observador na Terra. Consideramos cada satélite como uma esfera perfeita de raio  $R_j$ , com um albedo uniforme  $A_j$ .

Conhecendo as posições relativas entre satélites para um instante  $t_{obs}$ , posicionamos os perfis dos satélites nos locais adequados (sobrepondo-os quando necessário) e medimos o fluxo de luz simulada resultante. Por fim, esse fluxo de luz simulado é normalizado pela soma dos fluxos de ambos os satélites. Ao fazer isso, para um conjunto de instantes de tempo, geramos a curva de luz simulada.

#### 2.1.1.1 O perfil de cada satélite

Nesta seção visamos obter um modelo de como um satélite que está sendo iluminado pelo Sol é visto por um observador na Terra. Antes de montarmos o perfil desejado, ainda é necessário escolhermos um modelo de reflectância que irá reger como a luz do Sol reflete na superfície do satélite. O modelo que vem tendo maior destaque é o modelo de Hapke (Hapke, 1981; Hapke; Wells, 1981; Hapke, 1984; Hapke, 1986; Hapke, 2002; Hapke, 2008; Hapke, 2012) que vem sendo utilizado por diferentes autores nos estudos dos fenômenos mútuos (Emelyanov, 2000; Emelyanov, 2003; Emelyanov; Gilbert, 2006; Emelyanov, 2009; Arlot et al., 2014; Saquet et al., 2018). Este modelo requer o conhecimento prévio dos parâmetros de Hapke para os satélites em questão. Estes parâmetros variam de acordo com comprimento de onda em que as observações são feitas.

Os parâmetros de Hapke foram determinados para as luas galileanas. Para Io temos estes parâmetros para comprimentos de ondas entre 350 e 590 nm (McEwen, 1988) e para os demais satélites nos comprimentos de onda 470 e 550 nm (Domingue; Verbiscer, 1997). Não é contemplada assim a região espectral em que nossas observações foram feitas (centrada em 889 nm<sup>6</sup>).

Optamos, por utilizar o modelo de Oren-Nayar (Oren; Nayar, 1994), que é uma generalização da lei de Lambert. Os parâmetros livres deste modelo são o albedo do satélite ( $A_j$ ) e um parâmetro relacionado com a rugosidade da superfície estudada ( $\kappa$ ). Para uma superfície similar à da Lua, é sugerido utilizamos um valor de  $\kappa$  igual a  $\pi/2$ . No lugar de tratar os albedos individuais de cada satélite ( $A_j$ ) podemos apenas determinar a razão entre os albedos ( $A_2/A_1$ ). Esta razão de albedos é então determinada de maneira independente utilizando observações minutos antes e/ou após o evento mútuo, com os satélites devidamente separados, maiores detalhes na subseção 2.1.1.2.

Aqui começamos a criação do perfil do satélite  $j$ . Conhecendo o vetor posição deste satélite em relação ao observador ( $\vec{P}_j$ ), o vetor topocêntrico da posição do Sol ( $\vec{P}_s$ ) e o vetor

<sup>6</sup> Filtro Metano, centrado em 889 nm com largura de 15 nm.

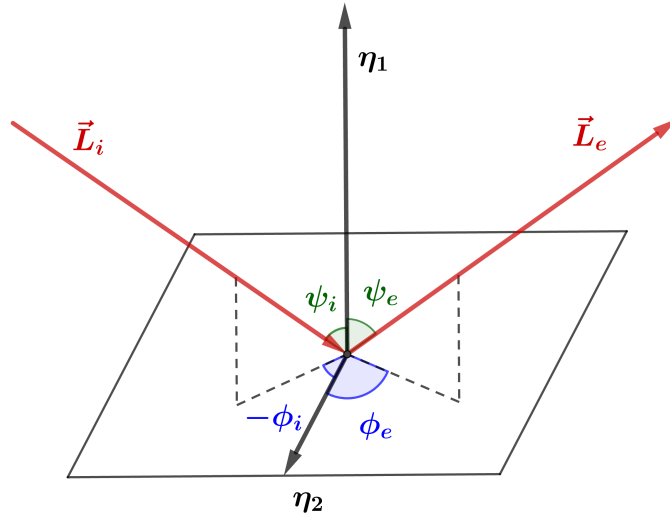


Figura 12 – Reflexão da luz em uma região do satélite. O raio de luz incidente ( $\vec{L}_i$ ) e o raio de luz refletida ( $\vec{L}_e$ ) estão em vermelho. O vetor normal ( $\eta_1$ ) e o vetor tangencial ( $\eta_2$ ) à superfície do satélite estão em preto. Em verde estão os ângulos de incidência e reflectância ( $\psi_i$  e  $\psi_e$ ) e em azul os ângulos ( $\phi_i$  e  $\phi_e$ ) entre as projeções de  $\vec{L}_i$  e  $\vec{L}_e$  no plano e o vetor  $\eta_2$ .

velocidade relativa entre o satélite ocultado e o satélite ocultador ( $\vec{V}_r$ ) podemos determinar a fração de brilho de cada região discreta do satélite  $j$  para o sistema de referência de escolha. Computacionalmente este perfil precisa ser discretizado dada uma resolução  $\delta r$  escolhida a fim de otimizar a dualidade: tempo de processamento computacional versus qualidade da simulação.

Um raio de luz de direção  $\vec{L}_i$  vindo do Sol atinge uma região  $(x', y', z')$  na superfície de um satélite, que possui raio  $R_j$ , e é refletida até o observador na forma de  $\vec{L}_e$ , ver Figura 12. Esta região  $(x', y', z')$  pode ser descrita em coordenadas esféricas como:

$$\theta = \arccos\left(\frac{z'}{R_j}\right), \quad (2.10)$$

$$\varphi = \arccos\left(\frac{x'}{R_j \sin(\theta)}\right). \quad (2.11)$$

Os valores de  $x'$  e  $z'$  variam entre  $-R_j$  e  $R_j$  e  $y'$  pode ser descrito como

$$y' = R_j \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\varphi). \quad (2.12)$$

O vetor normal a esta região da superfície ( $\eta_1$ ) e o vetor tangente ( $\eta_2$ ) podem ser descritos como

$$\eta_1 = x'\hat{x} + y'\hat{y} + z'\hat{z} , \quad (2.13)$$

$$\eta_2 = \cos(\theta) \cdot \cos(\varphi) \cdot \hat{x} + \cos(\theta) \cdot \sin(\varphi) \cdot \hat{y} + \sin(\theta) \cdot \hat{z} . \quad (2.14)$$

Os ângulos de incidência ( $\psi_i$ ), reflectância ( $\psi_e$ ) e suas projeções no plano em relação ao ângulo tangente ( $\phi_i$ ,  $\phi_e$ ) são determinados utilizando as Equações (2.15), (2.16), (2.17) e (2.18).

$$\psi_{ij} = \arccos \left( \frac{\vec{P}_{sj} \cdot \vec{\eta}_{1j}}{|\vec{P}_{sj}| \cdot |\vec{\eta}_{1j}|} \right) , \quad (2.15)$$

$$\psi_{ej} = \arccos \left( \frac{\vec{P}_j \cdot \vec{\eta}_{1j}}{|\vec{P}_j| \cdot |\vec{\eta}_{1j}|} \right) , \quad (2.16)$$

$$\phi_{ij} = \arccos \left( \frac{(\vec{\eta}_{1j} \times \vec{\eta}_{2j}) \cdot (\vec{P}_{sj} \times \vec{\eta}_{1j})}{|(\vec{\eta}_{1j} \times \vec{\eta}_{2j})| \cdot |(\vec{P}_{sj} \times \vec{\eta}_{1j})|} \right) , \quad (2.17)$$

$$\phi_{ej} = \arccos \left( \frac{(\vec{\eta}_{1j} \times \vec{\eta}_{2j}) \cdot (\vec{P}_j \times \vec{\eta}_{1j})}{|(\vec{\eta}_{1j} \times \vec{\eta}_{2j})| \cdot |(\vec{P}_j \times \vec{\eta}_{1j})|} \right) . \quad (2.18)$$

Finalmente, aplicamos a lei de reflexão desejada e determinamos a fração da luz que esta região irá refletir e que chegará ao observador, Equação (2.19) (Oren; Nayar, 1994). Utilizamos  $\kappa$  igual a  $\pi/2$  que reproduz realisticamente a reflexão da lua cheia.

$$L_e = L_i \cdot (L_e^{(1)} + L_e^{(2)}) , \quad (2.19)$$

onde  $L_e^{(1)}$  representa a componente ligada a reflexão direta da luz do Sol pela superfície do satélite, definida na Equação (2.20).

$$L_e^{(1)} = \frac{A_j}{\pi} \cdot \cos(\psi_i) \cdot [C_1 + C_2 \cdot \tan(\beta) \cdot \cos(\phi_e - \phi_i) + (1 - C_3 \cdot |\cos(\phi_e - \phi_i)|) \tan \left( \frac{\alpha + \beta}{2} \right)] , \quad (2.20)$$

$$\alpha = \max(\psi_i, \psi_e) ,$$

$$\beta = \min(\psi_i, \psi_e) ,$$

$$C_1 = 1 - 0,5 \cdot \frac{\kappa^2}{\kappa^2 + 0,33} ,$$

$$C_2 = \begin{cases} 0,45 \cdot \left( \frac{\kappa^2}{\kappa^2 + 0,09} \right) \sin(\alpha) & \text{se } \cos(\phi_e - \phi_i) \geq 0 \\ 0,45 \cdot \left( \frac{\kappa^2}{\kappa^2 + 0,09} \right) \left( \sin(\alpha) - \frac{2\beta}{\pi} \right)^3 & \text{de outra forma} \end{cases} ,$$

$$C_3 = 0,125 \cdot \left( \frac{\kappa^2}{\kappa^2 + 0,09} \right) \cdot \left( \frac{4\alpha\beta}{\pi^2} \right) ,$$



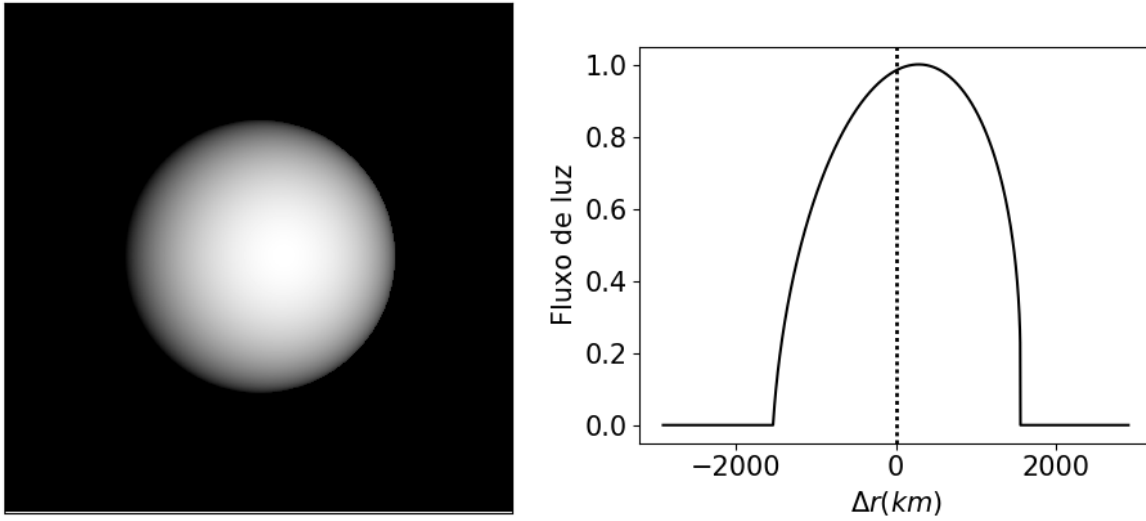


Figura 13 – Perfil 2D de Europa para o dia 19/11/2014 às 07:37 UTC. A direita temos a intensidade do brilho de Europa ao longo da linha central da imagem em quilômetros em relação ao centro do satélite, a não simetria é devido ao ângulo de fase igual a  $10,7^\circ$ . Note que o raio de Europa utilizado foi igual a 1560,8 km. A resolução utilizada foi de 1 *mas* ( $\sim 3,7$  km).

e  $L_e^{(2)}$  é a componente de segunda ordem que considera as inter-reflexões, definida pela Equação (2.20).

$$L_e^{(2)} = \frac{A_j}{\pi} \cos(\psi_i) \cdot C_4 \cdot \left[ 1 - \cos(\phi_e - \phi_i) \cdot \left( \frac{2\beta}{\pi} \right)^2 \right], \quad (2.21)$$

$$C_4 = 0,17 \cdot \left( \frac{\kappa^2}{\kappa^2 + 0,13} \right).$$

Ao aplicarmos estas equações podemos então desenhar o perfil de um satélite para um momento de escolha de acordo com este modelo. Nas Figuras 13 temos, a esquerda, o perfil do satélite Europa como observado pelo OPD para o dia 19 de novembro de 2014 às 07:37 UTC, momento em que este satélite foi ocultado pelo satélite Calisto. No gráfico a direita temos a distribuição do brilho ao longo da linha central do satélite em quilômetros em relação ao centro do satélite, a não simetria dessa curva é devido ao ângulo de fase igual a  $10,7^\circ$ , para ilustração o albedo foi considerado 1,0 e a resolução adotada foi de 1 *mas* ( $\sim 3,7$  km). A integral do fluxo de todas as regiões compõe o fluxo total do satélite  $F_j$ .

#### 2.1.1.2 Determinação da razão de albedos

Como mencionado anteriormente um dos parâmetros necessários em nossa modelagem é o albedo de cada um dos satélites ( $A_j$ ). Em resumo o albedo é o quanto a superfície

do corpo reflete a luz Solar. Este parâmetro depende de inúmeras informações a respeito da superfície do objeto, porém está fora do escopo deste trabalho estudar em detalhes os albedos individuais dos satélites galileanos, sendo necessário apenas determinarmos a razão entre os albedos dos satélites ocultante e o ocultado para o momento da ocultação.

A partir das equações (2.19) é fácil perceber que o albedo é um fator que escala o fluxo do satélite como um todo. Ele pode ser facilmente colocado em evidência e multiplicar o perfil inteiro do satélite no lugar de ser aplicado internamente em cada região discretizada. Aproveitamos dessa característica para determinar esse parâmetro a partir de observações feitas instantes antes e/ou após o fenômeno mútuo.

Uma vez que os satélites estejam suficientemente separados na imagem e os seus fluxos possam ser medidos individualmente, fazemos uma fotometria de abertura e medimos o fluxo do satélite ao longo de algumas centenas de imagens. Consideramos que o albedo é um fator multiplicativo que permite que o fluxo de luz simulado ( $F'_j$ ) se equipare à média do fluxo de luz observado  $\bar{F}_{obsj}$ .

$$F_j = \bar{F}_{obsj} = F'_j \cdot A_j . \quad (2.22)$$

Porém fazer essa determinação diretamente para cada satélite fará com que erros instrumentais sejam inseridos no nosso modelo. A solução é trabalharmos com a razão de albedos entre os dois satélites (ocultante e ocultado). Dessa forma eliminamos erros sistemáticos instrumentais que afetem ambos os satélites da mesma forma.

$$\frac{A_1}{A_2} = \frac{\bar{F}_{obs1}}{\bar{F}_{obs2}} \cdot \frac{F'_2}{F'_1} . \quad (2.23)$$

Como estamos interessados no fluxo de luz normalizado, os albedos individuais podem ser facilmente substituídos pela razão de albedos aqui determinada. É importante ressaltar que essa abordagem já leva em consideração os tamanhos dos satélites e o efeito da fase solar.

### 2.1.1.3 Curva de luz simulada de uma ocultação

Uma vez que temos o perfil dos satélites o que nos falta fazer é posicionar ambos os satélites para medirmos o fluxo de luz do conjunto para um instante observado de escolha.

Como mencionado anteriormente, consideramos o plano do céu, centrado no *Sat 2* e rotacionado por  $\omega$  de maneira que o o sentido  $\hat{x}$  seja o sentido da velocidade relativa entre os satélites. O processo se inicia a partir das posições topocêntricas dos satélites  $(\alpha, \delta)$  no ICRS para um instante de tempo qualquer ( $t$ ). A posição do satélite ocultador em relação ao satélite ocultado  $(\Delta\alpha, \Delta\delta)$  pode ser obtido com as Equações (2.24) e (2.25).

A separação ( $s$ ) é a distância aparente entre os dois satélites e pode ser determinada utilizando a Equação (2.26).

$$\Delta\alpha(t) = (\alpha_1(t) - \alpha_2(t)) \cos\left(\frac{\delta_1(t) + \delta_2(t)}{2}\right), \quad (2.24)$$

$$\Delta\delta(t) = \delta_1(t) - \delta_2(t), \quad (2.25)$$

$$s(t) = \sqrt{\Delta\alpha^2(t) + \Delta\delta^2(t)}. \quad (2.26)$$

Rotacionamos estas posições relativas pelo ângulo  $\omega$  a fim de chegarmos no referencial que escolhemos previamente  $\hat{x}$  e  $\hat{z}$ .

$$\Delta x(t) = \Delta\alpha(t) \cdot \cos(\omega) - \Delta\delta(t) \cdot \sin(\omega), \quad (2.27)$$

$$\Delta z(t) = \Delta\alpha(t) \cdot \sin(\omega) + \Delta\delta(t) \cdot \cos(\omega), \quad (2.28)$$

$$(2.29)$$

onde

$$\omega = \arctan\left(\frac{\Delta\alpha(t_2) - \Delta\alpha(t_1)}{\Delta\delta(t_2) - \Delta\delta(t_1)}\right). \quad (2.30)$$

Agora que temos as posições relativas entre os satélites no referencial escolhido sobrepomos o perfil do satélite ocultador ao perfil satélite ocultado respeitando estas posições e integramos o fluxo de luz resultante dessa sobreposição ( $F(t)$ ). Ao repetimos este processo para diferentes instantes de tempo ao longo do evento podemos construir a curva de luz simulada. A Figura 14 ilustra a simulação do evento entre Europa e Io que aconteceu em 22 de fevereiro de 2015. A curva de luz resultante é normalizada para que fora do evento ela tenha valor igual a 1,0, isso quer dizer que normalizamos a curva de luz pela soma dos fluxos individuais dos satélites ( $F_1 + F_2$ ).

## 2.1.2 Eclipses Mútuos

Para o satélite eclipsado a abordagem que utilizamos é igual àquela utilizada em uma ocultação, falta então criar um perfil para a sombra do satélite eclipsante. Esta sombra possuirá uma componente de umbra, onde a luz do Sol é completamente bloqueada pelo satélite eclipsante e uma componente de penumbra onde a luz é parcialmente bloqueada.

Em particular é necessário utilizarmos uma modelagem para o escurecimento de limbo do Sol. Após a criação do perfil da sombra podemos então aplicar a sombra sobre o perfil do satélite eclipsado de maneira similar àquela explorada na Seção 2.1.1.3.

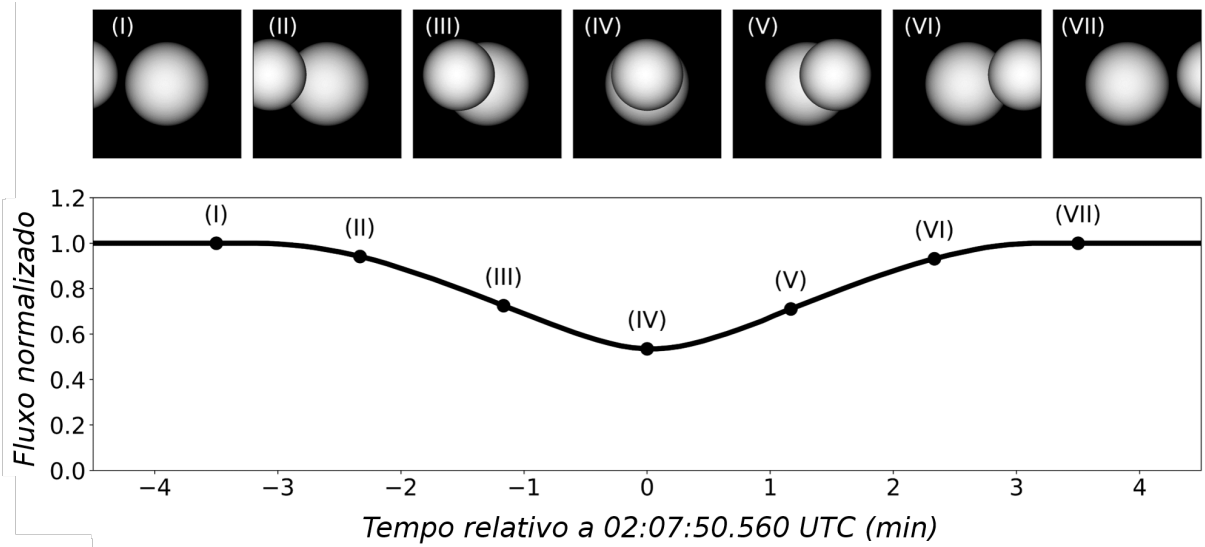


Figura 14 – Europa oculta Io em 22/02/2015 às 02:07 UTC como vista pelo OPD. Este modelo foi criado utilizando as efemérides *jup310* e a DE435. No gráfico inferior temos a curva de luz normalizada ao longo do evento, os pontos pretos demarcam os instantes (I), (II), (III), (IV), (V), (VI) e (VII). Os perfis de cada um destes pontos estão ilustrados na parte superior do gráfico. A razão de albedo entre Io e Europa para este evento foi igual a 0,960. A resolução utilizada foi de 1 *mas* ( $\sim 3,2$  km).

### 2.1.2.1 Perfil da sombra: umbra e penumbra

A geometria característica de um eclipse pode ser construída olhando a Figura 15.

Temos que os tamanhos dos segmentos  $\overline{C_0R_s}$ ,  $\overline{C_1R_1}$  e  $\overline{C_2R_2}$  são os raios do Sol ( $R_s$ ), do satélite eclipsante ( $R_1$ ) e do satélite eclipsado ( $R_2$ ) respectivamente. A linha tracejada representa a trajetória do satélite eclipsado conforme ele passa pela sombra do satélite eclipsante. Definimos então:

$$d_1 = \overline{C_0C_1} = |\vec{P}_{s1}|, \quad (2.31)$$

$$d_2 = \overline{C_0C_s} = |\vec{P}_{s2}| \cdot \cos \alpha, \quad (2.32)$$

onde

$$\cos \alpha = \frac{\vec{P}_{s1} \cdot \vec{P}_{s2}}{|\vec{P}_{s1}| \cdot |\vec{P}_{s2}|}. \quad (2.33)$$

O raio da penumbra ( $R_p$ ) pode ser calculado utilizando semelhança de triângulos entre  $R_sC_0P$  e  $R_pC_sP$ . Temos então que

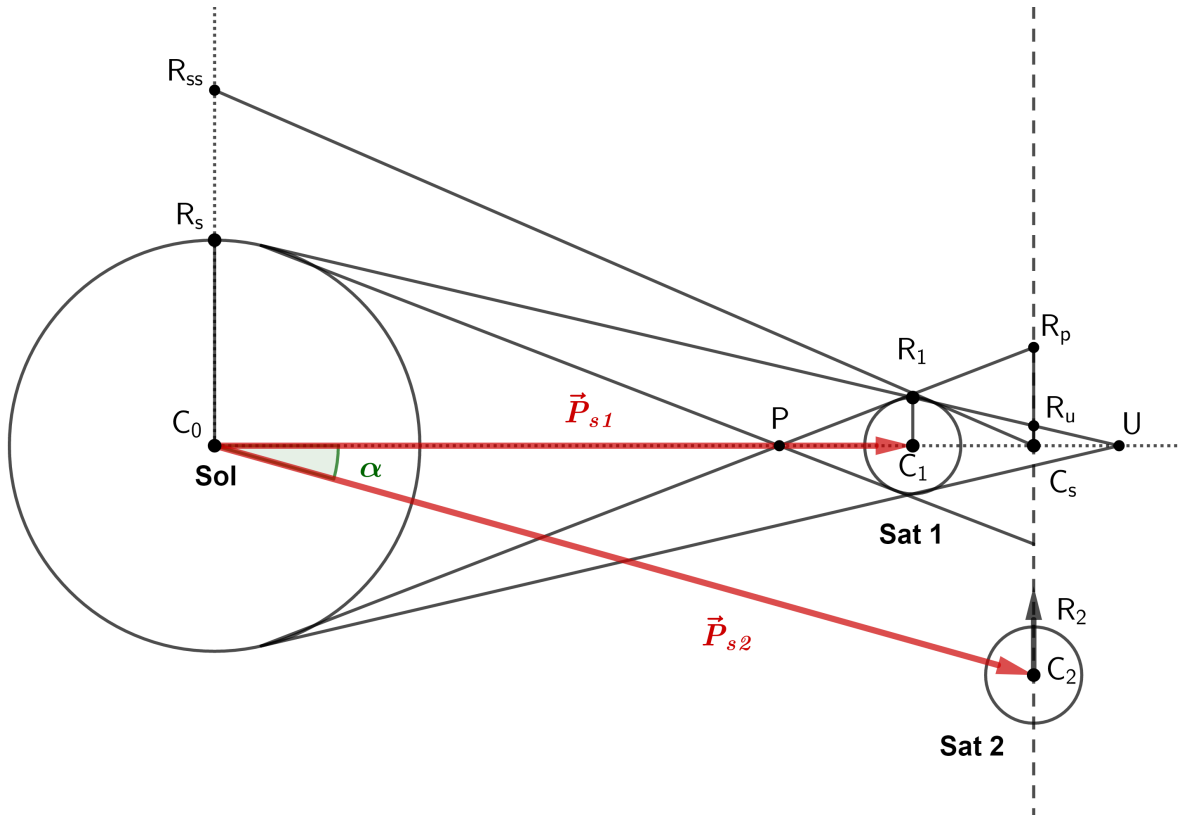


Figura 15 – Figura fora de escala para visualização.

$$d_p = \overline{C_0P} = \frac{R_s \cdot d_1}{(R_s + R_1)}, \quad (2.34)$$

$$R_p = \overline{C_sR_p} = \frac{R_s \cdot (d_2 - d_p)}{d_p}. \quad (2.35)$$

O raio da umbra ( $R_u$ ), por sua vez, pode ser calculado utilizando semelhança de triângulos entre  $R_sC_0U$  e  $R_uC_sU$ . Temos então que

$$d_u = \overline{C_0U} = \frac{R_s \cdot d_1}{(R_s - R_1)}, \quad (2.36)$$

$$R_u = \overline{C_sR_u} = \frac{R_s \cdot (d_u - d_2)}{d_u}. \quad (2.37)$$

Para um observador na superfície do satélite eclipsado, ele perceberá o tamanho da sombra do satélite eclipsante no plano do Sol com um tamanho  $R_{ss}$ . Este tamanho pode ser determinado através da semelhança dos triângulos  $R_{ss}C_0C_s$  e  $R_1C_1C_s$ . Temos que

$$R_{ss} = \overline{C_0R_{ss}} = \frac{R_1 \cdot d_2}{(d_2 - d_1)}. \quad (2.38)$$

Precisamos também calcular o ângulo  $\varpi$  que é o ângulo entre o plano do Sol e o plano do céu como visto para um observador na Terra e o ângulo  $i_2$  que é o ângulo de fase solar para o satélite eclipsado. Estes ângulos podem ser descritos por

$$\sin(\varpi) = \frac{|(\vec{P}_{s2} \times \vec{P}_2) \times (\vec{V}_r \times \vec{P}_2)|}{|(\vec{P}_{s2} \times \vec{P}_2)| \cdot |(\vec{V}_r \times \vec{P}_2)|}, \quad (2.39)$$

$$\sin(i_2) = \frac{|\vec{P}_1 \times \vec{P}_{s1}|}{|\vec{P}_1| \cdot |\vec{P}_{s1}|}. \quad (2.40)$$

O que nos resta é determinar a fração da luz do Sol que chegará para uma posição  $(x, z)$  de escolha no plano do céu. A distância entre esta posição e o centro da umbra no plano do Sol ( $R_{cp}$ ) pode ser calculada utilizando a Equação (2.41).

$$R_{cp} = \sqrt{x^2 [\cos^2 \varpi \cos^2(i_2) + \sin^2(\varpi)] + z^2 [\sin^2(\varpi) \cos^2(i_2) + \cos^2(\varpi)]}. \quad (2.41)$$

Por sua vez a distância entre o centro da sombra do satélite e o centro do Sol ( $d_{cs}$ ) pode ser calculado utilizando a Equação (2.42).

$$d_{cs} = \frac{R_{cp} \cdot d_2}{d_1 - d_2}. \quad (2.42)$$

A partir de  $d_{cs}$ ,  $R_{ss}$  e do raio do Sol ( $R_s$ ) podemos determinar a fração do Sol que estará visível para uma determinada região da penumbra ( $A_s$ ), Figura 16. Devemos então escolher entre duas abordagens, a primeira consiste em definirmos analiticamente a fração da área do Sol que um observador fictício naquela região da penumbra observaria, esta abordagem analítica está detalhada em (Assafin et al., 2009) e pode ser obtida utilizando a Figura 16 (a esquerda). A segunda abordagem é determinamos numericamente a fração do Sol que será observado. Neste projeto utilizaremos esta abordagem numérica uma vez que ela nos permite levar em consideração efeitos como o escurecimento de limbo do Sol, ver Figura 16 (a direita). Maiores detalhes sobre como o escurecimento de limbo foi modelado na Seção 2.1.2.2.

Uma vez que determinamos a fração do Sol ( $A_s$ ) visível para a região  $(x, z)$  de escolha podemos percorrer as diferentes regiões dentro da penumbra e obtemos o perfil da sombra no plano do céu. A Figura 17 mostra este perfil para o evento onde Ganímedes eclipsou Europa em 17 de março de 2015 às 02:53 UTC, como observado por FOZ, a resolução utilizada foi de 1 mas ( $\sim 3,3$  km).

### 2.1.2.2 Efeito de escurecimento de limbo do Sol

No lugar de considerarmos o Sol um disco de luminosidade uniforme precisamos considerar que o brilho de uma região do Sol depende da distância desta região ao centro

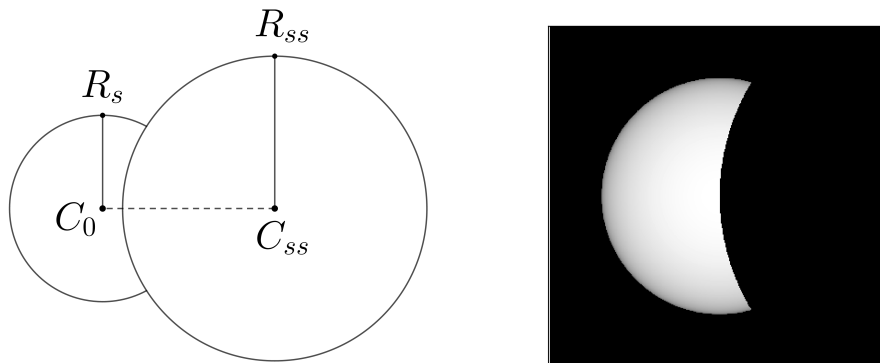


Figura 16 – Área do Sol que está sendo observada por uma região  $(x, z)$  da penumbra. A distância  $\overline{C_0 C_{ss}}$  é a distância  $d_{cs}$ . A esquerda temos o modelo e a direita temos a abordagem numérica.

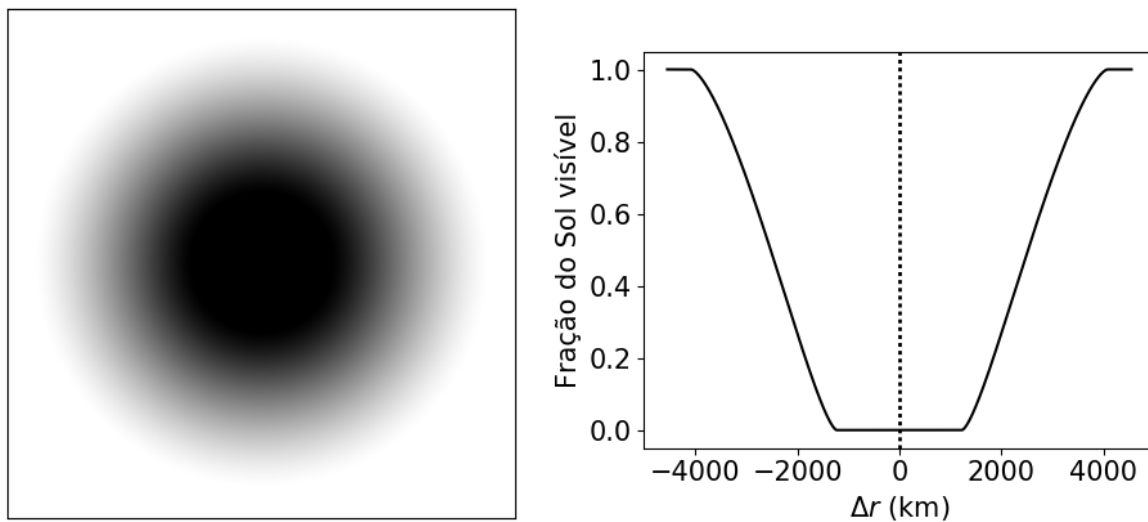


Figura 17 – Perfil 2D da sombra de Ganimedes para o dia 17/03/2015 às 02:53 UTC. A direita temos a fração da luz do Sol ao longo da linha central da imagem em quilômetros em relação ao centro da sombra. Note que o raio da umbra é igual a 1227,7 km e o raio da penumbra é igual a 4045,4 km. A resolução utilizada foi de 1 *mas* ( $\sim 3,3$  km).

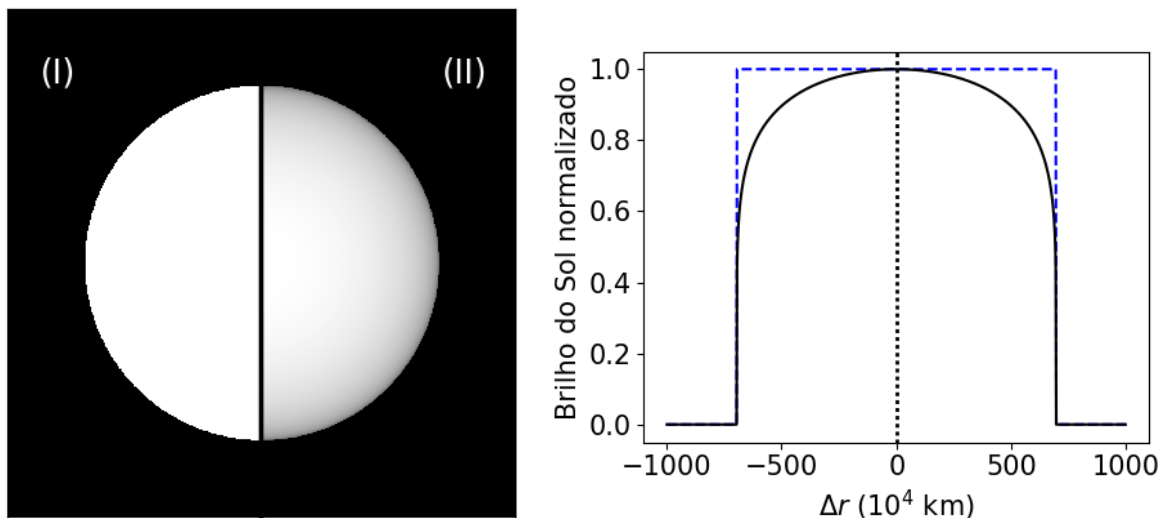


Figura 18 – Perfil 2D da luz do Sol considerando-o homogeneamente brilhante (I) e levando em conta o efeito de escurecimento de limbo (II). A esquerda temos a luminosidade normalizada ao longo da linha central, em azul tracejado o modelo do Sol homogeneamente brilhante e em preto contínuo o modelo que considera o escurecimento de limbo.

do Sol ( $F(r)$ ). E, além disso, está variação do brilho depende do comprimento de onda que as observações forem feitas (Hestroffer; Magnan, 1998). O modelo que utilizaremos para determinarmos essa variação do brilho está descrito na equação (2.43):

$$F(r) = \left( \sqrt{1 - \frac{r^2}{R_s^2}} \right)^\beta \quad (2.43)$$

Consideramos o valor de  $\beta$  igual 0,3 para um comprimento de onda de 889 nm (Hestroffer; Magnan, 1998). O perfil do Sol considerando o efeito de escurecimento de limbo está ilustrado na Figura 18 onde comparamos com o modelo do Sol homogêneo.

### 2.1.2.3 Curva de luz simulada de um eclipse

Para se determinar a curva de luz simulada de um eclipse utilizamos as posições heliocêntrica dos satélite no ICRS ( $\alpha, \delta$ ) para um instante determinado ( $t$ ) e de maneira similar as ocultações obtemos um  $\Delta x$  e um  $\Delta z$  utilizando as Equações (2.24), (2.25), (2.26), (2.27), (2.28) e (2.30). Em particular no lugar de sobrepormos os perfis como fizemos nas ocultações agora multiplicamos o perfil da sombra do satélite eclipsante com o perfil do satélite eclipsado. A integral do fluxo será igual a  $F(t)$ . Ao explorarmos diferentes instantes de tempo em torno do instante central montamos a curva de luz. Esta curva de luz é então normaliza para que fora do evento tenha valor igual a 1,0, isso quer dizer que normalizamos a curva pelo fluxo do satélite eclipsado ( $F_2$ ). A Figura 19 contém a curva de luz do evento entre Europa e Ganímedes que aconteceu em 12 de abril de 2015 às 01:46 UTC.



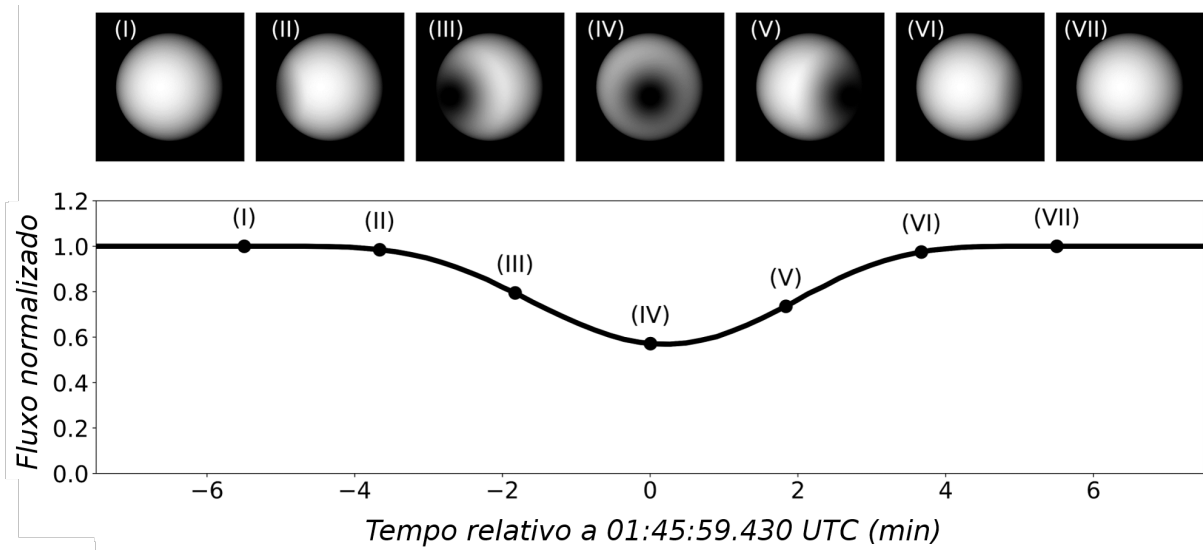


Figura 19 – Europa eclipsa Ganímedes em 12/04/2015 às 01:46 UTC como vista por FOZ. Este modelo foi criado utilizando as efemérides *jup310* e a DE435. No gráfico inferior temos a curva de luz normalizada ao longo do evento, os pontos pretos demarcam os instantes (I), (II), (III), (IV), (V), (VI) e (VII). Os perfis de cada um destes pontos estão ilustrados na parte superior do gráfico. A resolução utilizada foi de 1 *mas* ( $\sim 3,6$  km).

## 2.2 Observações

A campanha dos fenômenos mútuos de 2014-2015 iniciou em outubro de 2014 e foi até julho de 2015. As previsões dos eventos foram fornecidas pelo IMCCE<sup>7</sup> de onde selecionamos 109 eventos propícios para observações (63 ocultações e 46 eclipses). Os critérios para a seleção dos eventos foram: (i) altura de Júpiter no céu maior que  $10^\circ$ ; (ii) distância dos satélites a Júpiter maior que duas vezes o raio de Júpiter; e (iii) parâmetro de impacto do evento menor que 90% da soma dos raios dos satélites envolvidos.

Uma particularidade de nossa campanha observacional foi a utilização de um filtro de banda estreita centrado em 889 nm com 15 nm de largura, este filtro é conhecido como filtro metano e nessa região espectral específica o albedo de Júpiter alcança valores da ordem de 0,05 (Karkoschka, 1994; Karkoschka, 1998). Essa região espectral é ideal para a observação dos satélites galileanos, afetando pouco os satélites, porém diminuindo com eficiência a luz difusa de Júpiter.

A nossa participação nesta campanha contou com observações em três sítios. Eu fui o observador principal do Observatório Pico dos Dias em Brazópolis/MG (OPD), Daniel Iria Machado fez suas observações no Polo Astronômico Casimiro Montenegro Filho em Foz do Iguaçu/PR (FOZ) e Márcio Malacarne fez observações no Gaturamo Observatório Astronômico em Vitória/ES (GOA). Maiores informações sobre os sítios estão dispostas

<sup>7</sup> Website: <<http://nsdb.imcce.fr/multisat/nsszph515he.htm>>.

Tabela 3 – Lista de observadores da campanha dos fenômenos mútuos de 2014-2015.

Cidade/Estado Sigla	Longitude Latitude Altura	Observadores	Abertura CCD Filtro	Nº de detecções positivas
Brazópolis/MG OPD	45° 34' 57" O 22° 32' 07" S 1,864 km	B. Morgado H. S. Gaspar G. Benedetti-Rossi A. Dias-Oliveira R. Sfair T. Santana L. A. Boldrin B. C. B. Camargo M. E. Huaman A. R. Gomes-Júnior	60 cm IKon-L Metano	<b>20</b>
Foz do Iguaçu/PR FOZ	54° 35' 37" O 25° 26' 05" S 0,184 km	D. I. Machado L. L. Trabuco	28 cm ST-7X-ME Metano	<b>22</b>
Vitória/ES GOA	40° 19' 00" O 20° 17' 52" S 0,026 km	M. Malacarne J. O. Miranda	35 cm ST-8X-ME Metano	<b>5</b>

na Tabela 3 e um mapa contendo as localizações desses sítios está disposta no apêndice C. É importante ressaltar que não foi possível observar do OPD os eventos que aconteceram entre o final de dezembro de 2014 e o final de janeiro de 2015, devido às políticas de funcionamento do observatório. A Figura 20 contém um gráfico contendo o número de observações previstas e observadas ao longo dos meses.

Dos 109 eventos previstos 52 foram observados, o restante foi perdido devido fatores climáticos. De 40 eventos foi possível obter as curvas de luz com razão sinal sobre ruído (SNR) adequada para se observar a queda esperada. Obtivemos um total de 47 curvas de luz destes 40 eventos, 7 eventos foram observados simultaneamente por dois sítios.

## 2.3 Redução e análise

Inicialmente todas as imagens foram corrigidas de *Bias* e *Flat-Field* utilizando procedimentos padrões do *Image Reduction and Analysis Facility* (IRAF) (Butcher; Stevens, 1981). A correção de *Bias* serve para eliminar o ruído de leitura do CCD das imagens de ciência, ela é feita utilizando imagens com baixíssimo tempo de exposição (0,0001 segundos) e com o telescópio fechado. A correção de *Flat-Field* é utilizada para corrigir a diferença de sensibilidade do CCD ao longo do campo. Para esta correção fazemos imagens de um quadro branco iluminado homogeneamente por uma lâmpada.

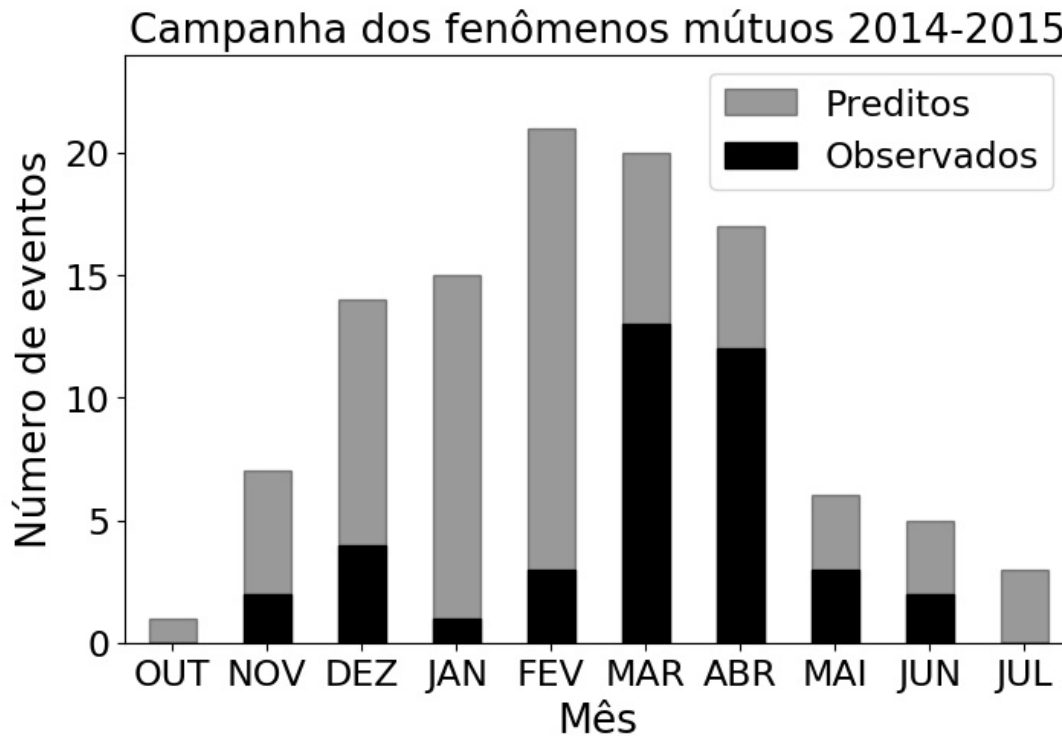


Figura 20 – Número de fenômenos mútuos observados ao longo dos meses, começando em outubro de 2014 até julho de 2015. Em cinza temos os 109 eventos selecionados para observação e em preto os 40 eventos observados.

Após estas calibrações fazemos a fotometria de abertura dos satélites alvos e calibradores nas imagens. No caso de uma ocultação os dois satélites (ocultante e ocultado) são medidos juntos utilizando a mesma abertura, no caso de um eclipse apenas o satélite eclipsado é medido. Em ambos os casos um terceiro satélite (ou Júpiter) é medido para calibrações fotométricas, ou, no caso de um eclipse, o satélite eclipsante pode ser utilizado como calibrador. A abertura utilizada para se medir o fluxo foi escolhida manualmente para se otimizar a razão sinal sobre ruído (SNR) das curvas de luz. Fizemos esta fotometria utilizando o pacote PRAIA<sup>8</sup> desenvolvido por Marcelo Assafin em colaboração com os membros deste grupo de pesquisa (Assafin et al., 2011). Ao fim desta etapa normalizamos o fluxo de luz fora do evento para 1,0 utilizando um polinômio de segundo grau para eliminar efeitos que não estejam relacionados com o fenômeno mútuo em questão.

A terceira etapa é o ajuste dos modelos descritos nas Seções 2.1.1 e 2.1.2 à curva de luz observada. A partir das efemérides, aplicamos correções em  $\delta t_0$ ,  $\delta s_0$  e  $\delta v_0$  e refazemos a curva de luz simulada ( $F_{mod}$ ) e a comparamos com a curva de luz observada ( $F_{obs}$ ) utilizando o método do qui-quadrado ( $\chi^2$ ), Equação (2.44), onde  $\sigma$  é o ruído da curva

<sup>8</sup> Platform for Reduction of Astronomical Images Automatically

medido fora do evento.

$$\chi^2 = \sum \frac{(F_{obs} - F_{mod})^2}{\sigma^2} \quad (2.44)$$

As correções calculadas que minimizam o qui-quadrado ( $\chi^2 = \chi_{min}^2$ ) são então selecionadas e aplicadas nas efemérides para determinarmos os parâmetros da observação. As incertezas de cada um dos parâmetros ( $\sigma t_0$ ,  $\sigma s_0$  e  $\sigma v_0$ ) são determinadas quando o valor de  $\chi^2$  alcança  $\chi_{min}^2 + 1$ . O qui-quadrado é então normalizado pelo número de pontos ajustados (N) subtraído do número de parâmetros ajustados ( $P = 3$ ). É esperado que um bom ajuste possua um valor de qui-quadrado normalizado próximo de 1,0.

Uma rotina PYTHON foi desenvolvida para fazer esta modelagem e ajuste. Esta rotina utiliza funcionalidades do ASTROPY ([Astropy Collaboration et al., 2013](#)), NUMPY, SCIPY e MATPLOTLIB.

### 2.3.1 Análise da campanha de 2009

Uma vez que apresentamos uma nova rotina para se ajustar os parâmetros de interesse de um fenômeno mútuo (ocultação ou eclipse) é necessário validarmos o nosso método aplicando-o aos dados já reduzidos das campanhas passadas. Para tal utilizaremos 25 eventos (13 ocultações e 12 eclipses) que foram obtidos por nosso grupo durante a campanha dos fenômenos mútuos de 2009. Maiores detalhes sobre estes eventos podem ser encontrados na dissertação de Mestrado de Alex Dias Oliveira e em seu artigo publicado em 2013 ([Dias-Oliveira, 2011](#); [Dias-Oliveira et al., 2013](#)).

Os resultados que obtivemos estão dispostos na Tabela 4. Nas três primeiras colunas apresentamos a data, o evento e quem foi o observador (utilizando o alias da tabela 3). Nas duas colunas seguintes disponibilizamos os nossos resultados para o instante central ( $t_0$ ), para o parâmetro de impacto ( $s_0$ ) e suas respectivas incertezas. Por fim, as três últimas colunas apresentam a média quadrática (RMS<sup>9</sup>) entre a curva observada e a curva ajustada, o que está relacionado com o ruído da curva, o número de pontos (N) utilizados no ajuste e o qui-quadrado mínimo normalizado ( $\chi_{min}^2$ ) obtido por nosso modelo. Os eventos estão dispostos em ordem cronológica. As curvas de luz destes eventos estão disponíveis no Apêndice D.

Além da análise feita por Alex Dias Oliveira e colaboradores, estas curvas de luz também foram analisadas por J.-E. Arlot e colaboradores ([Arlot et al., 2014](#)). Cada um utilizou o seu próprio método de redução e análise. Entretanto, os resultados obtidos por estes dois autores apresentam discrepâncias (como pode ser visto na Tabela 5. No artigo apresentando a técnica das aproximações mútuas<sup>10</sup> ([Morgado et al., 2016](#)) analisamos cinco

<sup>9</sup> Do inglês: *Root Mean Square*

<sup>10</sup> Maiores detalhes no Capítulo 3

Tabela 4 – Resultados dos 25 eventos observados em 2009.

Data (a-m-d)	Evento ( $S_1 \times S_2$ )	Obs.	$t_0$ (UTC) (hh:mm:ss,s $\pm$ s,s)	$s_0$ ( <i>mas</i> )	rms	N	$\chi^2_{min}$
2009-04-27	503o501	OPD	06:42:53,5 $\pm$ 0,6	121,0 $\pm$ 20,0	0,010	0801	1,005
2009-05-09	502o501	OPD	07:21:54,9 $\pm$ 0,7	538,0 $\pm$ 14,3	0,010	0580	1,007
2009-05-21	501o502	OPD	05:29:44,3 $\pm$ 0,7	033,6 $\pm$ 21,1	0,014	0869	1,005
2009-05-28	501o502	OPD	07:44:17,6 $\pm$ 0,4	219,1 $\pm$ 17,5	0,007	0801	1,005
2009-06-10	503e504	OPD	07:29:37,4 $\pm$ 1,2	315,0 $\pm$ 17,9	0,009	1285	1,003
2009-06-16	503e501	OPD	08:45:10,5 $\pm$ 1,2	928,4 $\pm$ 13,3	0,008	2697	1,001
2009-06-19	504e502	OPD	05:11:36,3 $\pm$ 0,2	489,1 $\pm$ 13,1	0,007	0901	1,004
2009-06-19	504e501	OPD	08:32:49,4 $\pm$ 1,0	930,1 $\pm$ 13,5	0,006	1201	1,003
2009-06-20	504e501	OPD	05:09:45,8 $\pm$ 1,3	530,5 $\pm$ 12,8	0,006	2326	1,002
2009-06-20	504e501	OPD	09:37:28,5 $\pm$ 1,3	412,3 $\pm$ 18,5	0,013	1704	1,002
2009-06-22	501o502	OPD	03:27:54,8 $\pm$ 1,6	576,1 $\pm$ 14,0	0,010	0905	1,004
2009-06-29	501o502	OPD	05:38:28,7 $\pm$ 0,8	606,4 $\pm$ 13,3	0,004	0801	1,005
2009-07-04	501e503	OPD	06:25:13,5 $\pm$ 0,5	395,5 $\pm$ 16,3	0,008	1641	1,002
2009-07-06	501e502	OPD	06:17:16,1 $\pm$ 1,8	718,5 $\pm$ 14,2	0,006	2001	1,002
2009-07-06	501o502	OPD	07:48:34,5 $\pm$ 0,5	603,5 $\pm$ 12,9	0,005	1004	1,004
2009-07-08	503e501	OPD	08:31:14,5 $\pm$ 0,2	223,9 $\pm$ 14,7	0,007	1758	1,002
2009-07-13	501e502	OPD	08:38:46,3 $\pm$ 1,7	623,4 $\pm$ 15,3	0,012	2001	1,002
2009-08-07	501e502	OPD	05:14:54,9 $\pm$ 1,3	444,6 $\pm$ 15,1	0,021	1775	1,002
2009-08-07	501o502	OPD	05:37:48,4 $\pm$ 0,8	283,1 $\pm$ 20,3	0,008	1664	1,002
2009-08-12	503o502	OPD	02:10:59,1 $\pm$ 3,9	1059,1 $\pm$ 13,1	0,004	1296	1,003
2009-08-22	501o502	OPD	04:07:54,9 $\pm$ 2,2	674,5 $\pm$ 12,9	0,004	2454	1,002
2009-09-16	501o502	OPD	00:46:04,4 $\pm$ 0,7	580,4 $\pm$ 15,0	0,011	0976	1,004
2009-09-16	501e502	OPD	02:15:11,0 $\pm$ 0,4	172,4 $\pm$ 12,9	0,007	1095	1,004
2009-10-24	503o502	OPD	00:35:33,9 $\pm$ 1,5	629,1 $\pm$ 13,6	0,008	1032	1,004
2009-10-25	501o502	OPD	01:21:30,8 $\pm$ 3,9	580,6 $\pm$ 17,5	0,014	0252	1,016

aproximações que culminaram em ocultações dentro destes eventos de 2009, os resultados obtidos pela técnica das aproximações mútuas concordaram em  $1\sigma$  com os resultados de Arlot et al. (2014) e em  $3\sigma$  com os resultados de Dias-Oliveira et al. (2013).

É interessante então compararmos os resultados obtidos neste trabalho com aqueles obtidos por Dias-Oliveira et al. (2013) e Arlot et al. (2014), é importante enfatizar que cada autor desenvolveu o seu próprio método de redução. Esta comparação segue na Tabela 5, onde disponibilizamos a diferença entre os resultados atualizados obtidos aqui e cada um dos trabalhos mencionado acima. Estas diferenças estão normalizadas pela incerteza das medidas de cada evento, para uma boa concordância entre os dados esperamos que a diferença esteja entre -1,0 e 1,0. Ao fim desta tabela informamos o valor médio e o desvio padrão. Note que para a comparação entre nossos resultados e Arlot et al., (2014) temos um desvio padrão menor que  $1\sigma$  e comparando com Dias-Oliveira et al. (2013) o desvio

Tabela 5 – Comparação entre os resultados atualizados da campanha dos fenômenos mútuos de 2009 [1] e os resultados em [2] (Arlot et al., 2014) e em [3] (Dias-Oliveira et al., 2013).

Data aaaa-mm-dd	Evento $S_1 \times S_2$	Obs.	Instante central ( $t_0$ )		Parâmetro de impacto ( $s_0$ )	
			[2] - [1]	[3] - [1]	[2] - [1]	[3] - [1]
2009-04-27	3o1	OPD	-0,65	-7,15	+0,15	-0,74
2009-05-09	2o1	OPD	+0,78	-2,34	+0,23	+0,97
2009-05-21	1o2	OPD	+0,28	-4,94	+3,30	+1,05
2009-05-28	1o2	OPD	+0,98	-9,24	-0,00	-2,36
2009-06-10	3e4	OPD	+0,13	+1,54	+0,13	+1,56
2009-06-16	3e1	OPD	+0,99	-1,99	-0,12	+8,81
2009-06-19	4e2	OPD	-1,87	+0,99	+0,03	+4,45
2009-06-19	4e1	OPD	-0,83	+0,62	+0,04	+8,26
2009-06-20	4e1	OPD	-0,70	+1,14	+0,08	-4,27
2009-06-20	4e1	OPD	-0,03	-2,85	-0,13	+9,77
2009-06-22	1o2	OPD	+0,27	-2,18	+0,16	-0,79
2009-06-29	1o2	OPD	+0,31	-5,30	+0,07	-0,86
2009-07-04	1e3	OPD	-0,03	+1,17	-0,26	+4,57
2009-07-06	1o2	OPD	-0,13	+0,25	+0,14	+5,74
2009-07-06	1e2	OPD	+0,50	-4,89	+0,09	-0,01
2009-07-08	3e1	OPD	-0,61	+1,33	-0,04	+1,84
2009-07-13	1e2	OPD	-0,31	+0,22	+0,18	+8,36
2009-08-07	1o2	OPD	-0,22	+0,29	+0,32	+7,38
2009-08-07	1e2	OPD	-0,34	-1,71	-0,09	-0,17
2009-08-12	3o2	OPD	+0,83	+0,60	-0,12	+0,50
2009-08-22	1o2	OPD	+0,31	+0,29	+0,07	-0,99
2009-09-16	1e2	OPD	-0,64	+3,52	-0,23	-1,43
2009-09-16	1o2	OPD	+0,51	-0,43	-0,22	+1,02
2009-10-24	3o2	OPD	-0,25	+14,15	-0,26	+2,78
2009-10-25	1o2	OPD	+0,62	+1,56	+0,23	-0,98
Média			-0,00	-0,61	+0,15	+2,18
Desvio Padrão			0,67	4,34	0,68	3,91

padrão é da ordem de  $4\sigma$ .

Os resultados obtidos pelo nosso método para estes 25 eventos concordam em  $1\sigma$  com os resultados obtidos por Arlot et al. (2014), salvo o evento onde Io ocultou Europa no dia 28 de maio de 2009. Entretanto, para este evento Arlot et al. (2014) encontraram um *offset* de 100 *mas*, o que sugere algum problema na redução destes autores.

Nossos resultados apresentam uma incerteza média de 4,9 *mas* ( $\sim 15$  km) para o instante central e 15,3 *mas* ( $\sim 46$  km) para o parâmetro de impacto.

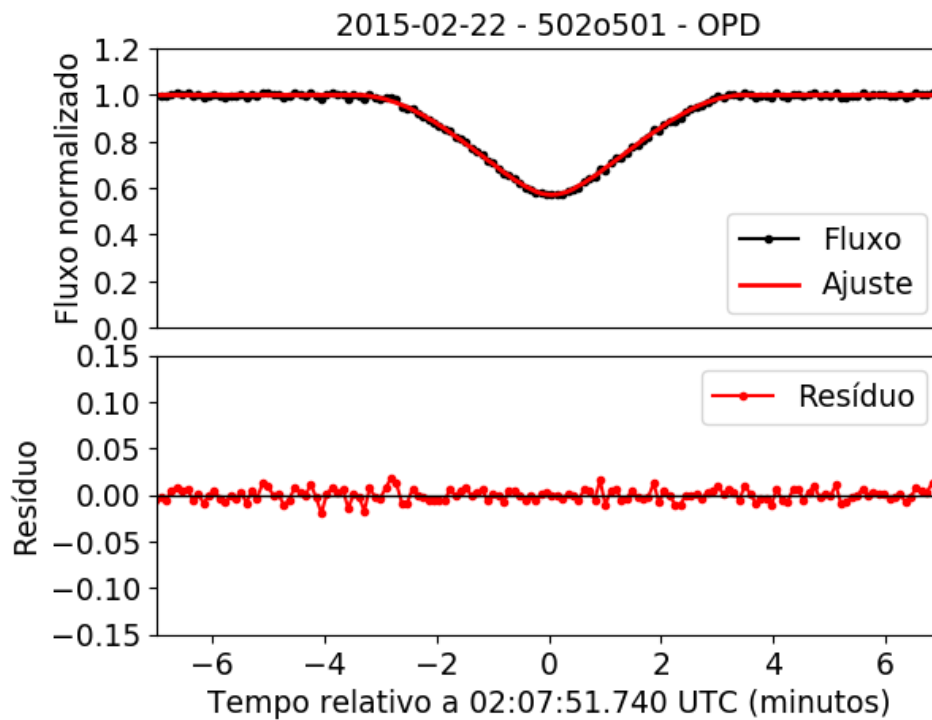


Figura 21 – Europa oculta Io em 22 de fevereiro de 2015 observado pelo OPD, no gráfico superior temos a curva de luz observada (em preto) e a ajustada (em vermelho). No gráfico inferior temos o resíduo no sentido observação menos ajuste.

## 2.4 Resultados

Nesta seção apresentamos os resultados da campanha dos fenômenos mútuos de 2014-2015 e o resultado obtido para o eclipse envolvendo Amalteia que observamos no telescópio de 1,60 metros do OPD.

### 2.4.1 Campanha de de 2014-2015

A campanha dos fenômenos mútuos de 2014 e 2015 contou com a participação de três observatórios espalhados pela região Sul e Sudeste do Brasil e obtivemos um total de 47 curvas de luz. Como exemplo selecionamos a curva de luz do evento onde Europa ocultou Io em 22 de fevereiro de 2015 às 02:07 UTC e o evento onde Europa eclipsou Ganímedes em 12 de abril de 2015 às 01:45 UTC, as curvas destes eventos estão disponibilizadas nas Figuras 21 e 22. Nos gráficos superiores destas figuras temos as curvas de luz observadas (em preto) e as curvas de luz ajustadas (em vermelho), no gráfico inferior temos os resíduos no sentido observação menos ajuste. Estes eventos exemplos estão realçados em cinza claro nas Tabelas 6 e 7.

Uma característica interessante desta campanha foi a redundância de observações, para 7 ocultações tivemos observações simultâneas por diferentes sítios. Um exemplo que ilustra essa característica foi o evento onde Ganímedes ocultou Io em 29 de abril de 2015

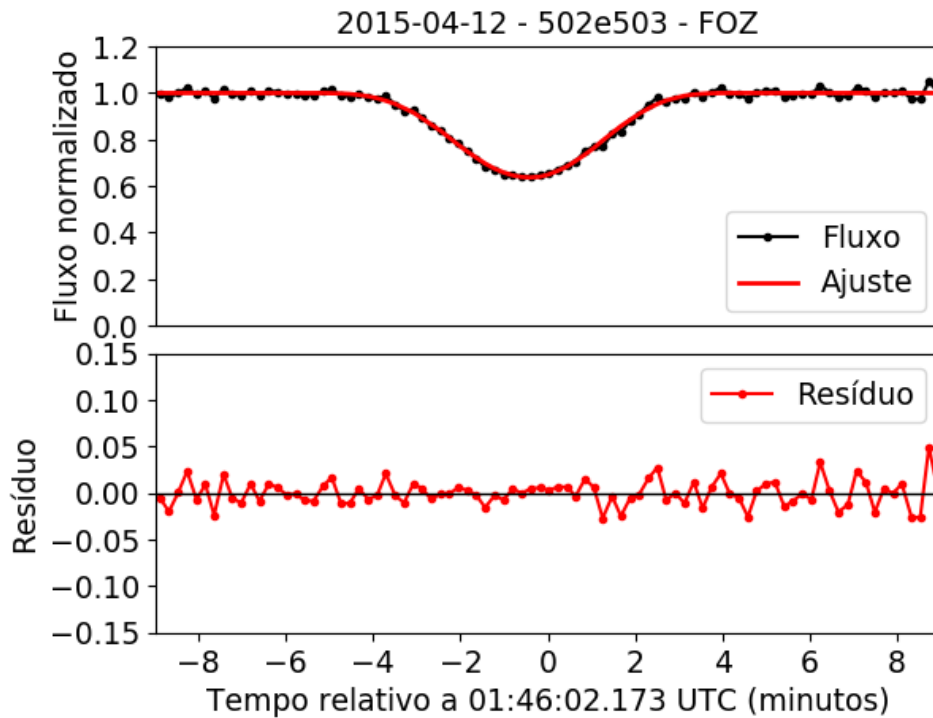


Figura 22 – Europa eclipsa Ganímedes em 12 de abril de 2015 observado por FOZ.

às 00:29 UTC que foi observado pelo OPD e pelo GOA. As curvas de luz destes eventos estão dispostas nas Figuras 23 e 24. A diferença entre os resultados deste evento foi de 5,2 *mas* para o instante central e de 2,3 *mas* para o parâmetro de impacto. Estes eventos também estão realçados em cinza claro nas Tabelas 6 e 7.

A Tabela 6 contém os resultados obtidos por nossa análise para estes eventos. Nas três primeiras colunas desta tabela disponibilizamos a data, o evento e quem foi o observador. As duas colunas seguintes apresentam os nossos resultados para o instante central ( $t_0$ ), para o parâmetro de impacto ( $s_0$ ) e suas respectivas incertezas. Por fim, as três últimas colunas apresentam o valor efetivo (RMS) entre a curva observada e a curva ajustada, o número de pontos (N) utilizados no ajuste e o qui-quadrado mínimo normalizado ( $\chi_{min}^2$ ) obtido por nosso modelo. Os eventos estão dispostos em ordem cronológica. Uma seleção de curvas de luz destes eventos estão disponíveis no Apêndice D.

Na Tabela 7 apresentamos a comparação entre os resultados obtidos aqui e as efemérides do JPL [1] e as efemérides do IMCCE [2], para o instante central e para o parâmetro de impacto, ambos em *mas*. As incertezas dos instantes centrais foram convertidas para *mas* utilizando a velocidade relativa dos eventos.

A incerteza média obtida foi de 7,6 *mas* ( $\sim 23$  km) para os instantes centrais e 14,8 *mas* ( $\sim 44$  km) para os parâmetros de impacto. A incerteza do instante central é transformada de segundos de tempo para segundos de arco utilizando a velocidade relativa de cada evento. A média quadrática (RMS) em relação as efemérides do JPL foi de 10,0



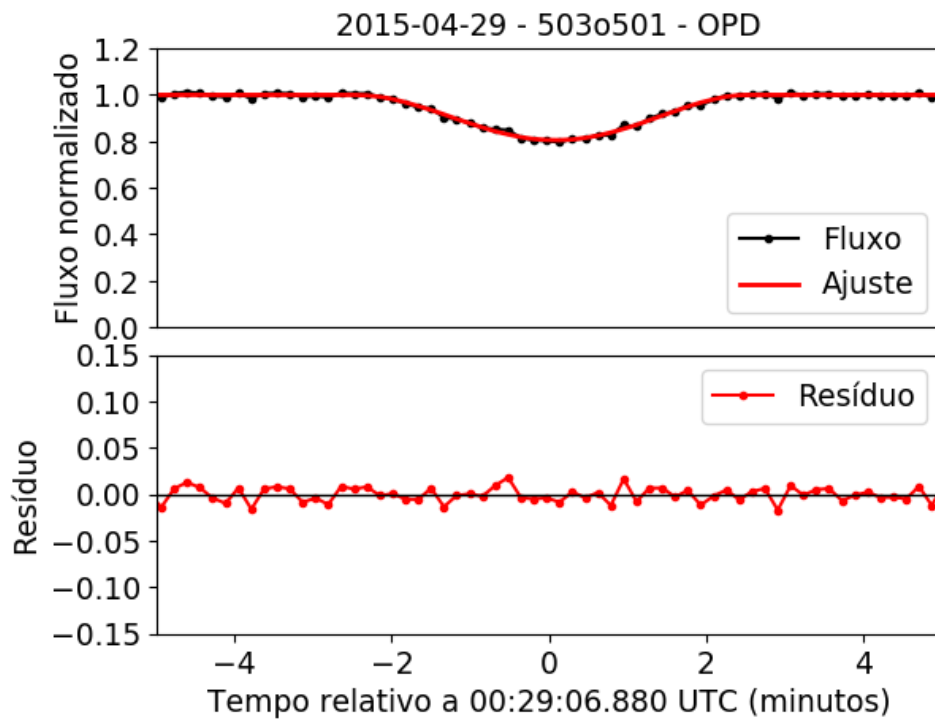


Figura 23 – Ganímedes oculta Io em 29 de abril de 2015 observado pelo OPD.

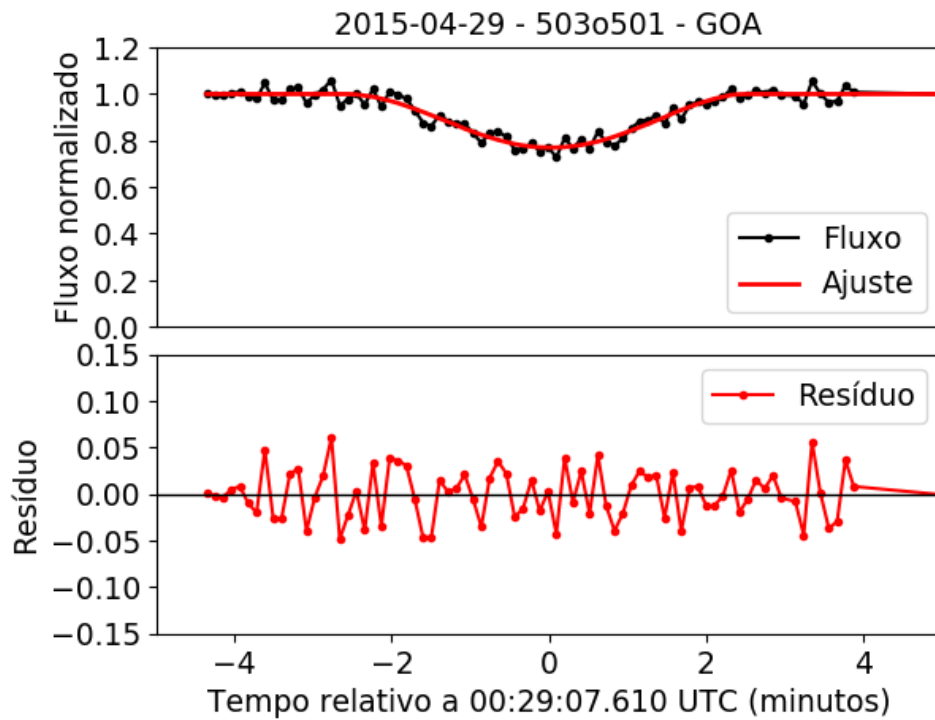


Figura 24 – Ganímedes oculta Io em 29 de abril de 2015 observado pelo GOA.

Tabela 6 – Resultados dos 40 eventos observados em 2014-2015.

Data (a-m-d)	Evento ( $S_1 \times S_2$ )	Obs.	$t_0$ (UTC) (hh:mm:ss,s $\pm$ s,s)	$s_0$ (mas)	rms	N	$\chi^2_{min}$
2014-11-02	504o501	OPD	06:02:14,8 $\pm$ 1,9	288,0 $\pm$ 18,6	0,041	0230	1,018
2014-11-19	504o502	OPD	07:37:43,9 $\pm$ 0,2	301,3 $\pm$ 06,0	0,010	0194	1,021
2014-12-20	502o501	FOZ	05:41:38,7 $\pm$ 0,1	162,4 $\pm$ 08,5	0,008	0376	1,011
2014-12-21	504e501	FOZ	03:22:39,2 $\pm$ 1,5	253,3 $\pm$ 09,0	0,018	0281	1,014
2014-12-21	503o501	FOZ	04:17:20,7 $\pm$ 3,2	455,1 $\pm$ 16,1	0,151	0244	1,017
2014-12-24	502e503	FOZ	06:35:06,5 $\pm$ 1,1	255,2 $\pm$ 08,8	0,014	0359	1,011
2015-01-21	502e501	FOZ	03:52:29,3 $\pm$ 1,0	457,5 $\pm$ 03,8	0,008	0141	1,029
2015-02-02	503o502	FOZ	07:56:42,3 $\pm$ 1,9	85,0 $\pm$ 27,4	0,022	0110	1,038
2015-02-22	502o501	OPD	02:07:51,7 $\pm$ 0,2	125,0 $\pm$ 12,9	0,007	0201	1,020
2015-02-22	502e501	OPD	02:45:11,0 $\pm$ 0,3	17,0 $\pm$ 09,6	0,013	0186	1,022
2015-03-01	502o501	FOZ	04:12:38,3 $\pm$ 0,7	17,6 $\pm$ 10,5	0,012	0131	1,031
2015-03-01	502e501	FOZ	05:05:06,7 $\pm$ 2,4	94,6 $\pm$ 33,3	0,059	0132	1,031
2015-03-03	503o501	OPD	04:08:16,3 $\pm$ 0,5	95,0 $\pm$ 14,4	0,010	0100	1,042
		FOZ	04:08:15,5 $\pm$ 0,6	86,8 $\pm$ 10,8	0,010	0107	1,039
2015-03-06	501e502	OPD	01:16:16,6 $\pm$ 0,4	570,9 $\pm$ 04,0	0,005	0124	1,033
2015-03-09	503e502	OPD	23:39:32,6 $\pm$ 0,3	67,7 $\pm$ 07,2	0,012	0213	1,019
2015-03-13	501e503	FOZ	23:29:44,5 $\pm$ 1,3	236,3 $\pm$ 04,4	0,015	0408	1,010
2015-03-13	501e502	FOZ	03:29:09,9 $\pm$ 1,1	445,2 $\pm$ 20,0	0,020	0198	1,021
2015-03-16	504o502	FOZ	01:38:58,2 $\pm$ 0,3	373,0 $\pm$ 06,3	0,013	0246	1,017
2015-03-17	503e502	FOZ	02:53:15,2 $\pm$ 0,2	225,4 $\pm$ 14,4	0,012	0234	1,017
2015-03-18	502e501	GOA	22:50:43,6 $\pm$ 1,9	398,2 $\pm$ 25,2	0,058	0288	1,014
2015-03-24	503o504	OPD	00:14:41,4 $\pm$ 0,9	499,0 $\pm$ 13,9	0,006	0182	1,022
		FOZ	00:14:41,6 $\pm$ 0,8	519,1 $\pm$ 09,9	0,008	0207	1,020
2015-03-25	502o501	FOZ	23:35:01,3 $\pm$ 0,7	398,9 $\pm$ 06,6	0,006	0092	1,045
		GOA	23:35:01,6 $\pm$ 1,1	400,2 $\pm$ 13,2	0,011	0083	1,051
2015-03-26	502e501	OPD	01:07:48,0 $\pm$ 5,3	516,7 $\pm$ 44,7	0,048	0151	1,027
2015-04-02	502o501	OPD	01:43:55,9 $\pm$ 0,7	479,5 $\pm$ 05,7	0,005	0082	1,051
		FOZ	01:43:55,6 $\pm$ 1,3	482,3 $\pm$ 15,0	0,011	0104	1,040
2015-04-02	502e501	OPD	03:24:16,8 $\pm$ 3,1	658,7 $\pm$ 19,1	0,018	0129	1,032
2015-04-03	501o503	FOZ	22:58:19,0 $\pm$ 5,9	737,3 $\pm$ 06,0	0,021	0383	1,011
2015-04-06	501e502	FOZ	23:16:40,4 $\pm$ 0,2	54,2 $\pm$ 10,8	0,007	0152	1,027
2015-04-12	502e503	FOZ	01:46:02,2 $\pm$ 1,0	142,6 $\pm$ 08,3	0,013	0121	1,034
2015-04-14	501e502	OPD	01:30:58,3 $\pm$ 0,4	49,4 $\pm$ 08,5	0,024	0093	1,045
2015-04-17	504o501	OPD	23:47:06,9 $\pm$ 0,9	711,5 $\pm$ 04,5	0,007	0101	1,041
		GOA	23:47:06,9 $\pm$ 0,9	712,1 $\pm$ 05,1	0,010	0128	1,032
2015-04-18	501o503	OPD	20:54:45,7 $\pm$ 3,7	699,4 $\pm$ 33,0	0,047	0119	1,035
2015-04-18	504o503	OPD	01:32:30,4 $\pm$ 0,9	69,5 $\pm$ 15,1	0,021	0161	1,025
2015-04-25	501o503	OPD	23:45:28,1 $\pm$ 1,3	679,2 $\pm$ 07,5	0,007	0100	1,042
		FOZ	23:45:26,7 $\pm$ 3,3	685,0 $\pm$ 28,8	0,014	0133	1,031
2015-04-26	502o501	OPD	21:25:00,0 $\pm$ 3,4	584,6 $\pm$ 27,6	0,029	0064	1,067
2015-04-29	503o501	OPD	00:29:06,9 $\pm$ 1,2	661,3 $\pm$ 19,2	0,009	0087	1,048
		GOA	00:29:07,6 $\pm$ 2,5	663,8 $\pm$ 22,2	0,026	0095	1,044
2015-05-03	502o501	OPD	23:39:19,6 $\pm$ 2,2	571,1 $\pm$ 25,6	0,033	0063	1,068
2015-05-05	503o502	FOZ	21:54:22,0 $\pm$ 2,4	780,5 $\pm$ 21,9	0,010	0117	1,035
2015-05-13	503o502	OPD	01:13:50,0 $\pm$ 3,0	593,2 $\pm$ 27,1	0,038	0137	1,030
2015-06-04	502o501	FOZ	21:55:27,9 $\pm$ 0,2	160,8 $\pm$ 06,3	0,009	0094	1,044
2015-06-18	503o501	GOA	21:01:51,1 $\pm$ 1,1	237,6 $\pm$ 18,6	0,017	0215	1,019

Tabela 7 – Comparação dos 40 eventos observados em 2014-15.

Data	Evento	Obs.	Instante central ( $t_0$ )		Parâmetro de impacto ( $s_0$ )	
			[1] ( <i>mas</i> )	[2] ( <i>mas</i> )	[1] ( <i>mas</i> )	[2] ( <i>mas</i> )
2014-11-02	504o501	OPD	-07,2	+27,0	-05,0	-01,9
2014-11-19	504o502	OPD	+00,7	-14,3	+00,2	+04,3
2014-12-20	502o501	FOZ	-03,0	+01,2	-17,5	-13,7
2014-12-21	504e501	FOZ	+00,1	-19,2	+26,2	-00,6
2014-12-21	503o501	FOZ	-00,8	-05,2	+14,0	+09,4
2014-12-24	502e503	FOZ	-00,8	-22,5	+09,5	+00,1
2015-01-21	502e501	FOZ	+00,8	+00,3	+12,8	+12,8
2015-02-02	503o502	FOZ	-02,3	+06,6	+08,0	-05,6
2015-02-22	502o501	OPD	+06,5	-02,0	-00,8	-15,9
2015-02-22	502e501	OPD	+04,1	-01,5	+07,5	+13,0
2015-03-01	502o501	FOZ	-00,7	-02,5	+16,8	+13,7
2015-03-01	502e501	FOZ	+06,6	-01,9	-06,8	-13,0
2015-03-03	503o501	OPD	+00,3	-05,3	+32,3	-00,2
		FOZ	-07,0	-05,2	+23,7	-00,1
2015-03-06	501e502	OPD	+09,4	+10,8	+06,2	+05,8
2015-03-09	503e502	OPD	+08,1	+01,3	+02,6	+04,7
2015-03-13	501e503	FOZ	+04,0	+19,8	+08,5	-02,7
2015-03-13	501e502	FOZ	+10,8	+10,2	+03,7	+05,5
2015-03-16	504o502	FOZ	-00,5	-21,1	+02,0	-01,9
2015-03-17	503e502	FOZ	+08,2	+00,2	-03,1	-04,7
2015-03-18	502e501	GOA	+06,1	-02,9	-02,7	-12,7
2015-03-24	503o504	OPD	-38,1	-14,0	-16,0	+03,5
		FOZ	-37,5	-14,0	+03,5	+03,5
2015-03-25	502o501	FOZ	-01,5	-04,1	+00,7	+14,8
		GOA	+00,8	-04,1	+01,7	+14,8
2015-03-26	502e501	OPD	+10,3	-03,3	-12,2	-12,6
2015-04-02	502o501	FOZ	-02,3	-04,5	+02,5	+14,4
		OPD	+00,0	-04,5	-00,5	+14,4
2015-04-02	502e501	OPD	+07,8	-03,7	-02,1	-12,5
2015-04-03	501o503	FOZ	+05,7	+26,4	-05,5	-08,2
2015-04-06	501e502	FOZ	+11,3	+07,8	+04,2	+04,0
2015-04-12	502e503	FOZ	+13,6	-21,5	+09,6	+02,6
2015-04-14	501e502	OPD	+10,4	+07,2	-01,5	-03,9
2015-04-17	504o501	OPD	-01,3	-19,8	+01,8	-06,4
		GOA	-01,0	-19,8	+02,7	-06,4
2015-04-18	501o503	OPD	-02,0	-14,7	+03,3	+02,4
2015-04-18	504o503	OPD	-02,3	-45,5	+06,8	-03,2
2015-04-25	501o503	OPD	+00,5	-13,7	-02,3	+02,0
		FOZ	-08,0	-13,5	+03,8	+02,0
2015-04-26	502o501	OPD	+01,8	-05,4	+00,5	+13,0
2015-04-29	503o501	OPD	-15,6	+00,4	-04,0	-05,0
		GOA	-10,5	+00,4	-01,7	-05,0
2015-05-03	502o501	OPD	-08,1	-05,3	+11,5	+12,6
2015-05-05	503o502	FOZ	+00,3	-05,1	-01,7	+04,1
2015-05-13	503o502	OPD	+06,5	-05,7	+03,5	+03,9
2015-06-04	502o501	FOZ	-01,8	-05,2	-06,8	+10,5
2015-06-18	503o501	GOA	+01,0	-05,4	+10,7	-02,9

*mas* ( $\sim 30$  km) e em relação as efemérides do IMCCE foi de  $12,8$  *mas* ( $\sim 38$  km). Para os sete eventos redundantes tivemos concordância em  $1\sigma$  entre os parâmetros obtidos.

### 2.4.2 Eclipse de Amalteia (J5)

Júpiter possui quatro satélites internos à órbita de Io, estes satélites são: Metis (J16), Adrastea (J15), Amalteia (J5), Tebe (J14)<sup>11</sup>. Amalteia é o maior e o mais brilhante destes satélites, possuindo tamanhos iguais a  $125 \times 73 \times 64$  quilômetros e uma magnitude visual média de 14,5.

As dificuldades para se fazer a astrometria destes satélites internos são ainda maiores, devido a sua proximidade à Júpiter (o semi-eixo maior de Amalteia é igual a 2,54 raios de Júpiter). Técnicas de coronagrafia são muitas vezes necessárias para que estes satélites possam ser observados (Kulyk et al., 2002; Veiga; Vieira Martins, 2005). Estes autores obtiveram posições dos satélites internos com uma precisão entre 100-900 *mas*. Mais recentemente (Robert et al., 2017) obteve posições de Amalteia e Tebe com precisões melhores que 120 *mas*, estes autores também utilizaram uma máscara para impedir que a luz de Júpiter saturasse o detector.

Os fenômenos mútuos têm sido sistematicamente observados desde a campanha de 1973 (Arlot; Camichel; Link, 1974; Aksnes; Franklin, 1976). Para a campanha de 1979 também foram publicadas as previsões de fenômenos mútuos envolvendo os satélites internos (Aksnes; Franklin, 1978). Estes eventos podem auxiliar de maneira significativa o conhecimento das órbitas destes satélites (Vachier; Arlot; Thuillot, 2002). Os primeiros eventos envolvendo Amalteia foram observados somente durante a campanha de 2009 e a precisão obtida variou de 50 a 100 *mas* (Christou et al., 2010). Durante a campanha de 2014-2015 outros três eventos envolvendo Amalteia e o primeiro evento envolvendo Tebe foram observados, a precisão desses resultados foram entre 40 e 60 *mas* (Saquet et al., 2016).

Ainda que fazer a astrometria desses satélites não seja o escopo deste projeto, em 2014<sup>12</sup> fizemos um pedido de tempo ao telescópio de 1,60 metros (Perkin-Elmer) do Observatório Pico dos Dias para a observação de quatro eventos mútuos envolvendo satélites internos. Os eventos foram: Ganímedes eclipsa Amalteia (02/03/2015), Io eclipsa Amalteia (12 e 19/03/2015) e Europa eclipsa Tebe (01/04/2015). Fui o observador principal destas missões.

Devido a fatores climáticos apenas um desses eventos foi observado (Ganímedes eclipsa Amalteia - 02-03-2015). A câmera utilizada foi a Ikon-L junto com o filtro Metano para diminuir a luz difusa de Júpiter. A duração do evento prevista era de 3,8 minutos, o

<sup>11</sup> Ordenado por distância à Júpiter, da menor para a maior.

<sup>12</sup> Durante o meu Mestrado no Observatório do Valongo

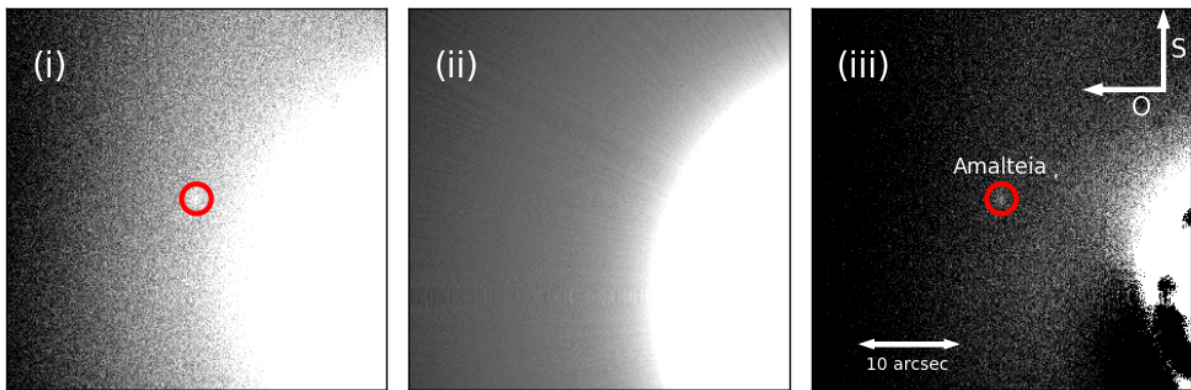


Figura 25 – Imagem de Amalteia e utilização da coronagrafia digital. (i) Imagem tratada de *bias* e *flat-field*; (ii) Imagem com apenas o brilho de Júpiter; e (iii) Imagem após aplicação da coronagrafia digital. As três imagens possuem a mesma escala e orientação, como descrito na imagem (iii). As três imagens também possuem a mesma escala de cor e a circunferência vermelha chama a atenção para a posição de Amalteia na imagem.

tempo de exposição utilizado foi de 8 segundos e obtivemos um total de 60 imagens. As imagens foram corrigidas de *Bias* e *Flat-Field* utilizando procedimentos padrões do IRAF.

O filtro metano diminui de maneira eficiente a luz difusa de Júpiter, porém se fez necessário utilizarmos a técnica de coronagrafia digital para eliminarmos ainda mais o ruído causado pela proximidade de Júpiter. Esta técnica se baseia na determinação de um centroide  $(x, y)$  para o objeto brilhante (Júpiter no nosso caso), na determinação de anéis concêntricos em torno deste objeto e a moda de cada anel é então subtraída da imagens de ciência. Esta técnica está implementada na forma de uma rotina PRAIA (Assafin et al., 2008) que vem sendo utilizado com sucesso em diferentes frentes de pesquisa (Camargo et al., 2015; Dias-Oliveira et al., 2015).

A Figura 25 demonstra a técnica de coronagrafia digital aplicada ao nosso caso. Em (i) temos a imagem antes e em (iii) a imagem após este processo, (ii) contém a imagem que foi subtraída da imagem de ciência. O círculo vermelho chama a atenção para a posição de Amalteia nas imagens.

Após a coronagrafia digital fizemos uma fotometria de abertura de Amalteia nas imagens. A abertura foi manualmente escolhida de maneira a otimizar a razão sinal sobre ruído. Esta curva de luz também foi obtida utilizando o pacote PRAIA.

Com a curva normalizada aplicamos o procedimento detalhado nas seções 2.1.2 e 2.3 para ajustar os parâmetros deste evento. Os resultados seguem na Tabela 8 e a Figura 26 ilustra a curva de luz observada (em preto) e a curva de luz ajustada (em vermelho). Nossos resultados contam com uma posição relativa entre Amalteia e Ganímedes com uma precisão média de 47,7 *mas*.

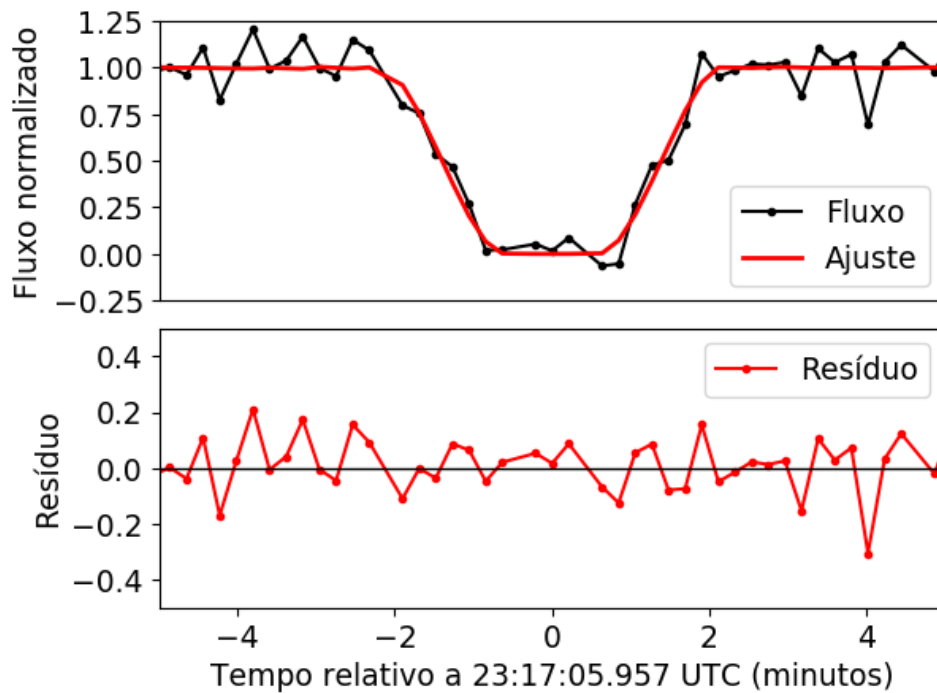


Figura 26 – Ganímedes eclipsa Amaltheia em 02 de março de 2015, no gráfico superior temos a curva de luz observada (em preto), a ajustada (em vermelho) e a curva de luz teórica (em azul). No gráfico inferior temos o resíduo no sentido observação menos ajuste.

Tabela 8 – Ganímedes eclipsa Amaltheia, OPD (1,60 cm), 02-03-2015.

Parâmetro	Observado	Efemérides	Offset
$t_0$ UTC	$23:17:06,0 \pm 2,3$	23:17:09,1	-3,1
$d_0$ (mas)	$391,3 \pm 76,3$	445,4	-54,1
N	60	-	-
rms	0,101	-	-
$\chi^2$	1,080	-	-

É importante ressaltar que escolhemos considerar Amaltheia um corpo esférico de raio igual a 83,5 km, o que é uma aproximação, uma vez que Amaltheia está mais próximo de elipsoide triaxial de eixos  $125 \times 73 \times 64$  km. Entretanto, dado a resolução temporal de nossa observação ( $\sim 8$  segundos) e a velocidade relativa do evento (26,9 km/s), a resolução de nossa observação ( $\sim 215$  km) não nos permite diferenciar a forma real de Amaltheia da forma aproximada.







### 3 Campanha das aproximações mútuas

Como mencionado no Capítulo 2 os fenômenos mútuos só acontecem duas vezes a cada órbita do planeta gigante, a cada 6 anos no caso de Júpiter. Fora desses períodos existe uma lacuna de posições precisas dos satélites galileanos, uma vez que a astrometria clássica obtém posições com precisões da ordem de 100 *mas* ( $\sim 300$  km) (Kiseleva et al., 2008). A dificuldade em se fazer a astrometria clássica CCD está relacionada com a dificuldade em se observar um número adequado de estrelas de referência no mesmo FoV<sup>1</sup> que os satélites galileanos (e Júpiter). A técnica das aproximações mútuas foi desenvolvida para preencher essa lacuna utilizando, inclusive, dados de pequenos telescópios.

Baseado na mesma geometria particular de uma ocultação mútua nós desenvolvemos a técnica das aproximações mútuas. Nesta técnica modelamos a variação da separação no plano do céu de dois satélites, quando essa separação possui um mínimo. Como resultado, determinamos o instante central de máxima aproximação aparente ( $t_0$ ), o parâmetro de impacto ( $s_0$ ) e a velocidade relativa entre os satélites no instante central ( $v_0$ ). Sem que haja calibração externa (utilizando estrelas de referência por exemplo) o  $s_0$  e a  $v_0$  são medidos em pixels e pixels por segundo, dessa forma apenas o instante central ( $t_0$ ) pode ser determinado de maneira efetiva. A Figura 27 ilustra estes parâmetros.

Esta técnica foi inicialmente sugerida por Jean-Eudes Arlot (Arlot et al., 1982). Em minha dissertação de Mestrado no Observatório do Valongo (OV/UFRJ)<sup>2</sup> (Morgado, 2015) avaliamos como utilizar esta técnica. Os primeiros resultados obtidos foram organizados na forma de um artigo publicado pela *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* em 2016 (Morgado et al., 2016).

Uma vez que a técnica se provou adequada, neste doutorado expandimos a campanha das aproximações mútuas incluindo a participação de outros observatórios colaboradores espalhados pelo Brasil e contamos também com observações do *Observatoire de Haute-Provence* (OHP) localizado na França. Além da expansão da campanha desenvolvemos uma *Pipeline* para predição, redução e análise destes eventos. Os resultados obtidos entre 2016 e 2018 foram organizados na forma de um artigo publicado pela *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* em 2019 (Morgado et al., 2019b).

A técnica das aproximações está descrita na Seção 3.1. Na Seção 3.2 apresentamos simulações que nos permitem entender as características e particularidades desta técnica. A campanha observacional está descrita na Seção 3.3, os detalhes da redução dos dados na Seção 3.4 e os resultados na Seção 3.5. Um conjunto selecionado de 25 curvas de separação

<sup>1</sup> Do inglês, *Field of View*

<sup>2</sup> Orientado por Marcelo Assafin e Roberto Viera Martins.

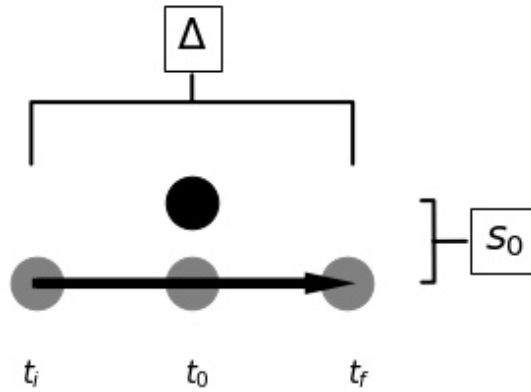


Figura 27 – Geometria de uma aproximação mútua e os parâmetros de interesse. Em cinza temos um satélite (*Sat 1*) e em preto o outro (*Sat 2*), a seta preta demarca o sentido do movimento relativo entre os satélites (*Sat 1* – *Sat 2*). O parâmetro de impacto ( $s_0$ ) é a mínima separação entre os satélites. O instante central ( $t_0$ ) é o instante de tempo em que essa mínima separação acontece. A velocidade relativa entre os satélites pode ser calculada utilizando  $v_0 = \frac{\Delta}{t_f - t_i}$ , para um intervalo  $\Delta$  adequadamente pequeno. Note que diferente de uma ocultação ambos os satélites estão completamente separados nas imagens.

das aproximações mútuas tratadas neste projeto estão disponíveis no Apêndice E. Por fim, apresentamos como utilizar este observável no ajuste de novas efemérides na Seção 3.6.

### 3.1 O método

A técnica das aproximações mútuas visa a determinação do instante central entre dois satélites que se aproximam no plano do céu. Para isso modelamos a variação da distância no plano do céu (ou separação) entre dois satélites ( $i$  e  $j$ ) quando essa separação possui um valor mínimo. A modelagem utilizada é um ajuste polinomial de grau  $N$  no quadrado da separação em função do tempo ( $s_{ij}^2(t)$ ).

$$s_{ij}^2(t) = \sum_{n=1}^N a_n t^n . \quad (3.1)$$

A partir de um ajuste por mínimos quadrados, determinamos os parâmetros ( $a_1, a_2, \dots, a_n$ ) e as respectivas incertezas ( $\delta a_1, \delta a_2, \dots, \delta a_n$ ). O instante central da aproximação ( $t_0$ ) é obtido quando a derivada em relação ao tempo da Equação (3.1) é igual a zero.

$$a_1 + 2a_2 t_0 + 3a_3 t_0^2 + \dots + N a_N t_0^{N-1} = 0 . \quad (3.2)$$

O instante central ( $t_0$ ) é o instante de tempo que satisfaz a equação (3.2). Usando um processo iterativo determinamos o instante central, diminuimos de  $t$  e refazemos a operação para satisfazer  $t_0 = 0$ , isso é feito até que o instante central da iteração  $k$  ( $t_0^{(k)}$ ) seja menor que 0.01 segundos. A incerteza do instante central ( $\sigma t_0$ ) é obtida aplicando a diferencial em torno de zero (Equações (3.3) e (3.4)).

$$\begin{aligned} 0 &= (\delta a_1 + 2\delta a_2 t_0 + \dots + N\delta a_N t_0^{N-1}) + (2a_2 + 6a_3 t_0 + \dots + N.(N-1)a_N t_0^{N-2}) \cdot \sigma t, \\ \sigma t &= \frac{- (\delta a_1 + 2\delta a_2 t_0 + \dots + N\delta a_N t_0^{N-1})}{(2a_2 + 6a_3 t_0 + \dots + N.(N-1)a_N t_0^{N-2})}. \end{aligned} \quad (3.3)$$

Para  $t_0 = 0$ , reduzimos a Equação (3.3) para

$$\sigma t_0 = -\frac{\delta a_1}{2a_2}. \quad (3.4)$$

Note que o numerador da equação (3.4) é afetado pela incerteza no ajuste polinomial, devido ao ruído da curva de distância. Por outro lado, o denominador é proporcional ao termo da concavidade ( $a_2$ ) que é altamente correlacionado com a velocidade relativa do evento ( $v_0$ ).

O parâmetro de impacto ( $s_0$ ), a mínima separação entre os satélites, pode ser calculado utilizando

$$s_0 = \sqrt{a_0}, \quad (3.5)$$

e a sua incerteza ( $\sigma s_0$ ) será

$$\sigma s_0 = \frac{\delta a_0}{2s_0}. \quad (3.6)$$

Para se calcular a velocidade relativa do evento, primeiro medimos a velocidade instantânea entre duas imagens separadas de um tempo arbitrário<sup>3</sup> e fazemos isso para toda a série de imagens do evento, um ajuste linear no tempo é feito e a velocidade relativa de interesse ( $v_0$ ) é a velocidade para  $t = t_0 = 0$ . Sua incerteza ( $\sigma v_0$ ) é obtida do mesmo ajuste linear.

Note que a partir das posições ( $x, y$ ) dos satélites na imagem CCD o parâmetro de impacto ( $s_0$ ) e velocidade relativa ( $v_0$ ) (e as respectivas incertezas) são determinados em unidades de pixel e pixel por segundo, respectivamente.

Essa modelagem considera que as deformações do CCD afetam ambos os satélites de mesmo maneira, o que está respaldado pelo conceito do *Precision Premium* (Peng et

<sup>3</sup> Para os satélites galileanos o tempo de escolha foi de aproximadamente um minuto.

al., 2008). O *Precision Premium* defende que temos uma melhor precisão ao medirmos posições relativas entre objetos que estejam próximos e no centro do FoV (separação menor que 85 segundos de arco), isso acontece uma vez que as deformações óticas e astronômicas afetam os dois satélites da mesma forma.

Como foi enfatizado apenas o instante central é efetivamente determinado independentemente de efemérides sem que calibração externa seja feita (escala de placa e orientação do CCD). Uma das maneiras de se obter estes parâmetros é utilizando as estrelas na calibração astrométrica (usando por exemplo a técnica da combinação de imagens<sup>4</sup>), porém isso não é sempre possível. Neste Capítulo os gráficos estão em segundos de arco utilizando a escala de placa nominal do CCD, apenas para visualização e comparação. As incertezas e as diferenças em relação as efemérides (*offset*) são calculadas em *mas* utilizando a velocidade relativa do evento no instante central ( $v_0$ ) e são fornecidas dessa maneira para permitir uma comparação direta e realista com outras técnicas astrométricas.

## 3.2 Predição e simulações

A preparação de uma campanha observacional começa com a previsão e seleção dos eventos de interesse. O segundo passo são simulações para analisar as melhores maneiras de fazermos estas observações, além de nos oferecerem indicações de quais são os efeitos causados por possíveis problemas técnicos ou meteorológicos.

### 3.2.1 Predição

Os eventos das aproximações mútuas podem ser facilmente previstos utilizando as efemérides dos satélites. A partir das efemérides, ascensão reta (RA ou  $\alpha$ ) e declinação (DEC ou  $\delta$ ) de dois satélites ( $i$  e  $j$ ) podemos calcular a separação entre estes satélites no plano do céu ( $s_{ij}$ ) utilizando a Equação (3.7).

$$s_{ij} = \sqrt{(\alpha_i - \alpha_j)^2 \cdot \cos^2\left(\frac{\delta_i + \delta_j}{2}\right) + (\delta_i - \delta_j)^2}. \quad (3.7)$$

Para os quatro satélites galileanos temos seis combinações possíveis<sup>5</sup> e a Figura 28 contém a variação destas distâncias ao longo do tempo. Cada ponto de mínimo nesta figura representa uma aproximação mútua potencial e estas aproximações deverão passar pelo crivo de seleção dos eventos antes de se tornarem candidatos factíveis.

A Figura 29 contém um gráfico contendo as separações mínimas ( $s_0$ ) de cada aproximação mútua potencial entre 2014 e 2026 ( $\Delta t$  igual a 12 anos, o que corresponde a

<sup>4</sup> Detalhes no Capítulo 5

<sup>5</sup> 501 e 502; 501 e 503; 501 e 504; 502 e 503; 502 e 504; 503 e 504

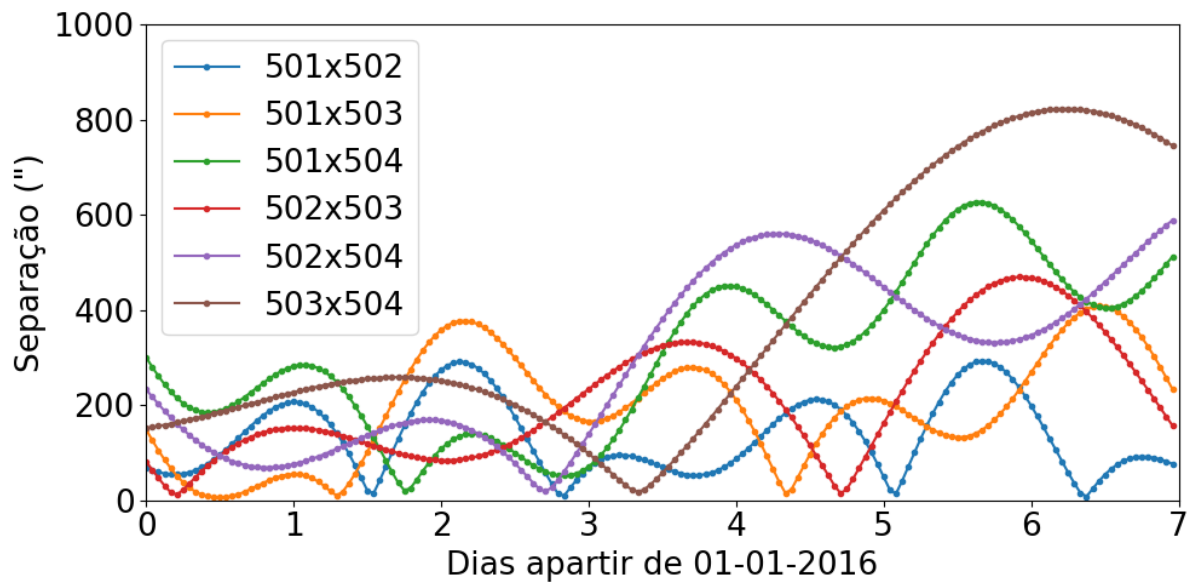


Figura 28 – Separação entre os satélites galileanos, em segundos de arco, ao longo de uma semana, começando em primeiro de janeiro de 2016. Cada mínimo neste gráfico corresponde a uma aproximação mútua potencial.

uma órbita de Júpiter em torno do Sol). Esta figura nos ilustra que existem aproximações mútuas adequadas (parâmetro de impacto menor que 30 segundos de arco) independentemente da posição de Júpiter em sua órbita. Note que os pontos em que os parâmetros de impacto são menores que a soma do raio aparente dos satélites ( $R_i + R_j \approx 2''$ ) são aproximações que culminam em ocultações mútuas<sup>6</sup> e isso ocorre apenas durante os equinócios de Júpiter.

Após as predições dos eventos é necessário selecionarmos adequadamente estes eventos utilizando alguns critérios. Com esse intuito aplicamos quatro filtros: (i) eliminamos os eventos com parâmetro de impacto maior que 60 segundos de arco; (ii) eliminamos os eventos onde a distância entre os satélites e Júpiter seja menor que dois raios de Júpiter ( $R_J \approx 45''$ ); (iii) eliminamos os eventos que possuem velocidade relativa menor que 1 *mas/s*, como explicitado pela Equação (3.4) esses eventos produzirão resultados piores; e (iv) selecionamos os eventos que são observáveis para um determinado observador na superfície da Terra.

Para a seleção deste eventos foi desenvolvido uma rotina PYTHON que seleciona os eventos, essa rotina utiliza funções do NUMPY, ASTROPY e PANDAS e como resultado temos um *Data Frame* conforme exemplificada pela Tabela 9. No exemplo em questão fizemos a previsão para o mês de fevereiro de 2016 para um observador localizado no Observatório Pico dos Dias (OPD).

<sup>6</sup> Maiores informações no Capítulo 2, seção 2.1.1

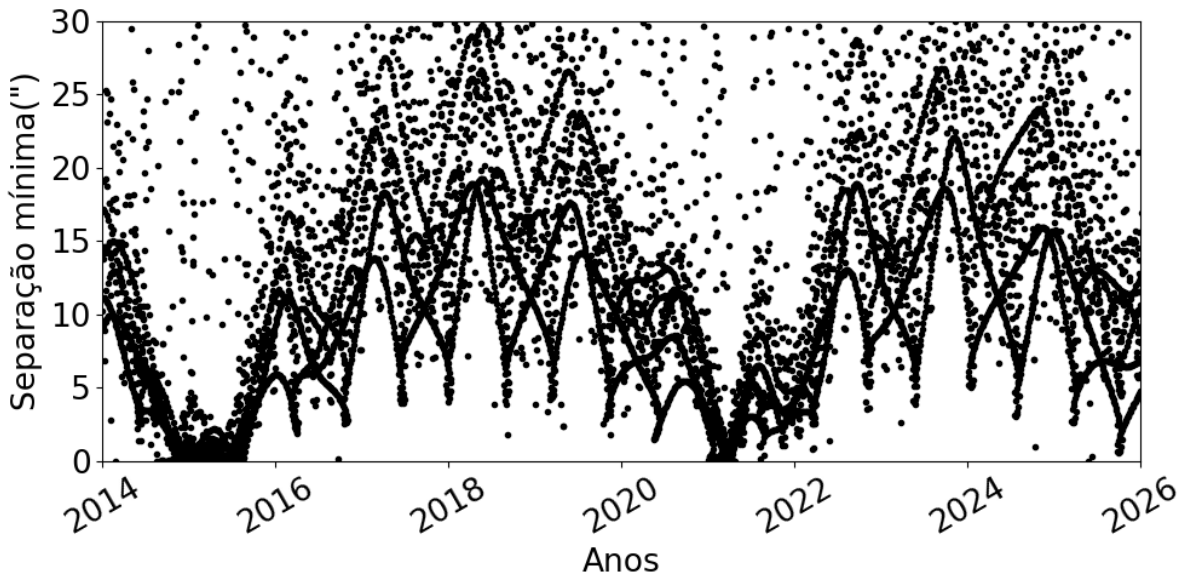


Figura 29 – Separação mínima entre os satélites ( $s_0$ ) em segundos de arco ao longo do tempo para as diferentes aproximações mútuas entre 2014 e 2026. Ilustramos apenas os eventos onde o parâmetro de impacto é menor que 30 segundos de arco. Note que as aproximações acontecem ao longo de toda órbita de Júpiter (12 anos).

### 3.2.2 Testes e simulações

Após a previsão dos eventos e antes de suas observações é importante explorarmos os diferentes cenários possíveis. Isso nos garante um melhor preparo durante as observações e nos permite prever, na medida do possível, a qualidade do resultado que obteremos.

O primeiro teste é determinar o grau do polinômio que deverá ser ajustado às curvas de distância. O segundo visa prever por quanto tempo devemos observar. O terceiro visa analisar a dualidade entre o tempo de exposição (resolução temporal) e a razão sinal sobre ruído (SNR<sup>7</sup>). O quarto visa prever os efeitos que problemas técnicos ou climáticos causam na curva de distância, como a presença de lacunas na curva de distância e a completa ausência de observações apenas em um dos lados da curva.

O evento teste que será utilizado nestas simulações será a aproximação mútua entre Io e Ganímedes que aconteceu no dia 24 de fevereiro de 2016.

#### 3.2.2.1 Grau do polinômio

O modelo ajustado às observações para determinação dos parâmetros de interesse é um modelo polinomial, logo o primeiro teste que devemos fazer é escolher o grau adequado do polinômio ( $N$ ) a ser ajustado. Para tal, ajustamos um polinômio à variação do quadrado da separação teórica (utilizando as efemérides) entre dois satélites ( $s_{ij}(t)$ ) em relação ao

<sup>7</sup> Do inglês, *Signal to Noise Ratio*

Tabela 9 – Predição das aproximações mútuas que ocorreram em fevereiro de 2016 para o Observatório Pico dos Dias (OPD).

	$t_0$ (UTC) (aaaa-mm-dd hh:mm:ss.sss)	Evento ( $Sat_1 \times Sat_2$ )	$s_0$ (")	$v_0$ ( $mas/s$ )	RA ( $^\circ$ )	DEC ( $^\circ$ )
0	2016-02-01 04:19:59,487	501a502	05,5604	4,716	173,28912	+4,40292
1	2016-02-03 04:48:00,198	502a503	16,2650	7,249	173,14887	+4,47174
2	2016-02-08 06:29:36,879	501a502	05,3442	4,459	172,75259	+4,66207
3	2016-02-16 02:16:54,401	501a502	21,3377	1,591	172,03075	+4,99892
4	2016-02-20 02:50:24,648	502a503	10,3822	3,087	171,61504	+5,18860
5	2016-02-21 01:12:24,183	501a503	14,5026	8,300	171,51551	+5,23373
6	2016-02-23 03:46:56,294	501a502	14,8254	1,317	171,28495	+5,33748
7	2016-02-23 07:06:10,479	503a504	20,6453	3,967	171,26916	+5,34437
8	2016-02-24 01:53:25,768	501a503	12,1528	6,226	171,18246	+5,38353
9	2016-02-27 06:01:27,015	502a503	09,8856	2,810	170,82200	+5,54394
10	2016-02-29 01:17:01,875	503a504	24,9629	4,393	170,61355	+5,63641

tempo, quando existe uma aproximação mútua. Analisamos então a diferença entre o modelo ajustado e as efemérides e calculamos o desvio padrão ( $\sigma$ ). Iteramos para polinômios com  $2 \leq N \leq 8$ , e o paramos quando o  $\sigma$  é menor que  $0,033 mas$ , em outras palavras,  $3\sigma$  é menor que  $0,1 mas$ . Note que isso é feito caso a caso para cada aproximação.

Para o evento exemplo, o ajuste polinomial do segundo grau produziu um desvio padrão de aproximadamente  $50 mas$ , longe do adequado (Figura 30). O ajuste polinomial do terceiro grau produziu um desvio padrão de aproximadamente  $0,22 mas$  (Figura 31), um valor mais adequado, porém ainda fora do critério de seleção. Ao ajustarmos um polinômio do quarto grau obtemos um desvio padrão de  $0,016 mas$ , valor selecionado que deverá ser utilizado para o ajuste dessa observação (Figura 32). As Figuras 30, 31 e 32 contêm as separações ao longo do tempo, segundo as efemérides *jup310* e DE435 entre Io e Ganimedes durante a aproximação mútua que ocorreu em 24 de fevereiro de 2016. Em cada uma dessas figuras ajustamos um polinômio (em amarelo no painel superior) ao quadrado da separação teórica (em preto no painel superior), no painel inferior temos o resíduo (efemérides menos modelo). Para melhor visualização os gráficos são apresentados na forma de separação, e não quadrado da separação.

Para 82% das aproximações mútuas previstas entre fevereiro de 2016 e setembro de 2019 foi selecionado um polinômio do quarto grau. Nos 18% restantes um polinômio do terceiro grau já se mostrou adequado.

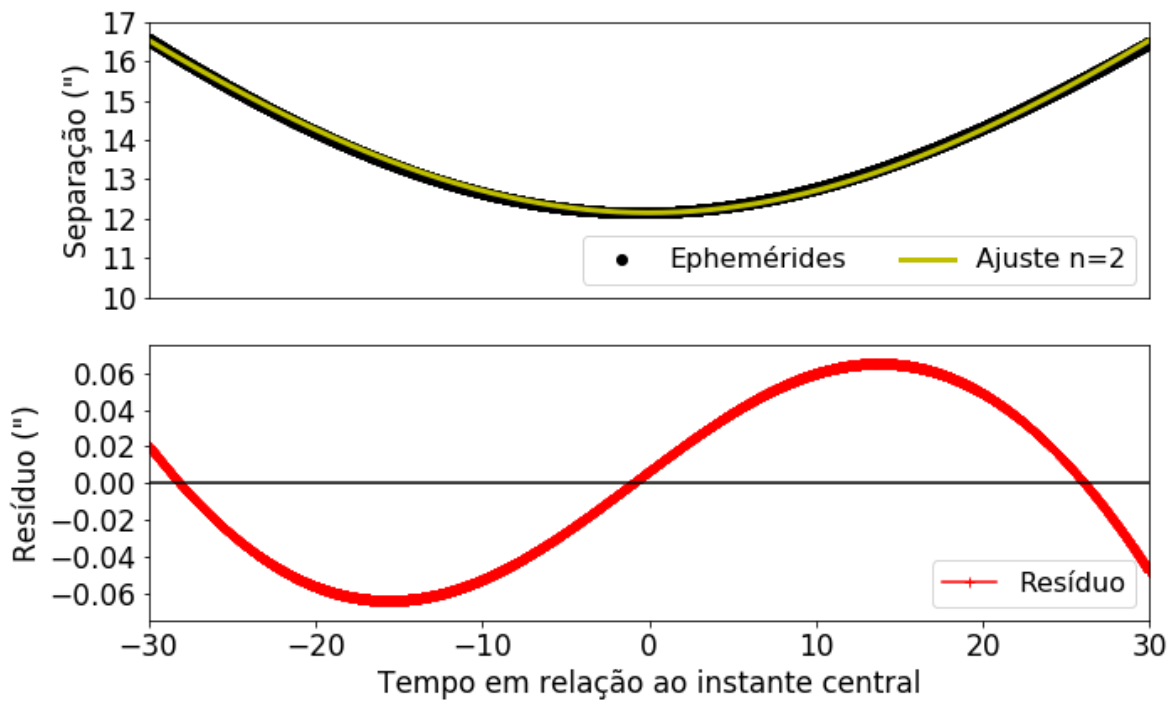


Figura 30 – Curva de separação utilizando as efemérides e ajuste polinomial do segundo grau, o desvio padrão do resíduo entre o modelo polinomial e as efemérides foi de  $\sim 50$  mas.

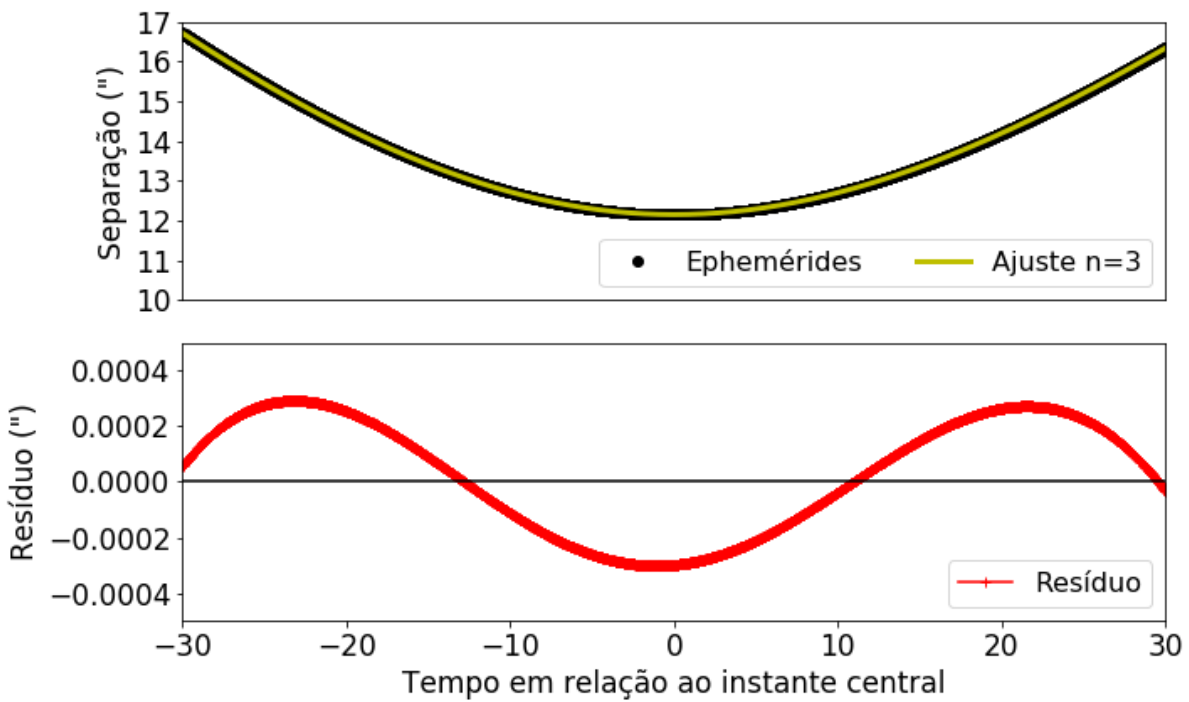


Figura 31 – Curva de separação utilizando as efemérides e ajuste polinomial do terceiro grau, o desvio padrão do resíduo entre o modelo polinomial e as efemérides foi de  $\sim 0,22$  mas.



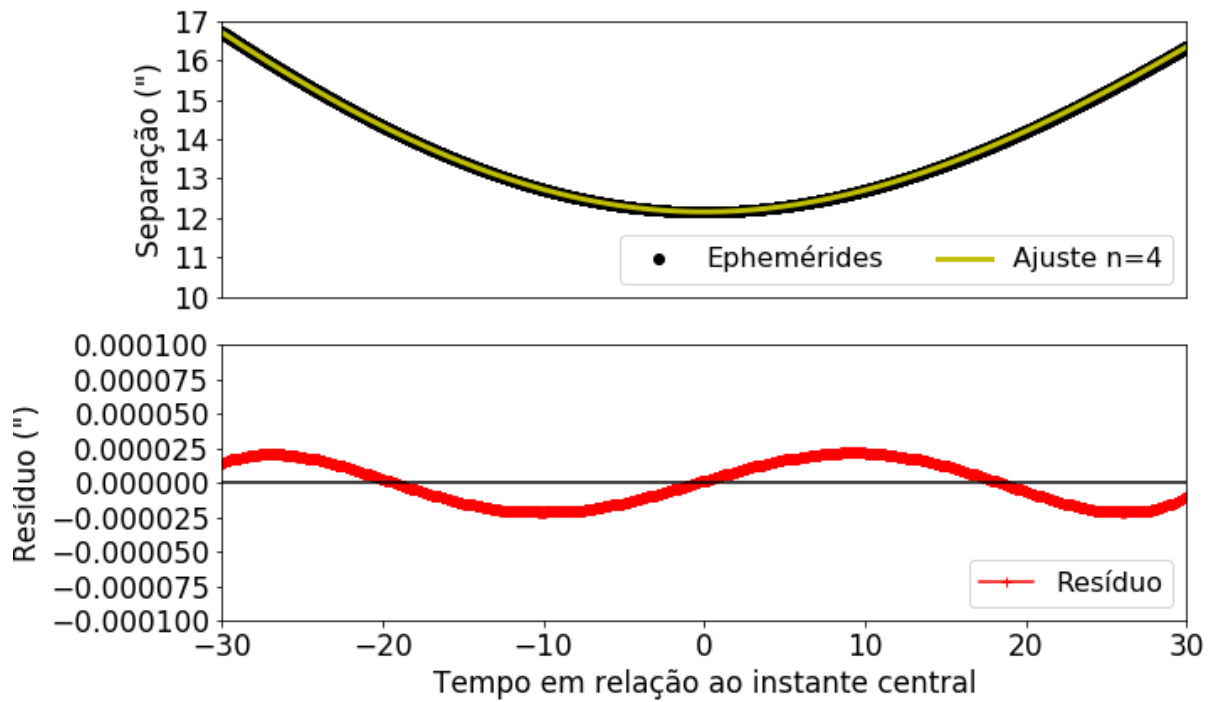


Figura 32 – Curva de separação utilizando as efemérides e ajuste polinomial do quarto grau, o desvio padrão do resíduo entre o modelo polinomial e as efemérides foi de  $\sim 0,016$  *mas*. Atingindo assim o critério de seleção adequado.

### 3.2.2.2 Duração da observação

O segundo teste a ser analisado é saber quanto tempo devemos observar uma aproximação mútua. Para tal, avaliamos as incertezas obtidas para o parâmetro de impacto ( $\sigma_{s_0}$ ) e para o instante central ( $\sigma_{t_0}$ ) para simulações com diferentes durações ( $\Delta t$ ).

Para este teste precisamos de dados mais realistas e é necessário incluir um ruído nas efemérides. As separações simuladas estavam espaçadas de 4 segundos ( $\delta t$ ) com um ruído randômico normal onde o desvio padrão ( $\sigma_{noise}$ ) é igual a 100 *mas*. Todas as simulações são repetidas 100 vezes e tiramos a média a fim de eliminar efeitos espúrios causados pelo ruído adicionado.

Nesta etapa simulamos uma aproximação mútua iniciando 60 minutos antes do instante central e indo até 60 minutos após este instante (duração de 120 minutos;  $\Delta t$ ), adicionamos o ruído mencionado e determinamos as incertezas no parâmetro de impacto ( $\sigma_{s_0}$ ) e no instante central ( $\sigma_{t_0}$ ). Removemos um ponto antes e um ponto após o instante central e refazemos o ajuste. Iteramos esse processo até que reste apenas 5 minutos antes e 5 minutos após o instante central ( $\Delta t = 10$  minutos). O resultado desta simulação está ilustrado na Figura 33. Note que para eventos com duração entre 120 e 40 minutos não existem variações significativas entre os resultados obtidos, devido a isso faremos as demais simulações com 60 minutos de duração, 30 minutos antes do instante central e 30

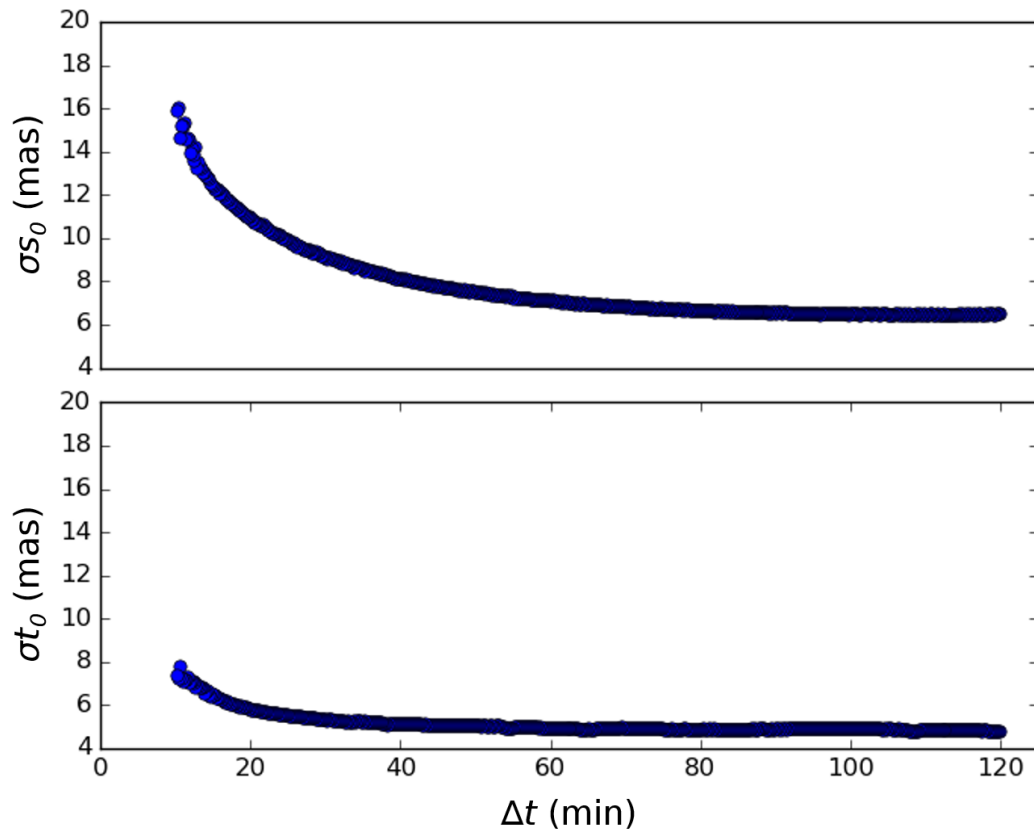


Figura 33 – Simulando a duração de uma aproximação mútua. O eixo  $x$  é a duração do evento (em minutos) centrado no instante central ( $\Delta t$ ). O eixo  $y$  do painel superior é a incerteza no parâmetro de impacto ( $\sigma_{s_0}$ ) e no painel inferior temos a incerteza no instante central ( $\sigma_{t_0}$ ), ambos em *mas*.

minutos após.

### 3.2.2.3 SNR $\times$ tempo de exposição

O segundo teste realizado visa analisar como a incerteza do instante central ( $\sigma_{t_0}$ ) e do parâmetro de impacto ( $\sigma_{s_0}$ ) mudam quando afetados por diferentes ruídos ( $\sigma_{noise}$ ) e para imagens separadas por diferentes intervalos de tempo ( $\delta t$ )<sup>8</sup>.

Iniciamos com um conjunto de imagens com  $\delta t$  igual a um segundo e adicionamos um ruído ( $\sigma_{noise}$ ) normalizado com desvio padrão igual 50 *mas* e determinamos as incertezas para o parâmetro de impacto ( $\sigma_{s_0}$ ) e para o instante central ( $\sigma_{t_0}$ ), repetimos o processo para um ruído normalizado com desvio padrão de 100, 150, 200, 250, 300 e 350 *mas*. Após, repetimos o processo para os demais valores de  $\delta t$ , ao final, temos o  $\delta t$  variando entre 1 e 10 segundos. Todas essas simulações são refeitas 100 vezes a fim de eliminar efeitos espúrios, o que é particularmente importante para um  $\sigma_{noise}$  de 350 *mas*.

<sup>8</sup> A resolução temporal será  $1/\delta t$

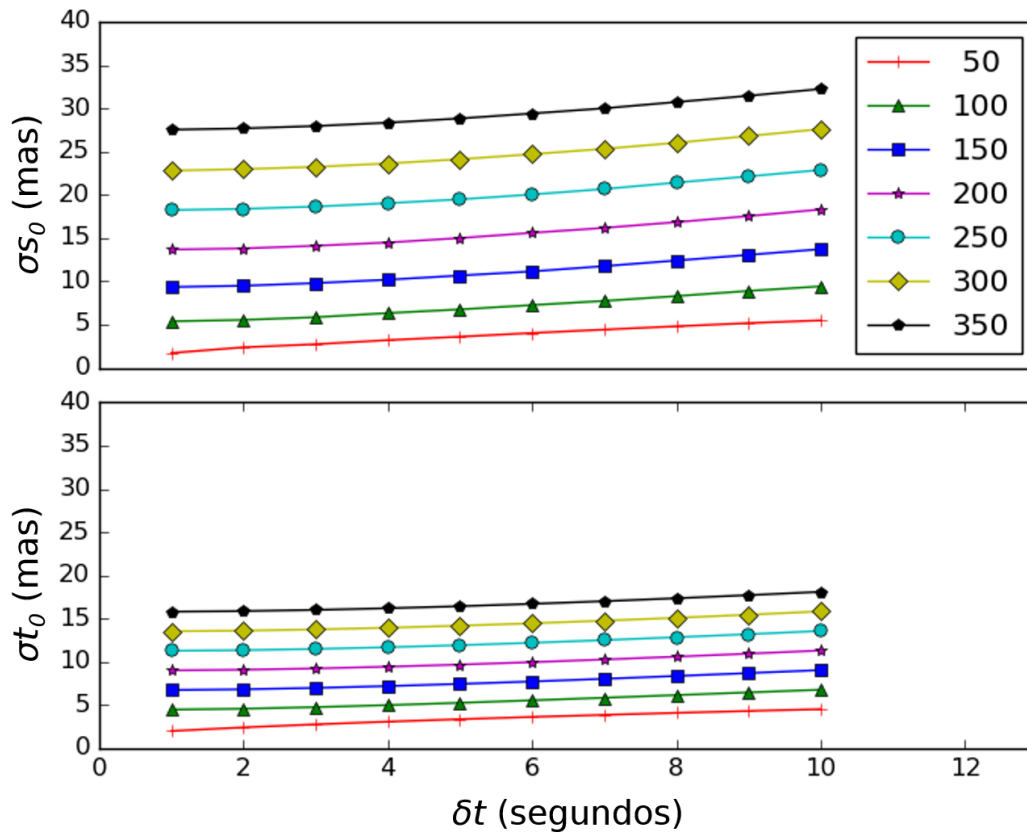


Figura 34 – Incerteza do parâmetro de impacto ( $\sigma_{s_0}$ ) e do instante central ( $\sigma_{t_0}$ ) em relação a resolução temporal ( $\delta t$ ) para diferentes regimes de ruídos ( $\sigma_{noise}$ ), demarcado pelas diferentes cores e símbolos na legenda. Obviamente o melhor cenário possível é uma alta resolução temporal e um baixo ruído, porém tendo que haver uma escolha o SNR deve ser priorizado.

Estas simulações estão ilustradas na Figura 34 onde apresentamos as incertezas determinadas para os diferentes cenários ( $\sigma_{s_0}$  e  $\sigma_{t_0}$ , em  $mas$ ). É obvio imaginar que os melhores resultados possíveis são aqueles com alta resolução de imagens (pequeno  $\delta t$ ) e com alta qualidade (baixo  $\sigma_{noise}$ ), porém esse cenário não é sempre possível e precisamos escolher o que priorizar. Em poucas palavras, a resolução temporal é dominada pelo tempo de exposição utilizado, e o tempo de exposição tem efeito direto na qualidade da imagem e na razão sinal sobre ruído (SNR)<sup>9</sup>, logo esses dois termos estão intrinsecamente correlacionados. Esta simulação nos mostra que devemos priorizar a qualidade da imagem, mesmo diminuindo a resolução temporal.

<sup>9</sup> Ver discussão no Capítulo 5.

### 3.2.2.4 Problemas Observacionais

Por fim, fizemos simulações que reproduzem os efeitos causados por problemas climáticos ou instrumentais. Nesse contexto prevemos dois tipos de problemas. O primeiro seria a ausência de imagens durante um "pequeno" intervalo de tempo, causando lacunas nas observações. Este tipo de situação ocorre quando temos a passagem de uma nuvem ou um problema técnico de resolução rápida.

O segundo tipo de problema que prevemos é o fim abrupto das imagens (ou um começo tardio), causando a completa ausência de pontos em apenas um dos lados da curva de separação. Este tipo de curva acontece quando temos um problema técnico grave que impossibilite as observações ou então o céu ser completamente encoberto ou a umidade do sítio alcançar valor crítico. Note que este problema pode acontecer em ambos os lados da curva, antes ou depois do instante central.

#### 3.2.2.4.1 Lacunas nas observações

Na simulação de lacunas nas observações definimos um instante de tempo central onde não haverá observações ( $t_{gap}$ ) e uma duração para esta lacuna ( $\Delta t_{gap}$ ). Considerando uma curva de separação começando 30 minutos antes do instante central e terminando 30 minutos após este instante, as imagens estão espaçadas de 4 segundos ( $\delta t = 4$  segundos) o ruído adicionado terá desvio padrão igual a 100 *mas* ( $\sigma_{noise} = 100$  *mas*).

Fazemos simulações para diferentes  $\Delta t_{gap}$  e com  $t_{gap}$  em diferentes momentos da curva de separação. Os resultados foram organizados na Figura 35. Note que o momento em que a lacuna ocorre não afeta de maneira significativa a determinação do instante central, porém a incerteza no parâmetro de impacto aumenta consideravelmente para lacunas que ocorrem próximas ao instante central.

#### 3.2.2.4.2 Ausência de observações

Para simular a ausência de observações consideramos que a curva de distância começa em um instante ( $t_b$ ) e vai até 30 minutos após do instante central. Esse tempo de término se mantém contante ao longo de todas as simulações e o tempo de início varia de 30 minutos antes do instante central até 2 minutos antes do instante central. Assim como na simulação anteriores utilizamos  $\delta t$  igual a 4 segundos e  $\sigma_{noise}$  igual a 100 *mas*.

Os resultados dessa simulação estão ilustrados na Figura 36. A não simetria da curva de separação causa um aumento considerável na incerteza do instante central que alcança valores da ordem de 40 *mas* se a observação começar (ou terminar) a menos de 5 minutos do instante central.

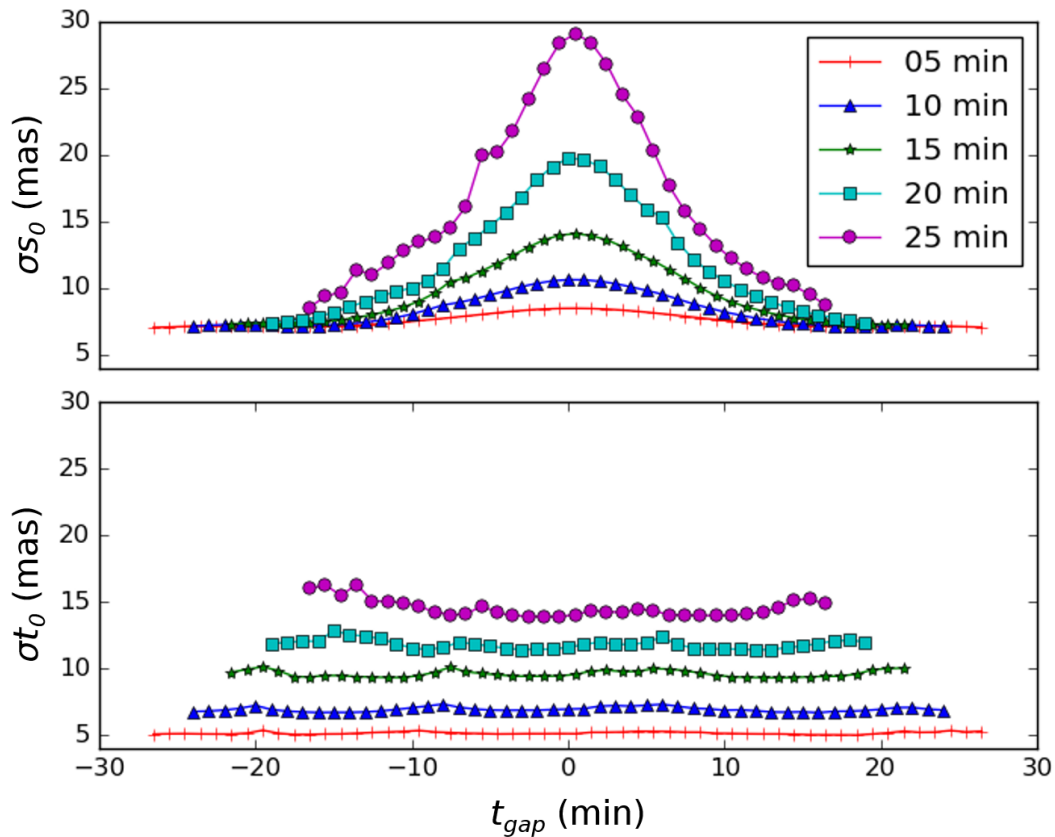


Figura 35 – Incerteza do parâmetro de impacto ( $\sigma_{s_0}$ ) e do instante central ( $\sigma_{t_0}$ ) em função do momento central de uma lacuna ( $t_{gap}$ ) de duração  $\Delta t_{gap}$ , os diferentes símbolos e cores denotam diferentes  $t_{gap}$ . Note que o momento em que a lacuna ocorre não afeta de maneira significativa a determinação do instante central.

### 3.3 Campanhas Observacionais

A campanha das aproximações mútuas se dividiu em campanhas anuais que iniciaram em fevereiro de 2016 e irão até setembro de 2019. As previsões destes eventos foram feitas dentro desse projeto e fornecidas aos observadores colaboradores. Os critérios de seleção dos eventos foram discutidos na Seção 3.2.1. Em particular, para o Observatório Pico dos Dias (OPD), fizemos 6 pedidos de tempo desde o semestre de 2015-2 até 2019-1, onde eu fui o responsável pelo pedido (PI).

Um grande diferencial da nossa campanha foi a utilização do filtro Metano de banda estreita, centrado em 889 nm com largura de 15 nm. Esta região espectral é ideal para a observação dos satélites de Júpiter uma vez que diminui drasticamente o brilho de Júpiter, sem afetar de maneira particular os satélites (Karkoschka, 1994; Karkoschka, 1998) (Ver a Seção 1.4).

A nossa campanha contou com a participação de cinco estações no Brasil. Das

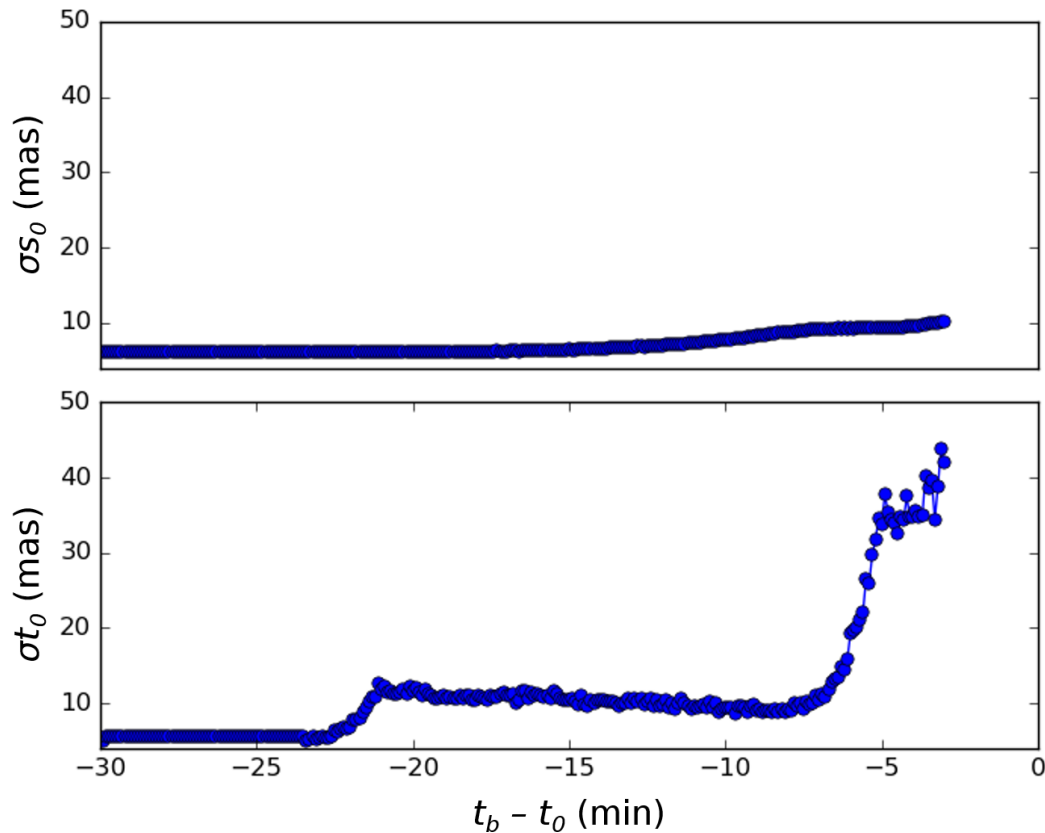


Figura 36 – Incerteza do parâmetro de impacto ( $\sigma_{s_0}$ ) e do instante central ( $\sigma_{t_0}$ ) em função da diferença entre o instante de começo das observações ( $t_b$ ) e o instante central em minutos ( $t_0$ ).

quais eu fui o observador principal nos telescópios do OPD em Brazópolis/MG, utilizamos os telescópios Boller & Chivens e o Zeiss, ambos de 60 centímetros de diâmetro. Daniel Iria Machado liderou as observações realizadas no Polo Astronômico Casimiro Montenegro Filho em Foz do Iguaçu/PR (FOZ). Rafael Sfair liderou as observações feitas na Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá (UNESP/FEG), Guaratinguetá/SP. Em Vitória/ES as observações foram realizadas no Gaturamo Observatório Astronômico (GOA) liderado por Marcio Malacarne. Felipe Braga-Ribas liderou as observações feitas na Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) em Curitiba/PR. Por fim, nossa campanha contou com a colaboração de observações feitas no *Observatoire de Haute-Provence* (OHP), localizado no Sudeste da França, essas observações foram lideradas por Vincent Robert. Os detalhes dos observatórios, observadores, instrumentos e o número de detecções positivas estão listadas na Tabela 10 e um mapa contendo a localização desses sítios está disposto no Apêndice C.

Durante os quatro anos deste projeto previmos 158 eventos acontecendo entre fevereiro de 2016 e setembro de 2019. Dos 43 eventos que aconteceram em 2016, 28 foram

Tabela 10 – Lista de observadores da campanha das aproximações mútuas de 2016-2019.

Cidade/Estado Sigla	Longitude Latitude Altura	Observadores	Abertura CCD Filtro	Nº de detecções positivas
Brazópolis/MG OPD	45° 34' 57" O 22° 32' 07" S 1,864 km	B. Morgado J. I. B. Camargo T. Bassalo A. R. Gomes-Júnior S. Santos-Filho A. Dias-Oliveira G. Benedetti-Rossi	60 cm IKon-L Metano	<b>42</b>
Foz do Iguaçu/PR FOZ	54° 35' 37" O 25° 26' 05" S 0,184 km	D. I. Machado L. L. Trabuco	28 cm Raptor Metano	<b>35</b>
Guaratinguetá/SP FEG	45° 11' 25" O 22° 48' 05" S 0,543 km	R. Sfair T. de Santana L. A. Boldrin G. Borderes-Mota T. S. Moura T. Akemi B. C. B. Camargo O. C. Winter	40 cm Raptor Metano	<b>34</b>
Vitória/ES GOA	40° 19' 00" O 20° 17' 52" S 0,026 km	M. Malacarne J. O. Miranda	35 cm ST-8X-ME Metano	<b>8</b>
Curitiba/PR UTFPR	49° 11' 45" O 25° 28' 24" S 0,861 km	F. Braga-Ribas A. Crispim	25 cm Watec Metano	<b>5</b>
OHP/França OHP	05° 42' 56" E 43° 55' 54" N 0,633 km	V. Robert V. Lainey B. Morgado A. R. Gomes-Júnior	120 cm CCD42-40 Metano	<b>3</b>

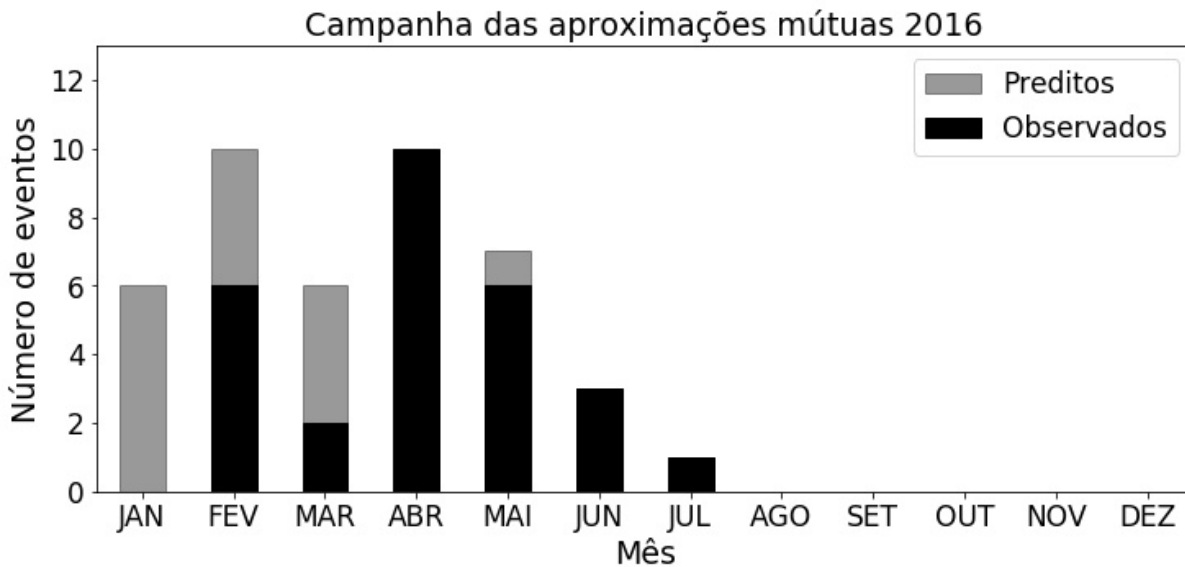


Figura 37 – Número de aproximações mútuas observadas ao longo dos meses, começando em janeiro até dezembro de 2016. Em cinza temos os 43 eventos selecionados para observação e em preto os 28 eventos observados.

observados com sucesso, dos 41 eventos em 2017 observamos 21, dos 30 eventos previsto para 2018 observamos 19 e dos 44 previstos para 2019 observamos 18<sup>10</sup>. Os histogramas que mostram o número de eventos previstos e observados ao longo dos meses estão dispostos nas Figuras 37, 38, 39 e 40. No total 83 eventos foram observados, dos quais obtivemos 127 curvas de separação, sendo que 34 eventos foram observados simultaneamente por dois ou mais telescópios.

### 3.4 Redução

Inicialmente todas as imagens FITS foram corrigidas de *Bias* e *Flat-Field* utilizando procedimentos padrões do IRAF. Os detalhes destas correções já foram detalhadas na Capítulo 2 na Seção 2.3.

Após essas correções determinamos os centroides (os fotocentros) dos satélites utilizando uma tarefa do pacote PRAIA (Assafin et al., 2011), esta tarefa determina o centroide  $(x, y)$  dos objetos nas imagens utilizando um ajuste gaussiano bi-dimensional simétrico onde a largura a meia altura (FWHM<sup>11</sup>) será aproximadamente o *seeing* da imagem.

A precisão do centroide calculado quando nas melhores condições climáticas é da ordem de 0,05 pixels, considerando as instrumentações utilizadas isso gera precisões de 16 a 36 *mas*.

<sup>10</sup> Destes, 5 ainda não aconteceram até a data de entrega desta tese ou ainda não foram analisados.

<sup>11</sup> Do inglês, *Full Width Half Maximum*



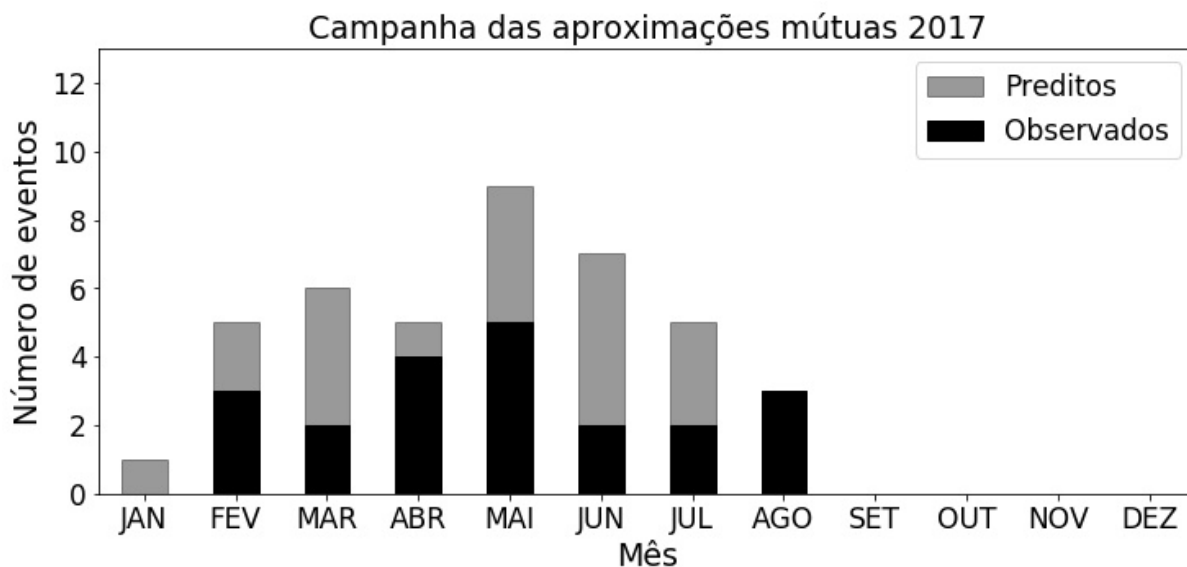


Figura 38 – Número de aproximações mútuas observadas ao longo dos meses, começando em janeiro até dezembro de 2017. Em cinza temos os 41 eventos selecionados para observação e em preto os 21 eventos observados.

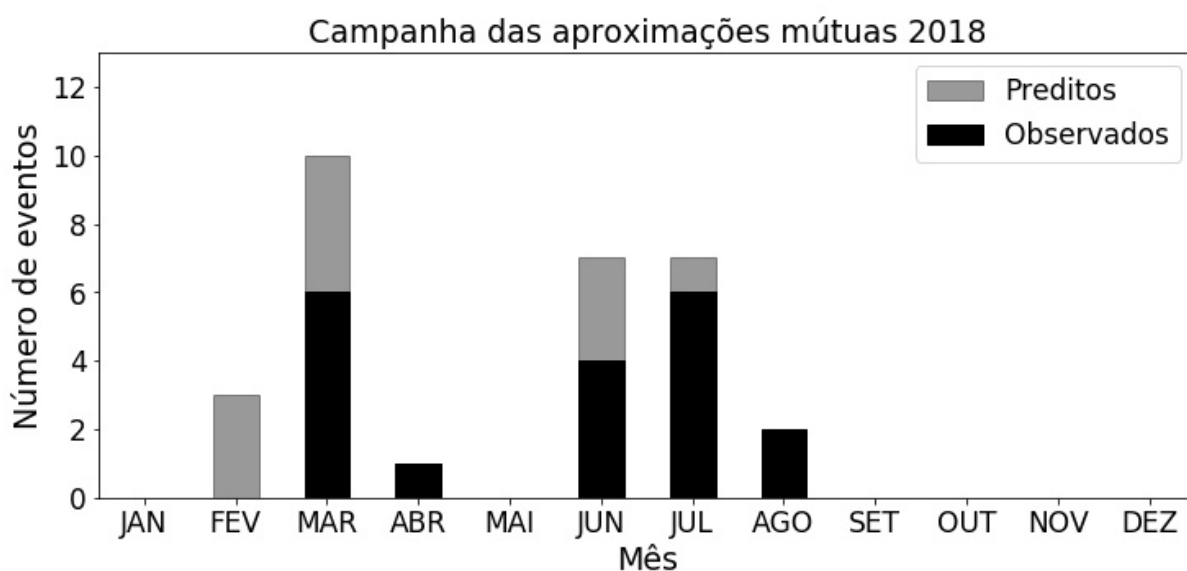


Figura 39 – Número de aproximações mútuas observadas ao longo dos meses, começando em janeiro até dezembro de 2018. Em cinza temos os 30 eventos selecionados para observação e em preto os 19 eventos observados.

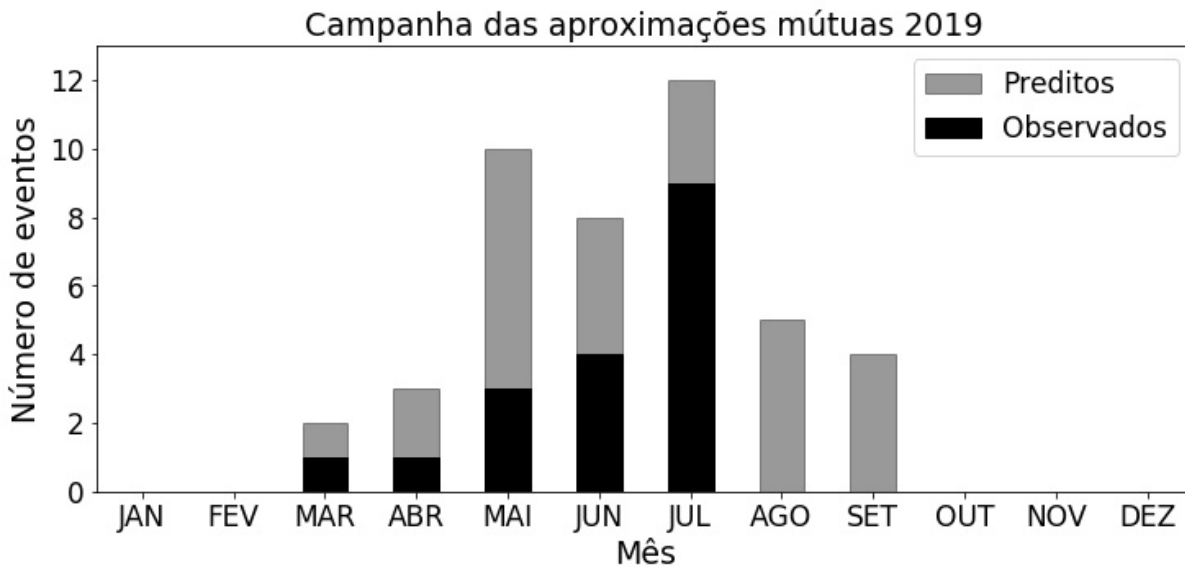


Figura 40 – Número de aproximações mútuas observadas ao longo dos meses, começando em janeiro até dezembro de 2019. Em cinza temos os 44 eventos selecionados para observação e em preto os 18 eventos observados.

A partir dos centroides de todos os satélites nas imagens podemos aplicar o método das aproximações mútuas como descrito na Seção 3.1. Entretanto, é necessário corrigirmos alguns efeitos astronômicos antes de determinarmos o parâmetro de interesse, o instante central da aproximação mútua.

As imagens obtidas pela UTFPR foram em formato de vídeo AVI e não no formato de imagens FITS, antes de tratarmos essas imagens utilizando os procedimentos descritos é necessário fazermos a conversão entre estes dois formatos. Neste projeto utilizamos o software Audela<sup>12</sup> para fazer esta conversão.

### 3.4.1 Correções astronômicas

Após a determinação das posições  $(x, y)$  dos satélites nas imagens ainda é necessário corrigirmos efeitos sistemáticos que podem estar afetando as observações. Aqui mostraremos como corrigir os efeitos de fase solar (Seção 3.4.1.1), refração atmosférica (Seção 3.4.1.2) e aberração da luz (Seção 3.4.1.3). Efeitos de deflexão da luz pelo Sol não serão considerados uma vez que seu efeito nos satélites é usualmente menor que 8 *mas*, além disso afetas ambos os satélites de mesma maneira.

Essas correções são aplicadas às efemérides dos satélites envolvidos nas aproximações e calculamos qual o seu efeito no instante central ( $\Delta t_{cor}$ ). Essa diferença é então subtraída do valor obtido utilizando as observações.

<sup>12</sup> Website: <<http://www.audela.org/>>

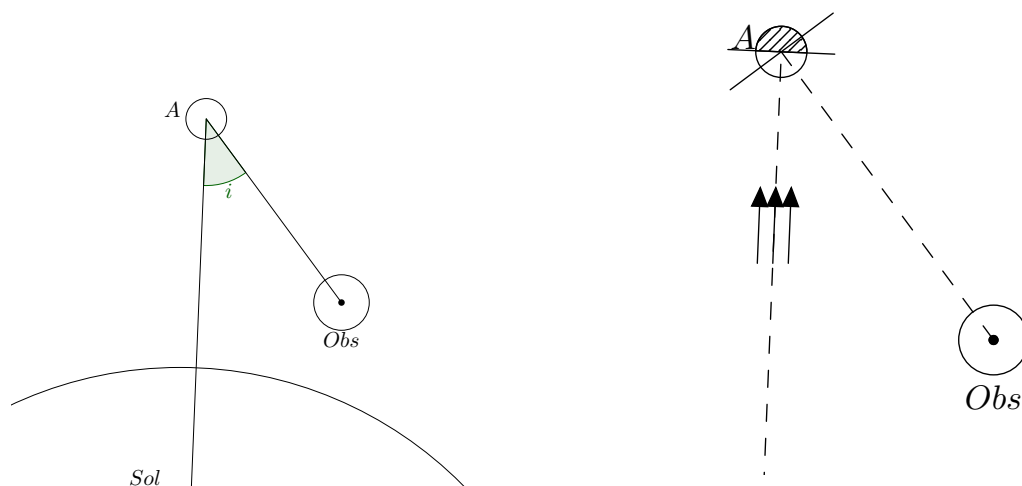


Figura 41 – Na esquerda: O ângulo de fase ( $i$ ) é o ângulo entre a direção da luz incidente do Sol no alvo e a direção do observador. Na direita está representado a aplicação do efeito de fase no objeto observado, onde a parte hachurada representa a região não iluminada do objeto.

#### 3.4.1.1 Fase solar

Os planetas e satélites são corpos que não possuem luz própria e a luminosidade atribuída a estes corpos é originária da luz do Sol refletida. A fase solar é originária da configuração geométrica entre o Sol, o observador e o alvo, este efeito é facilmente percebido nos corpos celestes próximos, como a Lua e Vênus. O ângulo de fase,  $i$ , é o ângulo entre a direção da luz solar incidente no objeto alvo e a direção da luz refletida que chega no observador, ilustrado na Figura 41. Esta fase, por sua vez, faz com que a posição do satélite na imagem CCD (fotocentro) seja diferente do centro geométrico (para todos os efeitos, o centro de massa) do objeto, como representado pela Figura 42.

Denominamos o ponto  $F$  como o fotocentro do objeto na imagem e o centro geométrico como o ponto  $C$ . O segmento  $\overline{FC}$  apresenta a correção que devemos aplicar à posição do fotocentro para obtermos o centro geométrico. Utilizando o ângulo de posição sub-solar ( $Q$ ) podemos transportar essa correção para o plano do céu e aplicar as componentes em ascensão reta ( $\alpha$ ) e declinação ( $\delta$ ). Esta correção poderá ser feita utilizando a equação (3.8), onde  $C(i)$  é um coeficiente relacionado com a lei de reflexão utilizada e  $r$  é o raio aparente do objeto no plano do céu (em unidades angulares) (Lindgren, 1977; Hestroffer, 1998; Kaasalainen; Tanga, 2004).

$$\begin{pmatrix} \Delta\alpha \cos \delta \\ \Delta\delta \end{pmatrix}_{phase} = C(i)r \sin(i/2) \begin{pmatrix} \sin(Q) \\ \cos(Q) \end{pmatrix} \quad (3.8)$$

Ao optarmos por utilizarmos a lei de reflexão de Lambert,  $C(i)$  assume o valor

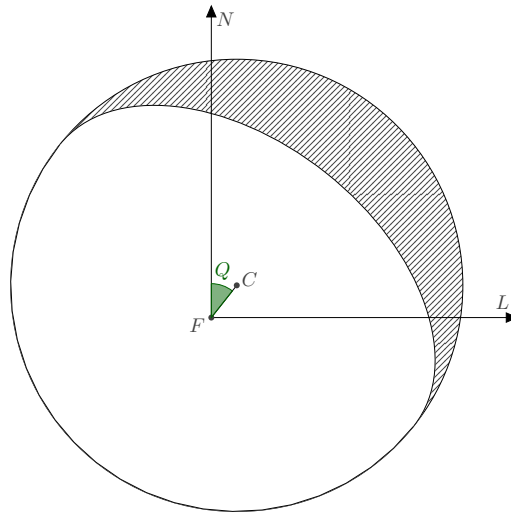


Figura 42 – Influência da fase solar em um satélite.  $N$  denomina o Norte, e  $L$  o Leste, o ponto  $F$  representa o fotocentro do objeto e  $C$  o centro geométrico. O ângulo  $Q$  é o ângulo sub-solar que determina a direção da fase no plano tangente à esfera celeste

obtido através da equação (3.9), onde o ângulo de fase ( $i$ ) utilizado deve estar em radianos.

$$C(i)_L = \frac{3\pi}{4} \cdot \frac{\cos^3(i/2)}{\sin(i) + (\pi - i) \cdot \cos(i)} \quad (3.9)$$

Uma outra lei de reflexão que podemos utilizar para aplicar esta correção é a lei de Lommel-Seelinger, neste caso  $C(i)$  pode ser calculado utilizando a equação (3.10).

$$C(i)_{LS} = \frac{2}{3\pi} \cdot \frac{\sin(i) + (\pi - i) \cdot \cos(i)}{\cos(i/2) - \sin^2(i/2) \cdot \ln[\cot(i/4)]} \quad (3.10)$$

Podemos analisar os diferentes valores deste coeficiente para as diferentes lei de reflexão, fazemos isso para ângulos de fase ( $i$ ) variando entre  $0^\circ$  e  $90^\circ$ , para o sistema de Júpiter o ângulo de fase será sempre menor que  $12^\circ$ , Figura 43.

A diferença neste coeficiente, para estas duas leis de reflexão, se traduz em uma diferença máxima de  $4 \text{ mas}$  para Io e Europa e de  $6 \text{ mas}$  para Ganímedes e Calisto, para o caso em que de ângulo de fase é máximo ( $\sim 12^\circ$ ). Para o caso de uma aproximação, como o que desejamos é a distância relativa entre os dois satélites está diferença irá muitas vezes ser anulada, ou então assumirá valor máximo de  $2 \text{ mas}$ . Isso acontecerá apenas quando analisarmos uma aproximação envolvendo um dos satélites “pequenos” (Io ou Europa) e um dos satélites “grandes” (Ganímedes e Calisto), para um ângulo de fase alto (maior que  $10^\circ$ ).

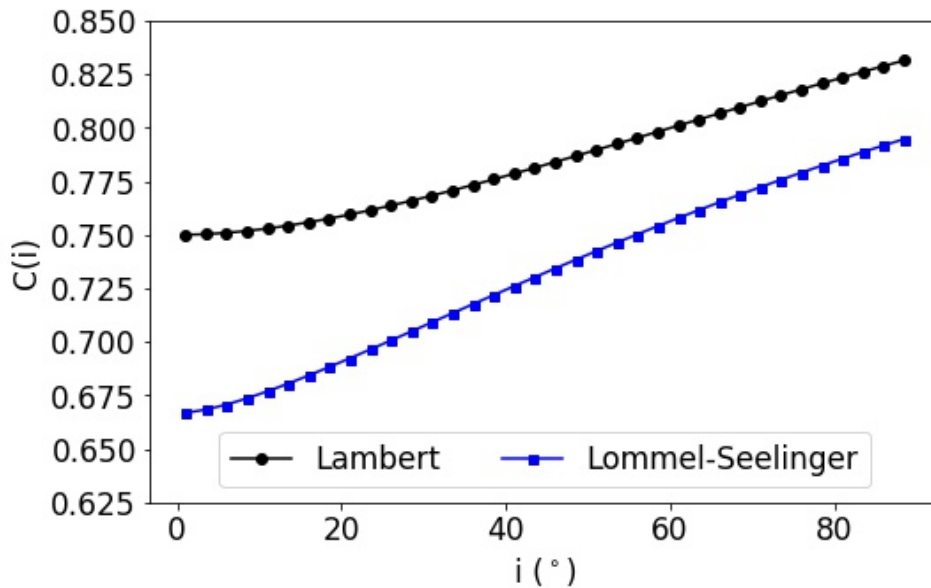


Figura 43 –  $C(i)$  para diferentes ângulos de fase ( $i$ ), utilizando a lei de reflexão de Lambert e a de Lommel-Seelinger.

Note que podemos utilizar leis de reflexão tão complexas quanto o desejado como a de Oren-Nayer (Oren; Nayar, 1994) ou a lei de Hapke (Hapke, 2012), assim como foi discutido ao analisarmos o perfil dos satélites durante os fenômenos mútuos, ver Capítulo 2, Seção 2.1.1. Entretanto, no caso das aproximações onde o que interessa é apenas o desvio entre o fotocentro e o centro de massa, não há uma diferença significativa entre os diversos modelos. Para as aproximações mútuas, utilizamos a Lei de Lambert.

Ao mudar a posição dos centros dos satélites este efeito afeta consideravelmente a determinação do instante central de uma aproximação mútua. Os desvios podem chegar, em casos extremos<sup>13</sup>, a 6 segundos ( $\sim 30$  mas).

#### 3.4.1.2 Refração atmosférica

Ao atravessar a atmosfera da Terra a luz dos astros é refratada de maneira gradual causando um desvio da posição observada para a posição real do astro, este desvio está relacionado com a massa de ar entre o observador e o astro. Esta diferença é tão maior quanto maior for a distância zenital do objeto (Green, 1985). Um modelo completo que permite computar com precisão o efeito da refração atmosférica da Terra foi publicado por R. Stone em 1996 (Stone, 1996). Aqui apresentaremos um breve resumo de como aplicar esta correção. Uma vez que as observações deste projeto foram realizadas o filtro Metano de banda estreita<sup>14</sup>, podemos desconsiderar qualquer efeito de refração cromática.

<sup>13</sup> Ângulo de fase maior que  $10^\circ$  e aproximação mútua envolvendo um satélite “grandes” e um “pequeno”.

<sup>14</sup> Comprimento de onda central de 889 nm com largura de 15 nm.

Antes é importante enfatizar que para uma aproximação mútua o que fará diferença de fato é apenas a diferença deste efeito entre os satélites que se aproximam. E isso só fará diferença mensurável em casos extremos, como será mencionado.

O desvio na posição do astro irá depender do ângulo de refração atmosférico ( $R(\lambda)$ ) e do ângulo paralático entre o polo celestial e o zênite como visto da posição do astro observado ( $\psi$ ).

$$\begin{pmatrix} \Delta\alpha \cos \delta \\ \Delta\delta \end{pmatrix}_{refrac} = -R(\lambda) \begin{pmatrix} \sin(\psi) \\ \cos(\psi) \end{pmatrix}. \quad (3.11)$$

Este ângulo paralático ( $\psi$ ) pode ser escrito em função da latitude do observador ( $\Phi$ ), da distância zenital do astro observado ( $z$ ), da sua declinação ( $\delta$ ) e do seu ângulo horário ( $HA$ ), como explicitado nas Equações (3.12) e (3.13).

$$\sin(\psi) = \frac{\cos(\Phi) \sin(HA)}{\sin(z)}, \quad (3.12)$$

$$\cos(\psi) = \frac{\sin(\Phi) - \sin(\delta) \cos(z)}{\cos(\delta) \sin(z)}. \quad (3.13)$$

Por outro lado, o ângulo de refração atmosférico ( $R(\lambda)$ ) dependerá do comprimento de onda observado ( $\lambda$ ), da distância zenital do astro observado ( $z$ ), a localização do observador na Terra (latitude –  $\Phi$  e altitude –  $h$ ) e de parâmetros relacionados com as condições atmosféricas, como o índice de refração atmosférico ( $n_{atm}$ ) e temperatura ( $T$ ).

$$R(\lambda) = A_1 \cdot \tan(z) + A_2 \cdot \tan^3(z), \quad (3.14)$$

os coeficientes  $A_1$  e  $A_2$  são descritos como

$$A_1 = k \cdot \gamma \cdot (1 - \beta), \quad (3.15)$$

$$A_2 = -k \cdot \gamma \cdot \left( \beta - \frac{\gamma}{2} \right). \quad (3.16)$$

Os termos  $\gamma$ ,  $\beta$  e  $\kappa$  são calculados utilizando as Equações (3.17), (3.18) e (3.19), onde a temperatura ( $T$ ) deve estar em graus Celsius e a altitude ( $h$ ) em metros.

$$\gamma = n_{atm} - 1, \quad (3.17)$$

$$\beta = 0,001254 \left( \frac{273,15 + T}{273,15} \right), \quad (3.18)$$

$$\kappa = 1 + 0,005302 \sin^2(\Phi) - 0,00000583 \sin^2(2\Phi) - 0,000000315 \cdot h. \quad (3.19)$$

Em sua publicação R. Stone apresenta as equações completas para determinação do índice de refração atmosférico ( $n_{atm}$ ) (Stone, 1996). Para tal, precisamos conhecer o

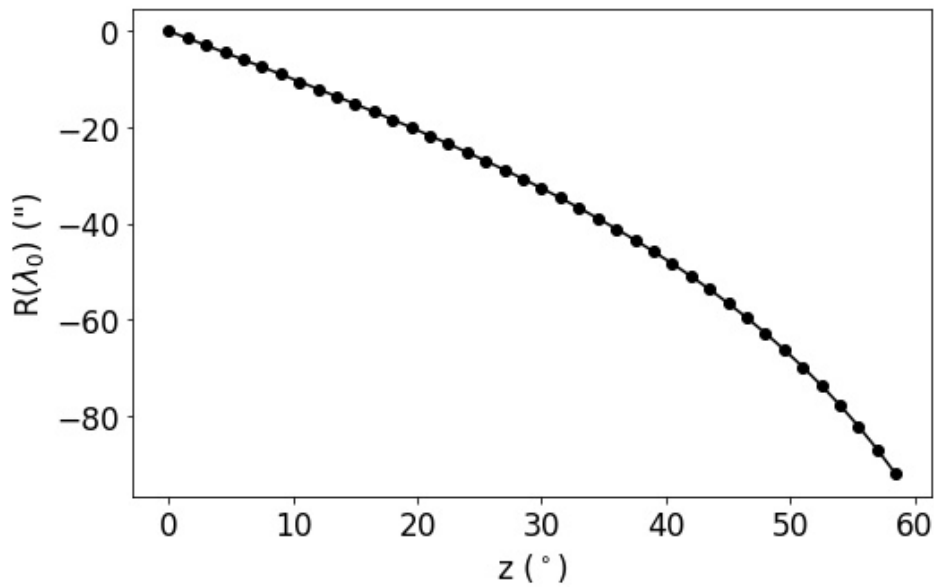


Figura 44 – Ângulo de refração atmosférica ( $R(\lambda_0)$ ) para diferentes distâncias zenitais ( $z$ ), para o comprimento de onda ( $\lambda_0$ ) de 889 nm que é o comprimento de onda central do filtro Metano.

comprimento de onda observado e os valores de temperatura, pressão e umidade para o momento da observação. Entretanto, nem todos observadores possuem os equipamentos adequados para medir estes parâmetros, logo optamos por utilizar a simplificação proposta por P.E. Ciddor em 1996 (Ciddor, 1996), onde o comprimento de onda observado ( $\lambda$ ) deve estar em micrômetros ( $\mu m$ ).

$$n_{atm} = 1 + \frac{0,05792105}{238,0185 - \lambda^{-2}} + \frac{0,00167917}{57,362 - \lambda^{-2}} \quad (3.20)$$

Por fim, utilizando as equações aqui descritas podemos calcular o ângulo de refração atmosférica ( $R(\lambda)$ ) para um observador no Observatório Pico dos Dias, utilizando o filtro Metano ( $\lambda = \lambda_0 = 889$  nm), a uma temperatura típica de  $15^\circ C$  para diferentes distâncias zenitais. Na Figura 44 apresentamos a variação deste ângulo de refração em função da distância zenital.

Como ambos os satélites estão próximos no plano do céu, eles possuem correções similares, mas como variam no tempo podem causar variações de até um segundo ( $\sim 5$  mas) no instante central para objetos com altas distâncias zenitais.

### 3.4.1.3 Aberração da luz

A aberração da luz é um fenômeno que causa um desvio na posição dos astros devido ao movimento do observador (ou da Terra). Este fenômeno possui diversas componentes que são causados por diferentes movimentos. Como exemplo, temos o movimento da Terra

em sua órbita em torno do Sol (aberração anual), o movimento do observador na superfície da Terra (aberração diurna) e o movimento do Sistema Solar em torno do centro da Galáxia (aberração secular) (Green, 1985; Kovalevsky; Seidelmann, 2004).

Assim como na refração atmosférica o que será relevante é a diferença deste efeito entre os dois satélites, o que será, na prática, muito pequeno. Por completeza esses efeitos são considerados na redução.

O efeito causado por este fenômeno astronômico pode ser descrito pelo ângulo  $K$  que é a razão entre a velocidade do movimento ( $v$ ) e a velocidade da luz ( $c = 299.792,5$  km/s), a direção desta correção será no sentido do movimento.

$$K = \frac{v}{c} . \quad (3.21)$$

No caso da aberração anual podemos separar este efeito nas componentes em  $\alpha$  e  $\delta$  utilizando a equação (3.22).

$$\begin{pmatrix} \Delta\alpha \cos \delta \\ \Delta\delta \end{pmatrix}_{\text{anual}} = K_A \begin{pmatrix} \cos \alpha \cos l_s \cos \epsilon + \sin \alpha \sin l_s \\ \cos l_s \cos \epsilon (\tan \epsilon \cos \delta - \sin \alpha \sin \delta) + \cos \alpha \sin \delta \sin l_s \end{pmatrix} , \quad (3.22)$$

onde  $l_s$  é a latitude eclíptica do Sol e  $\epsilon$  é o ângulo entre o plano da eclíptica e equador celeste ( $23,5^\circ$ ).

Neste caso  $K_A$  será a razão entre a velocidade da Terra em sua órbita em torno do Sol e a velocidade da luz, dessa forma teremos:

$$K_A = \frac{2\pi \cdot a}{yr \cdot \sqrt{(1 - e^2)} \cdot c} \cdot \cos(1'') = 20'',49552 , \quad (3.23)$$

onde  $a$  é o semi-eixo maior da órbita da Terra (149.600.000 km),  $yr$  é o ano sideral (31.558.150 segundos),  $e$  é a excentricidade da órbita da Terra (0,01672) e  $\cos(1'')$  é uma aproximação para converter de radianos para segundos de arco.

Por outro lado, a aberração diurna pode ser separada em componentes de  $\alpha$  e  $\delta$  utilizando a equação (3.24).

$$\begin{pmatrix} \Delta\alpha \cos \delta \\ \Delta\delta \end{pmatrix}_{\text{diurna}} = K_D \cdot \bar{\rho} \cdot \cos \Phi \begin{pmatrix} \cos(HA) \\ \sin(HA) \sin(\delta) \end{pmatrix} , \quad (3.24)$$

onde  $\bar{\rho}$  é a razão entre a distância do observador ao geocentro ( $\rho$ ) e o raio equatorial de Terra ( $R_{eq} = 6371,0$  km).



Neste caso  $K_D$  será a razão entre a velocidade de rotação do observador na superfície da Terra e a velocidade da luz, dessa forma teremos:

$$K_D = \frac{2\pi \cdot R_{eq}}{d_s \cdot c} \cdot \cos(1'') = 0'',3198, \quad (3.25)$$

onde,  $d_s$  é a duração do dia sideral em segundos (86.164 segundos).

No contexto das aproximações mútuas a aberração anual e a aberração diurna podem ser desprezadas uma vez que este efeito afeta ambos os satélites de forma similar. Para a aberração anual esta correção alcança valores da ordem de 0,07 *mas* e para a aberração diurna este efeito é ainda menor, de apenas 0,002 *mas*.

### 3.4.2 Pipeline: Mutual Approximation Reduction (MAR)

Após a determinação dos centroides dos satélites e de determinarmos as devidas correções astronômicas necessárias aplicamos o método discutido na Seção 3.1 para determinarmos o instante central e a sua incerteza. Como mencionado anteriormente também obtemos o parâmetro de impacto e a velocidade relativa entre os satélites no instante  $t_0$ , porém em unidades de pixels e pixels por segundo.

Para obtermos os parâmetros de interesse desenvolvemos uma *pipeline* de redução automatizada. Esta *pipeline* está escrita em PYTHON e utiliza funções de ASTROPY, NUMPY, MATPLOTLIB e SCIPY.

O funcionamento desta *pipeline* inicia utilizando as saídas fornecidas do pacote PRAIA com as posições  $(x, y)$  de todos os objetos nas imagens (em unidades de píxel) e o momento de cada imagem (instante de tempo em UTC, calibrado por GPS). A partir de uma escala de placa nominal a *pipeline* identifica os satélites na imagem, determina a separação entre os satélites que se aproximam e ajusta o polinômio de grau  $N$  determinado utilizando a curva de separação das efemérides. Após o ajuste o código aplica um *sigma-clip* para eliminação de pontos que são claramente *outliers* (diferença entre as separações observadas e o ajuste polinomial maior que  $2,5\sigma$ ) e refaz o ajuste, isso se repete até que nenhum ponto seja eliminado. Em sua maioria a eliminação das imagens está relacionado com movimentos nos telescópios durante a integração (imagens corridas), além disso contaminação de um outro satélite na proximidade (separação da ordem do *seeing* da imagem ou menor) também pode fazer com que as imagens sejam eliminadas.

Após o ajuste o software calcula as correções astronômicas e as aplica (fase solar, refração atmosférica, aberração). O resultado sai formatado e é incluído automaticamente na tabela de resultados (ver Tabelas 11, 12, 13 e 14) além de tabelas auxiliares contendo informações técnicas da observação (número de imagens, duração da observação, *seeing* médio da noite, distância zenital mínima e máxima, ângulo de fase, etc) e os respectivos gráficos de interesse, em especial a curva de separação (ver Figuras 45, 46, 47, 48, 49).

### 3.5 Resultados

As campanhas das aproximações mútuas contaram com a participação de cinco estações espalhadas pelo Sul e Sudeste do Brasil e uma estação no Sudeste da França. Obtivemos um total de 127 curvas de separação entre fevereiro de 2016 e julho de 2019. Observamos um total de 83 eventos. Um evento que ilustra esta campanha observacional é a aproximação entre Io e Europa que aconteceu dia 19 de abril de 2016, onde cinco observadores obtiveram dados simultaneamente (OPD, FOZ, GOA, UTFPR e OHP). As curvas de separações obtidas estão ilustradas nas Figuras 45, 46, 47, 48 e 49 onde os pontos em preto do painel superior são as separações medidas e a linha amarela são os ajustes polinomiais ao quadrado das separações. Os resíduos estão no painel inferior, em vermelho. A conversão de pixel para segundos de arco foi feita utilizando a escala de placa nominal de cada instrumentação, isso foi feito apenas para ilustração.

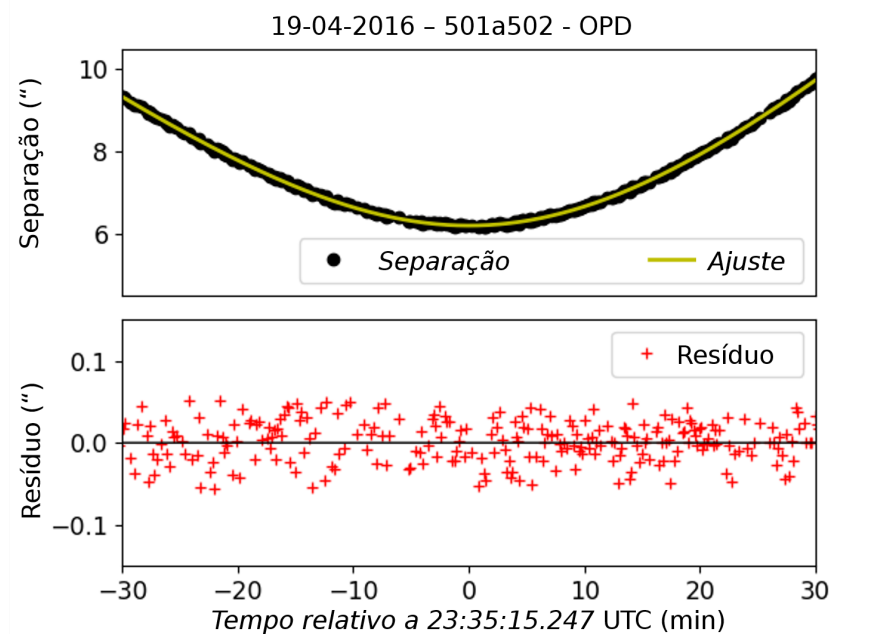


Figura 45 – Curva de separação observada pelo OPD para a aproximação entre Io e Europa que ocorreu no dia 19 de abril de 2016.

Note que temos a curva do OPD (Figura 45) onde o evento foi obtido regularmente, por outro lado a curva de FOZ (Figura 46) teve lacunas causadas por passagem de nuvens. O GOA (Figura 47) só pôde começar suas observações faltando apenas 10 minutos para o instante central devido às condições climáticas. As observações na UTFPR (Figura 48) foram, estrategicamente, separadas em diferentes blocos, isso foi motivado uma vez que as imagens feitas estavam em formato de vídeo (AVI) e este formato aumenta muito o seu tamanho físico conforme o número de *frames* obtidos aumenta. Por fim a observação no OHP (Figura 49) também foi feita sem irregularidades.

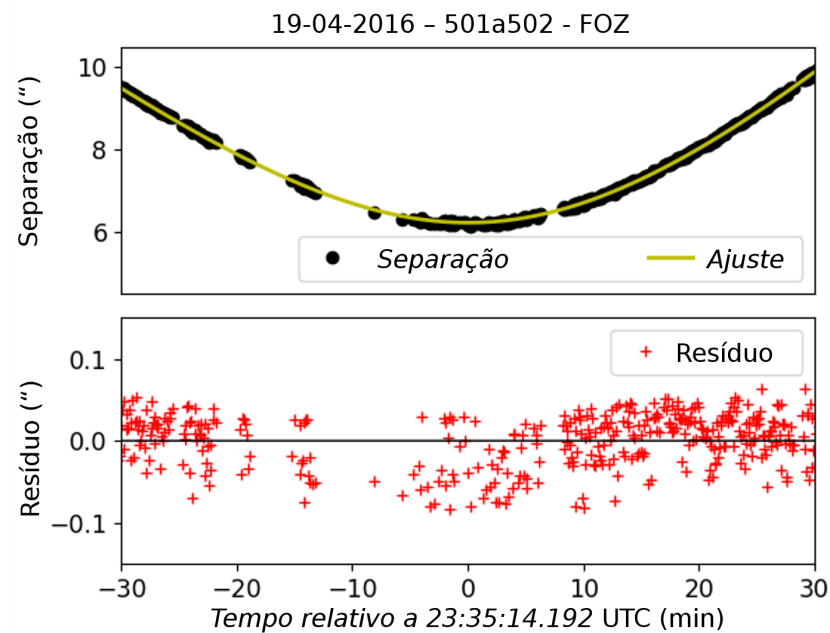


Figura 46 – Curva de separação observada por FOZ para a aproximação entre Io e Europa que ocorreu no dia 19 de abril de 2016.

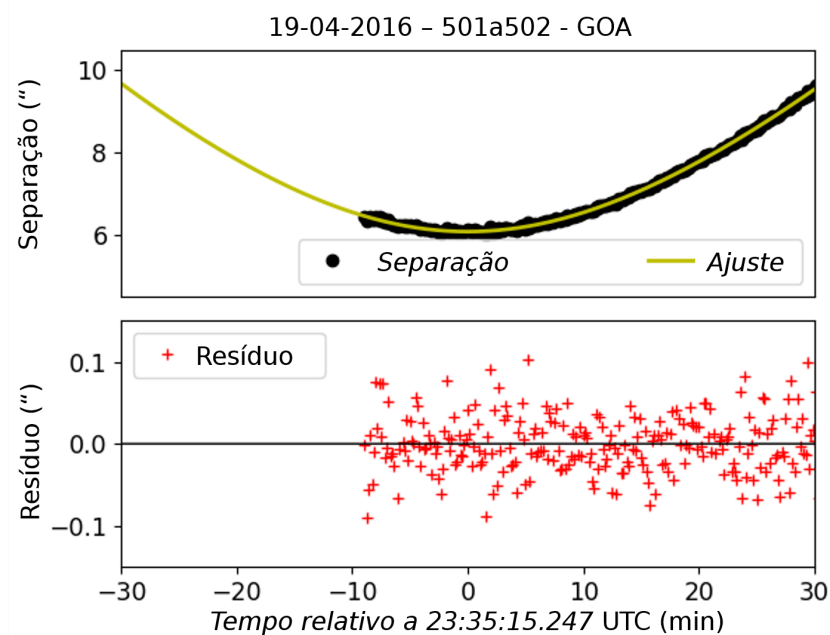


Figura 47 – Curva de separação observada pelo GOA para a aproximação entre Io e Europa que ocorreu no dia 19 de abril de 2016.

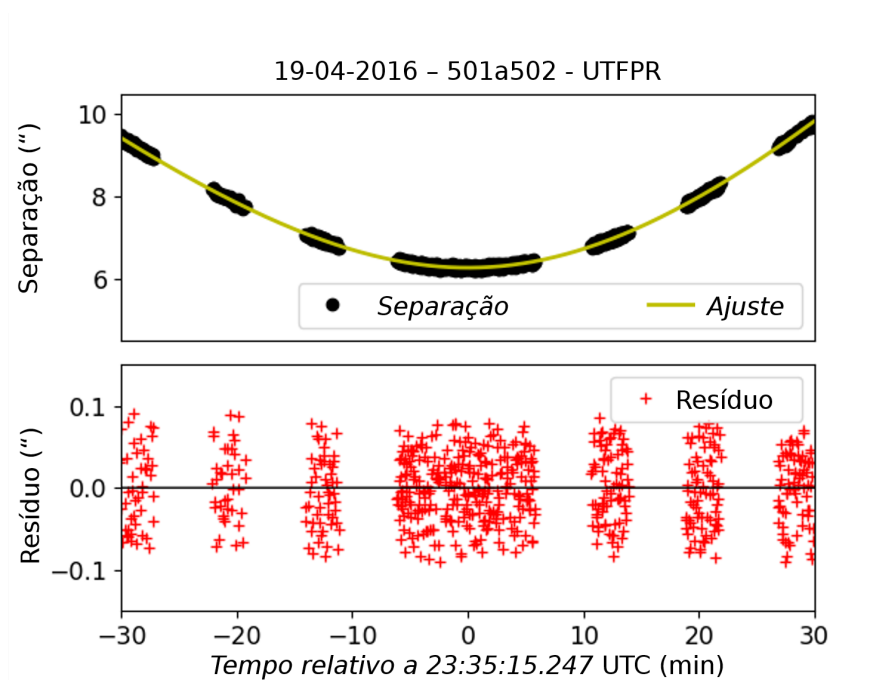


Figura 48 – Curva de separação observada pela UTFPR para a aproximação entre Io e Europa que ocorreu no dia 19 de abril de 2016.

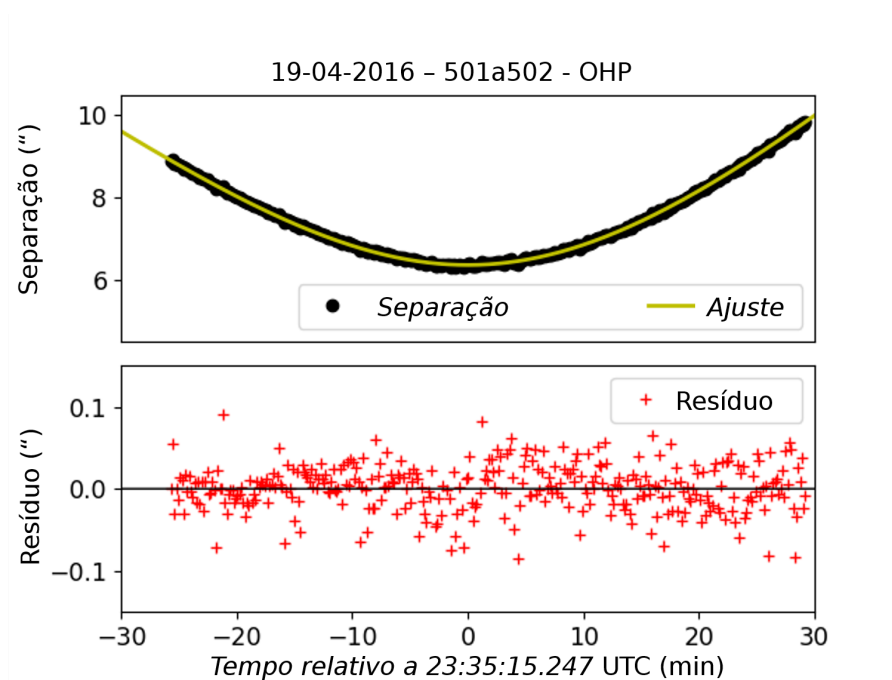


Figura 49 – Curva de separação observada pelo OHP para a aproximação entre Io e Europa que ocorreu no dia 19 de abril de 2016.

As diferenças entre os resultados obtidos e as efemérides DE435 e a *jup310* do JPL foram de -0,2, -4,8, -7,8, -0,5, e -5,5 *mas* e as suas precisões foram de 3,8, 8,2, 8,2, 12,0 e 5,6 *mas*, respectivamente. A conversão entre segundos de tempo e segundo de arco é realizada utilizando a velocidade relativa de cada evento. Note que estes valores concordam dentro de  $1\sigma$  e juntos representam um *offset* de -3,8 *mas* com um desvio padrão de 2,9 *mas*. Estes valores estão na Tabela 11 nas linhas realçadas em cinza claro.

Na Tabela 11 organizamos os resultados das 26 aproximações mútuas observadas em 2016. Nesta tabela listamos a data da observação, o evento, onde 501 significa Io, 502 Europa, 503 Ganímedes e 504 Calisto, o observador, seguindo a sigla definida na Tabela 10. A seguir, temos o valor do instante central observado em UTC ( $t_0$ ) sua incerteza ( $\sigma t_0$ ) em segundos e em *mas*, o *offset* ( $\Delta t_0$ ), também em segundos e em *mas*. Por fim, temos o identificador da aproximação (*id*) que é um número sequencial dado a cada aproximação observada. Nas Tabelas 12, 13 e 14 temos os mesmos parâmetros para os eventos observados em 2017, 2018 e 2019.

De todas as 127 curvas obtidas, em 84 (66%) obtivemos um instante central com precisão melhor que 10 *mas*, 112 (88%) possuem precisões melhores que 20 *mas* e 118 (92%) melhores que 30 *mas*. Um exemplo extremo é o caso da aproximação entre Io e Calisto que aconteceu no dia 12 de abril de 2016 (*id* = 10), neste caso a incerteza no instante central foi de  $\sim 50$  *mas*. A curva de separação deste evento está ilustrada na Figura 50. Note que este evento foi muito afetado por problemas climáticos. Neste evento tivemos uma lacuna de aproximadamente 20 minutos antes do instante central e as observações tiveram que ser interrompidas aproximadamente 15 minutos após o instante central devido a nuvens, este evento também está destacado em cinza claro na Tabela 11. Esta incerteza não é inesperada e a sua causa foi, em parte, explorada nas simulações analisadas (Seção 3.2).

A incerteza média obtida para os eventos foi de 10,9 *mas* ( $\sim 33$  km), um histograma contendo a distribuição das precisões obtidas está ilustrado na Figura 51. Ao compararmos com as efemérides obtemos uma média quadrática (RMS<sup>15</sup>) de 14,4 *mas* ( $\sim 44$  km) em relação as efemérides do DE435 e *jup310* e um valor de 18,1 *mas* ( $\sim 55$  km) utilizando as efemérides DE435 e a NOE-5-2010-GAL do IMCCE. Um conjunto de 25 curvas de separações foram selecionadas como exemplos e estão dispostas no Apêndice E.

---

<sup>15</sup> Do inglês, *Root Mean Square*

Tabela 11 – Resultados APPROX 2016.

Data (dd-mm-aaaa)	Evento	Obs.	$t_0$ (UTC) (hh:mm:ss,ss)	$\sigma_{t_0}$ (s)	$\sigma_{t_0}$ (mas)	$\Delta t_0$ (s)	$\Delta t_0$ (mas)	id
03-2-2016	502A503	OPD	04:48:01,1	4,2	30,4	+0,9	+ 6,3	1
08-2-2016	501A502	FOZ	06:29:38,4	0,6	2,6	+1,5	+ 6,8	2
15-2-2016	501A502	FOZ	08:39:28,5	1,1	4,8	-0,7	- 2,8	3
24-2-2016	501A503	OPD	01:53:25,5	1,1	7,1	-0,2	- 1,6	4
		FEG	01:53:27,3	4,0	24,7	+1,5	+ 9,6	4
25-2-2016	501A502	GOA	23:55:58,2	2,4	8,8	-1,6	- 6,0	5
04-3-2016	501A502	GOA	02:09:59,3	2,3	7,7	+1,8	+ 6,1	6
18-3-2016	501A502	OPD	06:53:17,0	2,5	5,9	+9,7	+22,4	7
02-4-2016	501A502	OPD	05:46:03,2	2,5	7,0	-3,2	- 9,2	8
		FOZ	05:45:57,1	2,2	6,4	-9,3	-26,7	8
		FEG	05:45:59,1	3,8	10,8	-7,4	-21,1	8
02-4-2016	501A504	OPD	23:24:20,4	1,2	6,6	-8,1	-44,9	9
		FOZ	23:24:22,4	1,4	7,5	-6,2	-33,9	9
		FEG	23:24:22,3	3,5	19,1	-6,3	-34,5	9
12-4-2016	501A504	OPD	04:35:29,7	8,9	51,6	+5,2	+30,3	10
		FOZ	04:35:31,1	1,1	6,4	+6,6	+38,3	10
		FEG	04:35:29,1	2,5	14,5	+4,7	+27,1	10
12-4-2016	501A502	FOZ	04:45:49,0	10,1	10,5	+19,1	+19,8	11
12-4-2016	502A504	FOZ	05:01:34,6	1,9	11,2	+0,0	+ 0,1	12
		FEG	05:01:36,1	4,2	25,2	+1,6	+ 9,8	12
12-4-2016	501A502	OPD	21:17:16,2	0,8	2,9	-7,2	-25,1	13
19-4-2016	501A502	OPD	23:35:15,3	1,0	3,8	-0,1	- 0,2	14
		FOZ	23:35:14,2	2,1	8,2	-1,3	- 4,8	14
		GOA	23:35:13,3	2,2	8,2	-2,1	- 7,8	14
		UTF	23:35:15,2	3,2	12,0	-0,2	- 0,6	14
		OHP	23:35:13,9	1,5	5,6	-1,4	- 5,5	14
20-4-2016	502A504	OHP	20:15:57,8	1,8	8,7	-3,6	-17,0	15
24-4-2016	501A503	OPD	22:35:12,0	0,5	3,7	-1,5	-11,6	16
		UTF	22:35:13,1	2,6	19,6	-0,4	- 3,3	16
29-4-2016	501A503	OPD	00:32:28,1	2,4	16,2	-1,4	- 9,2	17
		UTF	00:32:28,6	4,2	28,0	-0,9	- 5,8	17
02-5-2016	501A503	OPD	01:08:50,3	1,5	10,5	+0,5	+ 3,3	18
		FOZ	01:08:50,7	2,3	16,7	+0,8	+ 6,0	18
		FEG	01:08:49,1	1,8	12,7	-0,7	- 4,8	18
		UTF	01:08:51,1	4,5	32,1	+1,3	+ 9,2	18
03-5-2016	502A503	OPD	01:04:55,4	1,3	4,2	+5,4	+18,2	19
		UTF	01:04:55,5	1,9	6,4	+5,4	+18,4	19
06-5-2016	502A504	OPD	00:59:06,8	6,5	31,6	+3,2	+15,6	20
19-5-2016	502A503	FOZ	22:52:31,9	1,0	6,6	-1,4	- 9,1	21
27-5-2016	502A503	FEG	02:00:21,8	5,5	34,2	+0,1	+ 0,9	22
17-6-2016	501A502	OPD	00:48:02,9	1,3	9,0	-0,3	- 2,2	23
		FEG	00:48:07,0	4,8	34,3	+3,8	+26,7	23
28-6-2016	501A503	OPD	23:58:57,1	1,4	6,5	+0,2	+ 0,8	24
		FEG	23:58:59,0	1,1	5,2	+2,1	+ 9,7	24
29-6-2016	501A502	OPD	22:36:02,2	0,5	2,9	+1,2	+ 6,6	25
		FEG	22:36:02,9	1,2	6,7	+1,8	+10,3	25
08-7-2016	502A503	OPD	21:51:35,5	0,6	3,2	+3,0	+14,4	26
		FEG	21:51:32,6	3,3	16,2	+0,0	+ 0,2	26

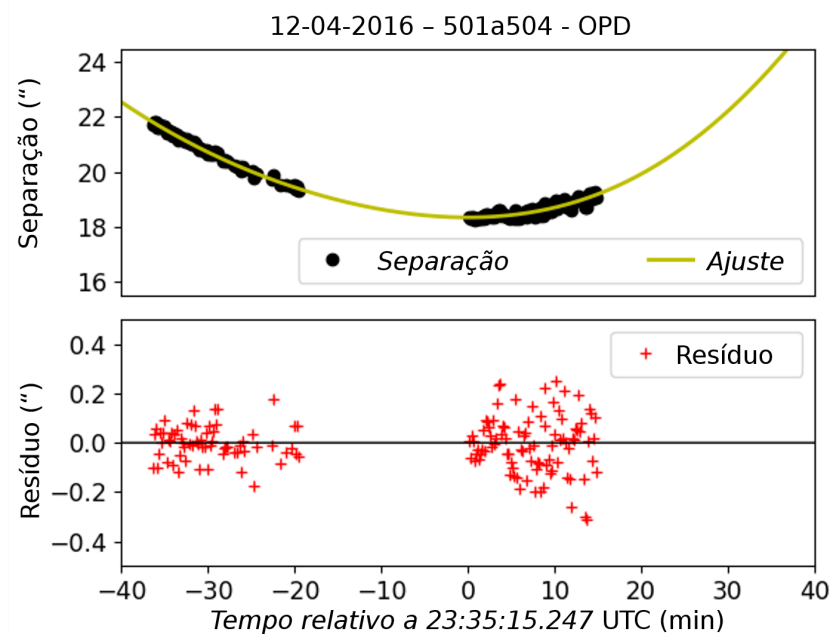


Figura 50 – Curva de separação observada pelo OPD para a aproximação entre Io e Calisto que ocorreu no dia 12 de abril de 2016. Note que aqui o resíduo está entre  $-0,5$  e  $0,5$  segundos de arco, diferente das Figuras 45, 46, 47, 48 e 49 que estão entre  $-1,5$  e  $1,5$  segundos de arco.

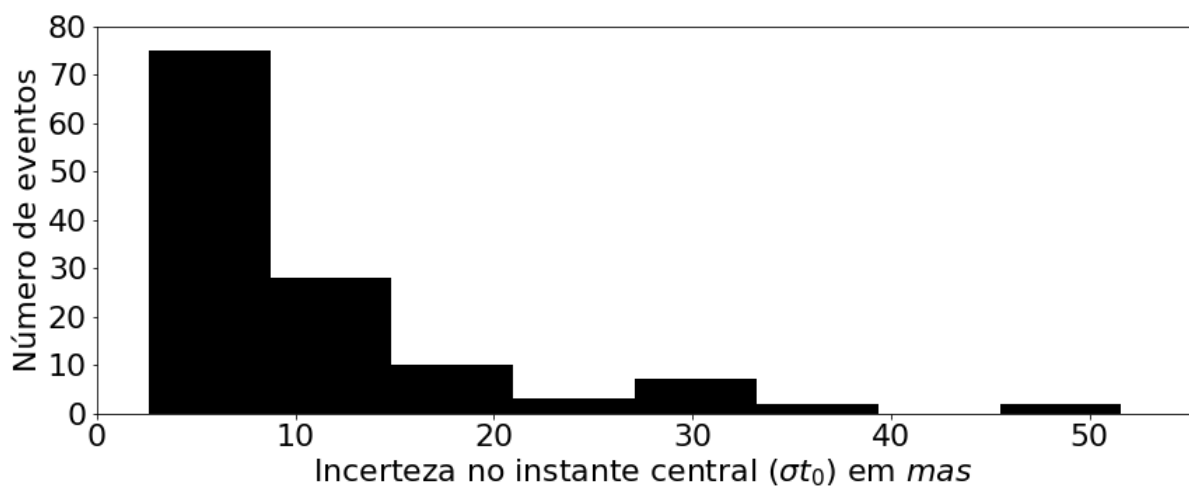


Figura 51 – Histograma das precisões dos resultados obtidos durante as campanhas das aproximações mútuas de 2016 a 2019.

Tabela 12 – Resultados APPROX 2017.

Data (dd-mm-aaaa)	Evento	Obs.	$t_0$ (UTC) (hh:mm:ss,ss)	$\sigma_{t_0}$ (s)	$\sigma_{t_0}$ (mas)	$\Delta t_0$ (s)	$\Delta t_0$ (mas)	id
07-2-2017	501A502	FOZ	04:36:54,1	1,0	7,5	+2,0	+14,4	27
26-2-2017	501A502	FOZ	04:32:43,5	1,3	9,0	+2,6	+17,7	28
27-2-2017	501A503	FOZ	03:36:51,3	1,1	5,7	+3,6	+18,8	29
07-3-2017	501A503	FOZ	03:00:44,4	32,9	31,0	-2,2	- 2,1	30
14-3-2017	501A503	FOZ	07:19:33,8	1,1	3,4	+0,9	+ 2,8	31
04-4-2017	501A502	OHP	20:43:34,4	0,7	6,3	+1,9	+17,9	32
06-4-2017	501A502	FEG	03:46:43,1	2,2	13,1	+3,9	+23,0	33
08-4-2017	502A503	FOZ	01:52:40,5	1,0	7,6	+2,3	+16,9	34
13-4-2017	501A502	FOZ	05:49:28,3	1,0	5,8	+1,8	+10,0	35
06-5-2017	501A503	GOA	02:16:30,2	1,7	12,1	+2,9	+20,9	36
08-5-2017	501A502	FOZ	01:11:26,5	1,0	4,5	+1,2	+ 5,5	37
13-5-2017	501A503	FOZ	04:47:32,1	1,0	7,0	+1,0	+ 6,7	38
15-5-2017	501A502	FEG	03:23:43,1	1,7	6,8	+2,0	+ 8,4	39
31-5-2017	502A503	FEG	22:30:36,2	27,9	14,7	+4,0	+ 2,1	40
08-6-2017	501A502	GOA	23:48:58,1	1,8	4,3	+2,9	+ 6,9	41
		FEG	23:48:57,1	7,5	17,6	+1,9	+ 4,4	41
23-6-2017	501A502	FOZ	23:17:09,0	1,1	2,8	+2,4	+ 5,7	42
		GOA	23:17:07,7	1,9	4,6	+1,2	+ 2,9	42
06-7-2017	502A503	FOZ	22:58:42,6	1,4	3,4	+1,0	+ 2,4	43
		FEG	22:58:41,1	19,4	48,3	-0,5	- 1,3	43
25-7-2017	501A502	FOZ	22:40:24,8	1,2	4,9	+2,9	+11,6	44
		FEG	22:40:21,3	3,3	13,1	-0,5	- 1,9	44
02-8-2017	503A504	FEG	23:38:20,0	7,7	28,7	+4,8	+17,6	45
10-8-2017	502A504	FOZ	23:41:23,6	48,2	30,6	-1,9	- 1,2	46
24-8-2017	501A503	FEG	22:35:37,6	6,6	16,1	+1,4	+ 3,3	47



Tabela 13 – Resultados APPROX 2018.

Data (dd-mm-aaaa)	Evento	Obs.	$t_0$ (UTC) (hh:mm:ss,ss)	$\sigma t_0$ (s)	$\sigma t_0$ (mas)	$\Delta t_0$ (s)	$\Delta t_0$ (mas)	id
05-03-2018	501A502	FOZ	05:10:29,7	0,6	3,7	-0,4	- 2,4	48
11-03-2018	501A503	OPD	05:40:46,7	1,8	4,4	+0,3	+ 0,6	49
		FOZ	05:40:47,0	2,0	5,0	+0,5	+ 1,3	49
12-03-2018	501A502	OPD	07:20:57,6	0,5	3,0	+0,1	+ 0,4	50
		FOZ	07:20:58,8	1,4	8,4	+1,2	+ 7,3	50
17-03-2018	501A502	FOZ	03:15:03,2	0,8	7,0	+0,2	+ 1,5	51
17-03-2018	502A504	FOZ	03:41:06,1	2,1	13,0	+1,8	+11,1	52
24-03-2018	501A502	FOZ	05:18:47,9	0,7	5,7	+1,4	+11,3	53
06-04-2018	501A502	OPD	02:40:32,0	1,2	8,8	+1,1	+ 8,2	54
		FOZ	02:40:31,4	1,0	7,7	+1,2	+ 8,5	54
11-06-2018	502A503	FEG	23:03:46,0	1,8	12,4	-0,4	- 3,0	55
		GOA	23:03:45,1	1,2	8,3	-1,3	- 9,2	55
19-06-2018	502A503	FOZ	01:55:19,9	1,1	7,6	+0,3	+ 2,4	56
22-06-2018	501A503	OPD	02:17:12,6	4,5	5,7	-2,0	- 2,5	57
		FOZ	02:17:12,5	5,6	7,0	-4,7	- 6,0	57
		FEG	02:17:09,5	7,2	9,0	-5,0	- 6,3	57
		GOA	02:17:09,9	6,5	8,2	-2,0	- 2,5	57
23-06-2018	501A502	FOZ	00:40:47,4	1,1	9,1	-1,9	-16,1	58
07-07-2018	501A503	OPD	00:30:56,8	1,1	6,3	-0,1	- 0,8	59
		FEG	00:30:57,0	2,2	12,5	+0,1	+ 0,4	59
11-07-2018	502A504	OPD	22:48:02,8	1,4	6,7	-0,4	- 1,5	60
12-07-2018	501A504	OPD	00:30:30,1	2,5	6,7	-1,2	- 3,2	61
12-07-2018	501A502	OPD	01:07:37,4	1,0	5,2	-0,5	- 2,5	62
		FEG	01:07:36,3	2,5	12,8	-1,6	- 8,1	62
13-07-2018	502A503	OPD	02:01:30,9	1,1	4,4	+0,1	+ 0,4	63
		FEG	02:01:29,9	5,4	20,9	-0,9	- 3,4	63
19-07-2018	501A504	OPD	01:52:08,6	1,9	8,9	-3,4	-16,2	64
		FOZ	01:52:09,3	2,1	10,1	-2,8	-13,4	64
07-08-2018	502A503	OPD	23:15:18,8	1,3	8,1	-1,0	- 6,6	65
12-08-2018	501A502	OPD	23:54:58,4	1,1	3,4	-1,2	- 3,5	66
		FOZ	23:54:58,5	1,2	3,5	-1,1	- 3,3	66

Tabela 14 – Resultados APPROX 2019.

Data (dd-mm-aaaa)	Evento	Obs.	$t_0$ (UTC) (hh:mm:ss,ss)	$\sigma t_0$ (s)	$\sigma t_0$ (mas)	$\Delta t_0$ (s)	$\Delta t_0$ (mas)	id
31-03-2019	501A502	OPD	05:00:53,8	1,4	4,5	-0,6	- 1,8	67
22-04-2019	501A504	OPD	07:10:45,4	4,1	9,9	+0,3	+ 0,8	68
02-05-2019	501A502	OPD	03:16:18,4	1,7	8,9	+1,8	+ 9,4	69
		FEG	03:16:16,3	2,3	12,1	-0,2	- 1,3	69
07-05-2019	501A503	OPD	03:28:09,4	0,6	3,9	-0,2	- 1,3	70
		OPD	03:28:09,0	1,0	6,6	-0,6	- 3,9	70
10-05-2019	502A504	FEG	04:45:07,3	0,6	3,6	-0,5	- 2,7	71
01-06-2019	502A503	FEG	04:10:18,6	3,6	26,6	-2,0	-14,7	72
03-06-2019	501A502	OPD	00:34:49,9	1,0	6,8	+1,2	+ 8,3	73
10-06-2019	501A502	FEG	02:35:37,0	1,8	12,4	-0,6	- 4,1	74
17-06-2019	501A502	OPD	04:36:08,2	1,0	7,2	+1,3	- 9,3	75
29-06-2019	501A502	OPD	02:19:48,3	1,0	9,0	-0,8	- 6,7	76
03-07-2019	501A503	FEG	02:10:02,1	7,7	19,7	-3,3	- 8,5	77
03-07-2019	501A503	OPD	23:21:03,0	0,6	3,5	+2,4	+15,0	78
		FEG	23:21:02,7	1,0	6,6	+1,6	+10,2	78
10-07-2019	501A503	FEG	03:44:57,9	5,4	16,4	-3,7	-11,5	79
11-07-2019	501A503	OPD	01:54:30,7	0,7	5,1	-0,8	- 5,7	80
		FEG	01:54:30,6	1,1	7,7	-0,9	- 6,3	80
11-07-2019	501A502	OPD	23:40:32,9	1,0	7,9	-1,9	-14,6	81
		FEG	23:40:34,7	1,3	10,0	-0,0	- 0,0	81
14-07-2019	502A504	OPD	02:10:30,0	1,1	5,0	+0,5	+ 2,0	82
19-07-2019	501A502	OPD	01:43:44,7	1,0	7,9	-1,9	-14,8	83
		FEG	01:43:45,1	1,1	8,7	-1,5	-11,7	83
20-07-2019	502A503	OPD	23:36:28,6	1,0	6,2	-1,3	- 8,2	84
28-07-2019	502A503	OPD	02:33:26,4	0,8	5,1	-0,6	- 3,6	85

### 3.6 Ajuste de efemérides usando as aproximações mútuas

As efemérides de um sistema de satélites são um conjunto de informações que permitem dizer as posições desses satélites para um dado instante de tempo. Estas informações se baseiam em duas frentes complementares: os modelos dinâmicos e as posições observadas. O ajuste destas posições é feito usualmente utilizando as equações variacionais (Lainey; Duriez; Vienne, 2004; Lainey; Arlot; Vienne, 2004).

Para o caso de uma aproximação mútua o observável de interesse é o instante central ( $t_0$ ), logo deveríamos, em princípio, resolver a equação diferencial  $\frac{\partial t_0}{\partial c_l}$  para obtermos a Equação condicional (3.26).

$$t_0^o - t_0^c = \Delta t_0 = \sum \frac{\partial t_0^c}{\partial c_l} \Delta c_l, \quad (3.26)$$

onde  $t_0^c$  é o instante central obtido do modelo dinâmico e  $t_0^o$  é o instante central obtido das observações e a diferença  $t_0^o - t_0^c = \Delta t_0$  representa o *offset*.

Entretanto, a Equação (3.26) não pode ser resolvida analiticamente e uma abordagem numérica consumiria muito tempo de processamento, tornando-o infactível (Emelyanov, 2017). Logo, é necessário desenvolvermos equações de condições que sejam equivalentes e que possam ser implementadas nos ajustes de órbitas.

Relembrando, o instante central ( $t_0$ ) é o instante de tempo onde a separação entre dois satélites ( $i$  e  $j$ ) no plano do céu ( $s_{ij}$ ) é mínima. Em outras palavras, podemos dizer que a sua derivada em função do tempo é nula  $\left(\frac{ds^o}{dt}(t_0) = 0\right)$ . Dessa forma podemos então escrever a Equação (3.27):

$$\frac{ds^o}{dt}(t_0) - \frac{ds^c}{dt}(t_0) = \sum \frac{\partial}{\partial c_l} \left( \frac{ds^c}{dt}(t_0) \right) \Delta c_l, \quad (3.27)$$

onde  $\frac{ds^c}{dt}(t_0)$  é o valor computado pelo modelo dinâmico e a diferença  $\frac{ds^o}{dt}(t_0) - \frac{ds^c}{dt}(t_0)$  representa o *offset*. Esta equação é mais adequada no ajuste das órbitas dos satélites.

A separação ( $s_{ij}$ ) entre dois satélites pode ser descrita como:

$$s_{ij} = \sqrt{\Delta x_{ij}^2 + \Delta y_{ij}^2}, \quad (3.28)$$

onde

$$\Delta x_{ij} \simeq (\alpha_i - \alpha_j) \cos(\delta_m), \quad (3.29)$$

$$\Delta y_{ij} \simeq \delta_i - \delta_j, \quad (3.30)$$

$$\delta_m = \frac{\delta_i + \delta_j}{2}, \quad (3.31)$$

$$(3.32)$$

onde  $\delta_m$  é uma declinação média entre os dois satélites, esta é a aproximação de primeira ordem da projeção gnomônica. As derivadas temporais das Equações (3.29), (3.30) e (3.31) estão descritas nas Equações (3.33), (3.34) e (3.35).

$$\Delta\dot{x}_{ij} \simeq (\dot{\alpha}_i - \dot{\alpha}_j) \cos(\delta_m) - (\alpha_i - \alpha_j) \sin(\delta_m) \dot{\delta}_m, \quad (3.33)$$

$$\Delta\dot{y}_{ij} \simeq \dot{\delta}_i - \dot{\delta}_j, \quad (3.34)$$

$$\dot{\delta}_m = \frac{\dot{\delta}_i + \dot{\delta}_j}{2}. \quad (3.35)$$

Derivando a Equação (3.28) no tempo obtemos a Equação (3.36):

$$\frac{ds_{ij}}{dt} = \frac{\Delta x_{ij} \Delta\dot{x}_{ij} + \Delta y_{ij} \Delta\dot{y}_{ij}}{s_{ij}}. \quad (3.36)$$

Então, derivamos a Equação (3.36) em relação aos parâmetros  $c_l$  e chegamos a Equação (3.37):

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial c_l} \left( \frac{ds_{ij}^c}{dt}(t_0) \right) &= \frac{1}{s_{ij}} \times \left[ \Delta\dot{x}_{ij} \frac{\partial \Delta x_{ij}}{\partial c_l} + \Delta x_{ij} \frac{\partial \Delta\dot{x}_{ij}}{\partial c_l} \right. \\ &\quad \left. + \Delta\dot{y}_{ij} \frac{\partial \Delta y_{ij}}{\partial c_l} + \Delta y_{ij} \frac{\partial \Delta\dot{y}_{ij}}{\partial c_l} \right] \\ &\quad - \frac{1}{s_{ij}^3} \times [\Delta x_{ij} \Delta\dot{x}_{ij} + \Delta y_{ij} \Delta\dot{y}_{ij}] \\ &\quad \times \left[ \Delta x_{ij} \frac{\partial \Delta x_{ij}}{\partial c_l} + \Delta y_{ij} \frac{\partial \Delta y_{ij}}{\partial c_l} \right]. \end{aligned} \quad (3.37)$$

Dessa forma, podemos escrever a Equação de condição (3.27) usando a Equação (3.37) e assim utilizar o instante central no ajuste de efemérides. Note que os instantes centrais dos fenômenos mútuos podem ser ajustados de mesma forma. Este método é original e foi publicado por nosso grupo (Morgado et al., 2019b). Nikolay Emelyanov testou esse método e provou a sua eficiência no ajuste de efemérides dos satélites galileanos utilizando diferentes tipos e conjuntos de observações (Emelyanov, 2017)<sup>16</sup>.

<sup>16</sup> À época o nosso método foi fornecido ao N. Emelyanov na forma de uma *private communication*



## 4 Ocultação estelar por Europa – 31-03-2017

Uma ocultação estelar é quando um objeto do Sistema Solar cobre uma estrela para um observador na Terra. Estes eventos permitem a determinação de tamanhos e formas com precisões de poucos quilômetros (Sicardy et al., 2011; Braga-Ribas et al., 2013; Benedetti-Rossi et al., 2016; Leiva et al., 2017), eventualmente podendo detectar até mesmo a topografia do objeto ocultador (Dias-Oliveira et al., 2017). Além disso, estes eventos nos permitem estudar as vizinhanças dos objetos como: atmosferas (Dias-Oliveira et al., 2015; Sicardy et al., 2016), anéis (Braga-Ribas et al., 2014; Ortiz et al., 2017; Bérard et al., 2017), jatos (Ortiz et al., 2015), entre outros.

Uma vez que a forma é bem determinada podemos obter posições com precisões melhores que 5 quilômetros (Leiva et al., 2017; Desmars et al., 2019). Esta qualidade está embasada em uma posição estelar de alta precisão, proveniente do catálogo *Gaia* DR2 (Lindegren et al., 2018) e uma posição relativa do objeto alvo em relação à estrela com grande precisão. A Figura 52 é uma ilustração de uma ocultação estelar como vista por observadores na Terra. Como a estrela está muito longe ao compararmos com as dimensões do Sistema Solar podemos considerar que a sombra na Terra terá mesmas dimensões que o objeto ocultador.

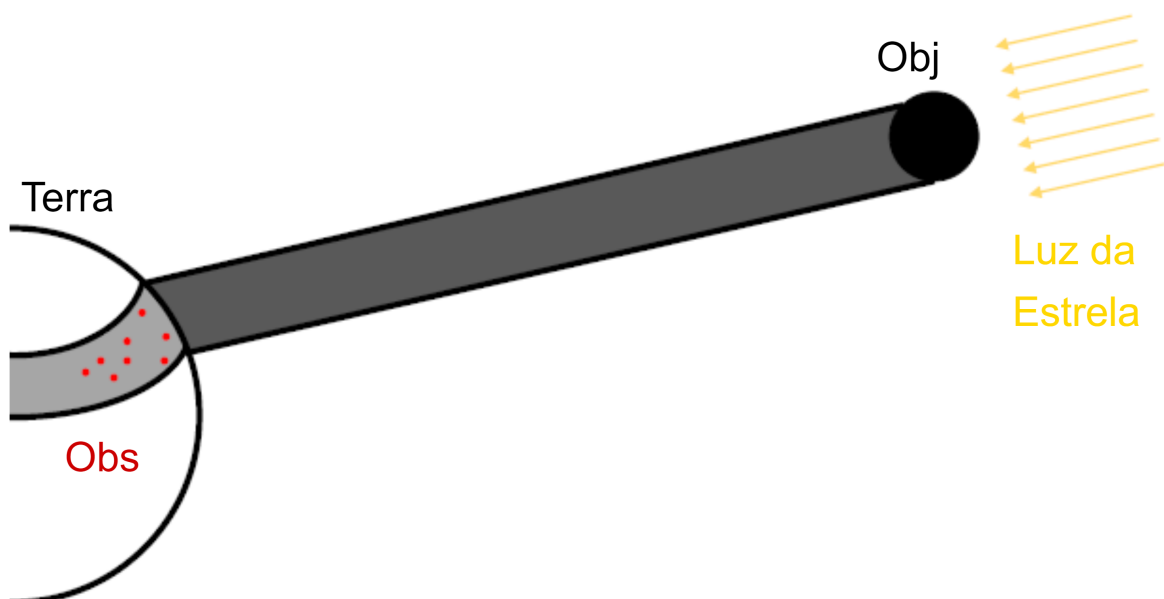


Figura 52 – Ilustração de uma ocultação. A luz da estrela é ocultada por um objeto do Sistema Solar criando uma sombra sobre a Terra (cinza claro), ao posicionarmos observadores (pontos vermelhos) distribuídos ao longo da região de sombra conseguimos observar esta ocultação.

No contexto dos satélites galileanos de Júpiter a técnica das ocultações estelares se apresenta como um método alternativo e independente capaz de obter tamanhos e formas com precisões comparáveis às obtidas por sondas. Além disso, podemos obter posições com precisões de poucos quilômetros. A dificuldade de se aplicar esta técnica às luas galileanas é que a estrela ocultada precisa ser suficientemente brilhante (mag. G menor que 12) para que a queda de luz seja maior que 1%. No passado já foram observadas uma ocultação estelar por Io (Taylor, 1972) e duas por Ganímedes (Carlson et al., 1973; D’Aversa et al., 2017).

Esta dificuldade pode ser parcialmente superada quando Júpiter estiver atravessando uma região do céu com alta densidade de estrelas. Entre 2019 e 2020 Júpiter terá o plano da nossa galáxia como plano de fundo (Gomes-Júnior et al., 2016). Este é um momento oportuno para aplicarmos a técnica das ocultações estelares aos satélites jovianos. Esta configuração acontecerá novamente apenas em 2031. A Figura 53 contém as efemérides de Júpiter sobreposta ao mapa de densidade de estrelas do *Gaia* DR1 (Clementini et al., 2016). Note que entre dezembro de 2018 e novembro de 2020 Júpiter estará em uma região com grande densidade de estrelas, o que aumenta muito a probabilidade de uma ocultação estelar por suas luas.

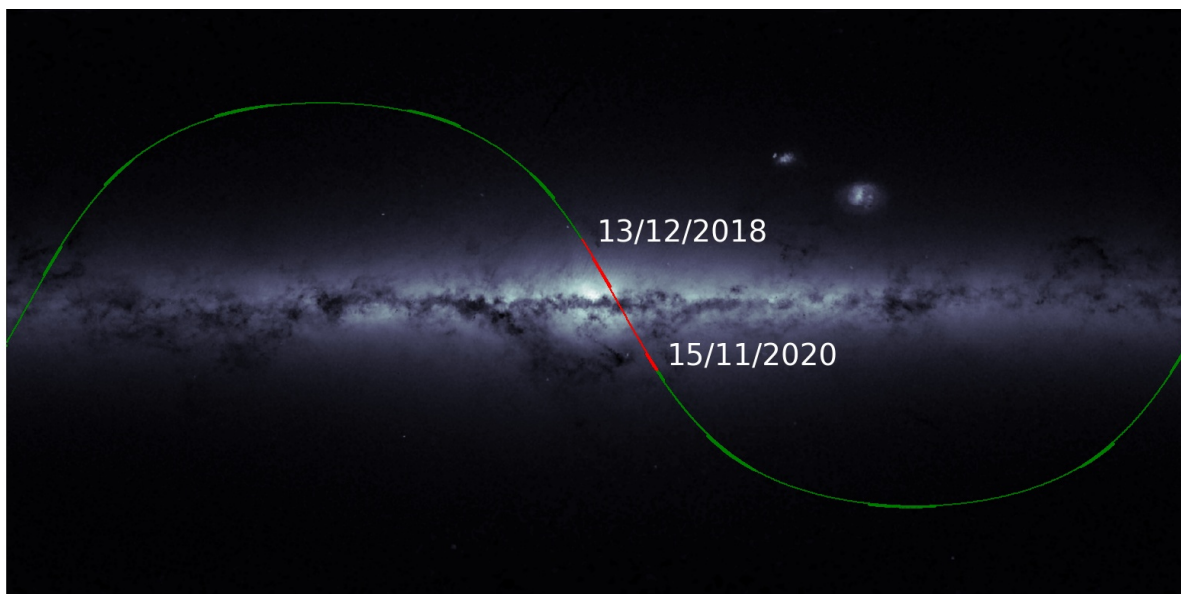


Figura 53 – Sobreposição das efemérides de Júpiter com o catálogo Gaia DR1, em coordenadas galácticas. A escala de cinza define a densidade estelar da região, em verde temos as posições de Júpiter entre janeiro de 2009 e janeiro de 2022. Em vermelho temos Júpiter entre 13/12/2018 e 15/11/2020 tendo como plano de fundo a região central da galáxia.

Estes eventos podem ser previstos ao compararmos as efemérides dos satélites, ao longo do tempo, com um catálogo de estrelas. Uma vez que a sombra do objeto alvo esteja atravessando uma região na Terra propícia à observação, uma campanha é organizada.

Por fim, os parâmetros de interesse vêm da análise combinada das curvas de luz obtidas pelos diferentes observadores.

Na Seção 4.1 apresentamos o método para previsão das ocultações estelares e nas Seções 4.2, 4.3 e 4.4 apresentamos a campanha observacional, o método de redução e os resultados obtidos desta ocultação. Na Seção 4.5 apresentamos brevemente as campanhas observacionais de outros dois eventos que aconteceram em julho de 2019 e ainda serão analisados.

Estes resultados foram organizados na forma de uma *Letter to the Editor* publicado pela *Astronomy & Astrophysics* em 2019 (Morgado et al., 2019a). Este trabalho recebeu reconhecimento internacional e foi destaque em uma matéria<sup>1</sup> produzida pela *European Space Agency* (ESA).

## 4.1 Previsão e seleção dos eventos

Para prevermos uma ocultação estelar primeiro devemos comparar as efemérides de um objeto de interesse com as posições das estrelas do campo proveniente de catálogos astrométricos, no nosso caso utilizamos em primeiro momento o *Gaia* DR1 (Clementini et al., 2016) e atualizamos com *Gaia* DR2 (Lindegren et al., 2018), após o seu lançamento. Um diagrama simplificado que nos permite visualizar os parâmetros de uma ocultação estelar está disposto na Figura 54. Para um intervalo de tempo suficientemente pequeno ( $\Delta t = t_2 - t_1$ ) podemos aproximar o movimento do objeto em relação à estrela que será ocultada como um movimento linear no plano do céu.

Em primeiro momento a estrela é considerada como uma fonte de luz pontual, uma ocultação estelar irá acontecer se a separação ( $s(t)$ ) aparente no plano do céu entre o centro do objeto estudado e a estrela for menor do que o raio do satélite para algum observador. A mínima separação entre o centro do satélite e a estrela ( $s_0$ ) é também denominada como *Closest Approach* (CA), o instante central é o instante de tempo que esta máxima aproximação aparente acontece ( $t_0$ ). A velocidade relativa ( $v$ ) é calculada a partir do movimento aparente entre o satélite e a estrela. Por fim, podemos definir o ângulo de posição ( $P/A$ ) da ocultação que será o ângulo entre o Norte e a posição de maior aproximação (medido no sentido horário).

Fizemos a previsão dos eventos em que algum dos satélites galileanos ocultaria uma estrela entre 2017 e 2021. Os eventos de interesse foram selecionados levando em consideração a queda de luz (maior que 0,005 magnitudes), a distância do satélite à Júpiter (maior que  $2R_J$ )<sup>2</sup> e a região da Terra por onde a sombra passaria (região com observadores

<sup>1</sup> Website: <[http://www.esa.int/Our\\_Activities/Space\\_Science/Gaia/Astronomers\\_spy\\_Europa\\_blocking\\_distant\\_star\\_thanks\\_to\\_Gaia](http://www.esa.int/Our_Activities/Space_Science/Gaia/Astronomers_spy_Europa_blocking_distant_star_thanks_to_Gaia)>

<sup>2</sup> A única exceção é o evento onde Io oculta uma estrela de magnitude G 5,1.



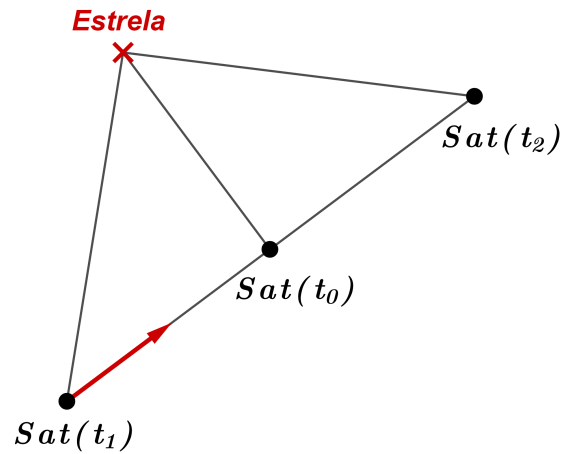


Figura 54 – Geometria no plano do céu de uma ocultação estelar.

colaboradores). Por fim, selecionamos 11 eventos entre 2017 e 2021, os parâmetros destes eventos estão organizados na Tabela 15. São três ocultações por Io, quatro por Europa, uma por Ganímedes e três por Calisto.

Tabela 15 – Ocultações estelares previstas para o período entre 2017 e 2021

Satélite	Tempo (UTC)	$s_0$ (arcsec)	$v$ (km/s)	P/A ( $^\circ$ )	$Gmag^*$	$\Delta mag$
502	2017-03-31 06:44	0,09	17,8	19,98	9,5	0,030
502	2019-05-06 20:32	0,58	23,1	183,07	10,9	0,008
502	2019-06-04 02:26	0,12	27,3	4,46	9,1	0,037
504	2019-06-05 23:12	0,90	21,0	182,86	10,2	0,020
501	2019-09-09 02:33	0,26	18,1	189,87	11,0	0,008
501	2019-09-21 13:08	1,22	26,5	7,97	11,3	0,007
504	2020-06-20 16:03	1,45	18,9	348,44	10,9	0,012
502	2020-06-22 02:09	2,07	26,1	348,23	11,3	0,005
501	2021-04-02 10:24	1,02	16,5	344,64	5,8	0,740
503	2021-04-25 07:55	0,44	27,7	160,79	11,1	0,005
504	2021-05-04 23:01	0,90	16,3	342,43	10,4	0,027

Tendo esses parâmetros é possível criarmos um mapa de predição do evento. A Figura 55 é um exemplo de um mapa de predição, selecionamos o evento em que Europa ocultou uma estrela de magnitude G 9,50 (linha realçada em cinza claro da Tabela 15). Os mapas de todas as ocultações listadas na Tabela 15 estão dispostos no Apêndice F.

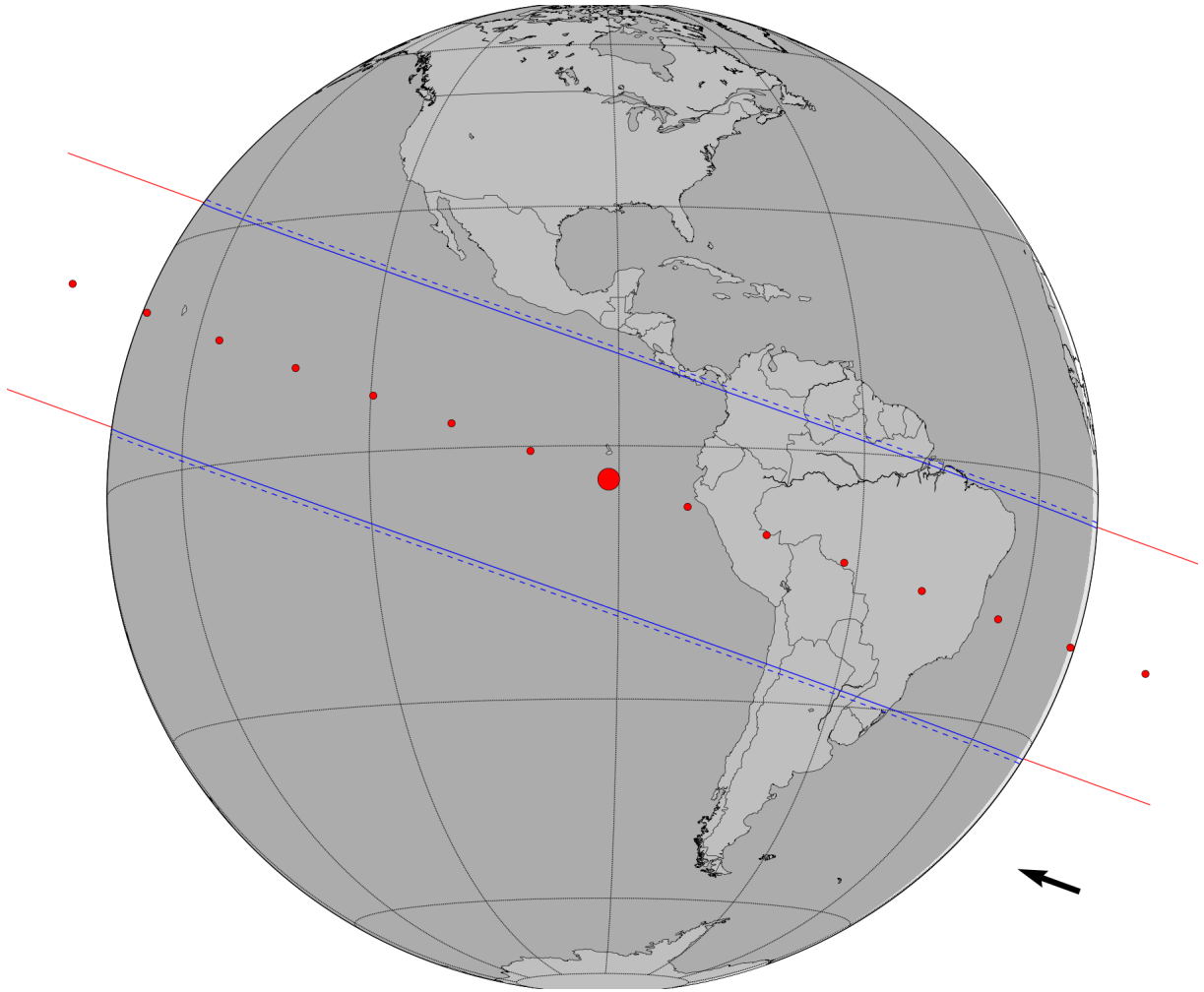


Figura 55 – Ocultação estelar de uma estrela de magnitude G 9,5 por Europa em 31 de março de 2017. As linhas azuis demarcam o diâmetro do satélite e as linhas azuis pontilhadas demarcam a incerteza na órbita de 20 *mas*. Os pontos vermelhos representam o centro da sombra do satélite a cada minuto, o ponto maior é instante de máxima aproximação entre a sombra do objeto e o geocentro ( $t_0$ ). A velocidade deste evento foi de 17,78 km/s e a seta preta no canto inferior direito representa o sentido do movimento da Sombra.

## 4.2 Campanha observacional

Dos eventos listados na Tabela 15, organizamos uma campanha para a observação do evento onde Europa ocultou uma estrela de magnitude G 9,5 em 31 de março de 2017. A posição (e incertezas) da estrela ocultada foi atualizada utilizando os movimentos próprios e paralaxe para o momento da ocultação (06:44:00 UTC). Esta posição atualizada e a magnitude G da estrela (GDR2) estão descritas em (4.1).

$$\begin{aligned}
\alpha_{star} &= 13^h 12^m 15^s,54296 \pm 0,16 \text{ mas} , \\
\delta_{star} &= -05^\circ 56' 48'',7526 \pm 0,12 \text{ mas} , \\
Gmag &= 9.5065 .
\end{aligned}
\tag{4.1}$$

Como podemos ver no mapa de predição na Figura 55 a Sombra de Europa cruzou uma grande parte da América do Sul. A campanha organizada contou com nove estações espalhadas em sete sítios no Brasil, um no Chile (San Pedro de Atacama) e um na Venezuela (Mérida). Destas nove estações, apenas quatro foram capazes de observar devido às condições climáticas (OPD/B&C, OPD/ROB, FOZ e OBSPA). Destas quatro estações, uma (OPD/ROB) teve que ser eliminada devido à baixa razão sinal sobre ruído e baixa resolução temporal. Maiores informações sobre os sítios, instrumentações e observadores estão dispostas na Tabela 16<sup>3</sup>. Sítios que não possuem informações de filtro são aqueles em que não foi possível fazer nenhuma imagem. Sítios que não possuem apenas informações de tempo de exposição são aqueles em que imagens testes foram feitas, mas o tempo fechou poucos minutos antes do evento.

Na Figura 56 reproduzimos o mapa da ocultação com um zoom na região onde tivemos observadores, cada sítio está demarcado no mapa.

### 4.3 Redução e análise individual

Inicialmente cada observação é tratada individualmente. As imagens são corrigidas de *Bias* e *Flat-Field* usando procedimentos padrões já tratados nessa tese, uma fotometria diferencial de abertura foi realizada nas imagens do evento para obtermos as curvas de luz, esta fotometria foi feita utilizando o pacote PRAIA (Assafin et al., 2011). A abertura foi escolhida automaticamente para se otimizar a razão sinal sobre ruído da curva de luz.

A partir das curvas de luz determinamos os instantes de ingresso e egresso, estes são os instantes em que a luz da estrela desaparece e reaparece, fazendo um ajuste através da minimização do  $\chi^2$ . Para determinarmos estes instantes utilizamos um modelo de caixa convoluído pela difração de Fresnel, diâmetro da estrela (no plano do satélite) e tempo de exposição das imagens. Os instantes de ingresso e egresso são ajustados separadamente e os seus valores são aqueles que minimizam o  $\chi^2$ . As incertezas ( $1\sigma$ ) podem ser determinadas para os instantes de tempo onde os  $\chi^2$  são menores que  $\chi_{min}^2 + 1$ .

A escala da difração de Fresnel ( $D_{rf}$ ) pode ser calculada utilizando o comprimento

<sup>3</sup> O mapa contendo as localizações desses sítios está disposto no Apêndice C.

Tabela 16 – Lista de observadores da ocultação de uma estrela GDR2 por Europa em 31 de março de 2017.

Cidade/Estado Sigla Status	Longitude Latitude Altura	Observadores	Abertura CCD Filtro	Tempo de exposição (s) ciclo (s)
Brazópolis/MG	-45° 34' 57"	G. Benedetti-Rossi	60 cm	0,60
OPD/B&C	-22° 32' 07"	M. Assafin	IXon-EM	0,63
<b>Corda positiva</b>	1,864 km		Metano <sup>1</sup>	
Foz do Iguaçu/PR	-54° 35' 37"	D. I. Machado	28 cm	1,00 <sup>2</sup>
FOZ	-25° 26' 05"	L. L. Trabuco	Raptor	1,00 <sup>2</sup>
<b>Corda positiva</b>	0,184 km		Clear <sup>3</sup>	
San Pedro de Atacama	-68° 10' 48"	A. Maury	40 cm	0,40
OBSPA	-22° 57' 08"	J. Fabrega	ProLine	1,41
<b>Corda positiva</b>	2,397 km		R <sup>4</sup>	
Mérida	-70° 52' 22"	G. R. Navas	100 cm	–
CIDA	+08° 47' 26"		ProLine	
Tempo fechado	0,026 km		R <sup>4</sup>	
Brasília/DF	-47° 54' 40"	P. Cacella	50 cm	–
DHO	-15° 53' 30"		ASI174MM	
Tempo fechado	1,064 km		–	
Brazópolis/MG	-45° 34' 57"	W. Schoenell	40 cm	0,10
OPD/ROB	-22° 32' 08"		ASCOM	7,72
Baixo SNR	1,864 km		R <sup>4</sup>	
Guaratinguetá/SP	-45° 11' 25"	R. Sfair	40 cm	–
FEG	-22° 48' 05"	T. de Santana	Raptor	
Tempo fechado	0,543 km	O. C. Winter	–	
Curitiba/PR	-49° 11' 46"	F. Braga-Ribas	25 cm	–
UTFPR	-25° 28' 25"	A. Crispim	Watec	
Tempo fechado	0,861 km	F. Rommel	Clear <sup>3</sup>	
Oliveira/MG	-43° 59' 03"	C. Jaques	45 cm	–
SONEAR	-19° 52' 55"	E. Pimentel	ML FLI16803	
Tempo fechado	0,982 km	J. R. de Barros	–	

<sup>1</sup> Filtro Metano de banda estreita ( $\lambda = 889$  nm;  $\Delta\lambda = 15$  nm).<sup>2</sup> Após aplicarmos a técnica de combinação de imagens (ver subseção 4.3.2)<sup>3</sup> Sem filtro.<sup>4</sup> Filtro R do sistema *Johnson* ( $\lambda = 700$  nm;  $\Delta\lambda = 220$  nm).

de onda central da observação ( $\lambda$ ) e a distância entre o observador e o objeto ( $d$ ).

$$D_{rf} = \sqrt{\frac{\lambda \cdot d}{2}} \approx 0,5 \text{ km} . \quad (4.2)$$

O diâmetro da estrela pode ser obtido de catálogos, ou então inferido utilizando

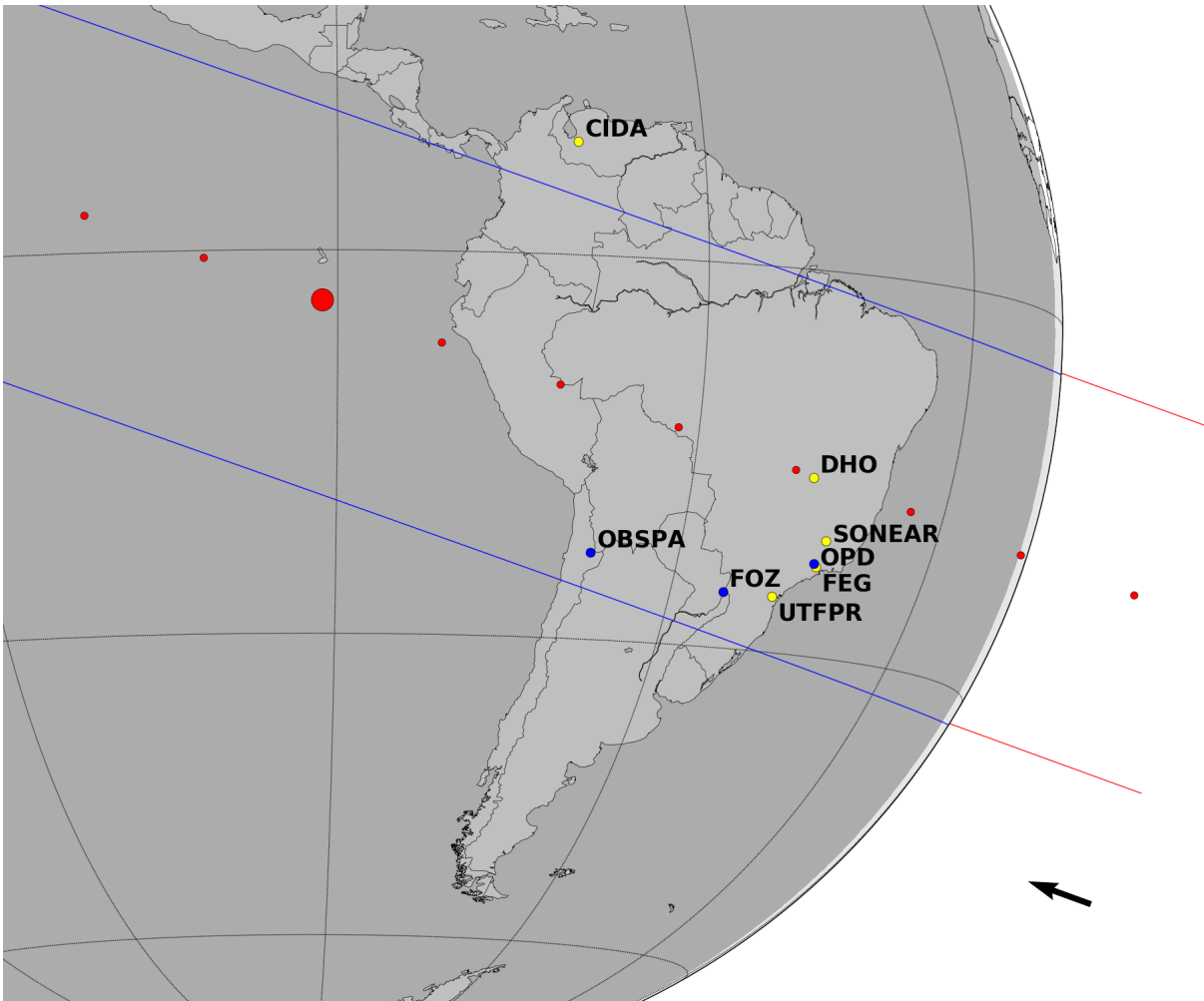


Figura 56 – Mapa da ocultação estelar de uma estrela de magnitude G 9,5 por Europa em 31 de março de 2017 e os sítios que a observaram. Em azul os sítios com cordas positivas e em amarelo os sítios que não conseguiram fazer observações devido ao clima.

modelos. A estrela em questão possui um tamanho catalogado (Bourges et al., 2017) de  $0,194 \text{ mas}$  (Filtro I do sistema Johnson<sup>4</sup>), para a distância de Europa no momento da ocultação este valor é traduzido em aproximadamente  $0,6 \text{ km}$ .

É fácil perceber que o efeito dominante na curva de luz será a metade do tempo do ciclo das imagens, considerando a velocidade do evento de  $17,78 \text{ km/s}$ , estas resoluções se traduzem em  $5,6$ ,  $8,9$  e  $12,5$  quilômetros para OPD/B&C, FOZ e OBSPA, respectivamente. Nas subseções 4.3.1, 4.3.2 e 4.3.3 trataremos os detalhes e particularidades de cada uma destas curvas de luz.

Ao obtermos os instantes de ingresso e egresso (e suas incertezas) de cada uma das curvas de luz podemos então analisa-las em conjunto para determinarmos a forma, tamanho e posição do objeto.

<sup>4</sup> Comprimento de onda central de  $879,7 \text{ nm}$  com largura de  $289,2 \text{ nm}$

### 4.3.1 Curva de luz do OPD/B&C

A observação no Observatório Pico dos Dias teve como observadores principais os colaboradores Marcelo Assafin e Gustavo Benedetti-Rossi<sup>5</sup>. Esta observação foi feita utilizando o filtro metano de banda estreita e a câmera CCD IXom-EM. Júpiter foi colocado fora do campo de visada para diminuir os efeitos causados por sua luz difusa e Io foi utilizado como calibrador fotométrico para a fotometria diferencial de abertura, o desvio padrão da curva de luz (medido fora do evento) foi de 0,013. A Figura 57 contém a curva de luz obtida e o ajuste de nosso modelo em vermelho, nos gráficos inferiores temos uma ampliação de dois minutos centrado, aproximadamente, nos instantes de ingresso e egresso. A Figura 58 contém os gráficos de  $\chi^2$  normalizados para os instantes de ingresso e egresso.

O instante de ingresso foi às 06:38:28,55 com uma incerteza de 0,75 segundos (13,33 km), o instante de egresso foi às 06:41:06,15 com uma incerteza de 0,24 segundos (4,27 km), a duração do evento foi de 160,50 segundos (2.855,47 km).

Uma primeira discussão que surge é a existência de um duplo mínimo para o instante de ingresso e ambos os mínimos possuem valores de  $\chi^2$  próximos. O motivo deste duplo mínimo é o ruído da curva junto com a pequena queda de brilho do evento ( $\sim 5\%$ ). A existência desse duplo mínimo faz com que a incerteza desse instante seja três vezes maior que a incerteza do instante de egresso.

Uma segunda discussão que surge é a existência aparente de um ingresso e um egresso gradual, evidenciado pelo zoom na Figura 57. Esta queda não abrupta não pode ser explicada utilizando o tamanho da estrela, que, como mencionado anteriormente, é inferior a um quilômetro. Uma explicação possível seria a detecção de um fortuito gêiser.

Europa é uma lua conhecida por seu criovulcanismo, gêiseres de vapor de água já foram observados por diferentes autores (Roth et al., 2014; Sparks et al., 2016; Sparks et al., 2019; Jia et al., 2018). Entretanto, antes de fazer conjecturas sobre a detecção de um gêiser é importante analisar se essa característica (queda não abrupta) é apenas um efeito visual ou se possuiu significância estatística. Para tal, além do ajuste de caixa já mencionado, também fizemos um ajuste de um trapézio, que pode ser considerado uma primeira aproximação do efeito que um gêiser (ou uma atmosfera) causaria na curva de luz. A Figura 59 apresenta a curva de luz agora contendo o ajuste do modelo de caixa e o ajuste do modelo do trapézio. O ajuste do modelo de caixa possui um  $\chi^2$  normalizado de 1,017 e o modelo do trapézio 1,014.

É fácil perceber que o modelo de caixa é um caso particular de um modelo de um trapézio, desde que as inclinações da entrada e da saída se igualem a  $90^\circ$ . Entretanto, o modelo do trapézio possui um número maior de parâmetros a serem ajustados (instante de

---

<sup>5</sup> Não participei desta observação uma vez que ela ocorreu durante o meu Doutorado Sanduíche

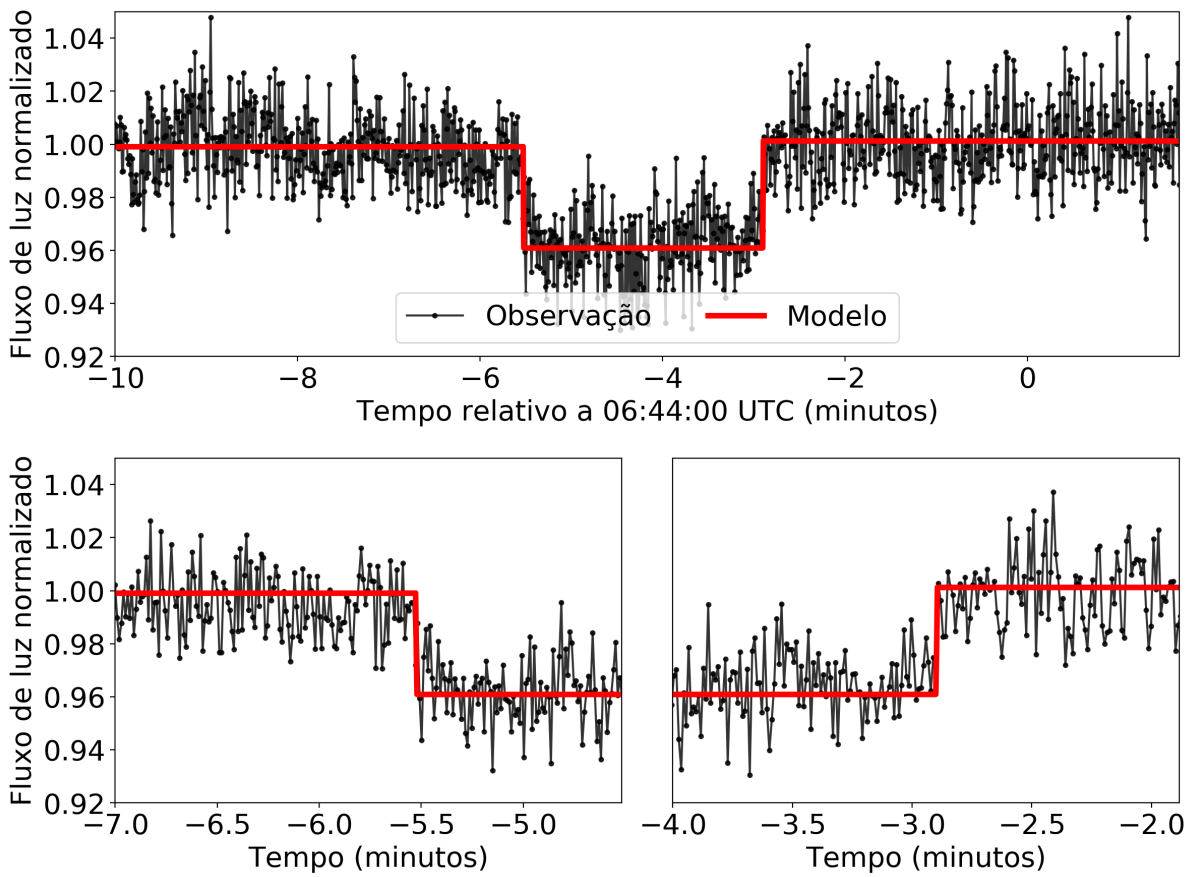


Figura 57 – Curva de luz normalizada do evento onde Europa ocultou uma estrela GDR2 de magnitude G 9,5 observada pelo OPD/B&C.

ingresso, instante de egresso, inclinação da entrada e inclinação da saída). Logo, a melhora do  $\chi^2$  é esperada.

Utilizamos o teste  $\mathcal{F}$  de Fisher-Snedecor (Chow, 1960; Seber; Lee, 2003) para estimar a probabilidade de que o modelo mais complexo (modelo 2; trapézio) realisticamente represente melhor os dados do que o modelo mais simples (modelo 1; caixa). O teste segue uma distribuição do tipo  $\mathcal{F}$  e o modelo mais complexo é aceito se possuir um valor de  $\mathcal{F}$  maior que um valor crítico tabelado. No nosso caso, considerando uma confiabilidade de 95%, esse valor tabelado é de 5,1432. O valor de  $\mathcal{F}$  é obtido ao compararmos o somatório do quadrado dos resíduos dos dois modelos ( $Rss_1$  e  $Rss_2$ ) levando em consideração o grau de liberdade de cada modelo ( $df_i$ ; número de pontos menos número de parâmetros ajustados do modelo  $i$ ). Como descrito nas Equações (4.3) e (4.4).

$$Rss_i = \sum (F_{obs} - F_i)^2, \quad (4.3)$$

$$\mathcal{F} = \frac{\left(\frac{Rss_1 - Rss_2}{df_1 - df_2}\right)}{\left(\frac{Rss_2}{df_2}\right)}. \quad (4.4)$$

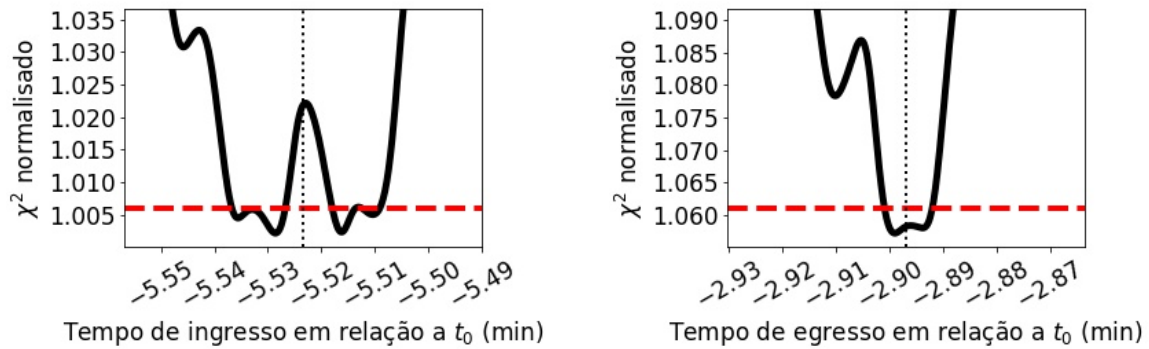


Figura 58 – Ajuste de  $\chi^2$  do instante de ingresso e egresso para a curva de luz do OPD/B&C. As linhas verticais pontilhadas demarcam os instantes determinados, as linhas horizontais tracejadas demarcam o  $1\sigma$ .

O valor de  $\mathcal{F}$  calculado foi de 0,1904 o que significa que existe uma probabilidade de 16,86% de que o modelo do trapézio represente melhor os dados do que o modelo da caixa, longe do esperado 95%. Para que o modelo do trapézio fosse considerado realmente melhor que o modelo da caixa o  $\chi^2$  normalizado deveria ser no máximo 0,739. Com isso concluímos que o ruído desta curva não nos permite afirmar a observação de um gêiser e os parâmetros determinados pelo ajuste do modelo padrão de caixa serão os únicos utilizados daqui em diante. Além disso, outros modelos mais complexos para se estudar possíveis estruturas não foram estudados devido a baixa relevância estatística quando comparados ao ruído da curva.

#### 4.3.2 Curva de luz de FOZ

A observação de Foz do Iguaçu foi liderada por Daniel Iria Machado que observou sem filtro e utilizou a câmera rápida Raptor. Esta câmera permite baixíssimo tempo de exposição e sem tempo morto (tempo de descarga da imagem). Esta configuração permitiu que ele utilizasse um tempo de exposição de 0,05 segundos, porém o SNR das imagens não permitiu uma curva de luz adequada para se observar a pequena queda de brilho ( $\sim 5\%$ ). O desvio padrão da curva de luz (medido fora do evento) foi de 0,073.

Ao longo deste doutorado uma técnica de combinação de imagens foi explorada. Esta técnica visa melhorar a qualidade das imagens (aumentando o SNR). Uma completa análise deste procedimento é feita no Capítulo 5, onde aplicamos esta técnica na astrometria dos satélites galileanos. Dado a alta resolução temporal desta observação foi possível aplicar esta técnica de combinação de imagens visando observar a queda de brilho do evento. Combinamos, então, séries de 20 imagens, resultando em uma resolução temporal de 1,00 segundo. A Figura 60 contém a curva de luz original em cinza e a curva de luz obtida das imagens combinadas em preto, a linha amarela demarca a normalização em 1,0.



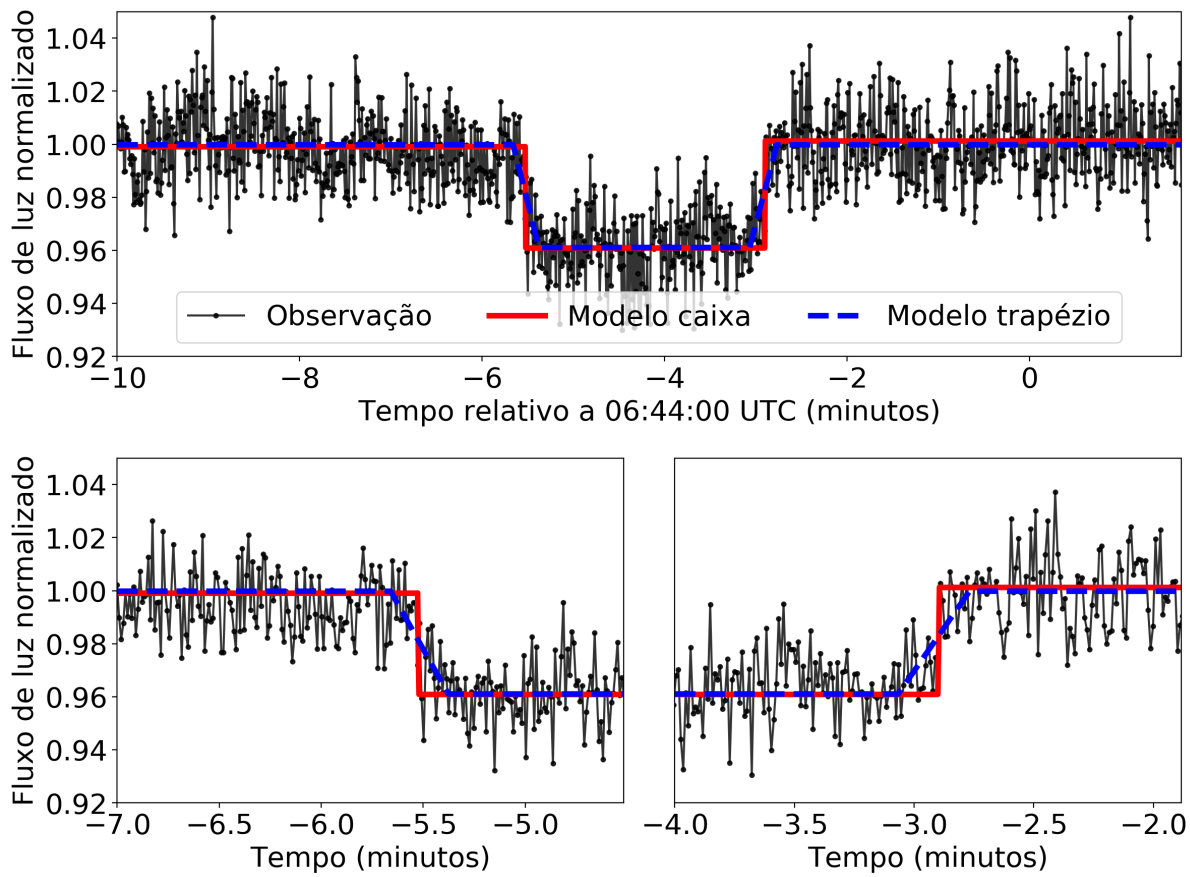


Figura 59 – Curva de luz normalizada do evento onde Europa ocultou uma estrela GDR2 de magnitude G 9,5 observada pelo OPD/B&C, comparação entre o modelo de caixa com o modelo de um trapézio

Para esta combinação Europa foi utilizado como guia<sup>6</sup>, o desvio padrão da curva de luz resultante foi de 0,016 (medido fora do evento). A melhora causada pela combinação de imagens pode ser aproximada como  $1/\sqrt{N}$ , o número de imagens combinadas ( $N$ ) precisa ser escolhido com cuidado respeitando a dualidade entre a SNR e a resolução temporal.

Após aplicarmos este procedimento os instantes de ingresso e egresso foram determinados utilizando o mesmo método já discutido na seção 4.3.1. A Figura 61 contém a curva de luz com o modelo de caixa ajustado e as respectivas ampliações em torno das instantes de ingresso e egresso. A Figura 62 contém as curvas de  $\chi^2$  para estes instantes. Ao aplicarmos o teste  $\mathcal{F}$  de Fisher-Snedecor, assim como fizemos anteriormente, a probabilidade de um modelo trapezoidal representar melhor os dados foi de apenas 1%.

O instante de ingresso foi às 06:39:26,07 com uma incerteza de 0,77 segundos (13,69 km), o instante de egresso foi às 06:41:21,59 com uma incerteza de 1,07 segundos (19,02 km), a duração do evento foi de 115,52 segundos (2.053,95 km). É importante enfatizar

<sup>6</sup> Na técnica de combinação de imagens um objeto precisa ser selecionado para corrigir possíveis movimentos do telescópio.

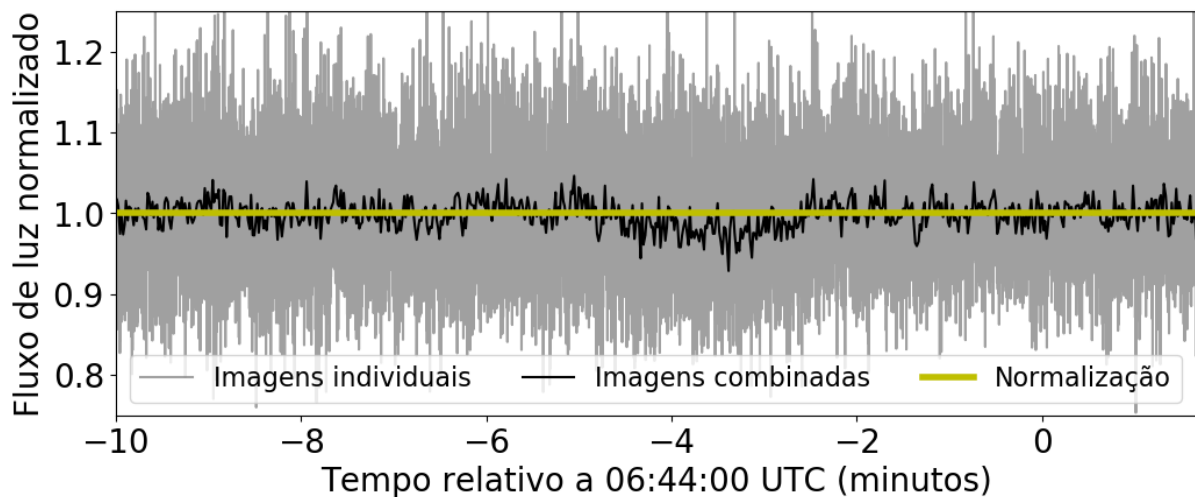


Figura 60 – Curva de luz normalizada do evento onde Europa ocultou uma estrela GDR2 de magnitude G 9,5 observada por FOZ. Comparação entre a fotometria oriunda das imagens individuais e das imagens combinadas. A linha amarela demarca a normalização em 1,0, note que aproximadamente entre -5 e -2 todos os pontos da curva de luz combinada estão sistematicamente abaixo desta linha.

que esta observação foi feita por um telescópio de 28 centímetros de abertura, realçando a importância da participação da comunidade de pequenos telescópios nestas campanhas observacionais.

### 4.3.3 Curva de luz de OBSPA

A observação no Observatório de San Pedro de Atacama, no Chile, foi liderada por Alain Maury que fez suas imagens utilizando o filtro R do sistema *Johnson*. Uma característica negativa de suas observações foi a existência de um tempo morto entre suas imagens, embora o tempo de exposição tenha sido de 0,40 segundos o tempo entre duas imagens consecutivas foi de 1,41 segundos ( $\sim 1$  segundo de tempo morto).

A curva de luz obtida possui um desvio padrão de 0,017 (medido fora do evento). O ajuste dos instantes de ingresso e egresso foi realizado utilizando os mesmos procedimentos detalhados anteriormente. A Figura 63 contém a curva de luz e o modelo de caixa ajustado, assim como as ampliações centradas nos instantes de ingresso e egresso. A Figura 64 contém as curvas de  $\chi^2$ . Algo relevante de ser mencionado é que as curvas de  $\chi^2$  apresentam platôs, isso é uma característica que aparece nas curvas de luz que possuem tempo morto longo.

O instante de ingresso foi às 06:40:38,19 com uma incerteza de 1,20 segundos (21,33 km), o instante de egresso foi às 06:42:22,85 com uma incerteza de 0,34 segundos (6,04 km), a duração do evento foi de 104,66 segundos (1.860,85 km). Também aplicamos o teste  $\mathcal{F}$  de Fisher-Snedecor nesta curva de luz, a probabilidade de um modelo trapezoidal representar melhor os dados foi de apenas 3%.

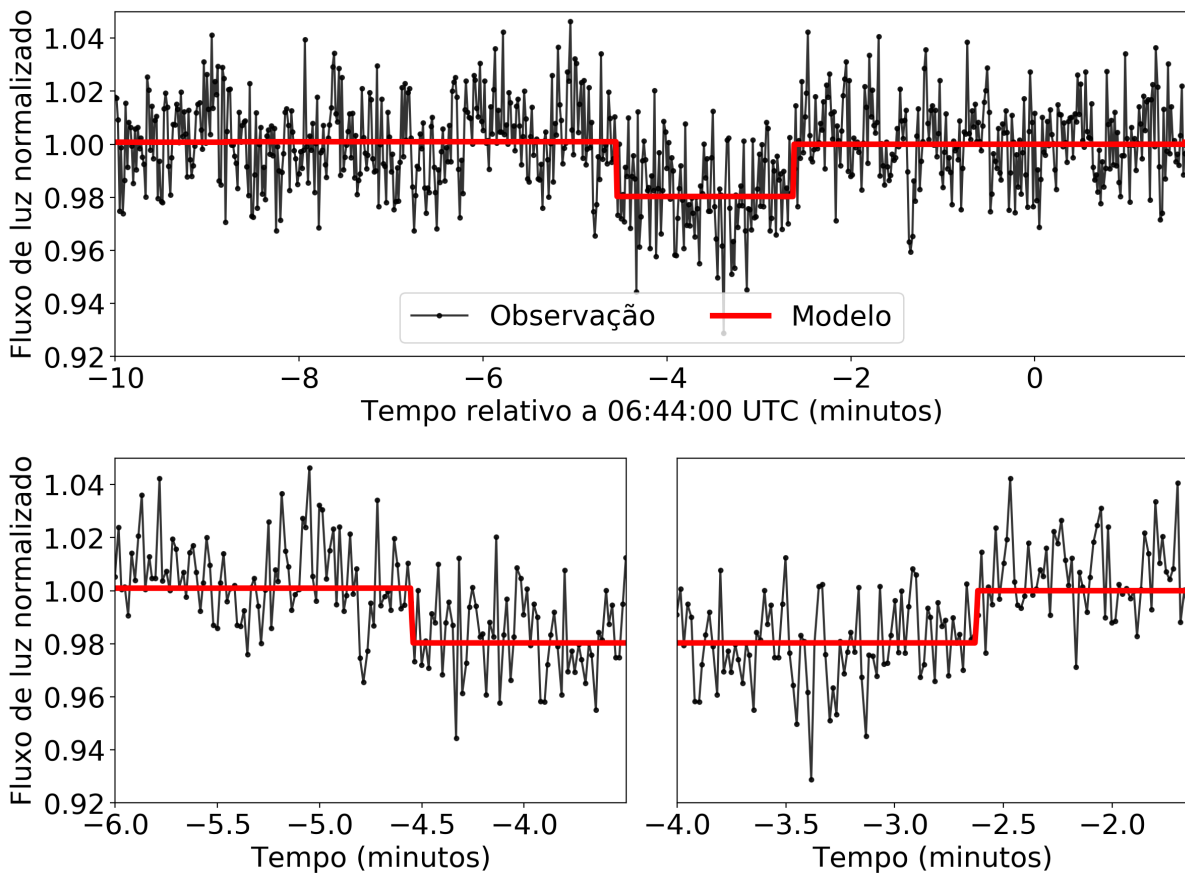


Figura 61 – Curva de luz normalizada do evento onde Europa ocultou uma estrela GDR2 de magnitude G 9,5 observada por FOZ.

## 4.4 Redução e análise conjunta

Uma vez que a redução de cada uma das curvas de luz é finalizada, utilizamos os resultados de todas as curvas para determinarmos os parâmetros de interesse – forma, tamanho e posição. Em posse dos instantes de ingresso e egresso de cada um dos observadores podemos transportá-los para o plano do céu e montarmos a disposição das cordas.

Os parâmetros da elipse são: o semi-eixo maior aparente ( $a'$ ); a excentricidade aparente ( $\epsilon'$ ); o centro ( $f_c, g_c$ ); e o ângulo de posição do polo ( $P_p$ ). Como a posição do polo de Europa é bem conhecida, optamos por deixar este ângulo fixo e o valor utilizado foi  $24,2534^\circ$ , calculado a partir dos parâmetros rotacionais deste satélite (Archinal et al., 2018). Uma vez que as cordas estejam dispostas no plano do céu podemos ajustar uma elipse às extremidades, levando em consideração suas incertezas, este ajuste é feito através da minimização do  $\chi^2$ .

A Figura 65 contém as três cordas obtidas (OPD/B&C, FOZ e OBSPA) em azul, ciano e verde, nas suas extremidades, em vermelho, temos as incertezas e em preto

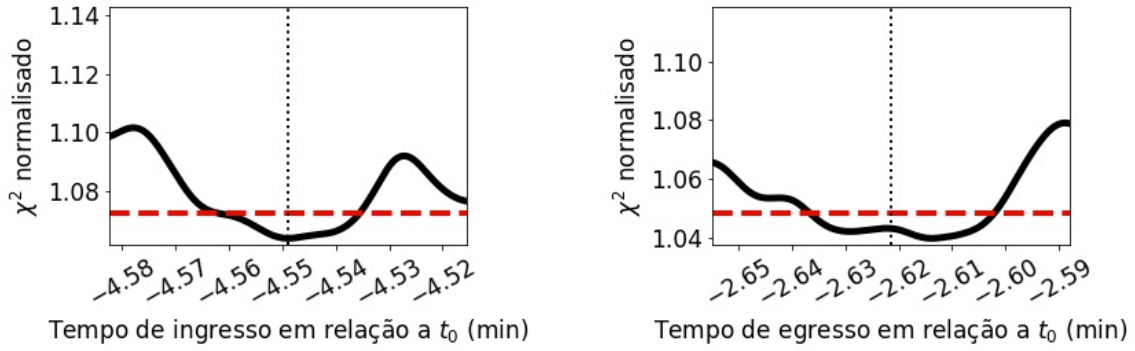


Figura 62 – Ajuste de  $\chi^2$  do instante de ingresso e egresso para a curva de luz de FOZ. As linhas verticais pontilhadas demarcam os instantes determinados, as linhas horizontais tracejadas demarcam o  $1\sigma$ .

apresentamos a elipse ajustada. As linhas pontilhadas demarcam os eixos e sua interseção é o ponto  $(0,0)$ , o ponto preto demarca o centro da elipse ajustada. Os parâmetros determinados estão disponíveis em (4.5).

$$\begin{aligned}
 f_c &= -0,9 \pm 3,1 \text{ km} , \\
 g_c &= -12,3 \pm 2,0 \text{ km} , \\
 a' &= 1562,0 \pm 3,6 \text{ km} , \\
 \epsilon' &= 0,0010 \pm 0,0028 , \\
 P_p &= 24,2534^\circ .
 \end{aligned} \tag{4.5}$$

Devido as dimensões envolvidas, diâmetro médio de Europa de 3121,6 km em comparação com as incertezas das cordas (incerteza média de 12,95 km), não é possível ver em detalhes as incertezas nas extremidades das cordas e a qualidade do ajuste na Figura 65. A Figura 66 contém as ampliações para evidenciar esses detalhes.

É importante enfatizar que existe uma correlação entre os parâmetros da elipse ajustada, essa correlação se torna menor conforme temos um maior número de cordas e que essas cordas estejam bem distribuídas ao longo da sombra. Em particular, cordas em ambos os hemisférios da sombra são ideais para se obter os melhores resultados. Para averiguar essa correlação em nosso caso montamos uma simulação por Monte-Carlo e o resultado está ilustrado na Figura 67. Escolhemos um *prior* linear centrado nos parâmetros ajustados pela minimização do  $\chi^2$  com valores variando em torno de  $10\sigma$ .

Na diagonal da Figura 67 temos o gráfico de  $\chi^2$  de cada um dos parâmetros ajustados, as linhas vermelhas demarcam a região de  $1\sigma$ . Fora da diagonal temos as correlações entre os pares de parâmetros, a escala de cinza foi ajustada para que o preto fosse o  $\chi^2$  mínimo e branco para valores maiores que  $5\sigma$ , se não houvesse correlação esta

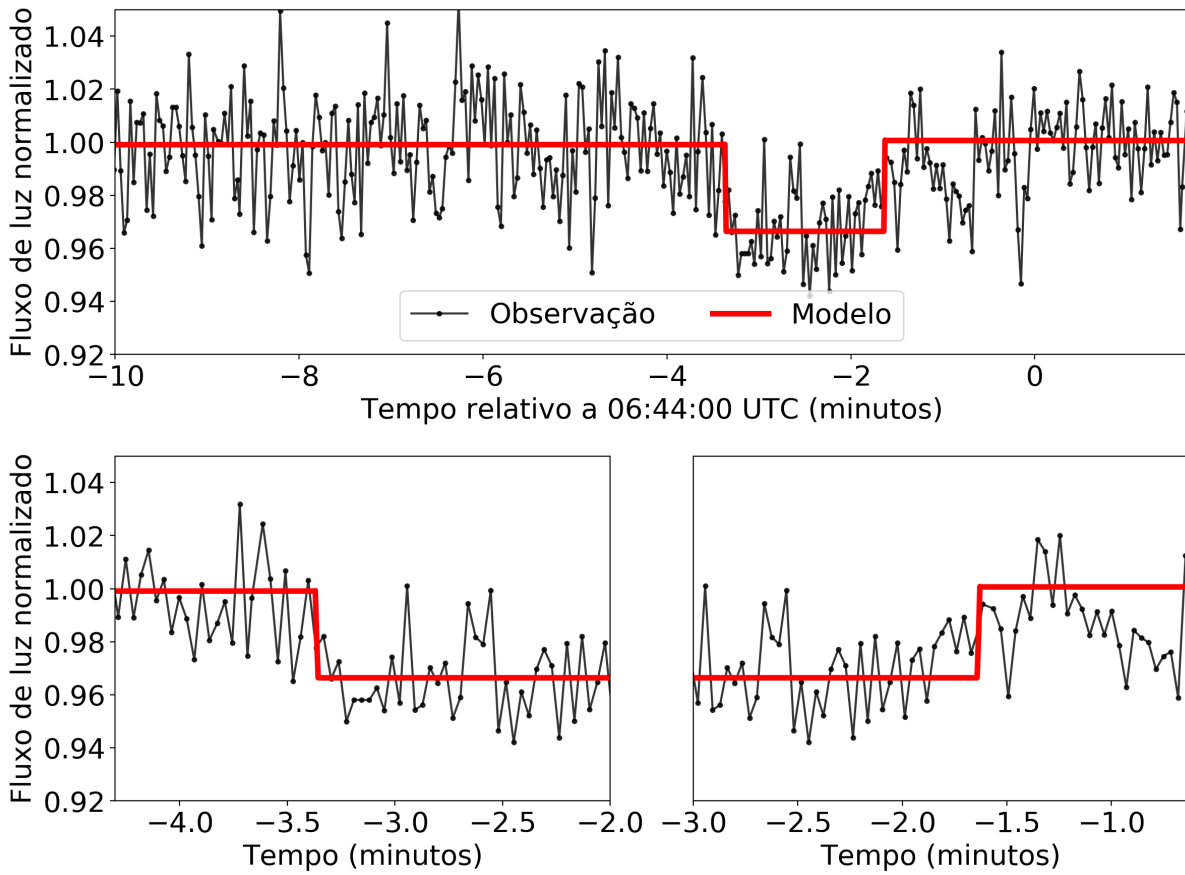


Figura 63 – Curva de luz normalizada do evento onde Europa ocultou uma estrela GDR2 de magnitude G 9,5 observada pelo OBSPA.

análise produziria uma circunferência, a excentricidade da elipse formada está relacionada com a correlação entre os parâmetros. Os valores destas correlações estão organizados na Tabela 17.

Tabela 17 – Correlação entre os parâmetros da elipse.

	$a'$	$e'$	$f_c$	$g_c$
$a'$	1,00			
$e'$	+0,72	1,00		
$f_c$	-0,64	+0,38	1,00	
$g_c$	+0,80	-0,81	+0,51	1,00

Chamamos a atenção para a forte correlação ( $\sim 0,80$ ) entre  $g_c$  e a forma da elipse ( $a'$  e  $e'$ ). Esta correlação é esperada uma vez que temos cordas apenas no hemisfério Sul da sombra, como evidenciado pela Figura 65.

Por fim podemos comparar o nosso resultado de tamanho e forma com os resultados obtidos a partir da análise das imagens da Sonda Galileu (Nimmo et al., 2007). A forma

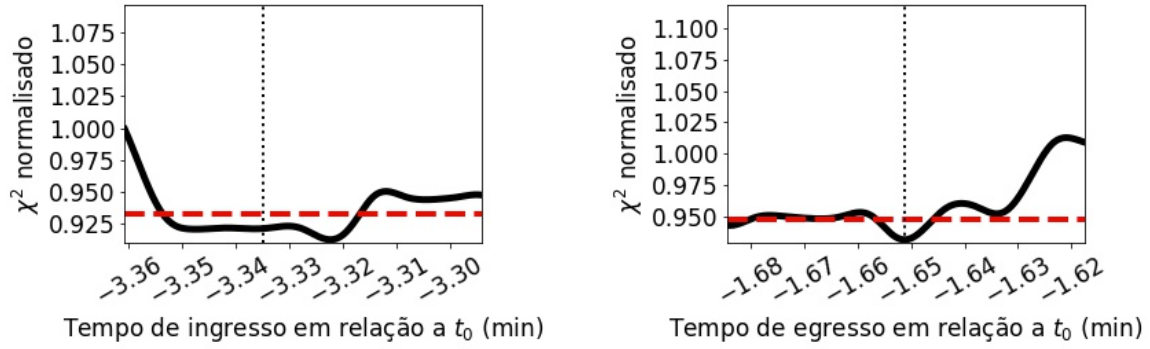


Figura 64 – Ajuste de  $\chi^2$  do instante de ingresso e egresso para a curva de luz do OBSPA. As linhas verticais pontilhadas demarcam os instantes determinados, as linhas horizontais tracejadas demarcam o  $1\sigma$ .

triaxial de Europa determinada por Nimmo e colaboradores possuiu eixos  $1562,6 \times 1560,3 \times 1559,5$  km ( $a \times b \times c$ ), a precisão obtida por esses autores foi de 0,5 km.

O semi-eixo maior aparente obtido em nossa análise ( $a' = 1562,0 \pm 3,6$  km) está entre os eixos  $a$  e  $b$  como esperado. O semi-eixo menor aparente ( $b' = 1560,4 \pm 5,7$  km) concorda dentro de  $1\sigma$  com o eixo  $c$ . A excentricidade aparente esperada deveria ser entre 0,0019 e 0,0005, novamente concordando com a excentricidade determinada aqui ( $\epsilon = 0,0010 \pm 0,0028$ ).

As correções de centro ( $f_c, g_c$ ) em km são então convertidas para  $(\Delta\alpha \cos(\delta), \Delta\delta)$  sabendo a distância entre o geocentro e Europa. A partir desta conversão obtemos a diferença desta posição e as efemérides utilizadas na redução, no nosso caso usamos as efemérides do JPL *jup310* e a DE435. Ao aplicarmos esta diferença determinamos que a posição no ICRS de Europa para o instante 06:44:00 UTC do dia 31 de março de 2017 foi

$$\begin{aligned}\alpha_{J2} &= 13^h 12^m 15^s,548372 \pm 0,96 \text{ mas} , \\ \delta_{J2} &= -05^\circ 56' 48'',687034 \pm 0,62 \text{ mas} .\end{aligned}\quad (4.6)$$

Devido à altíssima precisão desta posição (menor que 1 *mas*) é interessante a compararmos com as diferentes efemérides tanto do sistema joviano quanto diferentes efemérides planetárias também. Para esta comparação utilizamos as Equações (4.7).

$$\begin{aligned}\Delta\alpha &= \alpha_{J2} - \alpha_{ephem} , \\ \Delta\delta &= \delta_{J2} - \delta_{ephem} , \\ s &\simeq \sqrt{\Delta\alpha^2 \cos^2\left(\frac{\delta_{J2} + \delta_{ephem}}{2}\right) + \Delta\delta^2} .\end{aligned}\quad (4.7)$$

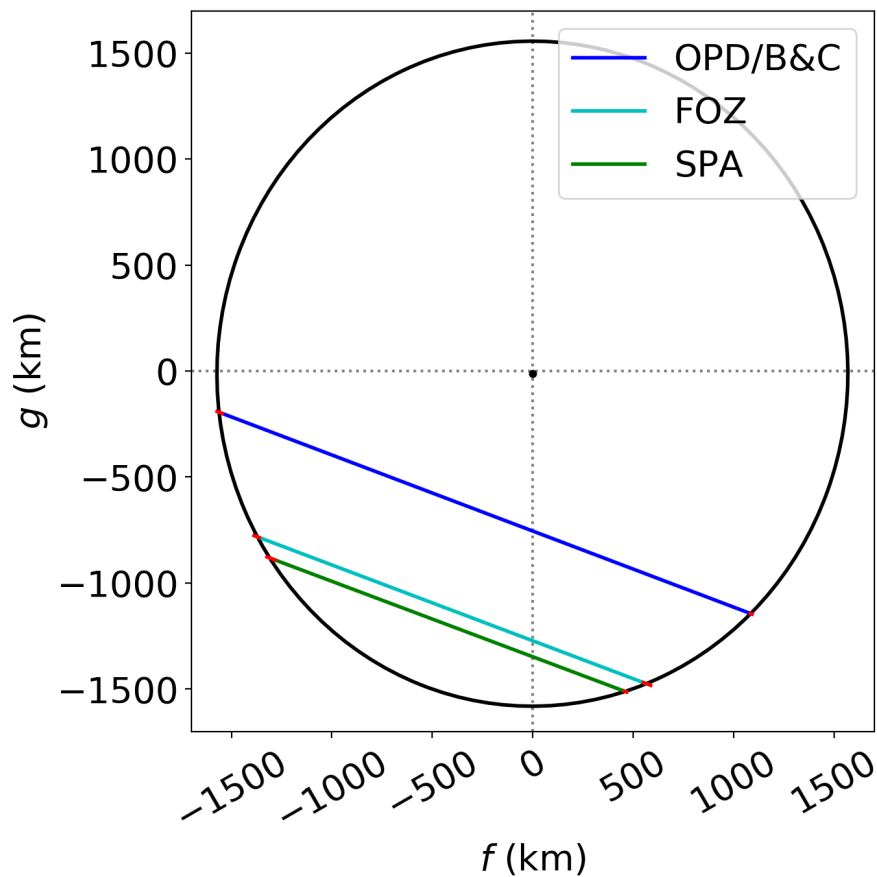


Figura 65 – Ajuste de uma elipse nas cordas.

Em nossa comparação aplicamos duas diferentes efemérides jovianas (*jup310* e NOE-5-2010-GAL) e seis efemérides planetárias (DE438s, DE436s, DE435, DE430, INPOP17a e INPOP13c). Essa comparação está apresentada na Tabela 18.

É importante ressaltar que esta precisão é sem precedentes quando tratamos astrometria dos satélites galileanos a partir de observações de solo, estes resultados possuem precisões similares àqueles obtidos com imagens de sondas espaciais. Realçando assim a importância da observação dos eventos que irão acontecer entre 2019 e 2021 (Tabela 15) enquanto Júpiter possui o centro da Galáxia como plano de fundo.

## 4.5 Outros eventos

Além da ocultação analisada em detalhes nessa tese ainda em 2019 outras três ocultações aconteceram, duas por Europa em 06 de maio e em 04 de junho, e uma por Calisto em 05 de junho. O primeiro evento por Europa em maio foi perdido devido a fatores climáticos. Os outros dois eventos foram observados por diferentes sítios, porém estes dados ainda estão sendo analisadas.

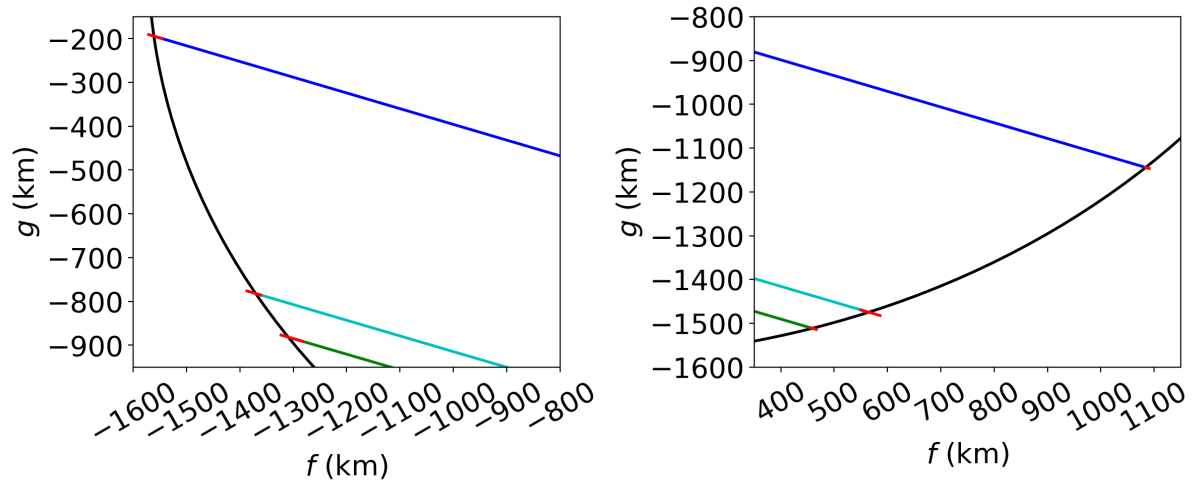


Figura 66 – Ajuste de uma elipse nas cordas. Zoom para evidenciar as incertezas.

#### 4.5.1 Ocultação por Europa - 04-06-2019

A Figura 68 contém o mapa de predição deste evento e os sítios que responderam a campanha. Dez estações tentaram fazer esta observação, seis estações (em verde) obtiveram dados que serão analisados no futuro, das demais estações (em amarelo) não foi possível obter dados devido ao clima.



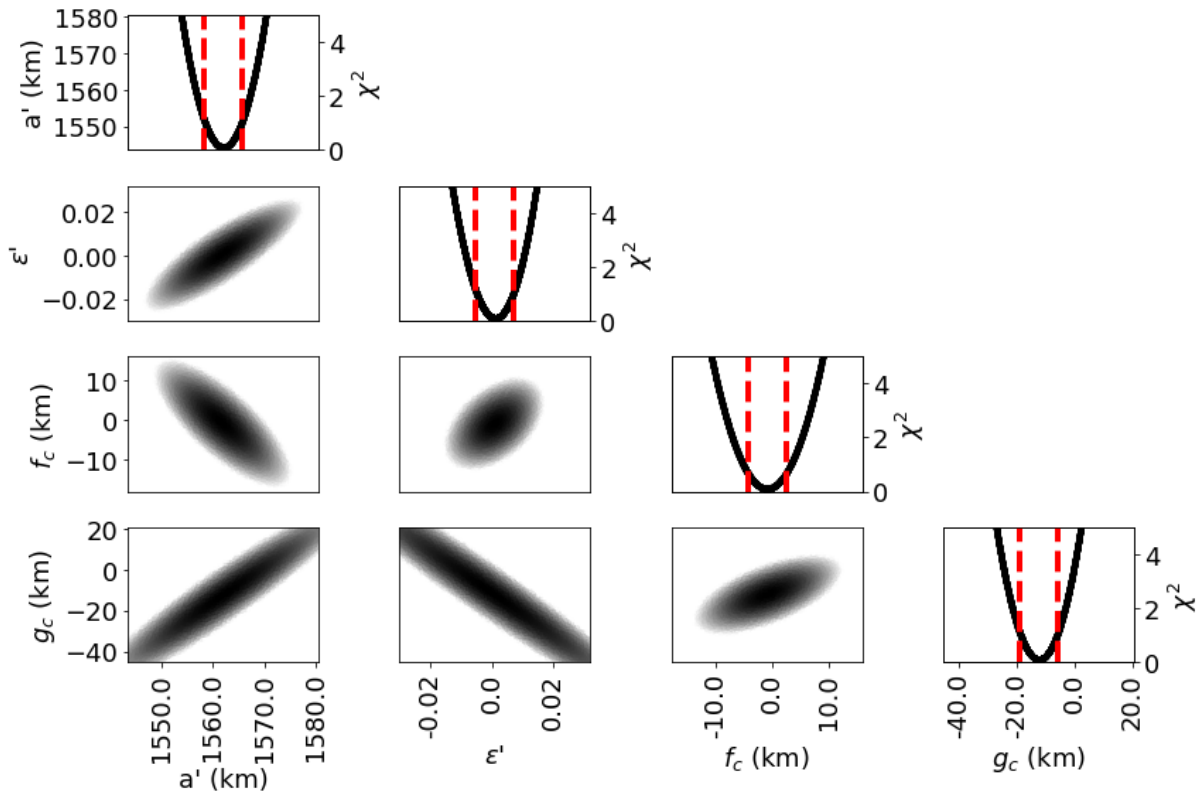


Figura 67 – Ajuste por  $\chi^2$  e correlação entre os parâmetros da elipse. Na diagonal temos o chi-quadrado por cada um dos parâmetros, as linhas vermelhas tracejadas delimitam o  $1\sigma$ . Fora da diagonal temos as correlações, note que existe uma forte correlação entre  $g_c$  e a forma da elipse ( $a'$ ,  $\epsilon'$ ), isso é esperado uma vez que temos cordas apenas no hemisfério Sul da sombra.

#### 4.5.2 Ocultação por Calisto - 05-06-2019

A Figura 69 contém o mapa de predição deste evento e os sítios que responderam a campanha. Nove estações tentaram fazer esta observação, cinco estações (em verde) obtiveram dados que serão analisados no futuro, das demais estações (em amarelo) não foi possível obter dados devido ao clima.

Tabela 18 – Diferença entre a posição geocêntrica de Europa obtida nesta ocultação estelar e as efemérides, no sentido observação menos efemérides.

		JPL <i>jup310</i> (mas)	IMCCE NOE-5-2010-GAL (mas)
JPL DE438s	$\Delta\alpha$	- 7,94	- 5,07
	$\Delta\delta$	-10,91	- 1,08
	$s$	13,46	5,15
JPL DE436s	$\Delta\alpha$	- 6,68	- 3,80
	$\Delta\delta$	- 7,59	+ 2,23
	$s$	10,09	4,39
JPL DE435	$\Delta\alpha$	- 0,27	+ 2,60
	$\Delta\delta$	- 3,81	+ 6,01
	$s$	3,82	6,54
JPL DE430	$\Delta\alpha$	- 1,67	+ 1,19
	$\Delta\delta$	- 3,69	+ 6,13
	$s$	4,06	6,24
IMCCE INPOP17a	$\Delta\alpha$	+ 0,63	- 2,23
	$\Delta\delta$	- 8,59	+ 1,23
	$s$	8,61	2,54
IMCCE INPOP13c	$\Delta\alpha$	- 2,64	- 5,50
	$\Delta\delta$	-10,28	- 0,46
	$s$	10,61	5,49

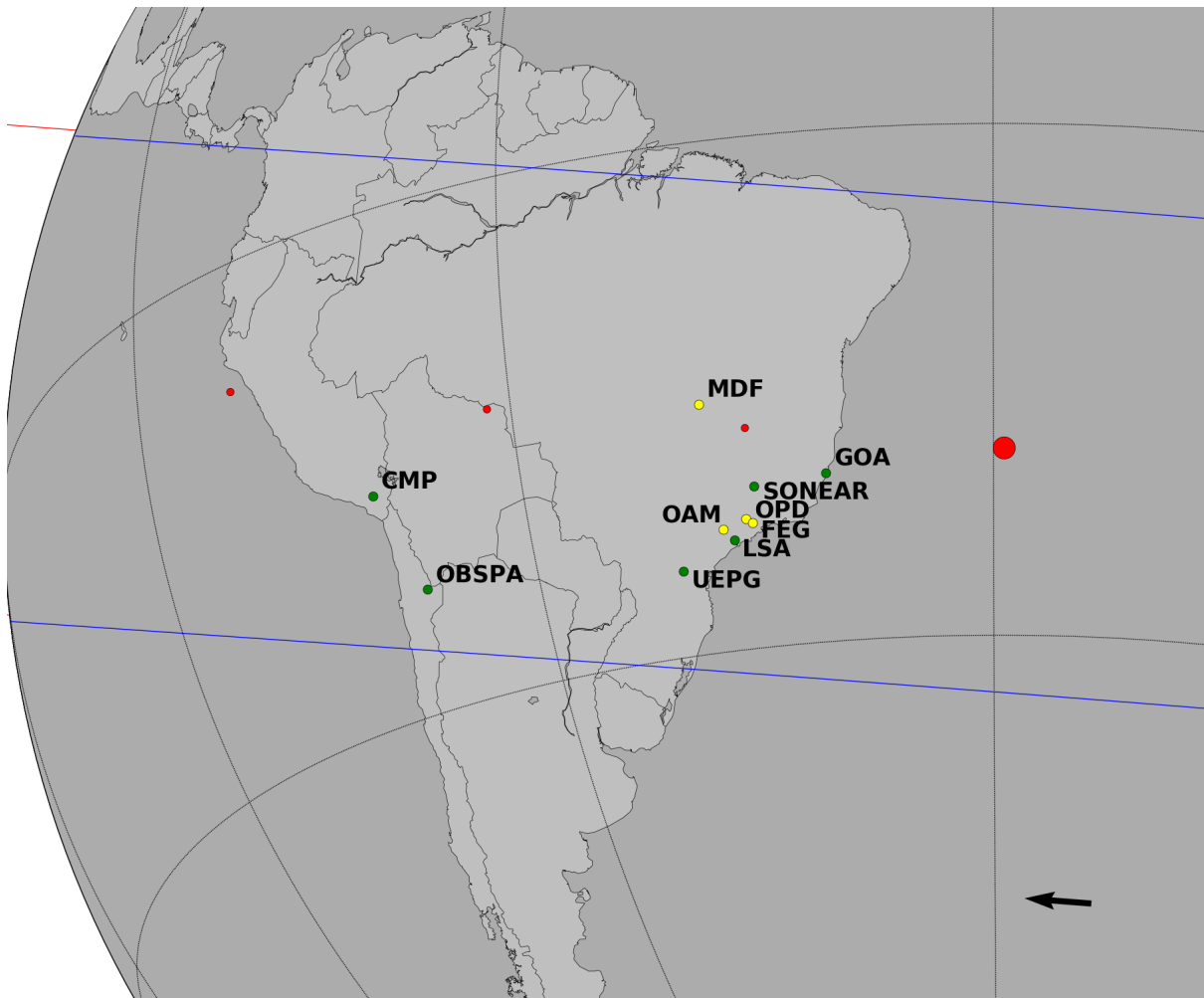


Figura 68 – Mapa da ocultação estelar de uma estrela de magnitude G 9,1 por Europa em 04 de junho de 2019 e os sítios que a observaram. Em verde os sítios com dados a serem analisados e em amarelo os sítios que não conseguiram fazer observações devido ao clima.

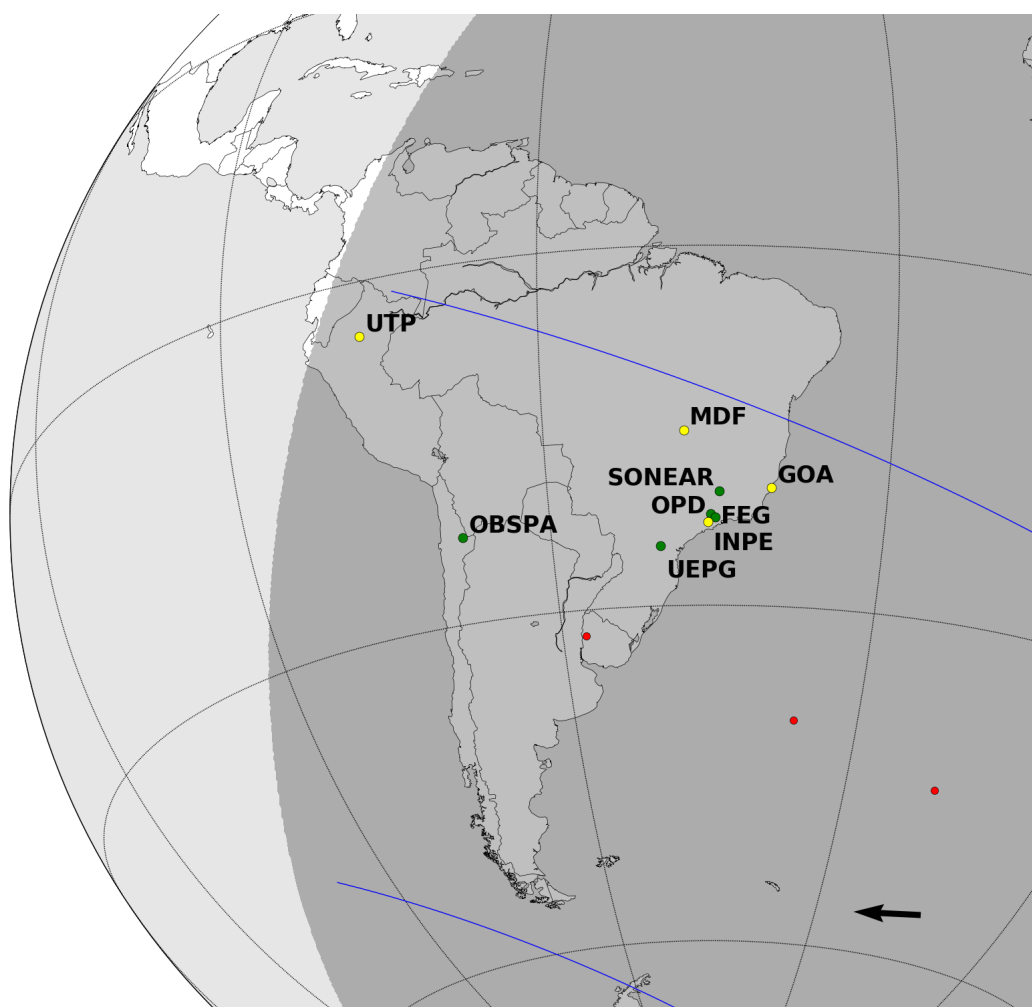


Figura 69 – Mapa da ocultação estelar de uma estrela de magnitude G 10,2 por Calisto em 05 de junho de 2019 e os sítios que a observaram. Em verde os sítios com dados a serem analisados e em amarelo os sítios que não conseguiram fazer observações devido ao clima.



## 5 Combinação de imagens

A astrometria clássica CCD aplicada aos satélites galileanos geralmente determina posições com precisões de 100 a 120 mas ( $\sim 300\text{-}400$  km) (Kiseleva et al., 2008). A grande dificuldade nesta astrometria é o imageamento de Júpiter (mag. V -2), dos satélites galileanos (mag. V 5) e um número adequado de estrelas de calibração astrométrica (mag. V 10 a 18).

Como já mencionado anteriormente, um método eficiente para diminuir a luz difusa de Júpiter é a utilização do filtro Metano de banda estreita<sup>1</sup>. Este filtro nos permite observar Júpiter e os satélites galileanos sem que o FoV (do inglês *Field of View*) sature. Ainda assim, imagear os satélites galileanos juntamente com um número adequado de estrelas de referência ainda se mostra uma dificuldade.

Para solucionar esta dificuldade utilizamos a técnica de combinação de imagens, este procedimento foi inicialmente sugerido por Valery Lainey<sup>2</sup> no final de 2016 e venho utilizando esta técnica desde 2018. A ideia base deste procedimento não é nova, ela vem sendo utilizada principalmente para se melhorar o sinal ruído de objetos fracos, por exemplo para TNOs (Alvarez-Candal et al., 2016; Ayala-Loera et al., 2018; Alvarez-Candal et al., 2019). Aqui essa técnica é utilizada para melhorar o SNR<sup>3</sup> da imagem como um todo, fazendo com que estrelas que antes estavam imersas no ruído da imagem se tornem visíveis. Utilizando esta nova imagem combinada aplicamos a astrometria clássica CCD e determinamos os parâmetros que relacionam o centroides dos objetos (x,y) nas imagens com as coordenadas (X,Y) projetadas no plano do céu. Ao aplicarmos esta transformação nos fotocentros dos satélites determinamos suas coordenadas em ascensão reta (RA,  $\alpha$ ) e declinação (Dec.,  $\delta$ ).

Na Seção 5.1 mostramos o método de combinação de imagens desenvolvido para este projeto. Na Seção 5.2 faço uma pequena revisão do método de astrometria clássica CCD e na Subseção 5.2.1 uma pequena revisão sobre o catálogo astrométrico *Gaia*. A Seção 5.3 contém detalhes das observações tratadas aqui, a Seção 5.4 contém os resultados preliminares que obtivemos. Por fim na Seção 5.5 discutimos possibilidades de aplicação dessa técnica no futuro.

É importante enfatizar que o método analisado e desenvolvido aqui ainda está em fase preliminar. Os resultados aqui obtidos devem ser considerados como uma prova de conceito, não como resultados finais.

<sup>1</sup> Centrado em 889 nm com largura de 15 nm.

<sup>2</sup> Orientador do meu doutorado Sanduíche.

<sup>3</sup> Do inglês, *Signal to Noise Ratio*

## 5.1 Método de combinação de imagens

O método da combinação de imagens visa melhorar a razão sinal sobre ruído (SNR) dos objetos nas imagens. A base desta técnica é reduzir o sinal randômicos (ruído) das imagens, mantendo apenas os sinais sistemáticos (fontes de luz). A combinação de imagens se baseia em tirar a média entre imagens consecutivas, após a correção da posição do campo utilizando um objeto fixo (no nosso caso, uma estrela). Como primeiro exemplo iremos utilizar a noite do dia 18 de julho de 2018, observada no telescópio B&C de 60 cm, com o CCD Ikon-L e filtro Metano. Ao analisarmos uma região vazia do CCD podemos ver claramente o efeito desta técnica para diminuir a contribuição randômica do ruído da imagem. A Figura 70 contém o histograma das contagens de uma região vazia do CCD de 100 por 100 pixels, em azul temos a imagem individual, e em vermelho as imagens combinadas, (I) é a combinação de duas imagens, (II) de três imagens e (III) de cem imagens. O desvio padrão das contagens na imagem individual foi de 3,74 contagens, ao somarmos duas imagens e dividirmos pelo número de imagens somadas esse número diminui para 2,72, ao repetirmos o processo para três imagens temos como resultado 2,17 e, por fim, ao para cem imagens esse valor alcança 0,39.

Esta melhora na imagem é também facilmente percebida ao analisarmos a região vazia do CCD. Isso é feita na Figura 71 onde comparamos a imagem individual com a imagem resultante da combinação de cem imagens.

Esta melhora pode ser descrita também como um aumento da SNR da imagem. Após as correções necessárias de *Bias* e *Dark*, o SNR de uma região da imagem pode ser computado utilizando o sinal obtido do alvo ( $S$ ) e o sinal do fundo do céu ( $B$ ), para um determinado tempo de exposição ( $t_{exp}$ ) na forma de (Howell, 2006):

$$SNR = \frac{(S + B) \cdot t_{exp}}{\sqrt{(S + B) \cdot t_{exp}}} . \quad (5.1)$$

Naturalmente, para melhorarmos o sinal sobre ruído devemos aumentar o tempo de exposição. Entretanto, existem casos que aumentar o tempo de exposição não é uma opção viável, para estes casos a técnica de combinação de imagens se torna uma alternativa. Ao combinarmos um conjunto de  $N$  imagens, o SNR da imagem resultante ( $SNR_{stk}$ )<sup>4</sup> será:

$$SNR_{stk} = \frac{N(S + B) \cdot t_{exp}}{\sqrt{N(S + B) \cdot t_{exp}}} = SNR \cdot \sqrt{N} . \quad (5.2)$$

Logo, esperamos que o ruído de uma imagem irá diminuir em função de  $1/\sqrt{N}$ , ao combinarmos  $N$  imagens. Esse comportamento, embora uma primeira aproximação, é comprovado ao olharmos o quanto a melhoria do desvio padrão do fundo do céu se

<sup>4</sup> As imagens devem possuir o mesmo tempo de exposição

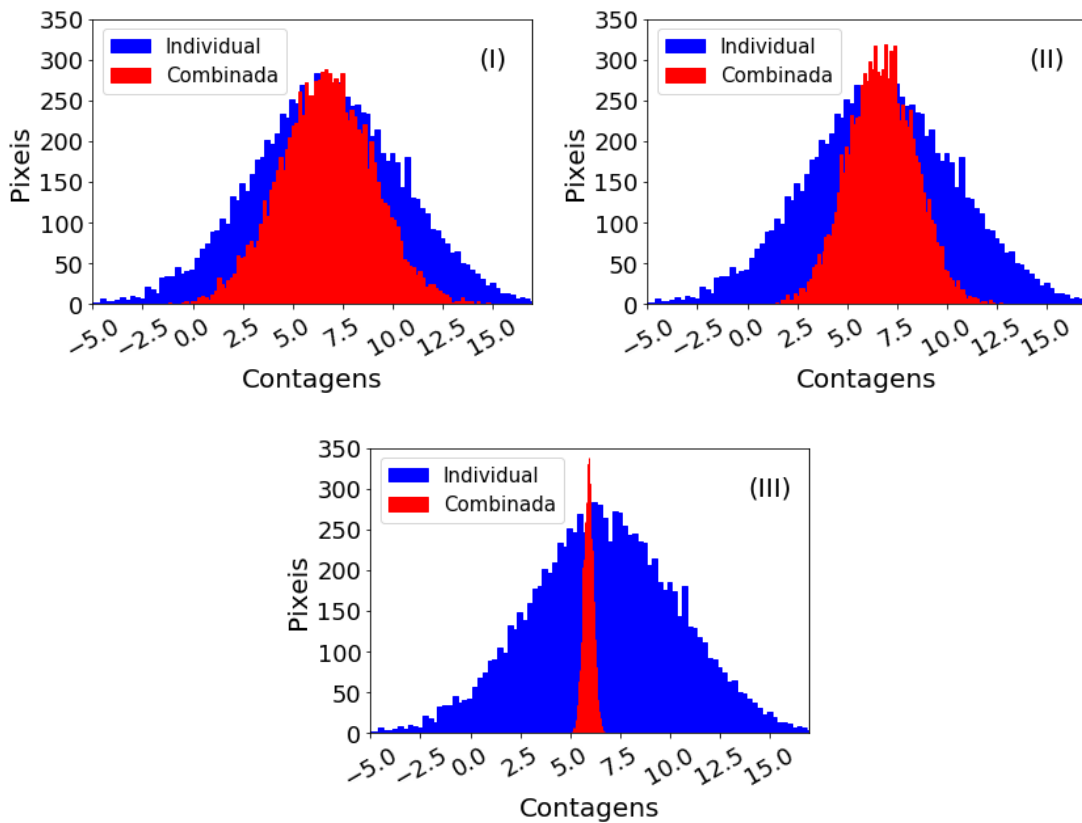


Figura 70 – Histograma de contagens sobre o CCD utilizando uma imagem individual (azul) e a combinação de duas imagens (vermelho; I), a combinação de três imagens (vermelho; II) e a combinação de cem imagens (vermelho; III). Note que conforme combinamos um maior número de imagens o desvio padrão do fundo do céu é reduzido.

comporta em função do número de imagens combinadas, ver Figura 72. É importante ressaltar que esta primeira aproximação considera que as imagens possuem uma qualidade uniforme ao longo da soma, não havendo variações nas condições climáticas.

Além de melhorar o SNR do céu o mais relevante desta técnica é a capacidade de melhorar o SNR de fontes de luz, no nosso caso, estrelas. Tendo ao menos uma estrela no campo<sup>5</sup> antes de fazermos a combinação das imagens precisamos fazer algumas considerações. Ao analisarmos a posição no CCD de uma estrela ao longo de um conjunto de imagens percebemos que ela não fica fixa, esse deslocamento é majoritariamente causado pelo movimento do telescópio. Logo, antes de combinar as imagens é necessário alinharmos corretamente utilizando uma (ou mais) estrela guia. Ao determinarmos o centroide  $(x, y)$  da estrela guia é fácil perceber o seu movimento ao longo do tempo (ou ao longo das imagens), veja por exemplo a Figura 73.

Antes de combinarmos as imagens é necessário corrigir este movimento. Neste projeto consideramos que o deslocamento do campo segue o deslocamento de uma estrela

<sup>5</sup> No caso desta noite havia uma estrela de magnitude G 10,8.



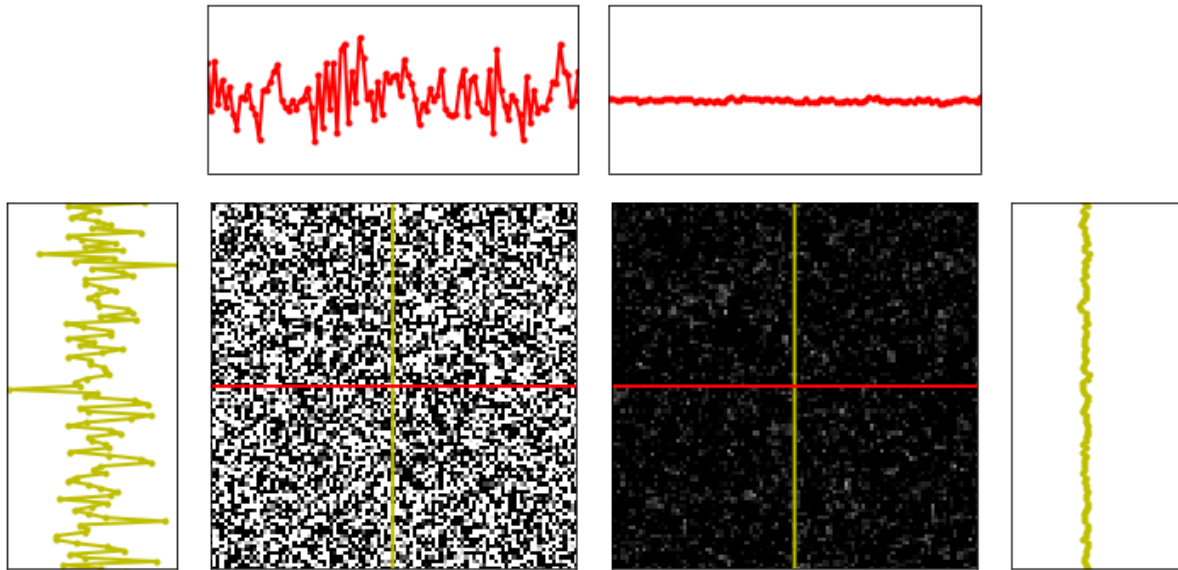


Figura 71 – Comparação entre a imagem individual e a combinação de cem imagens. Os gráficos superiores mostram as contagens ao longo da linha central, em vermelho. Os gráficos laterais mostram as contagens ao longo da coluna central, em amarelo. A região do CCD escolhida é um quadrado de  $100 \times 100$  pixels em uma região vazia do CCD. Estas imagens foram obtidas no telescópio B&C de 60 cm utilizando a câmera IKon-L junto com o filtro Metano. O tempo de exposição foi de 4 segundos. Note como o ruído da imagem diminuiu.

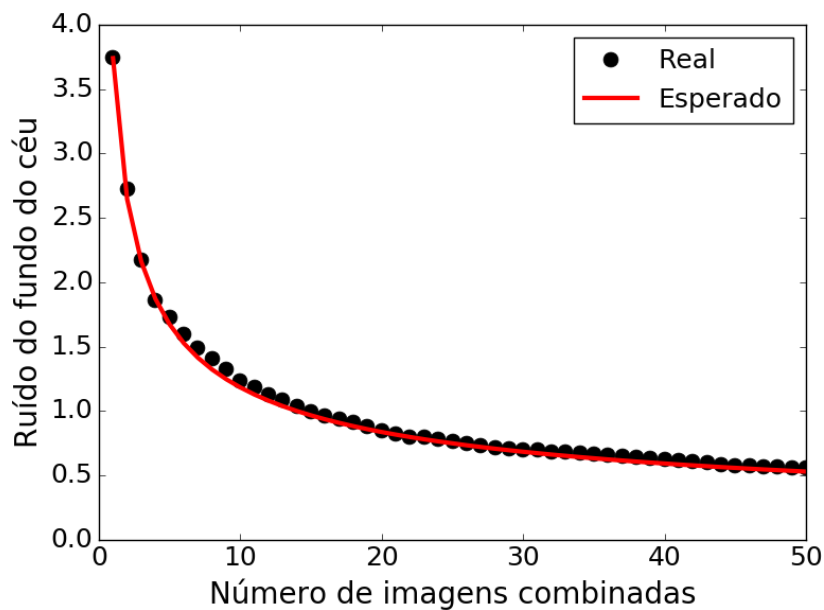


Figura 72 – Variação do desvio padrão do fundo do céu ( $\sigma$ ) ao combinarmos  $N$  imagens. Os valores reais foram obtidos utilizando as imagens e o valor esperado veio da simplificação  $Noise/\sqrt{N}$ .

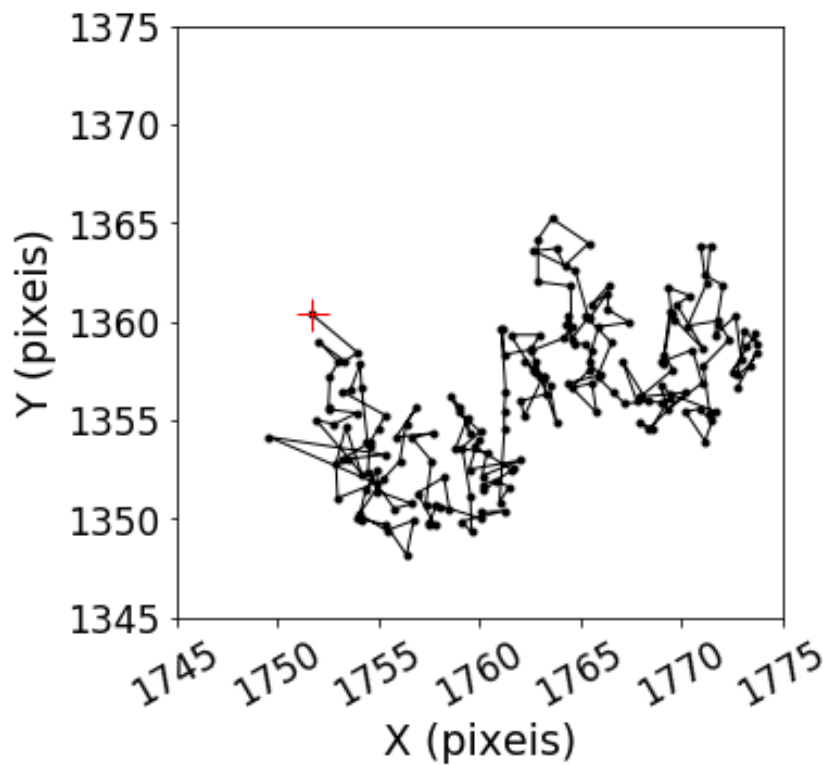


Figura 73 – Variação da posição de uma estrela guia no campo (em pixels) ao longo de 300 imagens ( $\sim 35$  minutos). Note que a posição da estrela no CCD pode variar de muitos pixels. A cruz vermelha marca a posição da estrela guia na primeira imagem.

e se dá como um movimento vertical ( $\Delta y$ ) e um horizontal ( $\Delta x$ ), portanto não havendo rotações. A variação da posição da estrela guia é utilizada para alinhar as imagens em relação a uma imagem de referência, por convenção a primeira imagem do conjunto.

Após este alinhamento, percebemos com clareza a melhoria da qualidade da imagem resultante, ver a Figura 74. A estrela guia nas imagens individuais para esta noite possuía um pico de 205,69 contagens, em um fundo de céu de contagem igual a 6,90 com um desvio padrão ( $\sigma$ ) de 3,74, este objeto estava a aproximadamente  $48\sigma$  acima do fundo do céu. Após a combinação de cem imagens, o valor de pico desta estrela ficou em 250,62 contagens, o fundo do céu em 6,18 com um desvio padrão de 0,37, resultando em uma estrela a aproximadamente  $661\sigma$  acima do fundo de céu.

Em especial, este procedimento não apenas melhora o SNR das estrelas visíveis no campo, como permite que estrelas que antes estavam imersas no ruído da imagem se tornem visíveis. Este é o caso de uma estrela de magnitude G 14,3 que estava no campo (Ver Figura 75). Esta estrela possui pico de 11,63 contagens em um fundo de céu de contagens 6,90 com desvio padrão de 3,74, fazendo com esta estrela estivesse a aproximadamente  $1\sigma$  acima do fundo do céu, após a combinação de imagens esta estrela se encontra a  $15\sigma$  acima do fundo do céu, permitindo uma detecção adequada.

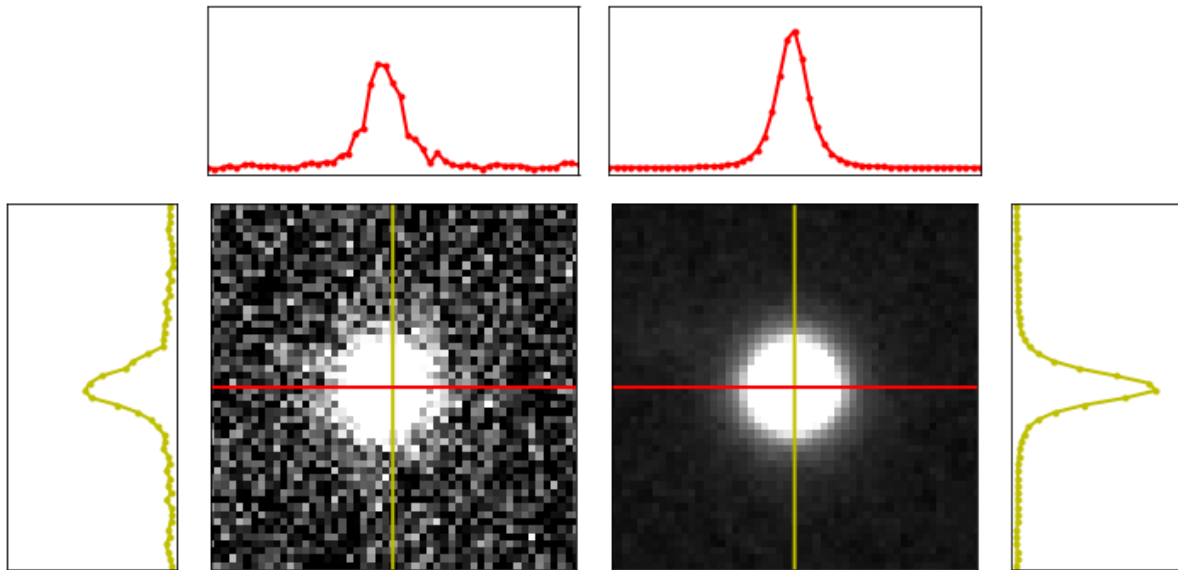


Figura 74 – Comparação entre a imagem individual e a combinação de cem imagens. A região do CCD escolhida é um quadrado de  $30 \times 30$  pixels em torno de uma estrela guia de magnitude G 10,8.

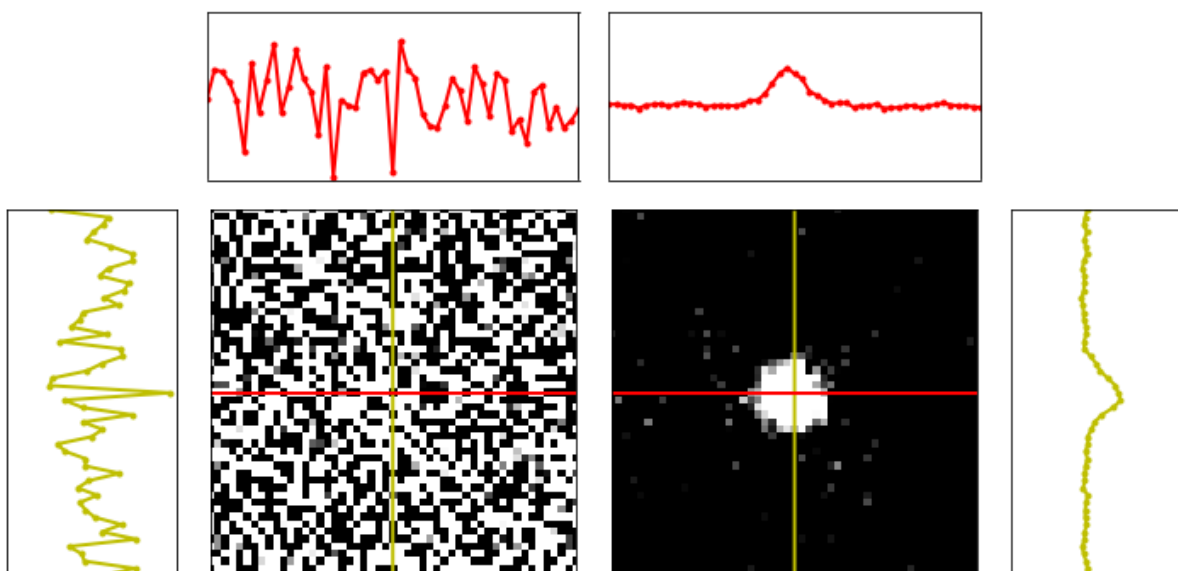


Figura 75 – Comparação entre a imagem individual e a combinação de cem imagens. A região do CCD escolhida é um quadrado de  $30 \times 30$  pixels em torno de uma estrela de magnitude G 14,3.

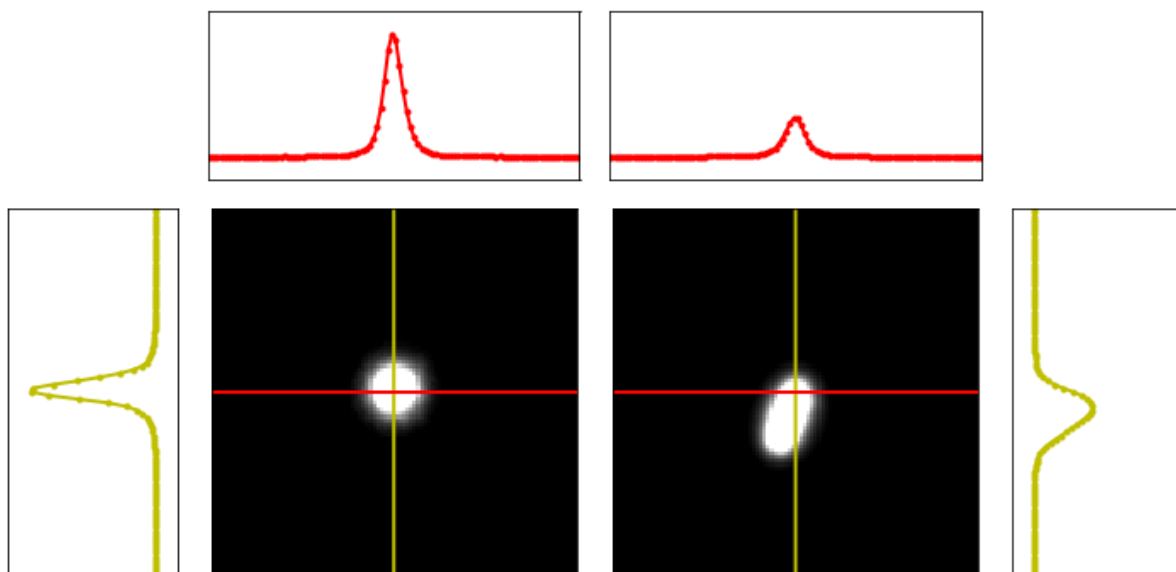


Figura 76 – Comparação entre a imagem individual e a combinação de cem imagens. A região do CCD escolhida é um quadrado de  $30 \times 30$  pixels em torno de Io.

Utilizando a imagem individual conseguimos detectar três estrelas que são detectáveis acima de  $10\sigma$  do fundo do céu, após a combinação de cem imagens esse número aumenta para quatorze estrelas. É importante notar que as estrelas que foram identificadas antes da combinação possuem magnitudes  $G \sim 10$ , após a combinação de cem imagens é possível detectar estrelas de magnitude  $G \sim 16$ . O campo utilizado foi de  $12 \times 12$  minutos de arco.

Por outro lado, ao combinarmos cem imagens os satélites galileanos se tornam traços, por exemplo a Figura 76 mostra o caso de Io nestas imagens. É importante ressaltar que os satélites são suficientemente brilhantes e as imagens individuais foram feitas para que os satélites galileanos estejam bem amostrados, logo suas posições nas imagens individuais são obtidas com precisões adequadas.

Devido a isso, duas abordagens podem ser aplicadas: a primeira consiste em uma combinação de poucas imagens, onde os movimentos dos satélites possam ser desprezados, esta é a abordagem utilizada por nossos colaboradores franceses (Lainey et al., 2017); A segunda abordagem é a determinação dos parâmetros das imagens combinadas (escala de placa, orientação do CCD, ponto zero e distorções) utilizando os procedimentos padrões de astrometria. Esses parâmetros são então aplicados as posições  $(x, y)$  dos satélites galileanos nas imagens individuais. Este segundo procedimento é o que será utilizado neste projeto. A motivação é permitir a detecção de um maior número de estrelas de calibração e assim obtermos uma melhor astrometria. Uma vez que tenhamos as posições  $(x, y)$  dos objetos nas imagens, estrelas e alvos, aplicamos o método clássico de astrometria.

## 5.2 Astrometria clássica CCD

A astrometria clássica CCD se baseia na medição de estrelas de calibrações astrométricas no mesmo campo que alvos de escolha. As posições das estrelas no campo CCD  $(x,y)$  são comparadas às posições catalogadas  $(\alpha, \delta)$  projetadas no plano tangente  $(X,Y)$ . Essa conversão entre posições instrumentais e posições no ICRS<sup>6</sup> é feita através de um polinômio de grau  $n$ . O grau do polinômio possui relação com a qualidade da ótica do telescópio e com possíveis distorções no campo do CCD. Por outro lado, esse grau é limitado pelo número de estrelas no campo. Para um ajuste de um polinômio de primeiro grau temos que ter ao menos três estrelas, um polinômio do segundo grau requer no mínimo seis estrelas e um polinômio do terceiro grau dez estrelas. Entretanto, para um bom ajuste polinomial o ideal é termos ao menos duas vezes o número mínimo de estrelas (Kovalevsky, 2002).

Esta astrometria é feita utilizando o pacote PRAIA desenvolvido por Marcelo Assafin em colaboração com o grupo de astrometria do Rio de Janeiro ao qual estou inserido (Assafin et al., 2011). Este código automaticamente identifica os objetos  $(x, y)$  na imagem utilizando um ajuste gaussiano bidimensional simétrico, onde o FWHM é igual ao *seeing*. A incerteza média do ajuste gaussiano foi igual a 0,05 pixeis ( $\sim 17 mas$  para os telescópios B&C e o Zeiss). As estrelas de calibração são automaticamente identificadas por esta rotina e as estrelas calibradoras que possuem uma diferença entre o valor obtido e o valor catalogado (O-C) maior que 50 *mas*<sup>7</sup> são eliminadas uma a uma. Esta eliminação está normalmente associada à uma má amostragem (objetos fracos) ou sobreposição de estrelas ou, no nosso caso, proximidade à Júpiter.

Além de parâmetros astrométricos esta rotina também determina a magnitude instrumental dos objetos via fotometria PSF (do inglês, *Point Spread Function*). O ponto zero é calculado em relação ao sistema fotométrico do catálogo de referência, no nosso caso o *Gaia* DR2.

Por fim, todas as informações astrométricas e fotométricas para cada objeto na imagem são armazenados em tabelas ASCII e tabelas específicas apenas com os alvos de escolha também são fornecidas automaticamente. Outras informações, como o número de estrelas em cada campo, o número de estrelas utilizadas na calibração (após a eliminação), o instante de tempo da observação e informações técnicas das observações (filtros utilizados, tempo de exposição, etc) são devidamente armazenadas.

<sup>6</sup> Do inglês *International Celestial Reference System*.

<sup>7</sup> Aproximadamente  $3\sigma$  da incerteza típica de centragem ( $\sim 17 mas$ ).

### 5.2.1 Catálogo Gaia

Os catálogos *Gaia* trouxeram uma evolução quando tratamos de astrometria. Incertezas nas posições das estrelas que antes eram da ordem de 60 *mas* utilizando os melhores catálogos disponíveis à época (UCAC4<sup>8</sup> por exemplo) agora alcança valores inferiores ao *mas*. Além disso, ao medir dois campos separados de 106,5° sobre o mesmo detector, este catálogo é virtualmente livre de efeitos sistemáticos zonais (Lindegren et al., 2016).

Em resumo, o satélite *Gaia* foi lançado em dezembro de 2013 da Guiana Francesa e os preparativos para o início das operações foram completados em julho de 2014 (Gaia Collaboration et al., 2016).

O primeiro *Gaia Data Release* (GDR1) foi publicado em setembro de 2016 e contou com posições (RA e Dec.) de mais de um bilhão de estrelas (Clementini et al., 2016). Este catálogo possui estrelas tão fracas quanto magnitude G 21, com precisões melhores que 16,3 *mas*. Para estrelas mais brilhantes que magnitude 16 a incerteza nas posições alcançam valores melhores que 5,0 *mas* (Lindegren et al., 2016).

O segundo *Gaia Data Release* (GDR2) foi publicado em abril de 2018 e contou com as posições atualizadas de mais de um bilhão de estrelas (Lindegren et al., 2018). Em particular esse catálogo também determinou os movimentos próprios e paralaxes. As incertezas das posições das estrelas agora, em muitos casos, se tornaram inferior ao *mas*. O terceiro *Gaia Data Release* (GDR3) está previsto para ser publicado no segundo semestre de 2021<sup>9</sup>.

## 5.3 Observações e redução

Esta etapa do projeto utilizou as imagens obtidas no Observatório Pico dos Dias utilizando os telescópios de 60 cm Zeiss (ZE) ou Boller & Chivens (B&C), utilizando os detectores CCD IKon-L<sup>10</sup> e IXom-EM<sup>11</sup>, em todos os casos utilizamos o filtro Metano de banda estreita centrado em 889 nm com largura de 15 nm. As imagens tratadas aqui em sua maioria foram planejadas como imagens para utilizarmos a técnica das aproximações mútuas<sup>12</sup>.

Como mencionado na Seção 5.1 a nossa técnica de combinação de imagens necessita que ao menos uma estrela esteja visível no campo, para as condições instrumentais utilizadas, isso significa uma estrela mais brilhante que magnitude 10 a uma distância menor que 6 minutos de arco de Júpiter. Apenas a partir de 2018 que esta condição é

<sup>8</sup> USNO CCD *Astrographic catalogue 4* - (Zacharias et al., 2013)

<sup>9</sup> Website: <<https://www.cosmos.esa.int/web/gaia/release>>

<sup>10</sup> Câmera de 2048 × 2048 pixels.

<sup>11</sup> Câmera rápida de 1024 × 1024 pixels.

<sup>12</sup> maiores detalhes no Capítulo 3.

satisfeita com recorrência. Pois, como mencionado no Capítulo 4, entre 2019 e 2020 Júpiter possui como plano de fundo a região central da Galáxia, aumentando muito a densidade de estrelas.

Analisamos nesta etapa 13 noites de observação, das quais 9 foram em 2018 e 4 em 2019. No total mais de 6.600 imagens foram tratadas com esta técnica, entre março de 2018 e maio de 2019. Como mencionamos anteriormente essa redução é preliminar e deverá ser aprimorada.

A redução destas imagens é feita em quatro etapas principais: (i) a primeira é a correção de *Flat-Filed* e *Bias* utilizando procedimentos padrões do IRAF; (ii) a segunda etapa é a determinação do centro  $(x, y)$  na imagem de uma (ou mais) estrela guia, esta etapa é realizada utilizando uma rotina PRAIA (Assafin et al., 2011), as variações de posições desta estrela guia  $(\Delta x, \Delta y)$  ao longo das diferentes imagens serão utilizadas para alinhar as imagens para a combinação; (iii) aqui é realizada a combinação de imagens em si. Por fim, (iv) utilizamos o pacote PRAIA para se fazer a astrometria clássica CCD das imagens.

A combinação das imagens é feita da seguinte maneira. Utilizando as posições  $(x, y)$  de uma estrela guia alinhamos um conjunto de  $N$  imagens, este alinhamento é feito considerando um movimento fracionado de pixels da imagem. Por fim, a imagem resultante é dividida por  $N$  para que as contagens da imagem resultante não possuam valores muito altos que impossibilitariam a utilização do pacote PRAIA na redução da etapa subsequente, além de permitir uma comparação direta entre as imagens individuais e as imagens combinadas. Como não é o nosso interesse determinar os fotocentros dos satélites nas imagens combinadas uma região de tamanho adequada centrada nos satélites (e em Júpiter) é retirada da imagem combinada. Todo este procedimento é realizado utilizando uma rotina PYTHON desenvolvida por mim para este projeto. Esta rotina se baseia em funções do ASTROPY, NUMPY e MATPLOTLIB

Determinamos as posições  $(x, y)$  das estrelas usando as imagens combinadas e as posições  $(x, y)$  dos satélites são determinadas nas imagens individuais<sup>13</sup>. Isso pressupõe que não há variações sistemáticas nas posições das estrelas entre as imagens combinadas, por isso optamos por fazer combinações de cem imagens, que corresponde a aproximadamente um intervalo de 12 minutos para um tempo de ciclo de 7 segundos<sup>14</sup>. Combinações maiores (duração da ordem de horas) podem ser afetadas por efeitos como refração atmosférica. A partir das posições das estrelas e dos satélites o pacote PRAIA é utilizado para obter as posições RA e DEC dos satélites.

Após a determinação das posições dos satélites galileanos corrigimos essas posições

<sup>13</sup> O movimento  $(\Delta x, \Delta y)$  aplicado é devidamente corrigido para cada imagem.

<sup>14</sup> Tempo de ciclo típico utilizando a câmera Ikon-L, tempo de exposição de 4 segundos e 3 segundos de tempo morto.

Tabela 19 – Astrometria utilizando a técnica de combinação de imagens.

Noite	Teles.	CCD	$N_s$	$N_c$	$\sigma_{RA}$	$\sigma_{DEC}$	$N_{im}$
2018-03-10	ZE	IKON-L	25	19	21,9	23,0	200
2018-03-11	ZE	IKON-L	22	17	23,7	24,2	400
2018-04-05	B&C	IKON-L	15	13	28,0	26,7	600
2018-06-29	B&C	IKON-L	18	17	23,8	22,0	800
2018-07-06	B&C	IKON-L	10	9	26,3	27,7	1300
2019-03-30	B&C	IKON-L	42	27	24,6	23,8	700
2019-04-21	B&C	IKON-L	263	179	22,1	21,6	500
2019-05-01	B&C	IXON-EM	77	49	22,0	24,5	200
2019-05-06	B&C	IXON-EM	15	12	24,4	29,3	1400
2019-05-06	ZE	IXON-EM	11	8	30,5	36,9	500

<sup>1</sup> A câmera IKON-L possui  $2048 \times 2048$  pixels.

<sup>2</sup> A câmera IXON-EM possui  $1024 \times 1024$  pixels.

do efeito de fase solar<sup>15</sup> (Lindgren, 1977; Hestroffer, 1998; Kaasalainen; Tanga, 2004) e esta correção pode chegar a 30 *mas* ( $\sim 90$  km).

## 5.4 Resultados preliminares

A técnica da combinação de imagens foi aplicada às imagens obtidas nos telescópios de 60 centímetros Zeiss (ZE) e Boller & Chivens (B&C) do Observatório Pico dos Dias (OPD), os detectores CCD utilizados foram os IKon-L e o IXon-EM, todas as imagens foram feitas utilizando o filtro Metano de banca estreita centrado em 889 nm com banda passante de 15 nm. Para a astrometria o catálogo utilizado foi o GDR2. As imagens combinadas são a média de cem imagens consecutivas.

A astrometria obtida das imagens combinadas conta com estrelas de referência de magnitudes G entre 9 e 17 e foi utilizado um ajuste polinomial de segundo grau. A Tabela 19 contém um resumo da astrometria de cada noite. Nesta tabela temos o telescópio utilizado, o detector CCD, o número de estrelas de calibração encontradas na imagem ( $N_s$ ), o número de estrelas utilizadas na astrometria ( $N_c$ ) e o número de imagens feitas ( $N_{im}$ ). Por fim, apresentamos a média do desvio padrão de todas as estrelas no campo em relação a suas posições no catálogo de referência (GDR2), em ascensão reta ( $\alpha$ ) e declinação ( $\delta$ ).

Como exemplo temos a noite do dia 21 de abril de 2018, nesta noite observamos com o telescópio B&C, detector Ikon-L e o filtro Metano. As imagens foram feitas com 4 segundos de exposição, a Figura 77 é um exemplo de uma das imagens desse conjunto, note que é possível ver algumas estrelas na imagem, ainda que elas estejam sub amostradas. A

<sup>15</sup> Como mencionado no Capítulo 3, Seção 3.4.1.1



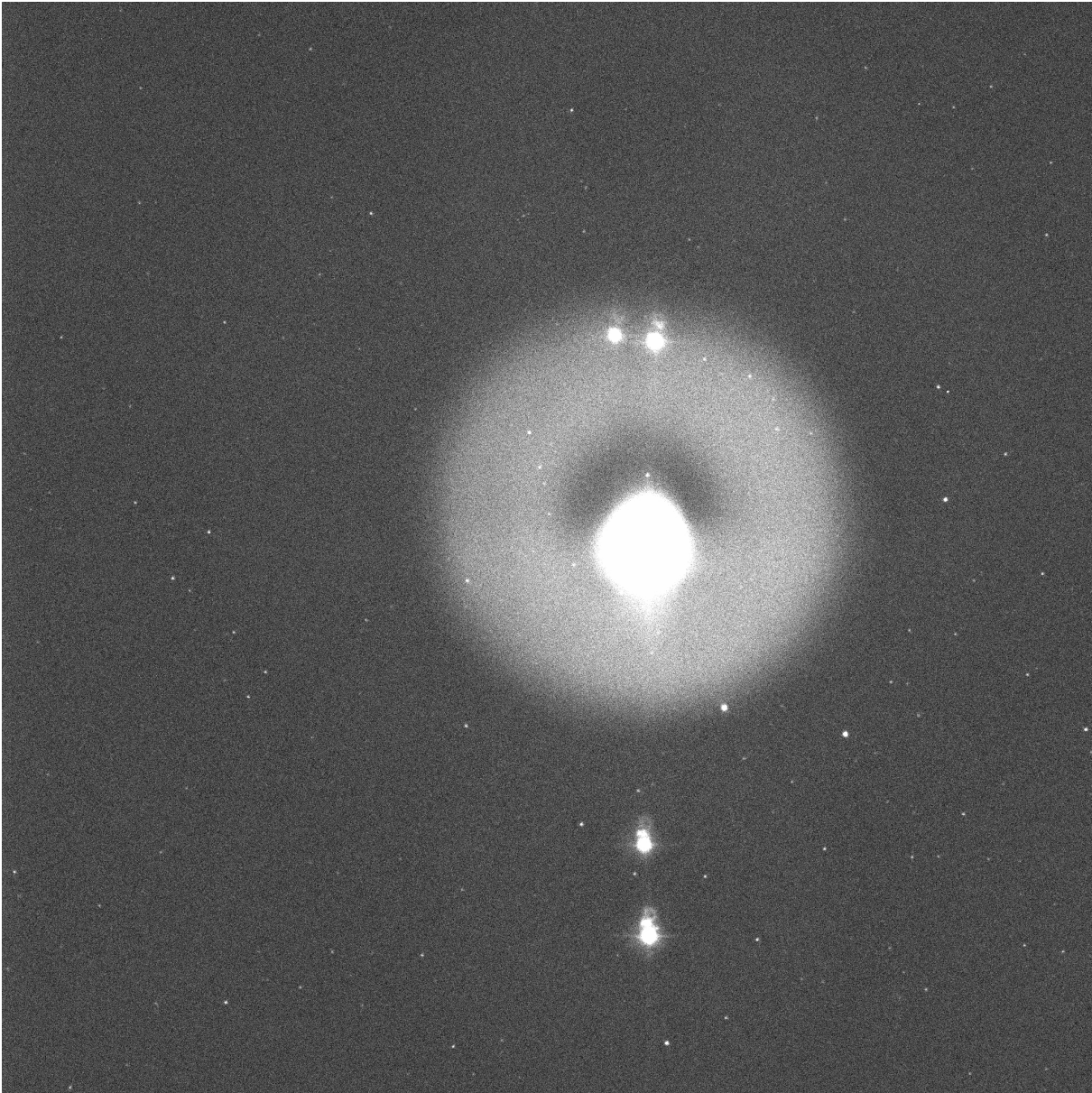


Figura 77 – Imagem individual obtida com o telescópio B&C de 60 cm, câmera IKon-L e filtro Metano na noite do dia 21 de abril de 2019. O tempo de exposição utilizado foi de 4 segundos. O campo é de  $12 \times 12$  minutos de arco. Os artefatos que aparecem nessa imagem estão relacionados com uma reflexão interna dos objetos brilhantes (satélites galileanos e Júpiter) devido ao filtro Metano, estes artefatos possuem baixíssima contagem se comparado aos objetos brilhantes, não contaminando a determinação dos fotocentros, como pode ser visto na Figura 76.

combinação de cem imagens está representada na Figura 78, uma máscara foi aplicada em cima dos satélites para que eles não afetassem a astrometria do campo. Note o aumento significativo de estrelas no campo ao combinarmos as imagens.

Utilizando a imagem combinada identificamos 248 estrelas para calibração astrométrica que estão  $10\sigma$  acima do fundo do céu, destas estrelas 210 foram efetivamente

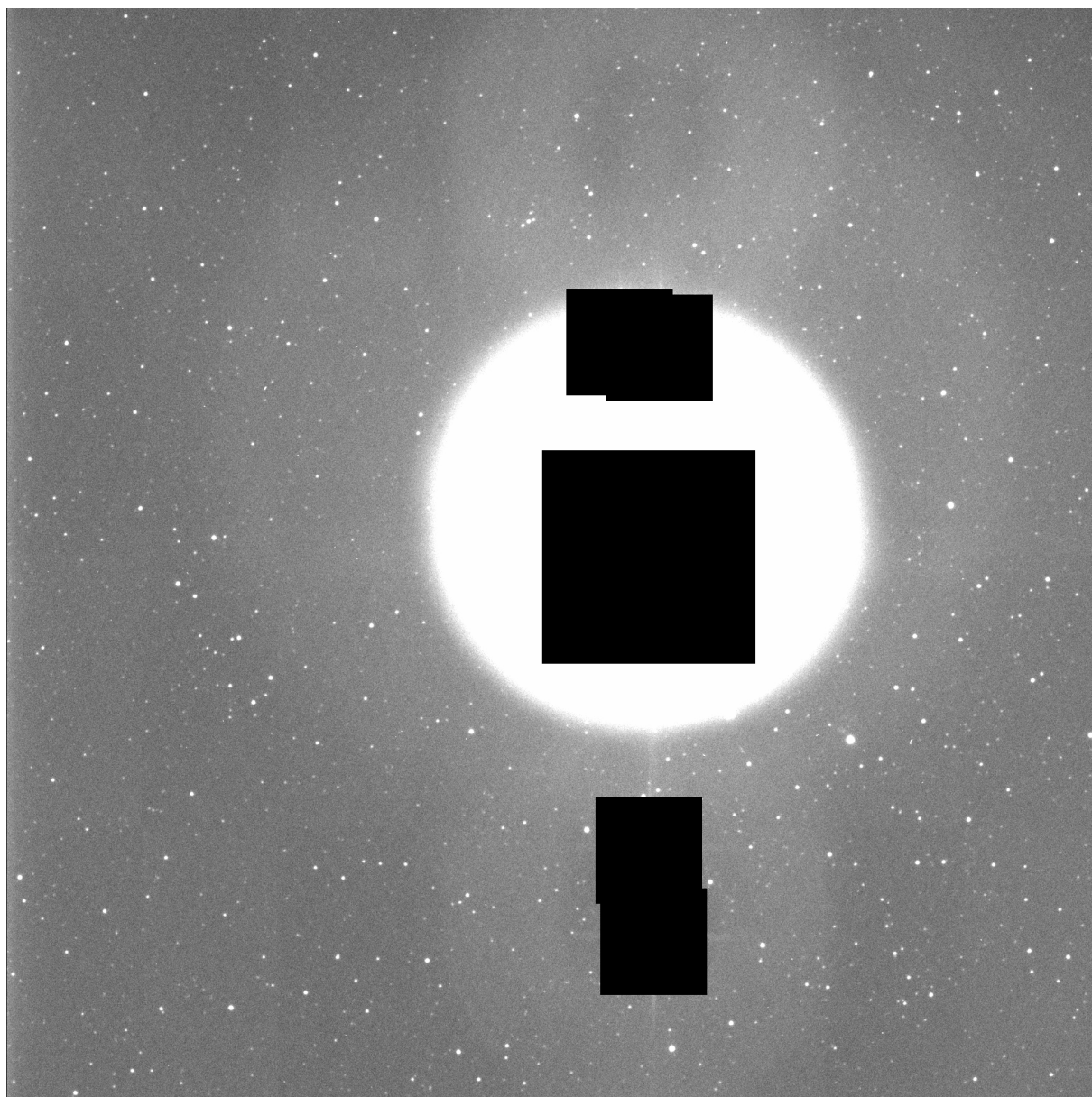


Figura 78 – Combinação de cem imagens obtidas com o telescópio B&C de 60 cm, câmera IKon-L e filtro Metano na noite do dia 21 de abril de 2019. Máscaras foram aplicadas em cima dos satélites galileanos e de Júpiter.

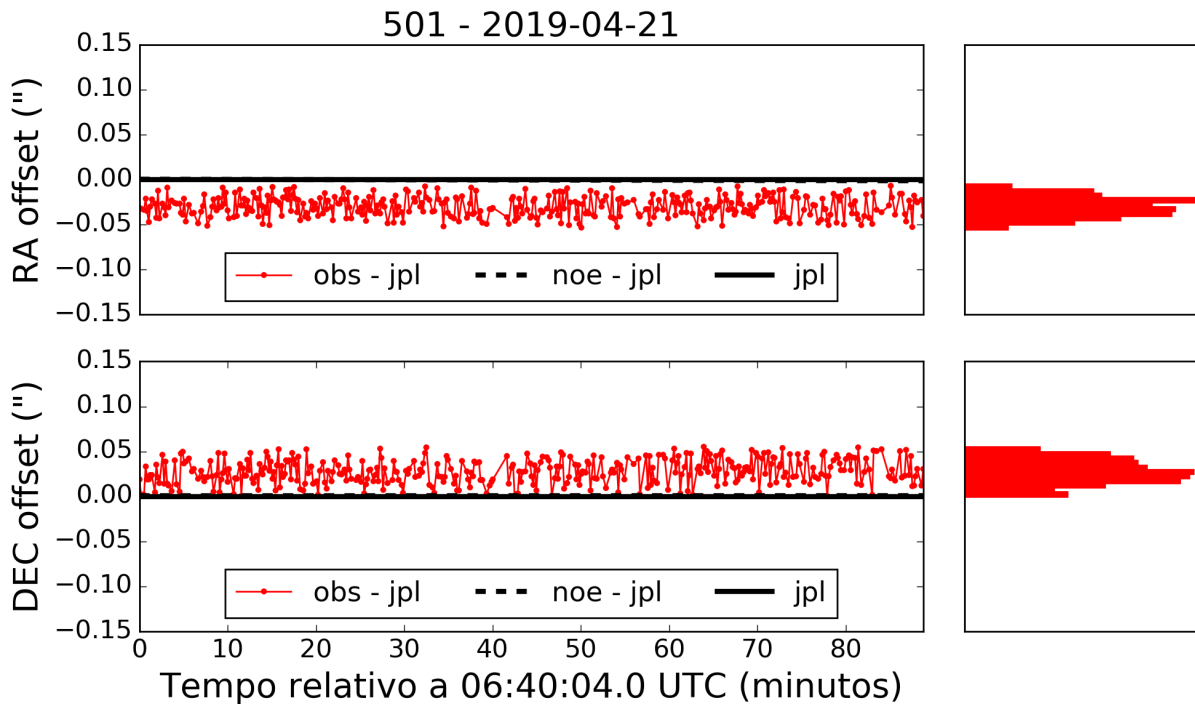


Figura 79 – Diferença entre as observações e as efemérides em RA e DEC ao longo do tempo para Io obtido na noite do dia 21 de abril de 2019. A esquerda está disponibilizados os histogramas desses offsets. Os desvios padrões foram 11,3 *mas* para RA e 13,6 *mas* para DEC.

utilizadas na redução, as demais foram eliminadas devido a possuírem uma diferença entre a posição determinada e a sua posição catalogada maior que 50 *mas*.

A astrometria dos satélites galileanos resultante nesta noite está ilustrada pelas Figuras 79, 80, 81 e 82. Essas Figuras mostram a diferença entre as posições determinadas para os satélites galileanos e as efemérides DE435 e *jup310*, a linha preta contínua demarca o zero, a linha pontilhada representa a diferença entre as efemérides *jup310* e a NOE-5-2010-GAL. O painel superior ilustra a diferença em ascensão reta (RA) e o inferior em declinação (DEC) em relação ao tempo, no lado direito apresentamos o histograma de ambos os casos.

Ainda que seja uma primeira análise, obtivemos para as 9 noites, um desvio padrão médio de 20,0 *mas* ( $\sim 60$  km) em RA e 16,3 *mas* ( $\sim 50$  km) em Declinação, mais de 6.600 imagens foram analisadas. Nosso estudo preliminar mostrou que a técnica de combinação de imagens é capaz de determinar posições no ICRS com precisões melhores que 30 *mas*. As posições determinadas com esta técnica serão úteis na melhoria das órbitas dos satélites galileanos e além disso essa técnica permitirá também uma melhoria nas efemérides de Júpiter.

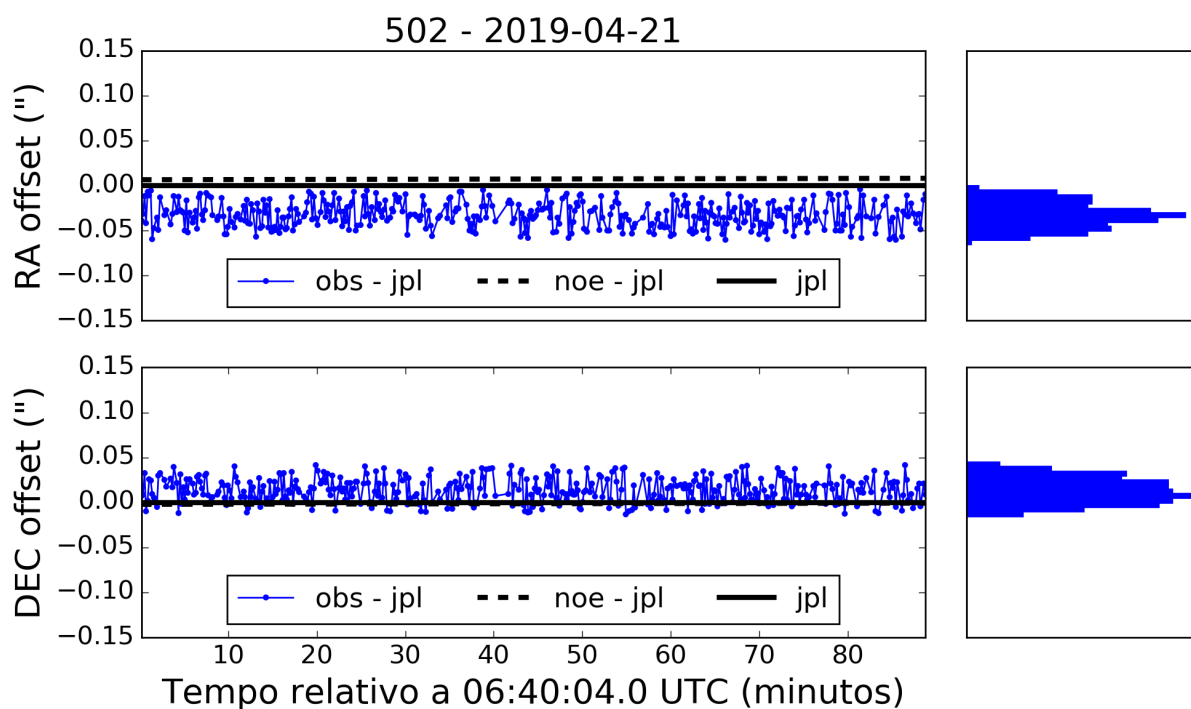


Figura 80 – Análogo à legenda da Figura 79 para Europa. Os desvios padrões foram 13,7 *mas* para RA e 14,0 *mas* para DEC.

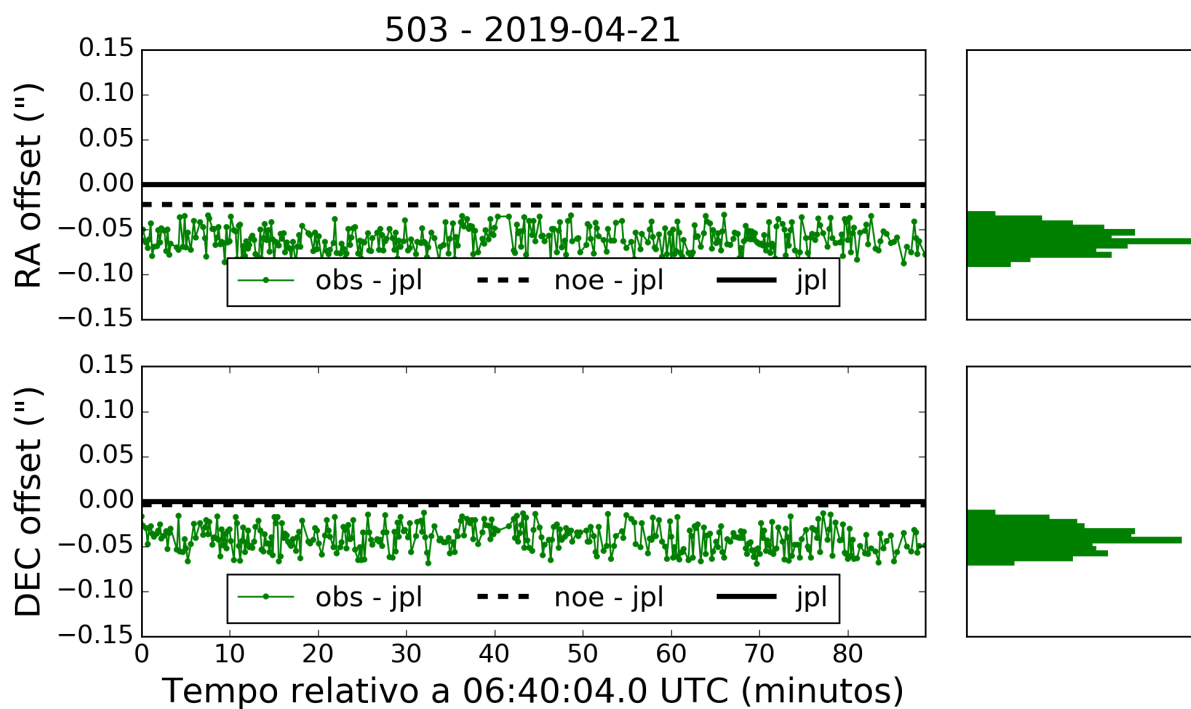


Figura 81 – Análogo à legenda da Figura 79 para Ganímedes. Os desvios padrões foram 13,4 *mas* para RA e 13,9 *mas* para DEC.

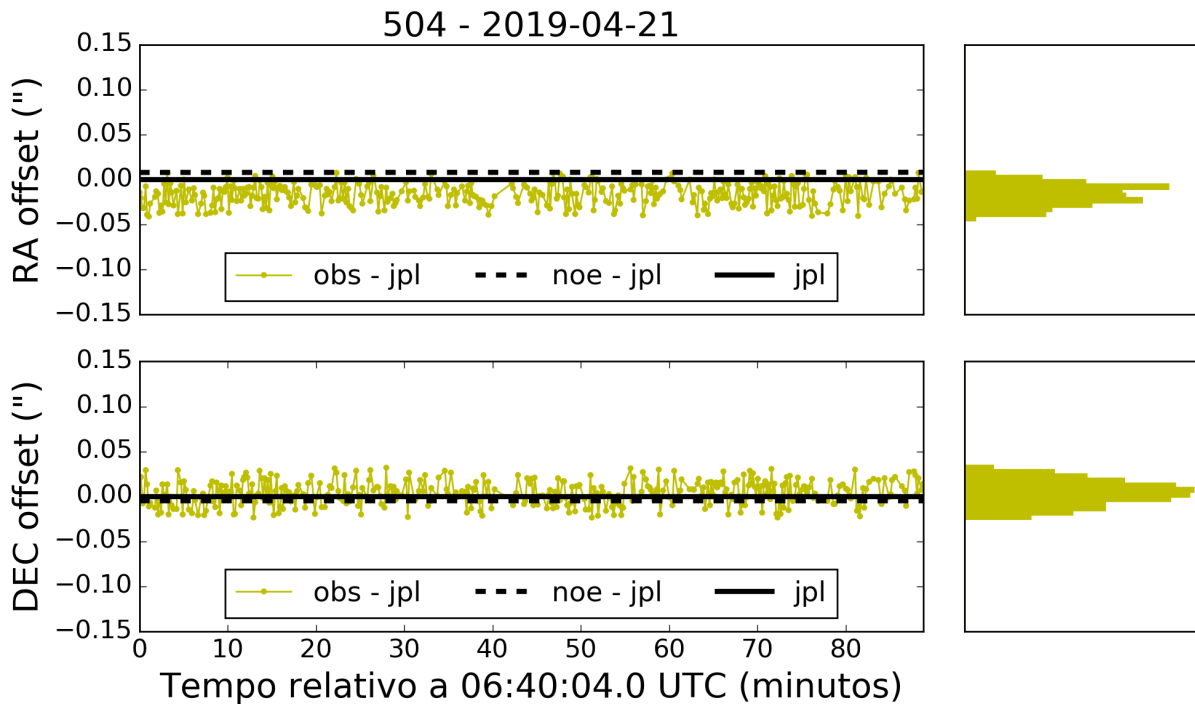


Figura 82 – Análogo à legenda da Figura 79 para Calisto. Os desvios padrões foram 11,8 *mas* para RA e 13,6 *mas* para DEC.

## 5.5 Considerações para o futuro

Com o advento de câmeras rápidas, a técnica de combinação de imagens para o imageamento de objetos moveis se torna uma opção interessante. Em particular, em casos em que objetos de magnitudes muito diferentes precisam ser imageados juntos, como é o caso dos satélites galileanos.

Entre 2020 e 2021 Júpiter ainda terá como plano de fundo uma região densa de estrelas permitindo que esta técnica seja aplicada. Diferente do que foi feito aqui, onde as imagens obtidas foram planejadas no contexto das aproximações mútuas, projetos para observações direcionada para a técnica da combinação de imagens serão propostos e assim será possível completar esta investigação. As datas serão selecionadas de forma a ter uma estrela suficientemente brilhante no mesmo campo que Júpiter. Além disso, esta técnica permitirá uma astrometria dos satélites galileanos em projetos rotineiros e não apenas em projetos específico, como os explorados aqui.

Técnicas de pós-processamento também poderão ser utilizadas para melhorar a qualidade da imagem combinada. Um exemplo é a coronagrafia digital (Assafin et al., 2008) que foi utilizada com sucesso na observação do eclipse de Amalteia dentro deste projeto<sup>16</sup>. Esta coronagrafia permitirá eliminar ainda mais a luz difusa de Júpiter na imagem e assim medir a posição de estrelas (ou dos satélites) que estejam próximos do planeta. Note o

<sup>16</sup> Ver Capítulo 2, Seção 2.4.2.

efeito causado pela luz de Júpiter que aparece nas Figuras 77 e 78. Esta coronagrafia vem sendo aplicada com sucesso para o sistema de Urano (Assafin et al., 2009; Camargo et al., 2015; Santos-Filho et al., 2019).

Além disso, variações desta técnica podem ser desenvolvidas e aplicadas para outros sistemas, por exemplo, os sistemas de Urano e de Netuno são fortes candidatos para se utilizar esta técnica. Além disso, uma variação que permita a combinação de imagens dos satélites galileanos sem que seja necessária uma estrela guia, por exemplo utilizando os próprios satélites como objeto guia porém descontando o seu movimento, poderá ser desenvolvida e explorada.

Além das aplicações astrométricas discutidas neste capítulo a técnica da combinação de imagens também é útil para melhorar o sinal sobre ruído das imagens para uma melhor fotometria, a custo da resolução temporal. Esta técnica pode ser aplicada no contexto das ocultações estelares, como mencionado no Capítulo 4, Seção 4.3.2. Neste caso utilizando o próprio satélite ocultador (Europa) como guia. A combinação de imagens foi feita considerando que os satélites não se moveram significativamente entre as imagens combinado, o que só foi possível uma vez que a resolução temporal original era de apenas 0,05 segundos. Foi feita a combinação de 20 imagens o que resultou em uma resolução temporal de 1 segundo.



## 6 Comparação dos resultados

Ao longo deste projeto analisamos diferentes técnicas para se obter a astrometria dos satélites galileanos. Analisamos 72 fenômenos mútuos, 127 aproximações mútuas, 1 ocultação estelar e 9 noites utilizando a técnica da combinação de imagens. As posições obtidas estão em diferentes formas, dessa forma a comparação entre elas, inclusive as incertezas, precisam ser avaliadas com certa cautela.

A partir dos fenômenos mútuos determinamos: (i) a mínima separação entre dois satélites<sup>1</sup>, o parâmetro de impacto ( $s_0$ ); (ii) O instante de tempo que esta mínima separação acontece, o instante central ( $t_0$ ); e (iii) a velocidade relativa no plano do céu entre os satélites ( $v_0$ ).

As aproximações mútuas são capazes de fornecer os mesmos parâmetros ( $s_0$ ,  $t_0$  e  $v_0$ ). Entretanto, sem que calibração externa seja feita apenas o instante central é de fato determinado independentemente de efemérides.

Em uma ocultação estelar determinamos a posição relativa entre o objeto ocultador e a estrela ocultada. Porém ao conhecermos a posição absoluta da estrela, utilizando o catalogo Gaia DR2 por exemplo, também determinamos a posição absoluta do objeto de interesse ( $\alpha$  e  $\delta$ ).

A técnica da combinação de imagens é uma técnica de pós-processamento que, após aplicada, permite uma típica astrometria clássica CCD utilizando as estrelas catalogadas como referência astrométrica. Neste caso, determinamos as posições absolutas ( $\alpha$  e  $\delta$ ) dos satélites nas imagens.

Os fenômenos mútuos, aproximações mútuas e as ocultações estelares requerem que a observação seja feita em um momento específico, durante o evento em questão. Para os fenômenos mútuos estes eventos acontecem apenas duas vezes a cada órbita de Júpiter (de 6 em 6 anos). As aproximações acontecem ao longo de toda a órbita de Júpiter. As ocultações estelares requerem que um dos satélites oculte uma estrela suficientemente brilhante, um evento tipicamente raro. Entretanto, esse evento é mais provável de acontecer quando Júpiter atravessa uma região densa de estrelas. Por outro lado, a técnica da combinação de imagens não possui restrição temporal. Entretanto, da maneira com que ela foi elaborada neste projeto, é necessário ter ao menos uma estrela brilhante no mesmo campo (FoV), o que pode ser previsto e planejado facilmente.

Em alguns casos algumas destas técnicas podem ser aplicadas ao mesmo conjunto de dados, ou então durante a mesma noite. Neste capítulo apresentaremos uma comparação

---

<sup>1</sup> Ou, no caso de um eclipse, a mínima separação entre o satélite eclipsado e a sombra do eclipsante.



entre os fenômenos mútuos e as aproximações mútuas (Seção 6.1) e entre as aproximações mútuas e a combinação de imagens (Seção 6.2). Por fim, na Seção 6.3 apresentamos como essas técnicas se comparam no contexto das efemérides e qual a precisão das efemérides que obtemos no contexto da missão JUICE.

## 6.1 Fenômenos mútuos $\times$ Aproximações mútuas

A técnica das aproximações mútuas (Capítulo 3) foi inspirada na geometria característica das ocultações mútuas (Capítulo 2). Porém em uma ocultação mútua analisamos a variação da luz dos objetos ao longo do tempo (curva de luz) e assim determinamos os parâmetros de interesse:  $s_0$ ,  $t_0$  e  $v_0$ . Já em uma aproximação mútua, analisamos a variação da distância entre dois objetos no tempo e assim determinamos o instante central ( $t_0$ ).

Embora as duas técnicas sejam baseadas na mesma geometria e determinam os mesmos parâmetros, suas execuções são completamente diferentes e independentes. Em uma ocultação mútua fazemos a fotometria de ambos os satélites na mesma abertura, devido a proximidade e ao *seeing* estes satélites estão indistinguíveis nas imagens. Já durante uma aproximação mútua determinamos os centroides (fotocentros) dos satélites utilizando um ajuste de uma gaussiana bidimensional circular, para isso os satélites precisam estar suficientemente separados. Note que não apenas as técnicas são diferentes, mas as imagens também não podem ser as mesmas.

A Figura 83 contém a curva de luz do ocultação de Io por Europa que ocorreu em 22 de fevereiro de 2015 e a Figura 84 é a curva de separação do mesmo evento que foi obtida com imagens antes e após a ocultação<sup>2</sup>. O instante central obtido com a ocultação mútua foi 02:07:51,7 com uma incerteza de 0,2 segundos (1,1 *mas*) e o mesmo parâmetro obtido utilizando a técnica das aproximações mútuas foi 02:07:53,6 com uma incerteza de 2,6 segundos (14,3 *mas*), havendo uma concordância em  $1\sigma$ . Note que é esperado que a técnica da aproximação mútua possua uma incerteza maior, uma vez que temos uma lacuna de pontos no meio do evento (ver testes realizados no Capítulo 3, Seção 3.2.2.4.1).

Estas duas técnicas foram aplicadas simultaneamente a 13 eventos e os resultados estão disponíveis na Tabela 20. Nesta tabela apresentamos a data do evento e os satélites envolvidos seguindo a nomenclatura definida no Capítulo 2 e listamos os instantes centrais em UTC e suas incertezas como determinados utilizando estas duas técnicas. Após, apresentamos a diferença ( $\Delta t_0$ ) no sentido fenômeno mútuo menos aproximação mútua, em segundos. Por fim, apresentamos essa diferença normalizada pela soma das incertezas obtidas ( $\Delta t_0(\sigma)$ ), isso nos informa que para valores entre -1 e 1 temos uma concordância dentro de  $1\sigma$ . Para todos os eventos temos uma concordância inferior a  $3\sigma$ , para 11 dos 12

<sup>2</sup> Essas mesmas imagens também foram utilizadas na determinação da razão de albedo entre os satélites.

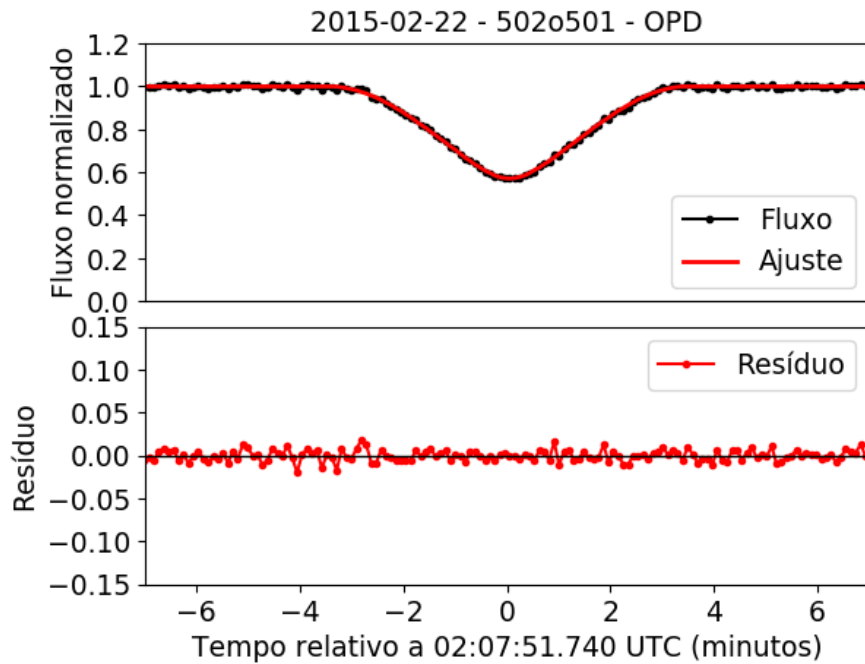


Figura 83 – Curva de luz obtida das imagens do OPD para a ocultação de Io por Europa que ocorreu no dia 22 de fevereiro de 2015. Note que esta curva inicia 7 minutos antes do instante central, indo até 7 minutos após este instante.

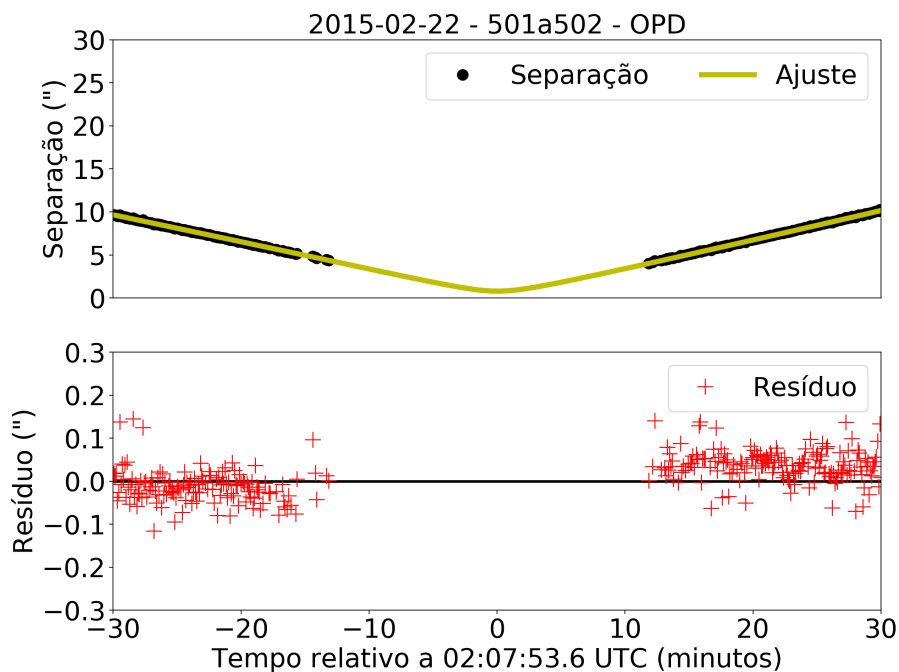


Figura 84 – Curva de separação observada pelo OPD para a aproximação entre Io e Europa que ocorreu no dia 22 de fevereiro de 2015. Este evento culminou em uma ocultação de Io por Europa. Note a lacuna de pontos 12 minutos antes do instante central até 12 minutos após este instante.

eventos a concordância é da ordem de  $1\sigma$  ou menor. O evento dado como exemplo está enfatizado em cinza claro nesta tabela.

Tabela 20 – Comparação entre os resultados obtidos analisando os fenômenos mútuos e as aproximações mútuas.

Data (aa-mm-dd)	Ev.	Fenômenos mútuos	Aproximações mútuas	$\Delta t_0$ (s – mas)	$\Delta t_0(\sigma)$ ( $\sigma$ )
		$t_0 \pm \sigma t_0$ (UTC) (hh:mm:ss.s $\pm$ s.s)	$t_0 \pm \sigma t_0$ (UTC) (hh:mm:ss.s $\pm$ s.s)		
14-11-02	4o1	06:02:14,8 $\pm$ 1.9	06:02:34,1 $\pm$ 18,4	-19,3 – -35.32	-0,95
14-11-19	4o2	07:37:43,9 $\pm$ 0.2	07:37:52,5 $\pm$ 07,2	-08,6 – -43.34	-1,16
15-02-22	2o1	02:07:51,7 $\pm$ 0.2	02:07:53,6 $\pm$ 02,6	-01,9 – -10.54	-0,68
15-03-03	3o1	04:08:16,3 $\pm$ 0.5	04:08:13,4 $\pm$ 07,6	+02,9 – +24.74	+0,36
15-04-02	2o1	01:43:55,9 $\pm$ 0.7	01:43:57,4 $\pm$ 03,8	-01,5 – -09.69	-0,33
15-04-17	4o1	23:47:06,9 $\pm$ 0.9	23:47:03,3 $\pm$ 02,6	+03,6 – +18.18	+1,03
15-04-18	4o3	01:32:30,4 $\pm$ 0.9	01:32:21,2 $\pm$ 02,4	+09,2 – +46.18	+2,79
15-04-18	1o3	20:54:45,6 $\pm$ 3.7	20:54:40,8 $\pm$ 04,2	+04,8 – +26.40	+0,60
15-04-25	1o3	23:45:28,1 $\pm$ 1.3	23:45:24,8 $\pm$ 03,0	+03,3 – +19.96	+0,77
15-04-26	2o1	21:25:00,0 $\pm$ 3.4	21:24:57,4 $\pm$ 08,2	+02,6 – +18.41	+0,22
15-04-29	3o1	00:29:06,9 $\pm$ 1.2	00:28:55,5 $\pm$ 08,8	+11,4 – +78.89	+1,14
15-05-03	2o1	23:39:19,6 $\pm$ 2.2	23:39:20,9 $\pm$ 03,0	-01,3 – -08.88	-0,25

## 6.2 Aproximações mútuas $\times$ Combinação de imagens

Eventualmente teremos uma estrela brilhante no mesmo campo que Júpiter durante uma aproximação mútua. Especialmente, entre 2018 até 2021 Júpiter está atravessando uma região densa de estrelas, tendo o centro da Galáxia como plano de fundo. Isso aumenta muito a chance de estrelas brilhantes (magnitude G da ordem de 10) estarem no mesmo campo que Júpiter, permitindo assim utilizarmos a técnica da combinação de imagens regularmente (Capítulo 5).

A partir das posições  $(\alpha, \delta)$  de dois satélites  $i$  e  $j$  podemos determinar a separação ( $s_{ij}$ ) entre estes dois objetos no plano do céu utilizando a Equação (6.1)

$$s_{ij} = \sqrt{\Delta X^2 + \Delta Y^2} . \quad (6.1)$$

onde

$$\Delta X = (\alpha_i - \alpha_j) \cdot \cos(\delta_m) , \quad (6.2)$$

$$\Delta Y = \delta_i - \delta_j , \quad (6.3)$$

$$\delta_m = \frac{\delta_i + \delta_j}{2} , \quad (6.4)$$

A partir das separações ao longo do tempo determinamos o instante central utilizando os procedimentos descritos no Capítulo 3. Dessa forma podemos calcular o instante central utilizando dois conjuntos de dados, o primeiro contém as posições nas imagens brutas  $(x, y)$  dos satélites em pixels e o segundo contém as posições  $(\alpha, \delta)$  processadas pelo pacote PRAIA em unidades angulares. Para a aproximação entre Io e Calisto que aconteceu em 22 de abril de 2019, utilizando as posições brutas determinamos um instante central igual a 07:10:45,4 UTC com uma incerteza de 4,1 segundos (9,9 *mas*), utilizando as posições pós processadas obtivemos um instante central de 07:10:40,1 com uma incerteza de 3,7 segundos (8,9 *mas*). Ambos os valores estão dentro de  $1\sigma$ .

Ao longo deste projeto em 6<sup>3</sup> noites foi possível analisar utilizando ambas as técnicas. Os resultados estão organizados na Tabela 21. Nesta tabela apresentamos a data do evento e os satélites envolvidos seguindo a nomenclatura definida no Capítulo 3 e listamos os instantes centrais em UTC e suas incertezas como determinados utilizando as imagens brutas e as imagens pós-processadas. Após, apresentamos a diferença ( $\Delta t_0$ ) no sentido aproximação mútua menos combinação de imagens, em segundos. Por fim, apresentamos essa diferença normalizada pela soma das incertezas obtidas ( $\Delta t_0(\sigma)$ ), isso nos informa que para valores entre -1 e 1 temos uma concordância dentro de  $1\sigma$ . Para todos os eventos temos uma concordância inferior a  $2\sigma$ , para 5 dos 6 eventos a concordância é menor que  $1\sigma$ . O evento dado como exemplo está enfatizado em cinza claro nesta tabela.

Tabela 21 – Comparação entre a técnica das aproximações mútuas aplicada antes e após a astrometria clássica CCD que só foi possível após a combinação das imagens.

Data (aa-mm-dd)	Ev.	Posições $(x,y)$	Posições $(\alpha,\delta)$	$\Delta t_0$ (s – mas)	$\Delta t_0(\sigma)$ ( $\sigma$ )
		$t_0 \pm \sigma t_0$ (UTC) (hh:mm:ss.s $\pm$ s.s)	$t_0 \pm \sigma t_0$ (UTC) (hh:mm:ss.s $\pm$ s.s)		
18-04-06	1a2	02:40:32,0 $\pm$ 1,2	02:40:35,6 $\pm$ 1,2	-3,6 – -26,4	-1,50
18-07-07	1a3	00:30:56,8 $\pm$ 1,1	00:30:57,6 $\pm$ 1,5	-0,8 – -04,6	-0,31
19-03-31	1a2	05:00:53,8 $\pm$ 1,4	05:00:53,4 $\pm$ 1,9	+0,4 – +01,3	+0,12
19-04-22	1a4	07:10:45,4 $\pm$ 4,1	07:10:40,1 $\pm$ 3,7	+5,3 – +12,8	+0,68
19-05-02	1a2	03:16:18,4 $\pm$ 1,7	03:16:15,2 $\pm$ 2,2	+3,2 – +16,8	+0,82
19-05-07	1a3	03:28:09,4 $\pm$ 0,6	03:28:07,5 $\pm$ 1,6	+1,9 – +12,4	+0,86
19-05-07	1a3	03:28:09,0 $\pm$ 1,0	03:28:07,1 $\pm$ 1,7	+1,9 – +12,5	+0,70

Além disso, um segundo ponto que é importante destacar é que com esses dados pós-processados é possível determinar o parâmetro de impacto ( $s_0$ ) em unidades de segundos de arco e não apenas em unidades de pixels. Para esse exemplo o  $s_0$  foi de 24,2147 segundos de arco com uma incerteza de 0,0113. A Tabela 22 contém os valores obtidos para os parâmetros de impacto ( $s_0$ ), sua incerteza ( $\sigma s_0$ ) e o *offset* em relação as efemérides *jup310*

<sup>3</sup> Note que o evento do dia 07 de maio de 2019 foi observado por dois telescópios simultaneamente, o Boller & Chivens e o Zeiss, ambos do Observatório Pico dos Dias.

e DE435, no sentido observação menor efeméride. A média das incertezas foi de 13,4 *mas* ( $\sim 40$  km).

Tabela 22 – Determinação do parâmetro de impacto de uma aproximação mútua utilizando as posições ( $\alpha$ ,  $\delta$ ) pós-processadas pelo método da combinação de imagens.

Data (aaaa-mm-dd)	Evento ( $S_1 \times S_2$ )	$s_0 \pm \sigma s_0$ ( <i>mas</i> )	$\Delta s_0$ ( <i>mas</i> )
18-04-06	1a2	17.234,5 $\pm$ 11,5	-04,7
18-07-07	1a3	19.469,9 $\pm$ 07,7	-10,8
19-03-31	1a2	07.718,1 $\pm$ 14,2	+00,7
19-04-22	1a4	24.214,7 $\pm$ 11,3	+24,4
19-05-02	1a2	10.706,1 $\pm$ 23,4	+06,2
19-05-07	1a3	19.657,7 $\pm$ 11,9	-12,6
19-05-07	1a3	19.635,0 $\pm$ 13,6	-25,3

### 6.3 Precisão das efemérides no contexto da missão JUICE

A sonda espacial JUICE da ESA tem previsão de chegada ao sistema joviano em 2029<sup>4</sup>. Uma das motivações da astrometria deste sistema é auxiliar na preparação desta e da sonda *Europa Clipper* da NASA.

Neste contexto é interessante analisar qual será a precisão na posição dos satélites galileanos para a data de chegada da sonda (2029). Este estudo foi uma colaboração realizada junto ao Valery Lainey e à Eléonore Saquet durante a minha estadia no Doutorado Sanduíche. Aqui utilizamos o código de integração numérica NOE desenvolvido pelo V. Lainey (Lainey; Duriez; Vienne, 2004; Lainey; Arlot; Vienne, 2004; Lainey et al., 2009; Lainey et al., 2012; Lainey et al., 2017; Lainey et al., 2019). Este estudo foi encomendado pelo *European Space Operations Centre* (ESOC) no final de 2016.

Neste estudo analisamos as incertezas nas posições dos quatro satélites galileanos ao longo do tempo entre os anos 2000 e 2035. Estas incertezas foram propagadas a partir dos resultados obtidos de dois diferentes ajustes de órbita. O primeiro ajuste considerou as posições disponíveis no *Natural Satellites DataBase* (NSDB)<sup>5</sup> até 2016. O segundo ajuste foi feito considerando os dados reais e dados simulados entre 2017 e 2029.

Os dados simulados foram criados de maneira a reproduzir de maneira realista as observações futuras se baseando nas observações que foram feitas recentemente (entre 2014 e 2016). Foram simulados dados oriundos de diferentes técnicas astrométricas. Adicionamos ruídos randômicos a estes dados de maneira a simular a precisão típica que seria obtida,

<sup>4</sup> Website: <<http://sci.esa.int/juice/>>

<sup>5</sup> Website: <<http://nsdb.imcce.fr/nsdb/home.html>>

além disso, conjuntos de observações foram eliminados randomicamente de maneira a simular as condições climáticas.

Os dados simulados foram de quatro tipo: (i) *precision premium*, posições relativas entre os satélites, tipicamente duas noites por ano; (ii) fenômenos mútuos, as campanhas internacionais de 2021 e 2026-2027; (iii) aproximações mútuas, campanhas anuais entre 2016 e 2029; e (iv) combinação de imagens, da ordem de uma dezena de noites por ano.

Ajustamos as órbitas destes satélites utilizando estes dois conjuntos de dados, propagamos a incerteza destas órbitas e analisamos a precisão das posições para cada satélite. As Figuras 85 contém a variação da precisão nas posições, em *mas*, para o período entre os anos 2000 e 2035. Nesta figura chamamos a atenção para o fato que as órbitas rapidamente se deterioram quando não temos observações (Desmars et al., 2015), além disso, a oscilação presente remete a um erro na distância entre a Terra e o sistema joviano (erro de paralaxe). Note também que Calisto é o satélite com uma posição mais estável, uma vez que os outros três satélites estão altamente correlacionados devido a ressonância Laplaciana em que se encontram. Para o ajuste que considerou os dados reais e os simulados as incertezas alcançam valores típicos menores que 5 *mas* ( $\sim 15$  km).

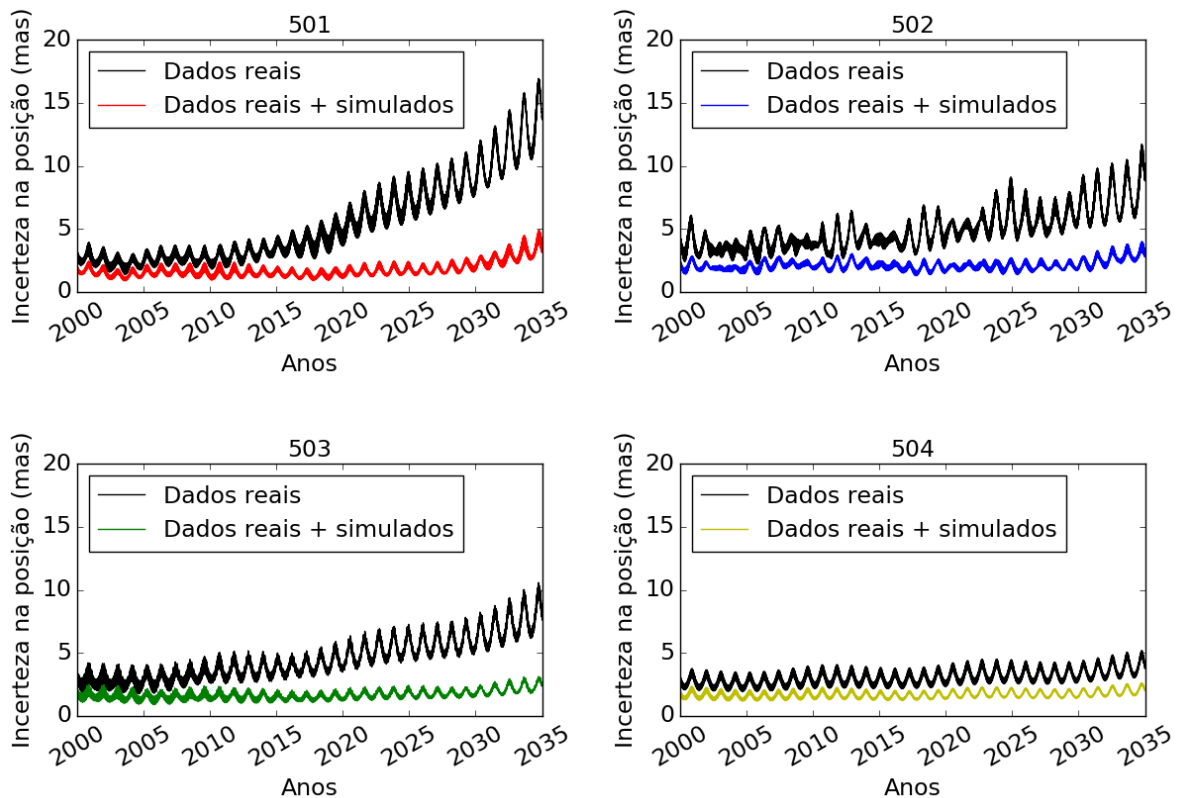


Figura 85 – Precisão das efemérides dos satélites galileanos para dois conjuntos de dados. O conjunto 1 contém as posições disponíveis no NSDB até 2016, o conjunto 2 contém o conjunto 1 e posições simuladas entre 2016 e 2029.

Este estudo reforça a necessidade e o interesse em novas observações dos satélites

galileanos no contexto das missões espaciais. Reforçando assim a motivação deste projeto.

## 7 Considerações finais

Essa tese se apresenta como uma coletânea de diferentes técnicas alternativas capazes de obter a astrometria de satélites naturais quando a astrometria clássica CCD não é uma opção viável, como é o caso dos satélites galileanos de Júpiter. Para o caso destes satélites, esta astrometria clássica obtém resultados com incertezas da ordem de  $100 \text{ mas}$  ( $\sim 300 \text{ km}$ ). Neste projeto, aplicamos estas técnicas alternativas aos satélites galileanos de Júpiter e determinamos suas posições.

Note que estas técnicas podem ser adaptadas e aplicadas a outros sistemas. Por exemplo, a metodologia desenvolvida para a redução e análise dos fenômenos mútuos pode ser utilizada em dados de fenômenos mútuos históricos e nas observações futuras. A partir dela é possível incluir efeitos finos como a variação de albedo na superfície dos satélites, uma vez que esse conhecimento esteja adequadamente disponível. Além disso essa metodologia pode ser adaptada para a redução e análise de outros fenômenos mútuos, seja aqueles envolvendo outros sistemas de satélites ou entre objetos binários.

A técnica das aproximações mútuas, por sua vez, vem sendo aplicada com sucesso aos cinco principais satélites de Urano (Miranda, Ariel, Umbriel, Titânia e Oberon) (Santos-Filho et al., 2019)<sup>1</sup> e os resultados obtidos possuem precisão média de  $45 \text{ mas}$ , qualidade da mesma ordem que os fenômenos mútuos destes satélites (Assafin et al., 2009), sem a restrição de somente serem observados a cada 42 anos.

As ocultações estelares vêm sendo utilizada por nosso grupo de pesquisa para determinação das características físicas dos objetos de interesse, Objetos Trans Netunianos (TNOs), Centauros, Troianos e satélites dos planetas gigantes dentro de uma colaboração internacional com o projeto *Lucky Star*<sup>2</sup>. Os resultados obtidos possuem precisão de poucos quilômetros, similar àqueles obtidos por imagens de sondas espaciais. Devido à Júpiter e Saturno estarem em um campo estelar denso (o plano da galáxia) está técnica pode ser utilizada para melhor caracterizar os satélites desses planetas, seja os satélites próximos (regulares) ou os satélites irregulares (Gomes-Júnior et al., 2016; Gomes-Júnior, 2018).

Em particular a técnica da combinação de imagens também pode ser aplicada aos diferentes sistemas, permitindo uma astrometria clássica CCD sem que o planeta esteja saturado. Com esta técnica pode ser possível observar Netuno, Tritão junto com um número adequado de estrelas catalogadas, uma vez que este planeta saturaria se utilizássemos um tempo de exposição que permitisse obtermos um número adequado de estrelas no campo. O mesmo se aplicaria a Urano e seus satélites que está, atualmente,

---

<sup>1</sup> Onde sou coautor

<sup>2</sup> Website: <<http://lesia.obspm.fr/lucky-star/>>



passando por uma região de baixa densidade de estrelas.

Além dos resultados gerais obtidos com a análise dessas diferentes técnicas astrométricas, produzimos uma gama de resultados específicos aos satélites galileanos de Júpiter. Exploramos a astrometria desses satélites utilizando diversas campanhas observacionais que visaram a observação de: (i) fenômenos mútuos; (ii) aproximações mútuas; e (iii) uma ocultação estelar. Além disso as observações do Observatório Pico dos Dias (OPD) entre 2018 e 2019 também foram utilizadas para a astrometria clássica utilizando a técnica da combinação de imagens que propomos.

Em resumo, ao longo desse projeto aperfeiçoamos o método de redução e análise dos fenômenos mútuos e obtivemos os resultados inéditos referentes aos eventos observados pela campanha brasileira que organizamos em 2014-2015. A precisão média obtida foi de  $11,2 \text{ mas}$  ( $\sim 35 \text{ km}$ ). Ainda durante a campanha dos fenômenos mútuos de 2014-2015 observamos um evento pelo satélite interno Amalteia (505). Este evento é o sétimo evento já observado por este satélite (o quarto durante a campanha de 2014-2015). Além disso, utilizamos o nosso método aperfeiçoado para re-analisar os eventos observados na campanha de 2009, a precisão média obtida foi de  $10,1 \text{ mas}$  ( $\sim 31 \text{ km}$ ). O artigo com esses resultados está aceito no P&SS (Morgado et al., 2019c). Além disso, 10 das 47 curvas de luz observadas em 2014-2015 foram reduzidas e analisadas dentro da campanha internacional PHEMU15 (Saquet et al., 2018).

Expandimos a campanha das aproximações mútuas e obtivemos mais de uma centena de novos instantes centrais, a precisão média foi de  $10,9 \text{ mas}$  ( $\sim 33 \text{ km}$ ). Esta campanha contou com telescópios entre 25 e 60 cm de diâmetro espalhados no Brasil e com colaboração do telescópio de 120 cm do *Observatoire de Haute-Provence* (OHP). Dois artigos com esses resultados foram publicados pela MNRAS (Morgado et al., 2016; Morgado et al., 2019b).

Observamos pela primeira vez uma ocultação estelar pela lua galileana Europa em 31 de março de 2017 e fizemos as previsões para outros eventos envolvendo estas luas que acontecerão entre 2019 e 2021. A partir deste evento determinamos um raio equivalente de Europa com a precisão de  $3,6 \text{ km}$  e uma posição absoluta de Europa com uma precisão melhor que  $1 \text{ mas}$  ( $\sim 3 \text{ km}$ ). O artigo com esse resultado foi publicado pela A&A como uma *Letter to the Editor* (Morgado et al., 2019a).

Desenvolvemos um *software* para a combinação de imagens consecutivas. Com ele foi possível obter as posições  $(x, y)$  de estrelas nas imagens combinadas que antes estava imersas no ruído do fundo do céu. Propomos uma nova metodologia para fazer a astrometria absoluta dos satélites galileanos e a aplicamos para observações feitas entre 2018 e 2019 no OPD. Os resultados obtidos possuem uma incerteza da ordem de  $18,1 \text{ mas}$  ( $\sim 55 \text{ km}$ ), uma qualidade quatro vezes melhor do que a atual astrometria clássica para este sistema.

O filtro metano de banda estreita teve um papel de destaque em garantir a qualidade dos dados obtidos. Este filtro eficientemente elimina a luz difusa de Júpiter permitindo que os satélites sejam observados com alto SNR sem que Júpiter esteja saturado. Com este filtro foi possível otimizar as observações e assim obtermos uma fotometria de alta qualidade (para o caso dos fenômenos mútuos e da ocultação estelar) e uma boa determinação do centroide dos satélites (para o caso das aproximações e da combinação de imagens).

Posições de alta precisão, como as que estamos fornecendo aqui, serão úteis para melhorar as órbitas dos satélites galileanos permitindo uma maior precisão e acurácia. Essas posições podem ser utilizadas em estudos envolvendo as forças de maré (Lainey et al., 2009; Lainey et al., 2012; Lainey et al., 2017; Lainey et al., 2019) além de estudos envolvendo a dinâmica e evolução desse sistema. Além disso, uma melhor órbita destes satélites permitirá um melhor planejamento das missões espaciais que visam este sistema, como por exemplo a *JUpiter ICy moons Explorer* (JUICE)<sup>3</sup> e a Europa Clipper<sup>4</sup> que possuem lançamento previsto para a próxima década (2020s) (Dirkx et al., 2016; Dirkx et al., 2017).

As campanhas observacionais organizadas dentro deste projeto contaram com a participação de observadores amadores e telescópios de pequeno porte. Reforçamos então a importância da colaboração entre diversos institutos, incluindo também a comunidade amadora na obtenção de dados cientificamente interessantes.

---

<sup>3</sup> Website: <<http://sci.esa.int/juice/>>

<sup>4</sup> Website: <<https://www.nasa.gov/europa/>>



## Referências

- Aksnes, K.; Franklin, F. A. Mutual phenomena of the Galilean satellites in 1973. III. Final results from 91 light curves. *Astronomical Journal*, v. 81, p. 464–481, Jun 1976. Citado 3 vezes nas páginas [6](#), [12](#) e [39](#).
- Aksnes, K.; Franklin, F. A. Mutual phenomena of Jupiter’s five inner satellites in 1979. *Icarus*, v. 34, p. 188–193, Apr 1978. Citado na página [39](#).
- Alvarez-Candal, A. et al. Absolute colours and phase coefficients of trans-Neptunian objects: correlations and populations. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 488, n. 3, p. 3035–3044, Sep 2019. Citado na página [103](#).
- Alvarez-Candal, A. et al. Absolute magnitudes and phase coefficients of trans-Neptunian objects. *Astronomy and Astrophysics*, v. 586, p. A155, Feb 2016. Citado na página [103](#).
- Anderson, J. D. et al. Europa’s Differentiated Internal Structure: Inferences from Four Galileo Encounters. *Science*, v. 281, p. 2019, set. 1998. Citado na página [2](#).
- Archinal, B. A. et al. Report of the IAU Working Group on Cartographic Coordinates and Rotational Elements: 2015. *Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy*, v. 130, p. 22, mar. 2018. Citado na página [92](#).
- Arlot, J.-E. *Amelioration des ephemerides des satellites galileens de Jupiter par l’analyse des observations*. Tese (Doutorado) — Observatoire de Paris, 61 Avenue de l’Observatoire, 75014 Paris, França, 1982. Citado na página [3](#).
- Arlot, J. E. et al. The results of the PHEMU79 observations of phenomena common to Galilean satellites of Jupiter in 1979. *Astronomy and Astrophysics*, v. 111, p. 151–170, Jul 1982. Citado 2 vezes nas páginas [12](#) e [43](#).
- Arlot, J. E.; Camichel, H.; Link, F. Mutual occultation and eclipse of Jupiter satellites J-1 and J-2 on August 30th 1973. *Astronomy and Astrophysics*, v. 35, p. 115–119, Sep 1974. Citado 2 vezes nas páginas [6](#) e [39](#).
- Arlot, J.-E.; Emelyanov, N. Natural satellites mutual phenomena observations: Achievements and future. *Planetary Space Science*, v. 169, p. 70–77, May 2019. Citado na página [12](#).
- Arlot, J. E. et al. The PHEMU09 catalogue and astrometric results of the observations of the mutual occultations and eclipses of the Galilean satellites of Jupiter made in 2009. *Astronomy and Astrophysics*, v. 572, p. A120, Dec 2014. Citado 8 vezes nas páginas [xxv](#), [5](#), [6](#), [12](#), [13](#), [17](#), [31](#) e [33](#).
- Arlot, J. E.; Emelyanov, N. V. The NSDB natural satellites astrometric database. *Astronomy and Astrophysics*, v. 503, n. 2, p. 631–638, Aug 2009. Citado na página [5](#).
- Arlot, J. E. et al. Astrometric results of observations of mutual occultations and eclipses of the Uranian satellites in 2007. *Astronomy and Astrophysics*, v. 557, p. A4, Sep 2013. Citado na página [13](#).

Arlot, J. E. et al. Astrometric results of observations of mutual occultations and eclipses of the Saturnian satellites in 2009. *Astronomy and Astrophysics*, v. 544, p. A29, Aug 2012. Citado na página 13.

Arlot, J. E. et al. A catalogue of the observations of the mutual phenomena of the Galilean satellites made in 1991 during the PHEMU91 campaign. *Astronomy and Astrophysics Supplement Series*, v. 125, p. 399–405, Nov 1997. Citado na página 12.

Arlot, J. E.; Stavinschi, M. Past and Future Mutual Events of the Natural Planetary Satellites: Need of a Network of Observation. In: Demircan, O.; Selam, S. O.; Albayrak, B. (Ed.). *Solar and Stellar Physics Through Eclipses*. [S.l.: s.n.], 2007. (Astronomical Society of the Pacific Conference Series, v. 370), p. 58. Citado na página 2.

Arlot, J. E. et al. A catalogue of the observations of the mutual phenomena of the Galilean satellites of Jupiter made in 1985 during the PHEMU85 campaign. *Astronomy and Astrophysics Supplement Series*, v. 92, p. 151–205, Jan 1992. Citado na página 12.

Arlot, J. E. et al. The PHEMU97 catalogue of observations of the mutual phenomena of the Galilean satellites of Jupiter. *Astronomy and Astrophysics*, v. 451, p. 733–737, May 2006. Citado na página 12.

Arlot, J. E. et al. The PHEMU03 catalogue of observations of the mutual phenomena of the Galilean satellites of Jupiter. *Astronomy and Astrophysics*, v. 493, p. 1171–1182, Jan 2009. Citado na página 12.

Assafin, M. et al. Instrumental and digital coronagraphy for the observation of the Uranus satellites' upcoming mutual events. *Planetary and Space Science*, v. 56, p. 1882–1887, Nov 2008. Citado 2 vezes nas páginas 40 e 118.

Assafin, M. et al. Observations and Analysis of Mutual Events between the Uranus Main Satellites. *Astronomical Journal*, v. 137, p. 4046–4053, Apr 2009. Citado 4 vezes nas páginas 13, 25, 119 e 129.

Assafin, M. et al. PRAIA - Platform for Reduction of Astronomical Images Automatically. In: *Gaia follow-up network for the solar system objects : Gaia FUN-SSO workshop proceedings*. [S.l.: s.n.], 2011. p. 85–88. Citado 5 vezes nas páginas 30, 58, 84, 110 e 112.

Astropy Collaboration et al. Astropy: A community Python package for astronomy. *Astronomy and Astrophysics*, v. 558, p. A33, out. 2013. Citado na página 31.

Ayala-Loera, C. et al. Absolute colours and phase coefficients of trans-Neptunian objects:  $H_V - H_R$  and relative phase coefficients. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 481, n. 2, p. 1848–1857, Dec 2018. Citado na página 103.

Benedetti-Rossi, G. et al. Results from the 2014 November 15th Multi-chord Stellar Occultation by the TNO (229762) 2007 UK<sub>126</sub>. *Astronomical Journal*, v. 152, p. 156, dez. 2016. Citado na página 79.

Bérard, D. et al. The Structure of Chariklo's Rings from Stellar Occultations. *Astronomical Journal*, v. 154, p. 144, out. 2017. Citado na página 79.

Bourges, L. et al. VizieR Online Data Catalog: JMMC Stellar Diameters Catalogue - JSDC. Version 2 (Bourges+, 2017). *VizieR Online Data Catalog*, p. II/346, jan. 2017. Citado na página 86.

- Braga-Ribas, F. et al. The Size, Shape, Albedo, Density, and Atmospheric Limit of Transneptunian Object (50000) Quaoar from Multi-chord Stellar Occultations. *Astrophysical Journal*, v. 773, p. 26, ago. 2013. Citado 2 vezes nas páginas 6 e 79.
- Braga-Ribas, F. et al. A ring system detected around the Centaur (10199) Chariklo. *Nature*, v. 508, p. 72–75, abr. 2014. Citado na página 79.
- Butcher, H.; Stevens, R. Image Reduction and Analysis Facility Development. *Kitt Peak National Observatory Newsletter*, v. 16, p. 6, Jan 1981. Citado na página 29.
- Camargo, J. I. B. et al. Astrometry of the main satellites of Uranus: 18 years of observations. *Astronomy and Astrophysics*, v. 582, p. A8, Oct 2015. Citado 2 vezes nas páginas 40 e 119.
- Carlson, R. W. et al. An Atmosphere on Ganymede from Its Occultation of SAO 186800 on 7 June 1972. *Science*, v. 182, p. 53–55, out. 1973. Citado na página 80.
- Charnoz, S. et al. Accretion of Saturn’s mid-sized moons during the viscous spreading of young massive rings: Solving the paradox of silicate-poor rings versus silicate-rich moons. *Icarus*, v. 216, n. 2, p. 535–550, Dec 2011. Citado na página 1.
- Chow, G. C. Tests of equality between sets of coefficients in two linear regressions. *Econometrica*, [Wiley, Econometric Society], v. 28, n. 3, p. 591–605, 1960. ISSN 00129682, 14680262. Disponível em: <<http://www.jstor.org/stable/1910133>>. Citado na página 88.
- Christou, A. A. et al. Observational detection of eclipses of J5 Amalthea by the Galilean satellites. *Astronomy and Astrophysics*, v. 522, p. A6, Nov 2010. Citado na página 39.
- Ciddor, P. E. Refractive index of air: new equations for the visible and near infrared. *Applied Optics*, v. 35, n. 9, p. 1566, Mar 1996. Citado na página 65.
- Clementini, G. et al. Gaia Data Release 1. The Cepheid and RR Lyrae star pipeline and its application to the south ecliptic pole region. *Astronomy and Astrophysics*, v. 595, p. A133, nov. 2016. Citado 3 vezes nas páginas 80, 81 e 111.
- Crida, A.; Charnoz, S. Formation of Regular Satellites from Ancient Massive Rings in the Solar System. *Science*, v. 338, n. 6111, p. 1196, Nov 2012. Citado na página 1.
- D’Aversa, E. et al. A stellar occultation by Ganymede. In: *European Planetary Science Congress*. [S.l.: s.n.], 2017. p. EPSC2017–850. Citado na página 80.
- De Sitter, W. Orbital elements determining the longitude of Jupiter’s satellites, derived from observations. *Annalen van de Sterrewacht te Leiden*, v. 16, p. B1–B96, Jan 1928. Citado na página 2.
- Desmars, J. et al. Orbit determination of trans-Neptunian objects and Centaurs for the prediction of stellar occultations. *Astronomy and Astrophysics*, v. 584, p. A96, Dec 2015. Citado na página 127.
- Desmars, J. et al. Pluto’s ephemeris from ground-based stellar occultations (1988–2016). *arXiv e-prints*, p. arXiv:1903.04800, Mar 2019. Citado 2 vezes nas páginas 6 e 79.
- Dias-Oliveira, A. *Fenômenos Mútuos entre os Satélites Galileanos de Júpiter*. Dissertação (Mestrado) — Observatório do Valongo, UFRJ, Ladeira do Pedro Antônio, 43 - Centro, Rio de Janeiro - RJ, 20080-090, 2 2011. Citado na página 31.

- Dias-Oliveira, A. et al. Pluto's Atmosphere from Stellar Occultations in 2012 and 2013. *Astrophysical Journal*, v. 811, p. 53, Sep 2015. Citado 2 vezes nas páginas 40 e 79.
- Dias-Oliveira, A. et al. Study of the Plutino Object (208996) 2003 AZ<sub>84</sub> from Stellar Occultations: Size, Shape, and Topographic Features. *Astronomical Journal*, v. 154, p. 22, jul. 2017. Citado na página 79.
- Dias-Oliveira, A. et al. Analysis of 25 mutual eclipses and occultations between the Galilean satellites observed from Brazil in 2009. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 432, p. 225–242, Jun 2013. Citado 6 vezes nas páginas xxv, 5, 6, 13, 31 e 33.
- Dirkx, D. et al. On the contribution of PRIDE-JUICE to Jovian system ephemerides. *Planetary Space Science*, v. 147, p. 14–27, Nov 2017. Citado 2 vezes nas páginas 1 e 131.
- Dirkx, D. et al. Dynamical modelling of the Galilean moons for the JUICE mission. *Planetary Space Science*, v. 134, p. 82–95, Dec 2016. Citado 2 vezes nas páginas 1 e 131.
- Domingue, D.; Verbiscer, A. Re-Analysis of the Solar Phase Curves of the Icy Galilean Satellites. *Icarus*, v. 128, p. 49–74, Jul 1997. Citado na página 17.
- Emelyanov, N. V. Determining Planetocentric Positions of Planetary Satellites from Photometry of Their Mutual Occultations and Eclipses. *Solar System Research*, v. 34, p. 226, Jan 2000. Citado 2 vezes nas páginas 5 e 17.
- Emelyanov, N. V. A Method for Reducing Photometric Observations of Mutual Occultations and Eclipses of Planetary Satellites. *Solar System Research*, v. 37, p. 314–325, Jul 2003. Citado na página 17.
- Emelyanov, N. V. Mutual occultations and eclipses of the Galilean satellites of Jupiter in 2002-2003: final astrometric results. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 394, p. 1037–1044, Apr 2009. Citado 3 vezes nas páginas 5, 12 e 17.
- Emelyanov, N. V. Precision of natural satellite ephemerides from observations of different types. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 469, n. 4, p. 4889–4898, Aug 2017. Citado 2 vezes nas páginas 77 e 78.
- Emelyanov, N. V.; Gilbert, R. Astrometric results of observations of mutual occultations and eclipses of the Galilean satellites of Jupiter in 2003. *Astronomy and Astrophysics*, v. 453, p. 1141–1149, Jul 2006. Citado na página 17.
- Ferraz-Mello, S. *Dynamics of the Galilean satellites*. [S.l.: s.n.], 1983. Citado na página 2.
- Fuller, J.; Luan, J.; Quataert, E. Resonance locking as the source of rapid tidal migration in the Jupiter and Saturn moon systems. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 458, n. 4, p. 3867–3879, Jun 2016. Citado na página 2.
- Gaia Collaboration et al. The Gaia mission. *Astronomy and Astrophysics*, v. 595, p. A1, Nov 2016. Citado na página 111.
- Gomes-Júnior, A. R. et al. New orbits of irregular satellites designed for the predictions of stellar occultations up to 2020, based on thousands of new observations. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 462, p. 1351–1358, out. 2016. Citado 2 vezes nas páginas 80 e 129.

- Gomes-Júnior, A. R. *Astrometria, Efemérides e Ocultações Estelares de Satélites Irregulares e Corpos do Sistema Solar Exterior*. Tese (Doutorado) — Observatório do Valongo, UFRJ, Ladeira do Pedro Antônio, 43 - Centro, Rio de Janeiro - RJ, 20080-090, 2018. Citado na página 129.
- Green, R. M. *Spherical Astronomy*. [S.l.: s.n.], 1985. Citado 2 vezes nas páginas 63 e 66.
- Hapke, B. Bidirectional reflectance spectroscopy. 1. Theory. *Journal of Geophysical Research*, v. 86, p. 4571–4586, Jun 1981. Citado na página 17.
- Hapke, B. Bidirectional reflectance spectroscopy 3. Correction for macroscopic roughness. *Icarus*, v. 59, p. 41–59, Jul 1984. Citado na página 17.
- Hapke, B. Bidirectional reflectance spectroscopy 4. The extinction coefficient and the opposition effect. *Icarus*, v. 67, p. 264–280, Aug 1986. Citado na página 17.
- Hapke, B. Bidirectional Reflectance Spectroscopy. 5. The Coherent Backscatter Opposition Effect and Anisotropic Scattering. *Icarus*, v. 157, p. 523–534, Jun 2002. Citado na página 17.
- Hapke, B. Bidirectional reflectance spectroscopy. 6. Effects of porosity. *Icarus*, v. 195, p. 918–926, Jun 2008. Citado na página 17.
- Hapke, B. Bidirectional reflectance spectroscopy 7. The single particle phase function hockey stick relation. *Icarus*, v. 221, p. 1079–1083, Nov 2012. Citado 2 vezes nas páginas 17 e 63.
- Hapke, B.; Wells, E. Bidirectional reflectance spectroscopy. 2. Experiments and observations. *Journal of Geophysical Research*, v. 86, p. 3055–3060, Apr 1981. Citado na página 17.
- Hestroffer, D. Photocentre displacement of minor planets: analysis of HIPPARCOS astrometry. *Astronomy and Astrophysics*, v. 336, p. 776–781, Aug 1998. Citado 2 vezes nas páginas 61 e 113.
- Hestroffer, D.; Magnan, C. Wavelength dependency of the Solar limb darkening. *Astronomy and Astrophysics*, v. 333, p. 338–342, May 1998. Citado na página 27.
- Howell, S. B. *Handbook of CCD Astronomy*. [S.l.: s.n.], 2006. v. 5. Citado na página 104.
- Ianna, P. A.; Seitzer, P.; Levinson, F. Astrometric observations of the satellites of the outer planets. I. The Galilean satellites in 1977. *Astronomical Journal*, v. 84, p. 429–435, Mar 1979. Citado na página 3.
- Jia, X. et al. Evidence of a plume on Europa from Galileo magnetic and plasma wave signatures. *Nature Astronomy*, v. 2, p. 459–464, jun. 2018. Citado 2 vezes nas páginas 2 e 87.
- Kaasalainen, M.; Tanga, P. Photocentre offset in ultraprecise astrometry: Implications for barycentre determination and asteroid modelling. *Astronomy and Astrophysics*, v. 416, p. 367–373, Mar 2004. Citado 2 vezes nas páginas 61 e 113.
- Karkoschka, E. Spectrophotometry of the Jovian Planets and Titan at 300- to 1000-nm Wavelength: The Methane Spectrum. *Icarus*, v. 111, p. 174–192, Sep 1994. Citado 4 vezes nas páginas xv, 8, 28 e 55.



- Karkoschka, E. Methane, Ammonia, and Temperature Measurements of the Jovian Planets and Titan from CCD-Spectrophotometry. *Icarus*, v. 133, p. 134–146, May 1998. Citado 5 vezes nas páginas [xv](#), [8](#), [9](#), [28](#) e [55](#).
- Kiseleva, T. P. et al. Results of astrometric observations of Jupiter's Galilean satellites at the Pulkovo Observatory from 1986 to 2005. *Solar System Research*, v. 42, p. 414–433, out. 2008. Citado 4 vezes nas páginas [3](#), [6](#), [43](#) e [103](#).
- Kovalevsky, J. *Modern Astrometry*. [S.l.: s.n.], 2002. Citado na página [110](#).
- Kovalevsky, J.; Seidelmann, P. K. *Fundamentals of Astrometry*. [S.l.: s.n.], 2004. Citado na página [66](#).
- Kulyk, I. et al. Astrometric CCD observations of the inner Jovian satellites in 1999-2000. *Astronomy and Astrophysics*, v. 383, p. 724–728, Feb 2002. Citado na página [39](#).
- Lainey, V. et al. Strong tidal dissipation in Io and Jupiter from astrometric observations. *Nature*, v. 459, n. 7249, p. 957–959, Jun 2009. Citado 4 vezes nas páginas [1](#), [2](#), [126](#) e [131](#).
- Lainey, V.; Arlot, J. E.; Vienne, A. New accurate ephemerides for the Galilean satellites of Jupiter. II. Fitting the observations. *Astronomy and Astrophysics*, v. 427, p. 371–376, Nov 2004. Citado 2 vezes nas páginas [77](#) e [126](#).
- Lainey, V.; Duriez, L.; Vienne, A. New accurate ephemerides for the Galilean satellites of Jupiter. I. Numerical integration of elaborated equations of motion. *Astronomy and Astrophysics*, v. 420, p. 1171–1183, Jun 2004. Citado 2 vezes nas páginas [77](#) e [126](#).
- Lainey, V. et al. New constraints on Saturn's interior from Cassini astrometric data. *Icarus*, v. 281, p. 286–296, Jan 2017. Citado 3 vezes nas páginas [1](#), [126](#) e [131](#).
- Lainey, V. et al. Strong Tidal Dissipation in Saturn and Constraints on Enceladus' Thermal State from Astrometry. *Astrophysical Journal*, v. 752, n. 1, p. 14, Jun 2012. Citado 3 vezes nas páginas [1](#), [126](#) e [131](#).
- Lainey, V. et al. Interior properties of the inner Saturnian moons from space astrometry data. *Icarus*, v. 326, p. 48–62, Jul 2019. Citado 2 vezes nas páginas [126](#) e [131](#).
- Leiva, R. et al. Size and Shape of Chariklo from Multi-epoch Stellar Occultations. *Astronomical Journal*, v. 154, p. 159, out. 2017. Citado na página [79](#).
- Lieske, J. H. Galilean satellite evolution - Observational evidence for secular changes in mean motions. *Astronomy and Astrophysics*, v. 176, n. 1, p. 146–158, Apr 1987. Citado na página [2](#).
- Lindgren, L. Meridian observations of planets with a photoelectric multislit micrometer. *Astronomy and Astrophysics*, v. 57, n. 1-2, p. 55–72, May 1977. Citado 2 vezes nas páginas [61](#) e [113](#).
- Lindgren, L. et al. Gaia Data Release 2. The astrometric solution. *Astronomy and Astrophysics*, v. 616, p. A2, Aug 2018. Citado 3 vezes nas páginas [79](#), [81](#) e [111](#).
- Lindgren, L. et al. Gaia Data Release 1. Astrometry: one billion positions, two million proper motions and parallaxes. *Astronomy and Astrophysics*, v. 595, p. A4, Nov 2016. Citado na página [111](#).

- Mallama, A.; Aelion, H. M.; Mallama, C. A. Jovian satellite positions from Hubble Space Telescope images. *Icarus*, v. 167, n. 2, p. 320–329, Feb 2004. Citado na página 4.
- McEwen, A. S. Global color and albedo variations on Io. *Icarus*, v. 73, p. 385–426, Mar 1988. Citado na página 17.
- Morgado, B. et al. Astrometry of mutual approximations between natural satellites. Application to the Galilean moons. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 460, p. 4086–4097, Aug 2016. Citado 4 vezes nas páginas 6, 31, 43 e 130.
- Morgado, B. et al. First stellar occultation by the galilean moon europa and upcoming events between 2019 and 2021. *Astronomy and Astrophysics*, v. 626, p. L4, Jun 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1051/0004-6361/201935500>>. Citado 2 vezes nas páginas 81 e 130.
- Morgado, B. et al. APPROX - mutual approximations between the Galilean moons: the 2016-2018 observational campaign. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 482, p. 5190–5200, Feb 2019. Citado 3 vezes nas páginas 43, 78 e 130.
- Morgado, B. et al. The 2014-2015 Brazilian Mutual Phenomena campaign for the Jovian satellites and improved results for the 2009 events. *Planetary Space Science*, Aceito, Sep 2019. Citado 3 vezes nas páginas 5, 13 e 130.
- Morgado, B. E. *Astrometria dos satélites Galileanos de Júpiter*. Dissertação (Mestrado) — Observatório do Valongo, UFRJ, Ladeira do Pedro Antônio, 43 - Centro, Rio de Janeiro - RJ, 20080-090, 7 2015. Citado 2 vezes nas páginas 6 e 43.
- Narizhnaya, N. V. Observations of the Galilean satellites of Jupiter with Pulkovo Normal Astrograph during 2009-2011. *Solar System Research*, v. 49, n. 6, p. 383–390, Nov 2015. Citado na página 4.
- Narizhnaya, N. V. Observations of the Galilean moons of Jupiter in 2013-2015 at Pulkovo. *Solar System Research*, v. 50, n. 5, p. 344–351, Sep 2016. Citado na página 4.
- Nimmo, F. et al. The global shape of Europa: Constraints on lateral shell thickness variations. *Icarus*, v. 191, p. 183–192, nov. 2007. Citado na página 94.
- Oren, M.; Nayar, S. K. Generalization of lambert's reflectance model. In: *Proceedings of the 21st Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*. New York, NY, USA: ACM, 1994. (SIGGRAPH '94), p. 239–246. ISBN 0-89791-667-0. Disponível em: <<http://doi.acm.org/10.1145/192161.192213>>. Citado 3 vezes nas páginas 17, 19 e 63.
- Ortiz, J. L. et al. Possible ring material around centaur (2060) Chiron. *Astronomy and Astrophysics*, v. 576, p. A18, abr. 2015. Citado na página 79.
- Ortiz, J. L. et al. The size, shape, density and ring of the dwarf planet Haumea from a stellar occultation. *Nature*, v. 550, p. 219–223, out. 2017. Citado na página 79.
- Pascu, D. Astrometric techniques for photographic observations of natural satellites. In: . [S.l.: s.n.], 1973. v. 5, p. 362. Citado na página 3.
- Pascu, D. An appraisal of the USNO program for photographic astrometry of bright planetary satellites. In: Morrison, L. V.; Gilmore, G. F. (Ed.). *Galactic and Solar System Optical Astrometry*. [S.l.: s.n.], 1994. p. 304. Citado na página 5.

- Peale, S. J.; Cassen, P.; Reynolds, R. T. Melting of Io by Tidal Dissipation. *Science*, v. 203, n. 4383, p. 892–894, Mar 1979. Citado na página 1.
- Peng, Q. Y. et al. Precise CCD positions of Galilean satellite-pairs. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 419, n. 3, p. 1977–1982, Jan 2012. Citado na página 5.
- Peng, Q. Y. et al. New evidence of precision premium for Galilean satellites from CCD imaging. *Planetary Space Science*, v. 56, n. 14, p. 1807–1811, Nov 2008. Citado 2 vezes nas páginas 5 e 46.
- Poppe, A. R.; Fatemi, S.; Khurana, K. K. Thermal and Energetic Ion Dynamics in Ganymede’s Magnetosphere. *Journal of Geophysical Research (Space Physics)*, v. 123, n. 6, p. 4614–4637, Jun 2018. Citado na página 2.
- Robert, V. et al. A new astrometric reduction of photographic plates using the DAMIAN digitizer: improving the dynamics of the Jovian system. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 415, n. 1, p. 701–708, Jul 2011. Citado na página 5.
- Robert, V. et al. CCD astrometric observations of Amalthea and Thebe in the Gaia era. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 467, p. 694–698, May 2017. Citado na página 39.
- Roth, L. et al. Transient Water Vapor at Europa’s South Pole. *Science*, v. 343, p. 171–174, jan. 2014. Citado 2 vezes nas páginas 2 e 87.
- Santos-Filho, S. et al. Mutual approximations between the 5 main moons of Uranus. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Aceito, Oct 2019. Citado 2 vezes nas páginas 119 e 129.
- Saquet, E. et al. Eclipses of the inner satellites of Jupiter observed in 2015. *Astronomy and Astrophysics*, v. 591, p. A42, Jun 2016. Citado na página 39.
- Saquet, E. et al. The PHEMU15 catalogue and astrometric results of the Jupiter’s Galilean satellite mutual occultation and eclipse observations made in 2014–2015. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 474, p. 4730–4739, Mar 2018. Citado 5 vezes nas páginas 5, 12, 13, 17 e 130.
- Saur, J. et al. The search for a subsurface ocean in Ganymede with Hubble Space Telescope observations of its auroral ovals. *Journal of Geophysical Research (Space Physics)*, v. 120, n. 3, p. 1715–1737, Mar 2015. Citado na página 2.
- Seber, G. A. F.; Lee, A. J. *Linear Regression Analysis*. Wiley, 2003. ISBN 9780471415404. Disponível em: <<https://www.amazon.com/Linear-Regression-Analysis-George-Seber/dp/0471415405?SubscriptionId=AKIAIOBINVZYXZQZ2U3A&tag=chimbori05-20&linkCode=xm2&camp=2025&creative=165953&creativeASIN=0471415405>>. Citado na página 88.
- Sicardy, B. et al. A Pluto-like radius and a high albedo for the dwarf planet Eris from an occultation. *Nature*, v. 478, p. 493–496, out. 2011. Citado na página 79.
- Sicardy, B. et al. Pluto’s Atmosphere from the 2015 June 29 Ground-based Stellar Occultation at the Time of the New Horizons Flyby. *Astrophysical Journal*, v. 819, p. L38, mar. 2016. Citado na página 79.

- Sparks, W. B. et al. Probing for Evidence of Plumes on Europa with HST/STIS. *Astrophysical Journal*, v. 829, p. 121, out. 2016. Citado 2 vezes nas páginas 2 e 87.
- Sparks, W. B. et al. A Search for Water Vapor Plumes on Europa using SOFIA. *Astrophysical Journal*, v. 871, p. L5, jan. 2019. Citado 2 vezes nas páginas 2 e 87.
- Stone, R. C. An Accurate Method for Computing Atmospheric Refraction. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, v. 108, p. 1051–1058, Nov 1996. Citado 2 vezes nas páginas 63 e 64.
- Stone, R. C. Positions for the Outer Planets and Many of their Satellites. IV. FASTT Observations Taken in 1999-2000. *Astronomical Journal*, v. 120, n. 4, p. 2124–2130, Oct 2000. Citado 2 vezes nas páginas 3 e 6.
- Stone, R. C.; Harris, F. H. CCD Positions Determined in the International Celestial Reference Frame for the Outer Planets and Many of Their Satellites in 1995-1999. *Astronomical Journal*, v. 119, n. 4, p. 1985–1998, Apr 2000. Citado 2 vezes nas páginas 3 e 6.
- Tajeddine, R. et al. Cassini ISS astrometry of the Saturnian satellites: Tethys, Dione, Rhea, Iapetus, and Phoebe 2004-2012. *Astronomy and Astrophysics*, v. 575, p. A73, mar. 2015. Citado na página 6.
- Taylor, G. E. The Determination of the Diameter of Io from its Occultation of  $\beta$  Scorpii C on May 14, 1971. *Icarus*, v. 17, n. 1, p. 202–208, Aug 1972. Citado na página 80.
- Vachier, F.; Arlot, J. E.; Thuillot, W. Mutual phenomena involving J5 Amalthea in 2002-2003. *Astronomy and Astrophysics*, v. 394, p. L19–L21, Oct 2002. Citado na página 39.
- Vance, S. et al. Ganymede's internal structure including thermodynamics of magnesium sulfate oceans in contact with ice. *Planetary Space Science*, v. 96, p. 62–70, Jun 2014. Citado na página 2.
- Veiga, C. H.; Vieira Martins, R. CCD astrometric observations of Amalthea and Thebe. *Astronomy and Astrophysics*, v. 437, p. 1147–1150, Jul 2005. Citado na página 39.
- Wang, B.; Zhao, H.-b.; Li, B. Detection of Faint Asteroids Based on Image Shifting and Stacking Method. *Chinese Astronomy and Astrophysics*, v. 42, n. 3, p. 433–447, Jul 2018. Citado na página 6.
- Zacharias, N. et al. The Fourth US Naval Observatory CCD Astrograph Catalog (UCAC4). *Astronomical Journal*, v. 145, n. 2, p. 44, Feb 2013. Citado na página 111.
- Zhu, B. et al. Studying quasar absorber host galaxy properties using image stacking technique. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 481, n. 2, p. 1469–1485, Dec 2018. Citado na página 6.



# Apêndices



# APÊNDICE A – Artigos publicados dentro deste projeto

Aqui listamos todos os artigos que foram publicados ao longo deste projeto. Note que estes artigos possuem conexão direta com o projeto explicitado nesta tese. Neste apêndice listo os três artigos já publicados e um que foi aceito para publicação no dia 17 de setembro de 2019. Incluímos também uma notícia publicada no website da *European Space Agency* (ESA)<sup>1</sup> a respeito do artigo sobre a ocultação por Europa que liderei. Os demais artigos que sou coautor estão listados no Apêndice B.

- 2016** – **Morgado, B.**, Assafin, M., Vieira-Martins, R., Camargo, J., Dias-Oliveira, A. e Gomes-Júnior, A. (2016). Astrometry of mutual approximations between natural satellites. Application to the Galilean moons. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 460(4), pp.4086-4097.
- 2019** – **Morgado, B.**, Vieira-Martins, R., Assafin, M., Machado, D. I., Camargo, J. I. B., Sfair, R., Malacarne, M., Braga-Ribas, F., Robert, V., Bassallo, T., Benedetti-Rossi, G., Boldrin, L. A., Borderes-Motta, G., Camargo, B. C. B., Crispim, A., Dias-Oliveira, A., Gomes-Júnior, A. R., Lainey, V., Miranda, J. O., Moura, T. S., Ribeiro, F. K., de Santana, T., Santos-Filho, S., Trabuco, L. L., Winter, O. C. e Yamashita, T. A. R. (2019). APPROX – Mutual approximations between the Galilean moons. The 2016-2018 observational campaign. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 482(4), pp.4086-4097.
- 2019** – **Morgado, B.**, Benedetti-Rossi, G., Gomes-Júnior, A. R., Assafin, M., Lainey, V., Vieira-Martins, R., Camargo, J. I. B., Braga-Ribas, F., Bouffleur, R. C., Fabrega, J., Machado, D. I., Maury, A., Trabuco, L. L., de Barros, J. R., Cacella, P., Crispim, A., Jaques, C., Navas, G. Y., Pimentel, E., Rommel, F. L., de Santana, T., Schoenell, W., Sfair, R. e Winter, O. C. (2019). First stellar occultation by the Galilean moon Europa and upcoming events between 2019 and 2021. *Astronomy & Astrophysics*, 626, L4.

<sup>1</sup> Website: <[http://www.esa.int/Our\\_Activities/Space\\_Science/Gaia/Astronomers\\_spy\\_Europa\\_blocking\\_distant\\_star\\_thanks\\_to\\_Gaia/](http://www.esa.int/Our_Activities/Space_Science/Gaia/Astronomers_spy_Europa_blocking_distant_star_thanks_to_Gaia/)>



**Aceito** – **Morgado,B.**, Vieira-Martins, R., Assafin, M., Dias-Oliveira, A., Machado, D. I., Camargo, J. I. B., Malacarne, M., Sfair, R., Winter, O. C., Braga-Ribas, F., Benedetti-Rossi, G., Boldrin, L. A., Camargo, B. C. B., Gaspar, H. S., Gomes-Júnior, A. R., Miranda, J. O., de Santana, T. e Trabuco, L. L. (2019). The 2014-2015 Brazilian Mutual Phenomena campaign for the Jovian satellites and improved results for the 2009 events. *Planetary & Space Science*, submetido em 06 de julho de 2019.

Por fim, listamos o artigo da Eléonore Saquet em 2018 que participei como co-autor por ceder observações de fenômenos mútuos feitas dentro deste projeto. Estas observações foram cedidas no contexto de uma colaboração com a campanha internacional PHEMU15, reproduzimos neste anexo a primeira página deste artigo.

**2018** – Saquet, E., Emelyanov, N., Robert, V., Arlot, J., Anbazhagan, P., Baillié, K., Bardecker, J., Berezhnoy, A., Bretton, M., Campos, F., Capannoli, L., Carry, B., Castet, M., Charbonnier, Y., Chernikov, M., Christou, A., Colas, F., Coliac, J., Dangel, G., Dechambre, O., Delcroix, M., Dias-Oliveira, A., Drillaud, C., Duchemin, Y., Dunford, R., Dupouy, P., Ellington, C., Fabre, P., Filippov, V., Finnegan, J., Foglia, S., Font, D., Gaillard, B., Galli, G., Garlitz, J., Gasmi, A., Gaspar, H., Gault, D., Gazeas, K., George, T., Gorda, S., Gorshanov, D., Gualdoni, C., Guhl, K., Halir, K., Hanna, W., Henry, X., Herald, D., Houdin, G., Ito, Y., Izmailov, I., Jacobsen, J., Jones, A., Kamoun, S., Kardasis, E., Karimov, A., Khovritchev, M., Kulikova, A., Laborde, J., Lainey, V., Lavayssiere, M., Le Guen, P., Leroy, A., Loader, B., Lopez, O., Lyashenko, A., Lyssenko, P., Machado, D., Maigurova, N., Manek, J., Marchini, A., Midavaine, T., Montier, J., **Morgado,B.**, Naumov, K., Nedelcu, A., Newman, J., Ohlert, J., Oksanen, A., Pavlov, H., Petrescu, E., Pomazan, A., Popescu, M., Pratt, A., Raskhozhev, V., Resch, J., Robilliard, D., Roschina, E., Rothenberg, E., Rottenborn, M., Rusov, S., Saby, F., Saya, L., Selvakumar, G., Signoret, F., Slesarenko, V., Sokov, E., Soldateschi, J., Sonka, A., Soulie, G., Talbot, J., Tejfel, V., Thuillot, W., Timerson, B., Toma, R., Torsellini, S., Trabuco, L., Traverse, P., Tsamis, V., Unwin, M., Abbeel, F., Vandenbruaene, H., Vasundhara, R., Velikodsky, Y., Vienne, A., Vilar, J., Vugnon, J., Wuensche, N. and Zeleny e P. (2018). The PHEMU15 catalogue and astrometric results of the Jupiter's Galilean satellite mutual occultation and eclipse observations made in 2014–2015. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 474(4), pp.4730-4739.



# Astrometry of mutual approximations between natural satellites. Application to the Galilean moons

B. Morgado,<sup>1,2\*</sup> M. Assafin,<sup>2</sup> R. Vieira-Martins,<sup>1,2</sup> J. I. B. Camargo,<sup>1</sup> A. Dias-Oliveira<sup>1</sup>  
and A. R. Gomes-Júnior<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Observatório Nacional/MCTI, R. General José Cristino 77, Rio de Janeiro RJ 20.921-400, Brazil

<sup>2</sup>Observatório do Valongo/UFRJ, Ladeira Pedro Antonio 43, Rio de Janeiro RJ 20080-090, Brazil

Accepted 2016 May 19. Received 2016 May 18; in original form 2016 April 8

## ABSTRACT

Typically we can deliver astrometric positions of natural satellites with errors in the 50–150 mas range. Apparent distances from mutual phenomena, have much smaller errors, less than 10 mas. However, this method can only be applied during the equinox of the planets. We developed a method that can provide accurate astrometric data for natural satellites – the mutual approximations. The method can be applied when any two satellites pass close by each other in the apparent sky plane. The fundamental parameter is the central instant  $t_0$  of the passage when the distances reach a minimum. We applied the method for the Galilean moons. All observations were made with a 0.6 m telescope with a narrow-band filter centred at 889 nm with width of 15 nm which attenuated Jupiter’s scattered light. We obtained central instants for 14 mutual approximations observed in 2014–2015. We determined  $t_0$  with an average precision of 3.42 mas (10.43 km). For comparison, we also applied the method for 5 occultations in the 2009 mutual phenomena campaign and for 22 occultations in the 2014–2015 campaign. The comparisons of  $t_0$  determined by our method with the results from mutual phenomena show an agreement by less than  $1\sigma$  error in  $t_0$ , typically less than 10 mas. This new method is particularly suitable for observations by small telescopes.

**Key words:** methods: data analysis – astrometry – planets and satellites: individual: Io, Europa, Ganymede, Callisto.

## 1 INTRODUCTION

The formation of planets occurs in a disc of gas and dust around the protostar. The formation of regular satellites around a giant planet probably occurs in a similar way in a circumplanetary disc around the planet. However, there are different models for this formation in the literature with pros and cons each (Crida & Charnoz 2012). The orbital evolution of these regular satellites around a giant planet can give us hints about their formation.

The orbital studies of these celestial bodies demand the observation of positions, relative distances or other forms of observables, like central instants and impact parameters in mutual phenomena, over extended period of time to fit them with dynamic models (De Sitter 1928; Lieske 1987; Lainey et al. 2009). However, to detect very weak disturbance forces, such as *tidal forces*, these observables have to be very precise. This high precision usually cannot be attained with classical methods. For example, Jupiter and Saturn’s brightness makes it very difficult to obtain enough number of

astrometric calibration stars in a CCD frame in order to obtain a good individual position for its main satellites. The classical CCD astrometry of a single satellite furnishes positions with precisions (usually the standard deviation from a set of a few hundreds of images) in the range of 50–150 mas (Stone 2001; Kiseleva et al. 2008). This issue was partially solved using relative positions between two (or more) satellites (Veillet & Ratier 1980; Veiga et al. 1987; Veiga & Vieira-Martins 1994; Harper et al. 1997; Vienne et al. 2001; Peng et al. 2008). More recently Peng et al. (2012) achieved relative positions with precision of 30 mas.

Some of these works use the ephemeris of the satellites as a ruler in order to obtain the reference system orientation and scale in the CCD image. Often, one uses the positions of bodies with more precise ephemeris to determine the position of another body with a worst ephemeris. An example is the case of Miranda of Uranus, when the ephemeris of the others satellites (mainly Oberon) were used as reference frame in the position reductions (Veillet & Ratier 1980). Another possibility is the use of the so called *precision premium* (Peng et al. 2008), first pointed out by Pascu (1994). The idea is that the accuracy of the determination of apparent distances is remarkably improved for short apparent distances (less

\*E-mail: morgado.fis@gmail.com

than 85 arcsec), as instrumental and astronomical issues tend to affect the images of both satellites in the same way. In principle, we can use the ephemeris distance between two small-separated satellites and the actual observed distance to determine the scale and orientation of the image. This method was mainly used for the Saturnian main satellites (Harper et al. 1997; Vienne et al. 2001) and for the Galilean satellites (Peng et al. 2012).

Another way to obtain very precise relative positions of typically a few mas is with the observation of mutual phenomena. However this can only be done during the equinox of these planets – see for example Assafin et al. (2009); Emelyanov (2009); Emelyanov et al. (2011); Dias-Oliveira et al. (2013); Arlot et al. (2014). Mutual phenomena consist of occultations and eclipses between natural satellites, as seen along the line of sight of an observer. One satellite (or its projected shadow) hides the other causing a drop in the light flux which can be measured with high precision using differential photometry in a small FOV, when astronomical and instrumental systematic errors in the measurements of the targets and calibration sources tend to cancel out. This flux variation is connected to the relative apparent motion of the satellites in the sky, and thus, ultimately, to their orbits. The apparent relative motion between the satellites under mutual phenomena can be described in terms of the instant of minimum apparent distance (central instant of the event), the minimum apparent distance at this instant (impact parameter), and the relative apparent velocity between one satellite (or shadow) and the other (Emelyanov (2003); Dias-Oliveira et al. (2013) and references therein). The particular nature of orbital geometry in mutual phenomena offers valuable constraints in the orbital solutions of the satellites (Lainey, Arlot & Vienne 2004). However, these phenomena can be observed only every 6 years for Jupiter, every 15 yr for Saturn and every 42 yr for Uranus (Arlot et al. 2012, 2013, 2014).

Inspired in the mutual phenomena and based in the same orbital geometry, we propose the observation of what we call *mutual approximations* between natural satellites in order to obtain the central instant when the apparent distance between two satellites reaches a minimum.

In mutual approximations the bodies only approach each other in the sky plane at adequate, not too short, distances – we actually avoid occultations, we wish to be able to measure the satellites separately. Similarly to the geometric parameters of mutual phenomena, we can also determine the impact parameter and the relative velocity, but, in this case, only in pixel units. For orbit fitting, these supplementary parameters can only be useful if we can accurately convert the distances from pixels to arc seconds using a standard reference frame, like an astrometric star catalogue representative of the ICRS. However, this is frequently not the case, as usually an insufficient number of reference stars is available in the FOV, for two reasons: short FOV and/or short exposure times to avoid saturation of the satellite images and light scatter from the central planet. One way to overcome this problem is to observe a crowded star field nearby and determine the pixel scale to be used. Another alternative is to use an ephemeris of the pair of satellites as the reference frame. But, by doing that we scale the observed impact parameter and the relative velocity to the used ephemeris, so no truly independent new results are really obtained, although they may serve to check parameters for internal consistency (see more details and computations in this respect in Section 3).

In fact, Arlot et al. (1982) were the first to suggest such astrometric approach. Also, Mason et al. (1999) reported observations which they called ‘close pairings’ of the Galilean moons with a speckle interferometer mounted on the 26-inch refractor at the Naval

Observatory in Washington, DC. But no further references, results or studies in this subject were published in the literature to our knowledge.

We give in this paper a complete description of the method of mutual approximations and present the results of its application to an observational campaign of mutual approximations for the Galilean moons carried out in 2014–2015. Our observations were made with the 0.6 m Zeiss telescope of the Observatório do Pico dos Dias (OPD, Brazil) with a narrow-band methane filter centred at 889 nm with width of 15 nm that attenuates Jupiter’s scattered light.

The paper is arranged as follows. In Section 2, we describe the theoretical model of relative motion for the mutual approximations and how to obtain the central instant of the event. In Section 3 we show also how to compute the impact parameter and relative velocity. In Section 4 we discuss what astronomical effects like solar phase-angle, atmospheric refraction and aberration could cause an offset in the raw measured central instant. In Section 5 we detail the observational campaign of the mutual approximations for the Galilean satellites, the measurement of the images and our results. In Section 6 we compare the results from mutual approximations and mutual phenomena simultaneously observed during the mutual phenomena campaign of 2009. For future comparisons, we also give the results of the approximations observed during the 2014–2015 equinox of Jupiter. Discussion and conclusions are presented in Section 7.

## 2 APPARENT RELATIVE MOTION OF SATELLITES IN MUTUAL APPROXIMATIONS. DETERMINATION OF THE CENTRAL INSTANT

We set here a geometric model that describes the variation with time of the apparent distance  $d$  in the plane of the sky between two satellites for a short arc of their orbits, typical of mutual approximations. We assume that there is no strong deformation from the telescope optics on the images. A simple description by a polynomial in  $t$  of arbitrary degree  $n$  (typically  $n = 4$ ) is obtained using  $d^2$ . In mutual approximations,  $d$  always reaches a minimum and the polynomial curve will present a positive concavity.

The same geometric parameters that describe mutual phenomena also describe mutual approximations, i.e. central instant, impact parameter and relative velocity. Notice however that only the central instant can be determined independently of any reference frame, even without the knowledge of the pixel scale of the images. But astronomical corrections such as refraction, aberration and solar phase angle must be taken into account (see Section 4). However, if one does want to get all the parameters, one needs to convert distances from pixels to arcseconds. In this case, the pixel scale must be computed (see Section 3).

The vector distance between the two satellites in the sky plane  $\Delta\mathbf{r}(t)$  in a specific instant  $t$  is:

$$\Delta\mathbf{r}(t) = \mathbf{r}_1(t) - \mathbf{r}_2(t) \quad (1)$$

Assuming that the square of the distance between two satellites in the short arc of their orbits, nearby the central instant of the approximation, can be described as a polynomial of arbitrary power  $n$  in time, then, considering (1) we obtain:

$$\begin{aligned} d^2(t) &= \Delta\mathbf{r}(t) \cdot \Delta\mathbf{r}(t) \\ d^2(t) &= a_0 + a_1t + a_2t^2 + \dots + a_nt^n \end{aligned} \quad (2)$$

where the parameters  $a_0$ ,  $a_1$ ,  $a_n$  are related with the kinematics of the satellites' motion.

Using least squares we fit this model with observed distances. Alternatively, we can fit ephemeris' apparent distances to study the event and even for testing the most adequate polynomial power to use in the fitting.

The central instant  $t_0$  of the mutual approximation is obtained when the first time derivative of equation (2) is set equal to zero.

$$a_1 + 2a_2t_0 + 3a_3t_0^2 + \dots + na_nt_0^{n-1} = 0 \quad (3)$$

The central instant  $t_0$  comes from the determination of the root of equation (3). Using an interactive process we determine the central instant, subtract it in  $t$  and then redo the adjustment in order to set  $t_0 = 0$ . The central instant error comes from around-zero derivative of equation (3) as a function of the error of the other coefficients, computed in the least squares fit. This error is given by equation (4):

$$\delta t_0 = -\frac{\delta a_1}{2a_2} \quad (4)$$

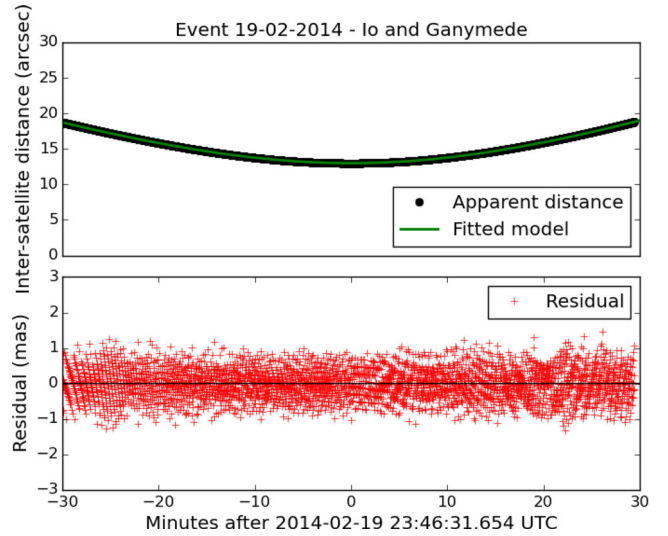
Note that the numerator of equation (4) relates to the observed distance errors, thus it reflects as expected the noise in the observed apparent distance curve, related with the atmospheric conditions of the night. The error of the central instant is also dependent on the curve concavity related to  $a_2$ , which in turn is dominated by the relative velocity. A smaller central instant error is expected from a more pronounced minimum which comes from larger  $a_2$  values, or higher relative velocities.

In practice the observational procedure in mutual approximations consists in observing a number of images, an hour before and after a central instant foreseen from an ephemeris. We then measure the apparent distances and, with the help of any ephemeris, apply corrections due to solar phase angle, refraction and aberration that could shift the distances in a way that could offset the central instant (see Section 4). The instant errors can be translated from seconds of time to mas or km by using the relative velocity and distance to the observer given by an ephemeris. In Section 3 we describe the procedure in the case that one wants to get the complete set of parameters, that is the impact parameter and relative velocity too, in the same fashion as in mutual phenomena.

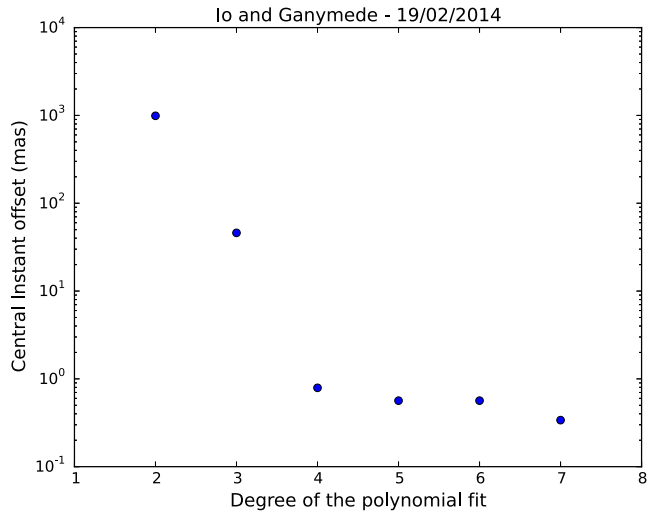
How well does the model of apparent relative motion introduced here really describe the actual relative apparent path between two real satellites in a mutual approximation? Considering that the Galilean moons of Jupiter are amongst the most studied dynamical systems, and taking their most precise ephemeris up to date as representative of their real paths in the sky, we addressed this question by fitting our model directly to apparent distances computed from their ephemeris. In this work all events were well fitted by a fourth degree polynomial.

We chose as an example the approximation between Io and Ganymede on 2014 February 19. The ephemeris used was the NOE-5-2010-GAL provided by IMCCE<sup>1</sup> from Lainey et al. (2009). In the Fig. 1 we computed the apparent distances from the ephemeris and fitted them with a fourth degree polynomial. The comparison between the fitted (green line) and ephemeris (black dots) apparent distances. The residual dispersion is also illustrated in the bottom (red crosses), in the sense *model minus ephemeris*. The time resolution of the ephemeris was one second.

<sup>1</sup> Institut de Mécanique Céleste et de Calcul des Éphémérides; Website: <http://www.imcce.fr/>



**Figure 1.** Apparent sky distances between Io and Ganymede in the mutual approximation of 2014 February 19. We used the NOE-5-2010-GAL ephemeris obtained in its topocentric form for OPD. Ephemeris distances  $d$  are in black and model fitted ones in green. We took ephemeris positions every second. Notice that the fit is actually done in  $d^2$ , using equation (2).



**Figure 2.** Central instant offset for each polynomial fitting. After the fourth degree there is no significant improvement in accuracy.

As seen in Fig. 1, our model fits quite well the satellite ephemeris. The residual of the adjustment stays in 1 mas, corresponding to the numerical limit of extracted ephemeris positions, here truncated for computational purposes (notice that the actual ephemeris precision is worse than this). In Fig. 2 we illustrate the discrepancy between the value for the central instant in mas obtained using different polynomial models in time for  $d^2$ . Models with power less than the fourth degree give incomplete descriptions of the satellite's relative motion. We show that after the fourth degree there is no significant improvement in the precision or accuracy of the model, for this example. Others tests showed similar results.

### 3 OBTAINING THE IMPACT PARAMETER AND RELATIVE VELOCITY IN MUTUAL APPROXIMATION

Although the determination of the central instant comes from fits to the raw measured apparent distances given in pixel units (see Section 2), the UTC time is recorded in the observations with a GPS system or precise internet timing. Thus, the central instant derived in UTC is the only truly independent parameter obtained in mutual approximations without regard to any reference frame, be it a star catalogue or an ephemeris. For this reason, the central instant is the main parameter derived from the mutual approximations.

The impact parameter and relative velocity are also derived from fits to the observed apparent distances, but in this case they share the same metric. Thus, these parameters can only be obtained in standard units if the observed distances are also given in standard metrics, such as arcseconds. A conversion from pixels to arcseconds must be made. This can only be accomplished with the use of a reference frame.

Notice that if we use a star catalogue as reference frame, the obtained impact parameter and relative velocity are independent from any ephemeris. In this case, like in mutual phenomena, they may be as useful as the central instant in orbit fit work. This is possible if we have enough catalogue reference stars and can make the right ascension and declination reduction of the FOV. If this is not the case, we can alternatively reduce a nearby field with a sufficient number of reference stars and use the derived pixel scale in the FOV of the satellites to compute the observed distances. Unfortunately, this is rarely the case of Jupiter and Saturn. They are currently crossing a sky path with few stars. Besides, due to the brightness of their main moons and their proximity to the planet, the very short exposure times used prevent the imaging of reference stars. But Uranus may be a good and promising example for the use of this procedure.

We can also use an ephemeris to obtain the pixel scale, see Peng et al. (2008). This is very useful when we have no reference stars, or even when only the two satellites are available in the FOV. This is frequently the case of the observations of Jupiter and Saturn moons. The drawback is that the observed distances are scaled according to the ephemeris frame, so that the impact parameter and the relative velocity will be dependent of the used ephemeris to some extent, and may be not useful in orbital works. Even so, it is always a good practical procedure to compute the impact parameter and relative velocity using the ephemeris as reference, for it serves as an extra checking procedure of the results. For this reason, we describe this procedure in Section 3.2.

#### 3.1 Modelling the impact parameter and relative velocity

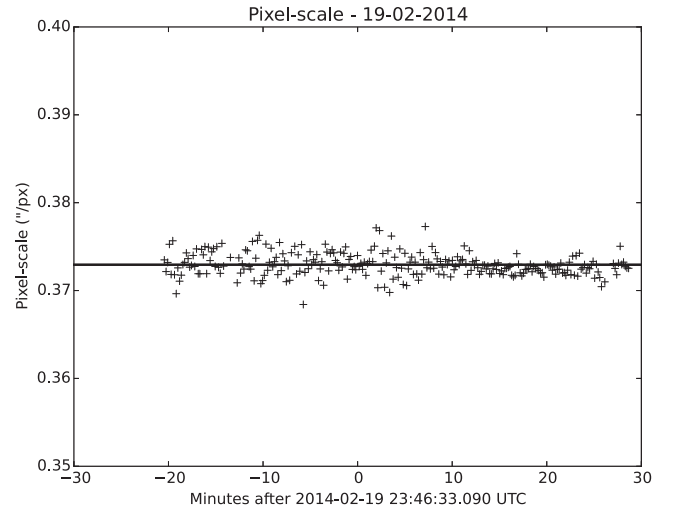
Since the observed satellite's images are affected by solar phase angle, aberration and refraction, these effects are taken into account prior to fitting the observed distances with the topocentric ephemeris ones (see Section 4).

From equation (2), when  $t_0 = 0$ , we see that the minimum distance between the satellites, the impact parameters  $d_0$  of the approximation, will be related with  $a_0$  in the form of

$$d_0 = \sqrt{a_0} \quad (5)$$

and the incertitude of this parameter is

$$\delta d_0 = \frac{\delta a_0}{2d_0} \quad (6)$$



**Figure 3.** Pixel-scale determined for the approximation between Io and Ganymede of 2014 February 19 in arcseconds per pixel as a function of the time. We used the NOE-5-2010-GAL ephemeris obtained in its topocentric form for OPD.

The relative velocity is determined as follows. Using two consecutive images we determine the instantaneous variation of the relative position in  $x$  and  $y$  in the CCD frame. With the accurate time of each image we can determine the relative instantaneous velocity between both frames. Then we fit a linear function in the velocity curve in time obtained with all the images. The relative velocity of interest is the one for the central instant  $t_0$  and its error is obtained from the linear fit.

Notice that, from our fit, these parameters are in pixel units and pixels per second. The conversion to arcsecond units is explained in the following section.

#### 3.2 Determining the pixel scale

Knowing from an ephemeris the theoretical apparent distances between the satellites ( $\Delta\alpha \cos \delta$ ,  $\Delta\delta$ ) in arcseconds, affected by solar phase angle, aberration and atmospheric refraction, and the instrumental distances ( $\Delta x$ ,  $\Delta y$ ) in pixels, makes it possible to obtain the pixel scale. Notice that we projected the ephemeris on the tangent plane using the gnomonic projection, so that the standard coordinates ( $X$ ,  $Y$ ) are used in the computation of the pixel scale.

We compute the pixel scale  $P_s$ , as the slope of a linear function fitted to the ratio between the ephemeris distances  $d_e$  and instrumental distances  $d_o$  (equation 7).

$$P_s = \frac{d_e}{d_o} \quad (7)$$

Fig. 3 illustrates the variation of the pixel scale overnight for the mutual approximation between Io and Ganymede which occurred on 2014 February 19. For illustration, in this example we computed an error of  $0.9 \text{ mas pixel}^{-1}$  for the pixel scale.

For comparison, we determined all the parameters of a mutual approximation, central instant, impact parameter, relative velocity and the pixel-scale using two different ephemeris. We chose the NOE-5-2010-GAL provided by IMCCE from Lainey et al. (2009) and the JPL<sup>2</sup> ephemeris, *jup310*, for this analysis. The results and errors are displayed in Table 1 for the approximation between Io

<sup>2</sup> Jet Propulsion Laboratory; Website: <http://ssd.jpl.nasa.gov/>

**Table 1.** Comparison between the results for the central instant,  $t_0$ , impact parameter,  $d_0$  and relative velocity,  $v_r$ , for Io and Ganymede mutual approximation of 2014 February 19 and the calibration parameter, pixel-scale  $P_s$ , using two ephemeris – NOE-5-2010-GAL and *jup310*.

Parameters	NOE-5-2010-GAL	
	Observation	Ephemeris
$t_0$ (hh:mm:ss)	23:46:35.79 (0.76)	23:46:31.68 (0.00)
$d_0$ (mas)	12982.89 (6.08)	12995.12 (0.12)
$v_r$ (mas s <sup>-1</sup> )	7.53 (0.08)	7.54 (0.00)
$P_s$ (arcsec pixel <sup>-1</sup> )	0.3729 (0.0009)	
Parameters	JPL – <i>jup310</i>	
	Observation	Ephemeris
$t_0$ (hh:mm:ss)	23:46:35.79 (0.76)	23:46:35.22 (0.00)
$d_0$ (mas)	12974.24 (6.07)	12996.66 (0.12)
$v_r$ (mas s <sup>-1</sup> )	7.52 (0.08)	7.58 (0.00)
$P_s$ arcsec pixel <sup>-1</sup>	0.3728 (0.0009)	

and Ganymede of 2014 February 19. Other examples showed similar results.

Notice that the values for the observational parameters are consistent and almost independent of the ephemeris utilized.

#### 4 ASTRONOMICAL CORRECTIONS

Astronomical effects such as the solar phase angle, the atmospheric refraction and aberration affect the apparent distance between the satellites. They must be taken into account when we want to obtain all the parameters, including the impact parameter and relative velocity, as described in Sect 3. But which of these effects can actually offset the central instant in a mutual approximation? And to what typical amounts? We address these question in this section.

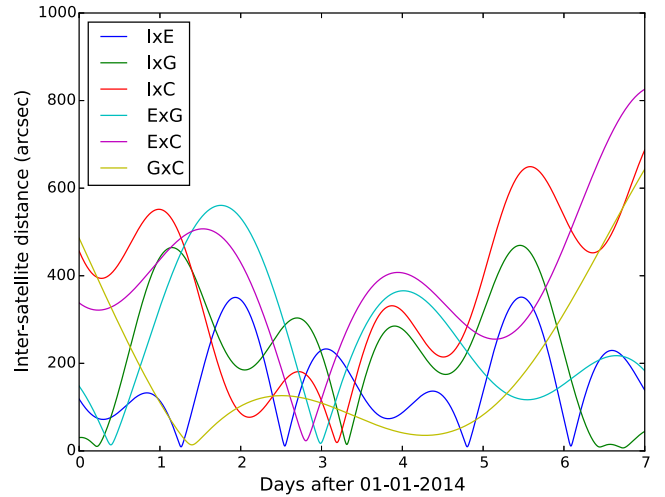
In the case of the solar phase angle, the photocentre of a satellite in an image is shifted relative to its geometric centre, the centre of mass, due the solar phase angle. According to Lindegren (1977) a spherical object with a light scattering in its surface causes an offset in its positions according to equations (8) where  $i$  is the solar phase angle,  $r$  is the apparent radius of the satellite,  $Q$  is the position angle of the sub-solar point in the tangential plane and  $C(i)$  is a parameter related to the reflectance model adopted.

$$\begin{pmatrix} \Delta\alpha \cos \delta \\ \Delta\delta \end{pmatrix} = C(i)r \sin(i/2) \begin{pmatrix} \sin Q \\ \cos Q \end{pmatrix} \quad (8)$$

Here we adopted the Lambertian sphere modelling (Lindegren 1977). But since the satellites' radii may be different, and considering that the direction of the Sun and of the relative motion may not coincide, the relative distances of the photo and geometric centres may vary differently, so that the associated central instants may be different too, causing an offset in the observed central instant which is associated with the photo and not to the geometric centre. For example, in the case of the Galilean moons, for an approximation with a phase angle of 10° the central instant can be shifted by up to 6 s, a significant value.

The atmospheric refraction causes a shift in the target position towards the zenith direction that increases at higher zenithal distances. However, once both satellites have almost the same zenithal distance and very close positions in an approximation it has a small, but non-negligible effect in the distances and in the central instant (less than 2 s for  $z \approx 70^\circ$ ). More details about its implementation can be found in Stone (1996).

The aberration causes a position shift towards the direction of the instantaneous velocity vector of the observer (Green 1985). Due



**Figure 4.** Inter-satellite apparent sky distances of the Galilean satellites over a week. I stands for Io, E for Europe, G for Ganymede and C for Callisto. Every minima in this graphic is a mutual approximation between two satellites. We used the NOE-5-2010-GAL ephemeris obtained in its topocentric form for OPD.

to the small apparent distance between satellites, the effect is very small in the central instant, less than 0.0005 s for diurnal aberration and 0.0145 s for annual aberration.

#### 5 MUTUAL APPROXIMATIONS OF GALILEAN SATELLITES: RESULTS OF THE CAMPAIGN OF 2014-2015

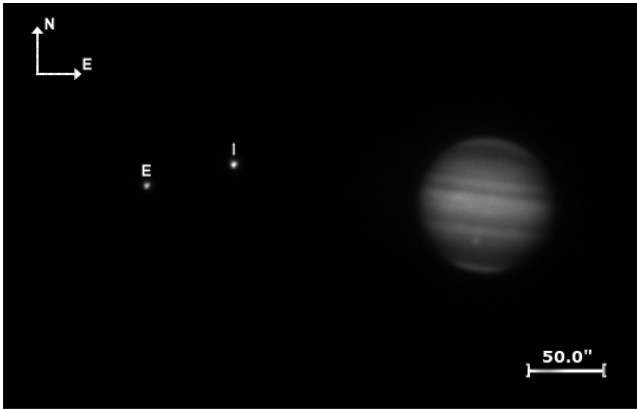
##### 5.1 Programme

The accurate prediction of mutual phenomena depends on how precise the ephemeris is and upon our knowledge of the size of the satellites. In the absence of one of these conditions, we may miss an event foreseen to be visible at a certain location. None of these conditions matter in our case. One can easily predict mutual approximations, even using poor ephemeris with precision in the arcsecond level only. By setting a threshold value of at least some arcseconds, we avoid selecting possible mutual occultations or situations where the apparent distances between the satellites are too small for centroid measurement purposes.

The observational campaign for the mutual approximations between the Galilean satellites was carried out in Brazil between 2014 and 2015. The predictions for these events were made with the topocentric ephemeris for the OPD observatory using the NAIF SPICE<sup>3</sup> platform, ephemeris NOE-5-2010-GAL, derived from Lainey et al. (2009), and DE430. Fig. 4 plots the inter-satellite apparent distances, in arcseconds, over a week for the six possible combinations between these satellites. Every minima is a mutual approximation. However, in order to not pick up a prohibitive number of events, we only selected the approximations for which the impact parameter was smaller than 30 arcsec, improving even further the precision premium.

We selected all the visible events for the OPD observatory with elevation above 20° and with a distance to the Jupiter's limb greater than 10 arcsec. The predictions were spread in 58 nights, with 65 approximations, selected in 15 months between 2014 and 2015. We

<sup>3</sup> Website: <http://naif.jpl.nasa.gov/naif/>



**Figure 5.** Image of Jupiter, Io and Europa obtained with the 0.6 m diameter Zeiss telescope, equipped with a methane filter on 2014 February 3. The planet and the satellites show about the same brightness due to the use of the narrow-band filter, centred at  $\lambda = 889$  nm with 15 nm width.

attempted observations for all these events. From these, only 36 events could be observed with success, the others were lost due to bad weather conditions.

## 5.2 Observations

Our observations were made at Observatório do Pico dos Dias (OPD, IAU code 874)<sup>4</sup> located at geographical longitude  $-45^{\circ}34'57''$ , latitude  $-22^{\circ}32'04''$  and an altitude of 1864 m. The telescope used was the 0.6 m diameter Zeiss telescope. It is a manual pointing Cassegrain telescope with focal ratio  $f/12.5$ .

For all the observations in this work the time, in UTC, was calibrated by a GPS and recorded in the FITS image's header. For observations which the GPS is not an option, a time's calibrator software can be used such as *Dimension 4*.<sup>5</sup> Tests comparing this software with GPS indicate that the time precision is on the order of 20 ms.

The CCD camera utilized in all observations was the Andor Ikon-L with  $2048 \times 2048$  square pixels of  $13.5 \mu\text{m}$ . This camera added to the Zeiss telescope has a field of view of  $12.63 \text{ arcmin} \times 12.63 \text{ arcmin}$ . The filter chosen was the narrow-band filter centred at 889 nm (region of methane absorption), with a width of 15 nm. In this specific wavelength, the methane in Jupiter's upper atmosphere strongly absorb the light causing the planet's albedo to drop to 0.1 in this spectral region as pointed out by Karkoschka (1994, 1998).

Although the observations in this wavelength are very efficient to eliminate the scattered light from Jupiter, the albedo of the Galilean satellites did not change much (Karkoschka 1994). Because of this, the brightness of Jupiter is nearly the same of that of the satellites in this wavelength as can be seen in the Fig. 5.

We summarized the specifications of the telescope, camera and filter utilized in these observations in Table 2.

Table 3 contains the observational characteristics for the 36 nights analysed in this work, where 14 are mutual approximations (see Section 5.4) and 22 are mutual approximation observed from mutual occultations data of the 2014–2015 mutual phenomena campaign (see Section 6.2). We list the mutual approximation targeted, the seeing of the night, the zenithal distance ( $z_0$ ) for the central instant,

**Table 2.** Specifications of the telescope, CCD camera and filter.

Diameter of primary mirror	0.60 m
Focal ratio	$f/12.5$
CCD FOV	$12.63 \text{ arcmin} \times 12.63 \text{ arcmin}$
Pixel size	$13.5 \times 13.5 \mu\text{m}^2$
Size of CCD array	$2048 \times 2048$
Pixel-scale	$0.34 \text{ arcsec}$ or $0.37 \text{ arcsec pixel}^{-1}$
Filter	$889 \text{ nm}$ ( $\Delta = 15 \text{ nm}$ )

**Table 3.** Approximations and observation conditions.

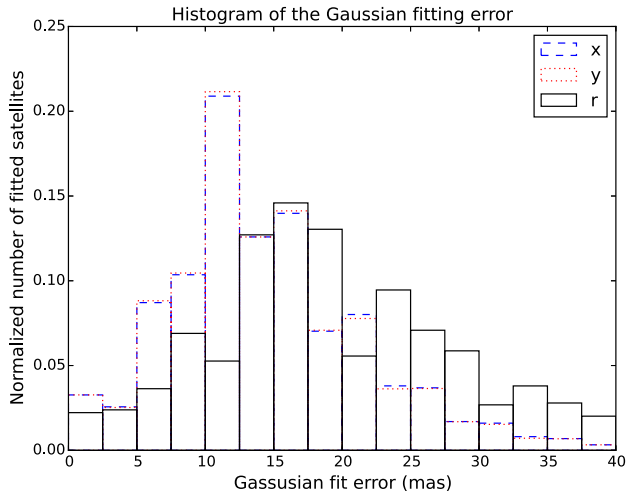
Date (d-m-y)	Event	Seeing (arcsec)	$z_0$ ( $^{\circ}$ )	$i$ ( $^{\circ}$ )	$Q$ ( $^{\circ}$ )
03-02-2014	IaE	1.9	56.74	5.80	275.44
05-02-2014	EaG	2.1	49.58	6.27	275.36
07-02-2014	IaE	1.8	51.87	6.61	275.28
19-02-2014	IaG	2.8	45.76	8.39	274.84
27-02-2014	IaE	1.9	47.23	9.32	274.71
18-03-2014	IaE	2.4	46.68	10.73	274.63
07-04-2014	IaE	2.4	51.73	10.99	275.15
20-04-2014	EaG	2.3	52.12	10.58	275.75
21-04-2014	GaC	2.2	51.38	10.54	275.77
21-04-2014	IaG	2.2	64.52	10.54	275.77
15-10-2014	GaC	1.3	66.32	9.70	108.26
15-10-2014	IaE	1.3	66.32	9.70	108.26
29-10-2014	IaG	1.5	54.46	10.45	108.67
02-11-2014	IaC	2.0	68.93	10.60	108.67
19-11-2014	EaC	1.3	41.34	10.69	108.86
02-02-2015	GaC	1.7	42.82	1.01	98.03
22-02-2015	IaE	1.7	39.58	3.17	290.47
24-02-2015	IaG	1.8	40.01	3.59	289.99
26-02-2015	IaE	1.6	64.54	4.14	289.47
27-02-2015	GaC	1.6	40.35	4.16	289.46
27-02-2015	IaG	1.6	40.60	4.17	289.45
03-03-2015	IaG	1.6	56.01	4.95	288.90
24-03-2015	GaC	2.2	41.53	8.19	287.38
25-03-2015	IaE	1.6	40.65	8.46	287.27
02-04-2015	IaE	1.5	52.27	9.14	287.07
11-04-2015	EaG	2.1	41.50	10.07	286.82
13-04-2015	IaE	1.5	43.80	10.21	286.79
17-04-2015	IaC	1.4	45.35	10.42	286.72
18-04-2015	GaC	1.4	61.45	10.42	286.72
18-04-2015	IaG	1.5	45.31	10.45	286.73
19-04-2015	EaG	1.4	59.89	10.46	286.73
21-04-2015	IaE	1.4	68.34	10.57	286.70
25-04-2015	IaG	2.7	48.86	10.41	286.70
26-04-2015	IaE	2.0	40.67	10.74	286.69
29-04-2015	IaG	1.9	57.72	10.81	286.70
03-05-2015	IaE	2.0	52.39	10.84	286.71

*Note.* For each event, we have the day, month and year, the satellites designated by their initials (capital letters), where ‘a’ stands for approximation. We also give the seeing, the zenithal distance ( $z_0$ ), the solar phase angle ( $i$ ) and the position angle of the sub-solar point in the tangential plane ( $Q$ ).

the solar phase angle ( $i$ ) and the sub-solar point in the tangential plane ( $Q$ ). The solar phase angles and the sub-solar point in the tangential plane are the same for both satellites and do not change during the approximation, which lasts typically less than two hours. The observational information about the five nights in the 2009 mutual phenomena campaign utilized in this work can be found in Dias-Oliveira et al. (2013) (see Section 6.1).

<sup>4</sup> Website: <http://www.lna.br/opd/opd.html>

<sup>5</sup> Website: <http://www.thinkman.com/dimension4/>



**Figure 6.** Normalized histogram for the centroid determination error, in mas, for  $x$ ,  $y$  and  $r = \sqrt{x^2 + y^2}$ , from all measured images.

### 5.3 Photocentre measurement

First, all the images were corrected by bias and flat-field by means of standard procedures using the IRAF<sup>6</sup> package (Butcher & Stevens 1981). The centroid of the satellites were determined using the PRAIA package described in Assafin et al. (2011). The PRAIA package measures the satellite coordinates ( $x$ ,  $y$ ) in the image with a two-dimensional circular symmetric Gaussian fit within a radius of one Full Width Half Maximum (FWHM = seeing). The typical error in the centroid measurement for our images was 12 mas. Fig. 6 is the normalized histogram for the centroid determination error, in mas, for  $x$ ,  $y$  and  $r = \sqrt{x^2 + y^2}$ , from all measured images.

### 5.4 Results

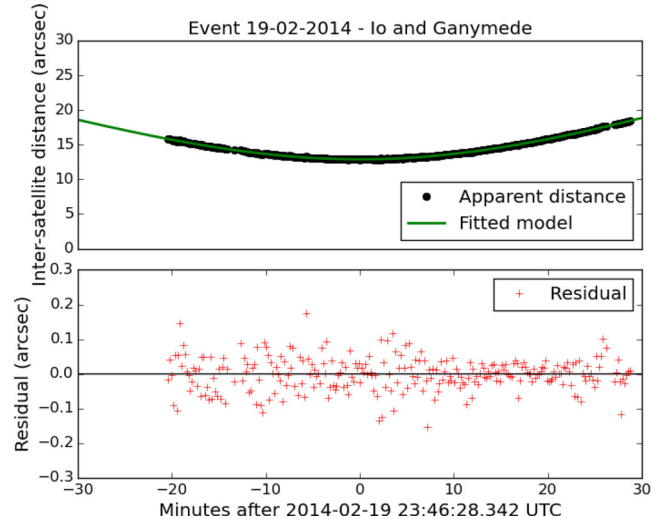
We used the model described in Section 2 to determine the central instant  $t_0$  of the observed mutual approximations. The current sky path of Jupiter is not crowded of stars. Also, Jupiter’s brightness made us use a short exposure time and a narrow-band filter. Because of that there was not enough number of reference stars in the images for an usual CCD astrometry. Even so, for evaluation purposes, we also determined the impact parameter  $d_0$  and the relative velocity  $v_r$  following the procedures given in Section 3 with the help of an ephemeris.

We separate our results in two different groups. Group 1 contains our best results. It consists of observations made in good sky conditions with no gaps along the event. Group 2 has gaps in the distance curve, which may present more noise than in group 1 due to poor atmosphere conditions. Some observations in the later group were virtually made during the 2014–2015 Jupiter equinox. Although they were not mutual occultations, the satellites approached each other by very small distances, about 2 arcsec.

#### 5.4.1 Mutual approximations: group 1

This campaign started in the beginning of 2014. Since the mutual phenomena started in the middle of the same year, only a few mutual approximations were observed without gaps in the centre of the curves due to the apparent proximity of the satellites. The group 1

<sup>6</sup> Website: <http://iraf.noao.edu/>



**Figure 7.** Apparent sky distances between Io and Ganymede in the mutual approximation of 2014 February 19. Inter-satellite distances,  $d$ , are in black and model fitted ones in green. The exposure time utilized was 3 s. Notice that the fit is actually done in  $d^2$ , using equation (2).

**Table 4.** The central instant for the group 1 mutual approximations and comparison with the ephemeris (see text in Section 5.4.1).

Date (d-m-y)	Event	$t_0$ (hh:mm:ss)	$E_{t_0}$ (mas)	$\Delta t_0$ (s)	(mas)
03-02-14	IaE	03:18:47.42 (0.20)	1.55	+4.37	+33.92
05-02-14	EaG	23:27:50.65 (0.66)	4.04	+2.86	+17.53
19-02-14	IaG	23:46:35.40 (0.76)	5.78	+2.31	+17.59
27-02-14	IaE	22:34:27.89 (0.10)	0.79	-1.16	-9.16
07-04-14	IaE	22:35:27.89 (0.19)	1.46	-0.35	-2.68
20-04-14	EaG	21:47:40.57 (0.52)	1.85	-9.70	-34.47
21-04-14	GaC	21:41:53.56 (1.01)	4.74	+1.71	+8.04
21-04-14	IaG	23:13:56.69 (1.01)	5.45	-2.73	-14.74

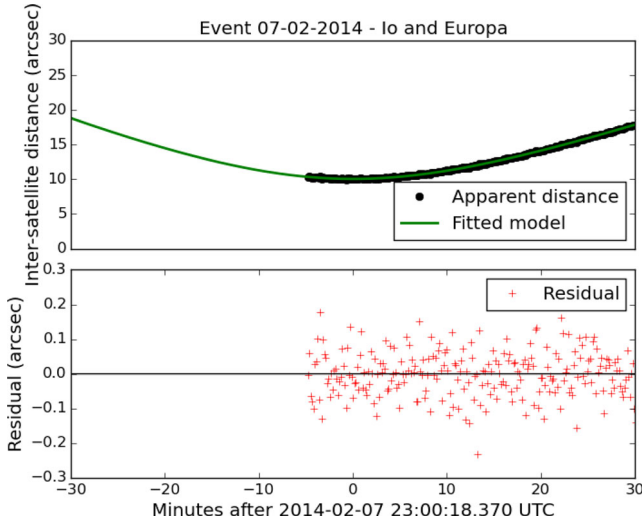
*Note.*  $t_0$  is the central instant of the mutual approximations. Column  $E_{t_0}$  lists the central instant error in mas by the use of the ephemeris relative velocities in mas per second. For each event, we have the day, month and year, the satellites designated by their initials (capital letters), where ‘a’ stands for approximation. The column  $\Delta t_0$  is the comparison between the observations and the ephemeris, here the *NOE* – 5 – 2010 – *GAL* from IMCCE plus DE430, derived from Lainey et al. (2009), in the sense ‘observations minus ephemeris’ in seconds and in mas by the use of the relative velocities in each event.

is composed of eight events. These approximations are similar to the ones that will be observed after the mutual phenomena campaign, this makes them the focus of this paper.

As an example we display the approximation between Io and Ganymede that occurred on 2014 February 19. The comparison between the fitted (green) and observed (black) apparent distances is shown in Fig. 7. The residual dispersion is also illustrated in the bottom (red crosses), in the sense ‘fitted minus observed’.

We show in Table 4 the central instant, in hours, minutes and seconds in UTC and the error in seconds. We also list the error in milliarcseconds by the use of the ephemeris relative velocity in milliarcseconds per second. These values are listed in column  $E_{t_0}$ . We compared the results with the ephemeris published by the IMCCE, currently considered the most accurate representative for the Jovian system, in the sense ‘observations minus ephemeris’.





**Figure 8.** Apparent sky distances between Io and Europa in the mutual approximation of 2014 February 07. Inter-satellite distances,  $d$ , are in black and model fitted ones in green. The exposure time utilized was 3 s. Notice that the fit is actually done in  $d^2$ , using equation (2).

The average precision obtained for the central instant is 0.56 s or 3.42 mas (using the relative velocity in each event obtained with the ephemeris).

#### 5.4.2 Mutual approximations: group 2

A mutual approximation can last a couple of hours. This makes it possible to acquire many observations and fit the model even without the full coverage of the approximation. Logically, these results will not be as good as if we could observe all the event. We have six mutual approximations in this group. A natural cause for the random observational gaps in the curves were bad weather or very bad seeing.

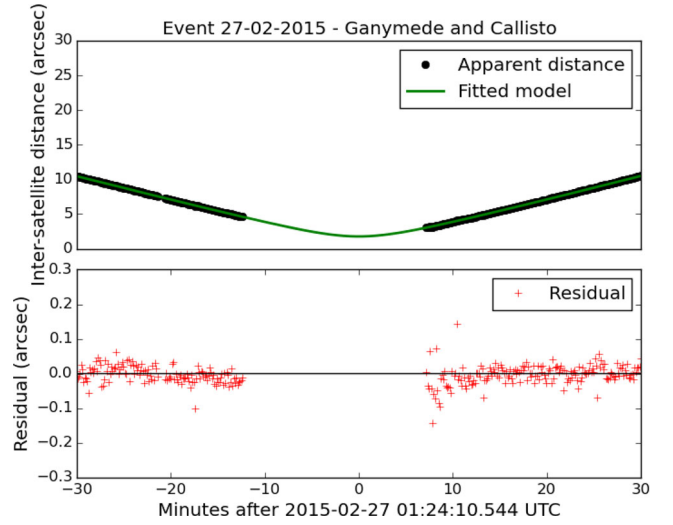
Two examples can be displayed. One is when the weather prevented the observation of part of the event such as in the approximation between Io and Europa that occurred on 2014 February, 07. In Fig. 8 we show the comparison between the fitted and observed apparent distances. Notice the absence of positions in the left side of the event.

The second example is when the approximation occurred during the mutual phenomena campaign at the planet’s equinox. Near the central instant of the approximation, the satellites are so close together that it is impossible to obtain a centroid for each satellite in the images. An example is the approximation between Ganymede and Callisto that occurred on 2015 February 27. In Fig. 9 we show the comparison between the fitted and observed apparent distances. Notice the absence of positions near the central instant.

We show in Table 5 the central instant for these six approximations, in the same manner as in Table 4 for the group 1. We also compared the parameters with the IMCCE ephemeris.

The average precision obtained for the central instant is 2.02 s or 14.15 mas (using the relative velocity in each event obtained with the ephemeris). Notice that even here the precisions are still much better than those obtained with usual CCD astrometry.

How does the gaps in these distance curves affect the determination of the central instant? We addressed this question by simulating gaps in the group 1 approximations reported in the previous section. As example, we illustrate the simulation using the event between



**Figure 9.** Apparent sky distances between Ganymede and Callisto in the mutual approximation of 2015 February 27. Inter-satellite distances,  $d$ , are in black and model fitted ones in green. The exposure time utilized was 3 s. Notice that the fit is actually done in  $d^2$ , using equation (2).

**Table 5.** Central instant for the group 2 mutual approximations and comparison with the ephemeris (see text in Section 5.4.2).

Date (d-m-y)	Event	$t_0$ (hh:mm:ss)	$E_{t_0}$ (mas)	$\Delta t_0$ (s)	$\Delta t_0$ (mas)
07-02-14	IaE	23:00:17.29 (4.94)	40.97	-1.38	-11.46
18-03-14	IaE	22:43:23.26 (2.52)	16.06	-7.93	-50.54
27-02-15	GaC	01:24:10.29 (1.42)	8.14	+0.71	+4.07
11-04-15	EaG	22:07:13.35 (1.13)	5.76	-2.60	-13.25
13-04-15	IaE	23:44:40.98 (1.12)	8.60	-1.78	-13.67
19-04-15	EaG	01:17:48.89 (1.00)	5.15	-4.10	-21.12

Note. Same as in Table 4.

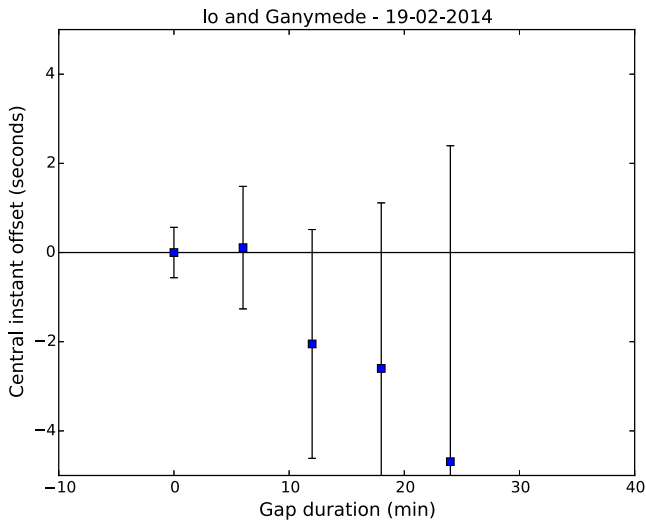
Io and Ganymede on 2014 February 19. Similar conclusions are drawn for the other simulations. The event took 1 h, thus a 6-min gap represents 10 per cent of the entire curve.

We explore two scenarios. (1) Removing points from the beginning, or end, of the curve. This affects the central instant error, even though the central instant value is close (within the errors) to the one obtained with the complete curve (Fig. 10). (2) Removing points in the central part of the curve. The central instant precision and value are nearly unaffected (Fig. 11). The offsets are consistent within the errors.

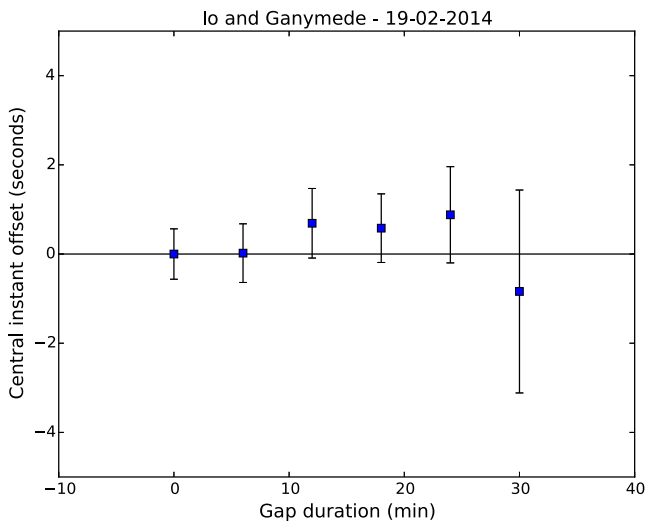
These simulations confirm the slight deterioration observed in the errors of the parameters of the incomplete mutual approximations of group 2, as compared to those from the group 1. But the simulations also indicate that the obtained central instant are practically unaffected with regard to the ones that would be derived with complete curves, within the errors. Therefore, in principle even incomplete curves of mutual approximations should not be discarded.

#### 5.4.3 Results for the impact parameter and relative velocity

In Table 6 we list the impact parameters and the relative velocity of our 14 mutual approximations. They are listed in milliarcseconds, and milliarcseconds per second, respectively. We also list the comparison of these parameters with the ephemeris in the sense ‘observations minus ephemeris’. Both observed and ephemeris results were obtained by fitting the model of Section 3.1 to the respective



**Figure 10.** Simulation of gaps in the beginning of the group 1 mutual approximation between Io and Ganymede of 2014 February 19. Offsets are in the sense ‘with gap minus without gap’.



**Figure 11.** Simulation of gaps in the central part of the group 1 mutual approximation between Io and Ganymede of 2014 February 19. Offsets are in the sense ‘with gap minus without gap’.

observed and ephemeris apparent distances. The pixel scale determined is also listed. The nominal pixel scale of the instrumental set was 0.34 or 0.37 mas per pixel depending of the instrumental configuration of the night. The last column is an identification flag where 1 stands for ‘group 1 mutual approximations’ and 2 stands for ‘group 2 mutual approximations’. Notice that, in the near future, a new reduction can be made using more precise ephemeris. This will allow the confirmation of ours results.

## 6 MUTUAL OCCULTATIONS INSIDE MUTUAL APPROXIMATIONS

Mutual approximations and mutual phenomena – occultations in particular – share the same concepts of orbital geometry, though based in very distinct measuring techniques, with the last being a consolidated and most precise method for measuring distances

between natural satellites. It would be very interesting if we could compare the performance of both methods in an equal basis. Indeed this is possible because, in a broader sense, any mutual occultation is always contained in a mutual approximation. The only drawback is that the same set of useful observations to be fitted in mutual occultations, when the satellites are too close together, is exactly the set that must be discarded in the mutual approximations, and vice-versa. Even so, this still makes an interesting comparison, because the instrumental and astronomical observational conditions are quite the same, and the independence of the observational sets has a relevance of its own.

### 6.1 A comparison from observations of Jupiter’s 2009 equinox

For this comparison, we used the data of the mutual phenomena campaign of 2009 of Dias-Oliveira et al. (2013). We utilized images acquired before and after five occultations originally designed for albedo determination. Arlot et al. (2014) also determined the geometric parameters of these five occultations using the same light curves as Dias-Oliveira et al. (2013), however obtaining slightly different results. Here we compare the results derived from the mutual approximations with the results of Arlot et al. (2014) and the NOE-5-2010-GAL ephemeris. The comparison is displayed in Table 7. As shown in Table 7, the results for the mutual approximation method agrees with the results of Arlot et al. (2014) and the NOE-5-2010-GAL, within the errors. This highlights the strength of mutual approximations.

### 6.2 Mutual approximations in the observations of Jupiter’s 2014-2015 equinox

The results for the mutual phenomena campaign of 2014–2015 are still being processed. However we list here the central instant for the mutual approximations derived from the observations before and after the mutual phenomena themselves. These results can be used, in the near future, for comparison with the results from the mutual occultations of this campaign. It is important to stress that, for this scenario, the precision of the mutual approximation results is below its capacity, once we will always have an absence of points around the central instant.

These results are shown in Table 8, where we list the central instant and its error obtained from our analysis for 22 mutual approximations and the comparison with the ephemeris, similar as in Table 4.

## 7 CONCLUSION

In this paper we presented a method to measure the central instant in an approximation between natural satellite pairs. Instead of being restricted to the particular configuration of mutual occultations – which only occur during the equinox of the central planet – in mutual approximations (as we call the method) we can make observations every time when the satellites don’t cross each other in the sky, but rather approach each other up to a minimum apparent distance, which is at least larger than the sum of their radii, or in practice larger than the seeing - a special geometry that recurrently occurs for natural satellites. In this method the relative motion of the satellites is essentially described by the same geometric parameters as in a mutual occultation – central instant, impact parameter and relative velocity. But only the central instant can be truly determined independently of any reference system, and so we

**Table 6.** Fitted impact parameter and relative velocity and comparison between observations and the ephemeris.

Date (d-m-y)	Event	$d_0$ (mas)	$v_r$ (mas s <sup>-1</sup> )	$\Delta d_0$ (mas)	$\Delta v_r$ (mas s <sup>-1</sup> )	$P_s$ (arcsec pixel <sup>-1</sup> )	Id.
03-02-2014	IaE	9908.66 (07.93)	7.81 (0.31)	-17.18	+0.05	0.372 14 (0.000 11)	1
05-02-2014	EaG	15 014.25 (09.61)	6.24 (0.35)	+51.00	+0.04	0.374 78 (0.000 05)	1
07-02-2014	IaE	10 080.02 (12.18)	8.36 (0.71)	-73.26	+0.02	0.371 54 (0.000 28)	2
19-02-2014	IaG	12 995.06 (06.08)	7.55 (0.22)	+0.43	+0.07	0.372 88 (0.000 87)	1
27-02-2014	IaE	9809.83 (13.64)	7.96 (0.38)	-7.61	-0.03	0.349 43 (0.000 07)	1
18-03-2014	IaE	7984.82 (29.31)	6.52 (0.71)	+7.69	+0.09	0.349 71 (0.000 14)	2
07-04-2014	IaE	8866.39 (11.83)	7.74 (0.34)	-24.28	+0.04	0.361 15 (0.000 12)	1
20-04-2014	EaG	8425.61 (03.46)	3.56 (0.08)	+4.27	+0.02	0.361 61 (0.000 33)	1
21-04-2014	GaC	18 052.70 (02.97)	4.72 (0.16)	-13.71	+0.03	0.362 33 (0.000 57)	1
21-04-2014	IaG	9250.29 (07.25)	5.48 (0.52)	-24.25	+0.09	0.362 35 (0.000 64)	1
27-02-2015	GaC	1763.02 (25.99)	5.76 (0.19)	-25.97	+0.03	0.348 73 (0.000 05)	2
11-04-2015	EaG	2173.79 (19.42)	5.16 (0.36)	-22.31	+0.09	0.348 37 (0.000 17)	2
13-04-2015	IaE	1358.27 (42.35)	7.73 (0.25)	-61.96	+0.05	0.348 60 (0.000 11)	2
19-04-2015	EaG	2126.17 (31.88)	5.19 (0.37)	-75.47	+0.07	0.348 18 (0.000 27)	2

*Note.* The impact parameter,  $d_0$  and the relative velocity  $v_r$  of the mutual approximations. The columns  $\Delta$  are the comparisons between the observations and the ephemeris parameters, here the *NOE - 5 - 2010 - GAL* from IMCCE plus DE430, derived from Lainey et al. (2009), in the sense ‘observations minus ephemeris’. For each event, we have the day, month and year, the satellites designated by their initials (capital letters), where ‘a’ stands for approximation. The Pixel-scale,  $P_s$ , determined with the ephemeris is, also, listed. In the Id. column 1 stands for ‘group 1 mutual approximations’ and 2 stand for ‘group 2 mutual approximations’.

**Table 7.** Comparison between the central instant for five mutual approximations and occultations observed in the 2009 equinox of Jupiter.

Date (d-m-y)	Event	Central instant difference							
		[1] error		[1] - [2]		[1] - [3]		[2] - [3]	
		(s)	(mas)	(s)	(mas)	(s)	(mas)	(s)	(mas)
09-05-09	IaE	3.23	23.84	-0.50	-3.65	+0.40	+2.98	+0.90	+6.63
28-05-09	IaE	3.62	22.55	+2.28	+14.16	-2.31	-14.34	-4.59	-20.49
22-06-09	IaE	4.72	26.57	-2.25	-12.77	-4.51	-25.59	-2.26	-12.82
06-07-09	IaE	3.02	16.01	-2.98	-15.61	-4.66	-24.35	-1.67	-8.74
07-08-09	IaE	3.59	13.46	+1.96	+7.33	-7.07	-26.40	-9.03	-33.72

*Note.* [1] Mutual approximation; [2] Arlot et al. (2014); [3] Ephemeris, NOE-5-2010-GAL from IMCCE plus DE430. The average error of the approximations are 3.63 s (20.47 mas) for the central instant. Notice that the difference between the approximations and the mutual phenomena of Arlot et al. (2014) is smaller than the errors of the central instant of the mutual approximation, and has the same order that the difference between Arlot et al. (2014) and the ephemeris.

consider it the main result of the method. Here astrometry is the technique used to directly measure typically very short distances (less than 85 arcsec) with very small errors due to the precision premium, while differential photometry is the technique used in mutual phenomena.

We successfully applied the method to the Galilean moons using CCD observations made in 2014 and 2015. We compared our results with the ephemeris NOE-5-2010-GAL from IMCCE. Using old observations from the 2009 equinox of Jupiter, we also compared the performance of mutual approximations with published mutual phenomena results from that campaign.

The frequency of these approximations depends only of the orbital period of the satellites. In the case of the Galilean moons, a couple of days or so. Because there is no need of reference stars for the astrometry even small telescopes can be used. Because the events may last for hours there is no need of a high cadence in time between the images, even tens of seconds would be ok.

The mutual approximations extend the possibility of obtaining relative distances with precision of a few mas, to periods where there are no occultations or eclipses. This means getting a relative position with an error about 10 mas for every observed event along

the visibility period. In the case of the Galilean moons we obtained a precision of 0.56 s for the central instant when the whole approximation curve of distances was observed and a precision of 1.52 s for the central instant when there were gaps along the curve or around the central instant.

The high precision results obtained in this work for the Galilean moons benefited from: (i) the precision premium from very small field astrometry; (ii) from the use of a narrow band filter centred in a methane absorption region, eliminating the scattered light of Jupiter (this filter was also used in the reported mutual phenomena observations); (iii) the use of an adequate telescope/detector/exposure configuration set, allowing for imaging the satellites with high S/N (signal/noise) ratios, but avoiding saturation.

The instrumental distortions due to the non flatness and non parallelness of the filter and the CCD cover glass, and their distance from the CCD chip affect the global reduction of the entire FoV of the CCD to some extent. However, due to the very small distance between both satellites (smaller than 30 arcsec) these distortions can be neglected here.

The error in the measurement of the centroids, and thus of the distances, due to the effects of low/high albedo regions in the surface

**Table 8.** Results for the mutual approximations for the 22 occultations observed in 2014–2015 and comparison with the ephemeris.

Date (d-m-y)	Event	$t_0$ (hh:mm:ss)	$E_{t_0}$ (mas)	$\Delta t_0$ (s)	$\Delta t_0$ (mas)
15-10-14	GaC	07:07:07.26 (3.55)	+4.80	14.60	+19.75
15-10-14	IaE	07:07:54.19 (2.48)	+0.02	17.54	+0.16
29-10-14	IaG	07:07:24.26 (4.34)	-2.05	22.17	-10.45
02-11-14	IaC	06:02:34.11 (9.19)	-2.82	16.75	-5.14
19-11-14	EaC	07:37:52.48 (3.61)	+11.79	18.32	+59.86
02-02-15	GaC	02:24:31.55 (2.57)	-3.56	14.99	-20.74
22-02-15	IaE	02:07:53.57 (1.32)	+6.24	7.21	+34.07
24-02-15	IaG	01:44:46.97 (6.43)	+2.72	53.15	+22.48
26-02-15	IaE	22:21:26.26 (2.53)	+1.32	23.72	+12.40
27-02-15	IaG	02:20:23.81 (1.30)	-1.63	8.54	-10.68
03-03-15	IaG	04:08:13.38 (3.85)	-1.46	32.28	-12.24
24-03-15	GaC	00:14:15.44 (5.08)	-0.02	27.19	-0.09
25-03-15	IaE	23:34:49.47 (10.46)	-9.13	65.38	-57.08
02-04-15	IaE	01:43:57.43 (1.86)	+4.26	11.83	+27.09
17-04-15	IaC	23:47:03.29 (1.26)	+3.00	6.28	+14.92
18-04-15	GaC	01:32:21.21 (1.16)	-0.58	5.80	-2.89
18-04-15	IaG	20:54:40.80 (2.06)	+0.07	11.39	+0.39
21-04-15	IaE	01:55:02.68 (1.16)	-1.61	8.56	-11.86
25-04-15	IaG	23:45:24.78 (1.51)	+1.23	8.99	+7.30
26-04-15	IaE	21:24:57.44 (4.12)	+0.12	27.29	+0.79
29-04-15	IaG	00:28:55.49 (4.36)	-14.96	29.87	-102.50
03-05-15	IaG	23:39:20.87 (1.53)	+2.35	10.20	+15.70

Note. Same as in Table 4.

of the satellites, is presently unknown. However, taking the surface illumination resulting from the solar phase angle geometry as an extreme example, and using the relations in Section 4, we find that we need nearly a  $5^\circ$  phase angle to change the photocentre by 10 mas. This corresponds to a zero albedo circular region of 100 km radius. Indeed, craters or volcanoes in many of the Galilean moons are features of this size (Faure & Mensing 2007). However, they represent a variation of only 0.1 in the surrounding surface albedo. So, in principle, at least for the Galilean moons, this effect can be neglected. In the special case of Io, the volcanoes can affect the centroid for infrared observations in wavelengths such as 3800 nm, as can be seen from Descamps et al. (1992). However in the same paper, the authors obtained a light curve observed in Pic du Midi at 800 nm for comparison purposes, but in this wavelength the effect of the volcanoes could not be observed. Since our observations were made in the same wavelength (889 nm), we conclude that these effects can be neglected in our images.

Mutual approximations is a simple, efficient and suitable method for small telescopes. It can be used to continually furnish high precision central instants that can be used to strongly constrain orbit fitting. Ultimately, mutual approximations will significantly contribute to the improvement of the orbits of natural satellites, including the consideration of weak interactions like tidal forces.

## ACKNOWLEDGEMENTS

This paper is based on observations made at the Laboratório Nacional de Astrofísica (LNA), Itajubá-MG, Brazil. The authors thank the referee Dr D. Pasco for his constructive comments. BM thanks the financial support by the CAPES/Brazil. MA thanks the CNPq (Grants 473002/2013-2 and 308721/2011-0) and FAPERJ (Grant E-26/111.488/2013). RVM acknowledges the following grants: CNPq-306885/2013, CAPES/Cofecub-2506/2015, FAPERJ/PAPDRJ-45/2013 and FAPERJ/CNE/05-2015. JIBC acknowledges CNPq for a PQ2 fellowship (process number

308489/2013-6). ADO is thankful for the support of the CAPES (BEX 9110/12-7) FAPERJ/PAPDRJ (E-26/200.464/2015) grants. ARGJ thanks CAPES/Brazil.

## REFERENCES

- Arlot J.-E. et al., 1982, *A&A*, 111, 151  
Arlot J.-E. et al., 2012, *A&A*, 544, A29  
Arlot J.-E. et al., 2013, *A&A*, 557, A4  
Arlot J.-E. et al., 2014, *A&A*, 572, A120  
Assafin M., Vieira-Martins R., Braga-Ribas F., Camargo J. I. B., de Silva Neto D. N., Andrei A. H., 2009, *AJ*, 137, 4046  
Assafin M. et al., 2011, in Tanga P., Thuillot W., eds, *Gaia Follow-up Network for the Solar System Objects*. Paris Observatory, France, p. 85  
Butcher E., Stevens R., 1981, *Newsl. Kitt Peak Natl. Obs.*, 16, 6  
Crida A., Charnoz S., 2012, *Science*, 338, 1196  
De Sitter W., 1928, *Leiden Ann.*, 16, 1  
Descamps P., Arlot J. E., Thuillot W., Colas F., Vu D. T., 1992, *Icarus*, 100, 235  
Dias-Oliveira A. et al., 2013, *MNRAS*, 432, 225  
Emelyanov N. V., 2003, *Sol. Syst. Res.*, 37, 344  
Emelyanov N. V., 2009, *MNRAS*, 394, 1037  
Emelyanov N. V. et al., 2011, *Sol. Syst. Res.*, 45, 264  
Faure G., Mensing T. M., 2007, *Introduction to Planetary Science: The Geological Perspective*. Springer, Netherlands  
Green R. M., 1985, *Spherical Astronomy*. Cambridge Univ. Press, Cambridge  
Harper D., Murray C. D., Beurle K., Williams I. P., Jones D. H. P., Taylor D. B., Greaves S. C., 1997, *A&AS*, 121, 65  
Karkoschka E., 1994, *Icarus*, 111, 174  
Karkoschka E., 1998, *Icarus*, 133, 134  
Kiseleva T. P., Izmailov I. S., Kiselev A. A., Khrutskaya E. V., Khovritvhev M. Yu., 2008, *Planet. Space Sci.*, 56, 1908  
Lainey V., Arlot J.-E., Vienne A., 2004, *A&A*, 427, 371  
Lainey V., Arlot J.-E., Karatekin O., Van Van Hoolst T., 2009, *Nature*, 459, 957  
Lieske J. H., 1987, *A&A*, 176, 146  
Lindgren L., 1977, *A&A*, 57, 55

- Mason B. D., Kaplan G. H., Douglass G. G., Pascu D., Aksnes K., 1999, BAAS, 30, 0509
- Pascu D., 1994, in Morrison L. V., Gilmore G. F., eds, Galactic and Solar System Optical Astrometry. Cambridge Univ. Press, Cambridge, p. 304
- Peng Q. Y., Vienne A., Lainey V., Noyelles B., 2008, Planet. Space Sci., 419, 1977
- Peng Q. Y., He F., Lainey V., Vienne A., 2012, MNRAS, 56, 1807
- Stone R. C., 1996, PASP, 108, 1051
- Stone R. C., 2001, AJ, 122, 2723
- Veiga C. H., Vieira-Martins R., 1994, A&A, 107, 551
- Veiga C. H., Vieira-Martins R., Veillet C., Lazzaro D., 1987, A&A, 70, 325
- Veillet C., Ratier G., 1980, A&A, 89, 342
- Vienne A., Thuillot W., Veiga C. H., Arlot J.-E., Vieira-Martins R., 2001, A&A, 380, 727

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

# APPROX – mutual approximations between the Galilean moons: the 2016–2018 observational campaign

B. Morgado,<sup>1,2★</sup> R. Vieira-Martins,<sup>1,2,3</sup> M. Assafin,<sup>2,3</sup> D. I. Machado,<sup>4,5</sup>  
J. I. B. Camargo,<sup>1,2</sup> R. Sfair,<sup>6</sup> M. Malacarne,<sup>7</sup> F. Braga-Ribas,<sup>1,2,8</sup> V. Robert<sup>9,10</sup>,  
T. Bassallo,<sup>1</sup> G. Benedetti-Rossi,<sup>1,2</sup> L. A. Boldrin,<sup>6</sup> G. Borderes-Motta,<sup>6</sup>  
B. C. B. Camargo,<sup>6</sup> A. Crispim,<sup>8</sup> A. Dias-Oliveira<sup>1,11</sup>, A. R. Gomes-Júnior<sup>2,3,6</sup>,  
V. Lainey,<sup>10,12</sup> J. O. Miranda,<sup>7</sup> T. S. Moura,<sup>6</sup> F. K. Ribeiro,<sup>7</sup> T. de Santana<sup>6</sup>,  
S. Santos-Filho,<sup>2</sup> L. L. Trabuco,<sup>5</sup> O. C. Winter<sup>6</sup> and T. A. R. Yamashita<sup>6</sup>

*Affiliations are listed at the end of the paper*

Accepted 2018 November 5. Received 2018 November 5; in original form 2018 September 24

## ABSTRACT

The technique of mutual approximations accurately gives the central instant of the maximum apparent approximation of two moving natural satellites in the plane of the sky. This can be used in ephemeris fitting to infer the relative positions of satellites with high precision. Only mutual phenomena – occultations and eclipses – can achieve better results. However, mutual phenomena only occur every six years in the case of Jupiter. Mutual approximations do not have this restriction and can be observed at any time in the year as long as the satellites are visible. In this work, we present 104 central instants determined from the observations of 66 mutual approximations between the Galilean moons carried out at different sites in Brazil and France during the period 2016–2018. For 28 events, we have at least two independent observations. All telescopes were equipped with a narrow-band filter centred at 889 nm with a width of 15 nm to eliminate the scattered light from Jupiter. The telescope apertures ranged between 25 and 120 cm. For comparison, the precision of the positions obtained with classical CCD astrometry is about 100 mas, for mutual phenomena it can be 10 mas or less, and the average internal precision obtained with mutual approximations is 11.3 mas. This new type of simple, yet accurate, observations can significantly improve the orbits and ephemeris of Galilean satellites and thus it can be very useful for the planning of future space missions to the Jovian system.

**Key words:** methods: data analysis – astrometry – planets and satellites: individual: Callisto – planets and satellites: individual: Europa – planets and satellites: individual: Ganymede – planets and satellites: individual: Io.

## 1 INTRODUCTION

Orbital studies of natural satellites can give us hints about the formation processes of moons (Charnoz et al. 2011; Crida & Charnoz 2012). They can also give us valuable information about the interiors of moons, with accurate estimations of the tidal effect. One example is the thermal equilibrium in Io (the innermost of the Galilean moons), determined by the agreement between the orbital

energy loss and the heat evacuated at Io’s surface (Lainey et al. 2009).

Any improvement of the orbits in these studies requires systematic astrometry of these moons, preferably over extended periods of time and, as much as possible, with accurate and precise measurements. These measurements, observable in a more general sense, are fitted with the use of dynamical models (De Sitter 1928; Lieske 1987; Lainey et al. 2009). For instance, an improvement in the study of the tidal force in the Jovian system requires positions with a precision better than 30 mas (Lainey 2016).

Usual CCD astrometry relies on the imaging of the target in the field of view (FOV) with an adequate number of catalogued

\* E-mail: [morgado.fis@gmail.com](mailto:morgado.fis@gmail.com)

reference stars. For the Galilean moons, this is not an easy task. Jupiter's brightness (magnitude in the  $V$  band of around  $-2.5$ ) makes it difficult to image catalogued stars ( $V = 12-20$ ), as Jupiter saturates and spreads its light all over the FOV with longer exposures. Methods to reduce this brightness have been tried, but the precision in the classical CCD astrometry of a single satellite is yet not satisfactory (i.e. the standard deviation of ephemeris residuals from a few hundred observations per night ranges between 100 and 150 mas; Kiseleva et al. 2008).

Mutual occultations and eclipses provide very precise relative positions between two satellites. The drawback is that they can only be observed during the equinox of the host planet, when the Earth and the Sun pass through the orbital plane of the satellites. In the case of Jupiter, this occurs every 6 yr, for Saturn every 15 yr and for Uranus every 42 yr (Arlot et al. 2012, 2013, 2014). For the Galilean satellites, mutual phenomena can deliver relative positions with a precision better than 5 mas (Emelyanov 2009; Dias-Oliveira et al. 2013). More than 600 light curves were obtained in the last mutual phenomena campaign (called PHEMU15) between the Galilean moons, with an average precision of 24 mas (Saqet et al. 2018).

This scenario motivated the search for alternative methods to obtain astrometric data for these satellites. For example, Peng et al. (2012a) determined the relative positions between a pair of satellites when they are close together in the FOV, with a relative distance smaller than 85 arcsec, and they obtained precisions of 30 mas in these relative positions.

A more recent attempt is the mutual approximations technique that we have developed (Morgado et al. 2016), first suggested by Arlot et al. (1982). In this method, the instant of the maximum apparent approximation in the sky plane between two moving satellites can be determined with a precision that corresponds to less than 10 mas. The technique solves two problems in the CCD astrometry of the Galilean moons: the determination of the pixel scale and the orientation of the CCD with respect to the right ascension and declination axes in the sky (Emelyanov 2017). Also, it is easy to perform observations using this technique with telescopes that have a small aperture size (of a few centimetres). One important aspect of the method is the correct registering of time. Fortunately, this is also usually easy to accomplish with GPS receivers, specialized software or Internet services that calibrate the acquisition computer's UTC time inserted in the images.

In this paper, we give details of APPROX, an observational campaign of mutual approximations between the Galilean moons. It is a collaboration between Brazilian and French institutes, with six observational sites. This campaign observed 66 mutual approximations, obtaining 104 distance curves between 2016 February and 2018 August. The average precision of the central instant was 11.4 mas using the relative velocity in each event to convert between seconds of time and arcseconds. We also present a procedure to use the mutual approximation data as observables to determine the parameters of the satellites' orbits in ephemeris fitting.

In Section 2, we give an overview of the mutual approximation method. In Section 3, we describe the observational campaign, prediction, simulations and observations, and we explain how we processed the observed data. In Section 4, we present our results. In Section 5, we describe a procedure to use the central instants of mutual approximations for ephemeris fitting. We give our conclusions in Section 6.

## 2 THE METHOD OF MUTUAL APPROXIMATIONS

A detailed description of the method of mutual approximations has been given in Morgado et al. (2016). Here, we briefly summarize the principles of this method.

It is possible to determine the International Celestial Reference System position of a target in a CCD frame but an astrometric star catalogue is required to find the pixel scale, the CCD orientation and the zero point. The zero point is not needed when fitting ephemeris of natural satellites if the relative distances are known.

However, in the case of the Galilean satellites, it is not trivial to determine the pixel scale and image orientation without catalogue reference stars. One possibility is to use the measured relative satellite positions and motions and a reference ephemeris as a template (Peng et al. 2012a), but then the 'true' relative distances might be masked by the correlation with the errors in the ephemeris scale and orientation.

In the mutual approximation technique, we do not work with scaled distances, but with instrumental distances given pixel units. Scaled distances can be derived, but are not used in any fitting for finding the central instant and impact parameter and their errors – only instrumental distances are used for that. We can derive the pixel scale and CCD orientation using an ephemeris as a template, or we can use the nominal pixel scale of the instrument, but only for internal checking purposes (e.g. converting the impact parameter and its uncertainties to milliarcseconds in order to have a better evaluation of the fit). We emphasize that post-derived scaled distances between the satellites are not the primary result of the method of mutual approximations.

Thus, the main result of the method is the central instant at the maximum apparent approximation between two satellites, so we must calibrate time correctly, preferably with a precision better than 0.1 s. We do this using GPS receivers or by using the time-calibration software called Dimension 4.<sup>1</sup>

The mutual approximation method consists of fitting the apparent distances  $s_{ij}$  in the sky plane between two moving satellites  $i$  and  $j$  by a  $N$ -degree polynomial in time, defined by

$$s_{ij}^2(t) = \sum_{n=1}^N a_n t^n. \quad (1)$$

The underlying assumption that actually defines a mutual approximation is the assumption that  $s_{ij}$  gradually decreases with time, reaches a minimum and then starts to increase. The use of the square of  $s_{ij}$  simplifies computations. The degree of the polynomial is determined by evaluating tentative fittings to the (squared) apparent distances computed from a reference ephemeris.

We then use the fitted polynomial coefficients ( $a_n$ ) to determine the central instant  $t_0$  (the instant at maximum approximation, when the apparent distance is minimum), the impact parameter  $d_0$  (the minimum apparent distance in the sky plane between both satellites, which occurs by definition at  $t_0$  when the approximation is at maximum), the relative velocity  $v_0$  at  $t_0$  between both satellites in the plane of the sky, and their uncertainties ( $\sigma d_0$ ,  $\sigma t_0$  and  $\sigma v_0$ ). The central instant is always obtained in UTC. When fitting observations, the impact parameter and its uncertainty are obtained in pixels, and the relative velocity and its uncertainty in pixels per second of time. When fitting reference ephemeris data, the impact parameter

<sup>1</sup>See <http://www.thinkman.com/dimension4/>.

is generally computed in arcseconds and the relative velocity in arcseconds per second of time.

We also correct a shift in the observed central instant due to effects on the apparent distances caused by the following: the different apparent sizes of each satellite and the solar phase angle correction; the atmospheric refraction; the diurnal and annual aberration. The correction is determined after comparing the shift in the central instant obtained from fittings using a reference ephemeris with and without these effects. The shift is usually in the range 1–6 s (5–30 mas).

Marks in the surface, or topography, of the satellites could affect the centroid measurement. As pointed out by Lindegren (1977), the maximum offset could be 35 mas, and would affect systematically all astrometric measurements during a run. Only a very precise albedo map of these satellites in the spectral region of the observations (in our case, 889 nm) would allow us to infer its contribution exactly. However, we highlight that, for mutual approximations, we would be affected only by a fraction of this offset, along the direction of relative motion between both satellites.

After all the fittings and computations of all parameters, for analysis and comparison purposes, we only use non-squared apparent distances. Once ordered in time, we have the distance curves of the event. There are two types of observed distance curves (i.e. measured and fitted) and two types of ephemeris distance curves (i.e. ephemeris- and fitted-based). The nature of the distance curves discussed in the text should be clear from the context.

### 3 OBSERVATIONAL CAMPAIGN

An observational campaign starts with the prediction of the apparent close approximations between two satellites that are really interesting. The second step is the simulation of these events, which can give some hints about the best instrumental configuration and observation procedures for the participants of the campaign. The third step is the observation itself, and the final step is the analysis of the data acquired.

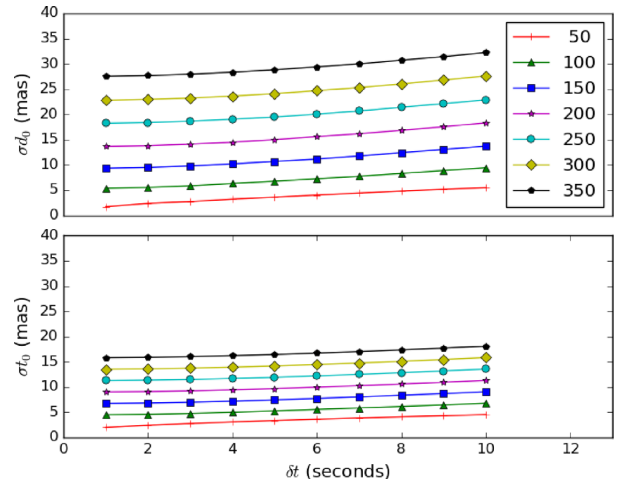
#### 3.1 Prediction

The predictions of the approximations were made with the topocentric ephemeris for each participating observatory using NASA's Navigation and Ancillary Information Facility (NAIF) SPICE<sup>2</sup> toolkit, Jovian ephemeris JUP310 and planetary ephemeris DE430.

The precision premium (Peng et al. 2008) predicts an increase in the precision in the measurement of apparent distances between two objects in the plane of the sky when this distance is smaller than 85 arcsec. In this scenario, we avoid the effects of distortions in the FOV, as both satellites should be affected in the same way. In order to avoid a prohibitive number of events, we only choose the approximations with an impact parameter smaller than 30 arcsec.

We selected all the mutual approximations that were visible for the observatories with an elevation above 30°. We set a minimum apparent distance of 10 arcsec between both satellites and the Jupiter limb. In total, we predicted 102 events between 2016 February and 2018 August. From these, we observed 66 mutual approximations; the others were lost as a result of bad weather conditions or instrumental issues.

<sup>2</sup>See <http://naif.jpl.nasa.gov/naif/>.



**Figure 1.** Simulating the observation of a mutual approximation with different values for the S/N ( $S/N - \sigma_{noise}$ ) and time resolution ( $\delta t$ ); the  $x$ -axis is  $\delta t$ , the upper  $y$ -axis is the error of the impact parameter ( $\sigma d_0$ ) and the lower  $y$ -axis is the error of the central instant ( $\sigma t_0$ ), both in mas. The different colours and marks represent different  $\sigma_{noise}$  regimes, in mas.

#### 3.2 Simulations

In order to test the feasibility of the selected events, it is important to simulate observations and to analyse the different aspects that arise in each scenario. First, we study the expected precision of the mutual approximation's central instant ( $\sigma t_0$ ) and impact parameter ( $\sigma d_0$ ) for different values of time resolution ( $\delta t$ ) and signal-to-noise ratio (S/N). Secondly, we evaluate the ideal duration of the observation of a mutual approximation. Thirdly, we mimic the presence of gaps in the distance curve, which are often caused by bad weather conditions or instrumental issues.

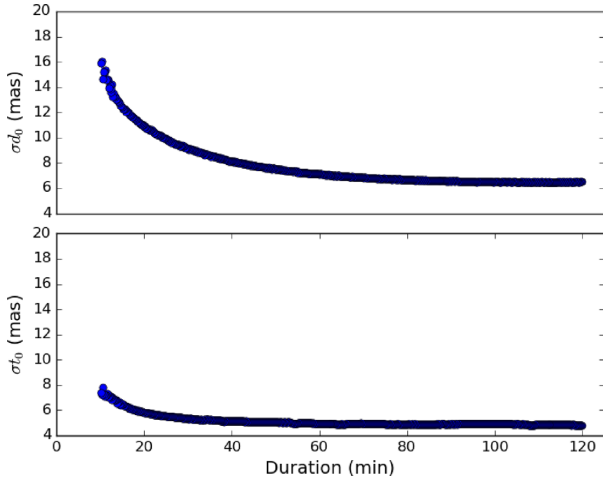
Let us illustrate all three steps in the simulation of events by taking as an example an approximation between Io (501) and Ganymede (503), which occurred on 2016 February 24. We added a Gaussian error with standard deviation equal to  $\sigma_{noise}$  in the distance between the pair of satellites to simulate real observations. We repeated the simulation 100 times with normalization to remove random systematic errors.

In the first step, we studied how the central instant and impact parameter errors are affected by different S/N and different  $\delta t$  (the time difference between two consecutive images). It is clear that the best-case scenario is a high S/N and a low  $\delta t$ . However, part of the time resolution is related to the time exposure, which in turn is correlated with the S/N. Thus, the simulations in this step show us which parameter we must prioritize to obtain the best results.

For the simulations in this step, we chose  $\delta t$  ranging between 1.0 and 10.0 s and  $\sigma_{noise}$  between 50 and 350 mas. The result is displayed in Fig. 1 where we can see that a high  $\sigma_{noise}$  (low S/N) affects the precision of the impact parameter ( $\sigma d_0$ ) and the central instant ( $\sigma t_0$ ) more than the time resolution itself. This means that a good S/N should be prioritized in the observations. For the remaining simulations, we used  $\delta t = 4$  s and  $\sigma_{noise} = 100$  mas, which are the mean values in Morgado et al. (2016).

In the second step, the simulations can be used to evaluate the duration for which a mutual approximation should be observed. We simulate observations starting 1 h before and ending 1 h after the central instant ( $t_0$ ). We eliminated pairs of simulated images





**Figure 2.** Simulating the duration of the mutual approximation event; the  $x$ -axis is the duration of the event ( $\Delta t$ ), symmetrical with regard to the central instant ( $t_0$ ); the upper  $y$ -axis is the error of the impact parameter ( $\sigma d_0$ ) and the lower  $y$ -axis is the error of the central instant ( $\sigma t_0$ ), both in mas.

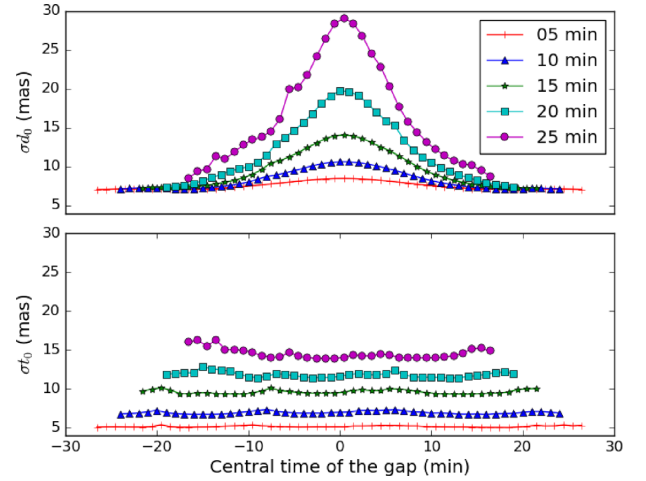
symmetrically placed around the central instant, one pair at a time, until our model failed to determine the central instant. This happens for  $\Delta t$  smaller than 10 min (5 min for each side around  $t_0$ ).

As seen in Fig. 2 for events with a duration between 120 and 40 min, there is no significant difference in the precision of the result obtained for the central instant. For the next simulations, we used distance curves of 60 min with 30 min before and after the central instant.

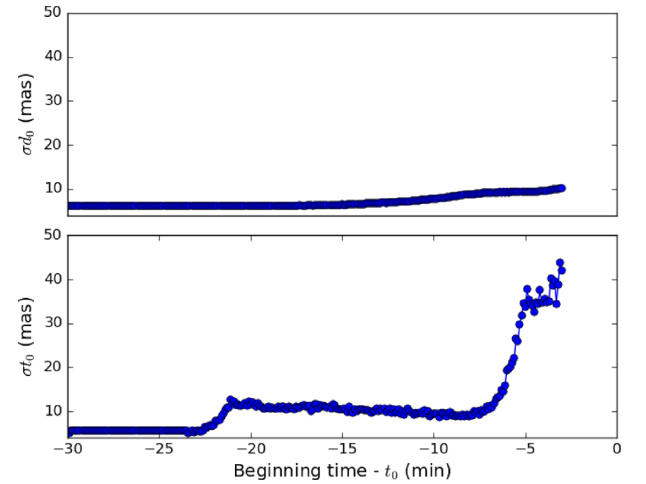
In the third step, the simulations mimic problems that arise from instrument issues and/or bad weather conditions, in order to evaluate how the absence of points along the curve affects the error of the results. The simulations are divided into two different scenarios: (i) gaps are present along the whole curve; (ii) only one side of the curve is available. Both scenarios were explored in Morgado et al. (2016), but here we study them in detail.

In the first scenario, it is not only the size of the gap that matters, but also the gap location. We explored gaps with sizes  $\Delta t_{\text{gap}}$  equal to 5, 10, 15, 20 and 25 min, in different positions along the distance curve with respect to the central time of the gap  $t_{\text{gap}}$ . In Fig. 3, we plot the errors of the impact parameter ( $\sigma d_0$ ) and the central instant ( $\sigma t_0$ ) over  $t_{\text{gap}}$ . We remark that the location of the gap does not affect  $\sigma t_0$ , whereas  $\sigma d_0$  is strongly affected by gaps near the central instant. This type of gap always occurs during the period of mutual phenomena when the mutual approximation culminates in an occultation, during which it is not possible to measure the  $(x, y)$  centroids of both satellites individually.

The distance curve in a mutual approximation should naturally be a quasi-symmetrical curve with respect to the central instant. Thus, observing only one side of the curve precludes a good determination of the central instant. In the second scenario, we investigated how close to the central instant we can start (or finish) one observation and still obtain good precision. In the simulations, one by one, we eliminate points only from one side of the curve and we compute the errors in the impact parameter ( $\sigma d_0$ ) and the central instant ( $\sigma t_0$ ). The results can be seen in Fig. 4, which shows that the central instant error is strongly affected by the absence of only one side of the curve. For observations starting less than 5 min before the central instant, the error can be up to 30 mas or more.



**Figure 3.** Simulating gaps in a mutual approximation; the  $x$ -axis is the central time of the gap  $t_{\text{gap}}$ , the upper  $y$ -axis is the error of the impact parameter ( $\sigma d_0$ ) and the lower  $y$ -axis is the error of the central instant ( $\sigma t_0$ ), both in mas. The different colours and marks represent different sizes of the gap in minutes.



**Figure 4.** Simulating one-sided curves in a mutual approximation; the  $x$ -axis is the beginning time minus the central instant in minutes; the upper  $y$ -axis is the error of the impact parameter ( $\sigma d_0$ ) and the lower  $y$ -axis is the error of the central instant ( $\sigma t_0$ ), both in mas.

The first and second steps of simulations show us the eventual limitations of the method for each event. They allow us to alert observers to take the necessary precautions in their instrumental set-up and observational strategies. This optimizes the outputs of each event and ultimately improves the overall results of the campaign. The two scenarios in the third step of simulations show us what to expect in the realistic case of a mutual approximation event with bad weather conditions and/or instrument issues. It is worth noting that even in the worst-case scenarios with errors greater than 30 mas, the measurements can still be very useful in the ephemeris fitting of the Galilean satellites.

### 3.3 Observations

The observations were made at five different sites in the south and south-east of Brazil and one site in the south-east of France. The

**Table 1.** Observation information for the 2016–2018 mutual approximations campaign.

Site Alias MPC code	Longitude Latitude Altitude	Team of observers	Telescope aperture CCD Pixel scale	Number of events detected
Itajubá/MG-Brazil OPD 874	45°34'57"5 W 22°32'07"8 S 1864 m	B. Morgado J. I. B. Camargo T. Bassallo A. R. Gomes-Júnior S. Santos-Filho A. Dias-Oliveira G. Benedetti-Rossi	60 cm Andor/Ikon 0.37 arcmin px <sup>-1</sup>	29
Foz do Iguaçu/PR-Brazil FOZ X57	54°35'37"0 W 25°26'05"0 S 184 m	D. I. Machado L. L. Trabuco	28 cm Raptor/Merlin 0.73 arcmin px <sup>-1</sup>	35
Guaratinguetá/SP-Brazil FEG XXX	45°11'25"5 W 22°48'05"5 S 543 m	R. Sfair T. de Santana L. A. Boldrin G. Borderes-Mota T. S. Moura T. Akemi B. C. B. Camargo O. C. Winter	40 cm Raptor/Merlin 0.55 arcmin px <sup>-1</sup>	24
Vitória/ES-Brazil GOA XXX	40°19'00"0 W 20°17'52"0 S 26 m	M. Malacarne J. O. Miranda F. Krieger	35 cm SBIG/ST-8X-ME 0.65 arcmin px <sup>-1</sup>	8
Curitiba/PR-Brazil UTF XXX	49°11'45"8 W 25°28'24"6 S 861 m	F. Braga-Ribas A. Crispim	25 cm Watec/910HX 0.32 arcmin px <sup>-1</sup>	5
Haute de Province/France OHP 511	05°42'56"5 E 43°55'54"7 N 633 m	V. Robert V. Lainey	120 cm Andor/CCD42-40 0.38 arcmin px <sup>-1</sup>	3

geographical longitude, latitude, altitude and the Minor Planet Center (MPC) observatory code of the sites (XXX for sites without a code) for each observatory are listed in Table 1, which also displays instrumental information for each site, the observers and the number of positive detections. Note that the aperture diameters of the telescopes ranged between 25 and 120 cm.

We encouraged the coverage of each event by multiple sites not only in order to lose as few events as possible due to bad weather conditions or instrumental problems, but also because of the advantage gained in the analysis. Also, we proposed that the observers place the satellites of the mutual approximation in the central part of the CCD FOV to attenuate the effects of field distortions, if any (see Peng et al. 2012b).

All the observations were made with a narrow-band filter centred at 889 nm with a width of 15 nm. Radiation in this spectral range is absorbed by the methane in Jupiter's high clouds, making its albedo drop to values below 0.1 (Karkoschka 1994, 1998). This filter is very efficient in decreasing the scattered light of Jupiter without affecting the brightness of the satellites, as pointed out by Karkoschka (1994). Thus, we could obtain good S/N images of the satellites ( $V \sim 5$ ) with exposures of a few seconds without the interference of the scattered light of the planet.

### 3.4 Data processing

The majority of the observations were acquired in FITS format with the time registered in the header. The UTF site recorded observations with a video camera with the time stamped in each frame. The conversion from AVI to FITS and the time extraction were performed with the AUDELA<sup>3</sup> software. The processing of the FITS images was done in three steps.

First, all images were corrected for bias, dark and flat-field using standard IRAF<sup>4</sup> procedures (Butcher & Stevens 1981).

The second step was the determination of the satellite's ( $x, y$ ) centres in the images using the PRAIA package (Assafin et al. 2011). This package measures the object's centroid with a two-dimensional circular symmetric Gaussian fit over pixels within one full width at half-maximum (FWHM = seeing) from the centre. The average error of the centroid measurement was 1/20 of a pixel. Using the nominal pixel scale of the instruments, this translates to errors in the range of 16–36 mas.

<sup>3</sup>See <http://audela.org/>.

<sup>4</sup>See <http://iraf.noao.edu/>.

The third step was the application of the mutual approximation method itself, described in Section 2. We fitted the observed and ephemeris distance curves for the determination of auxiliary ephemeris central instants of time, impact parameter and relative velocities. After the corrections for solar phase angle, atmospheric refraction, diurnal and annual aberration, we obtained the final observed central instants, as well as the observed impact parameters and relative velocities, and their errors. It turned out that a fourth-degree polynomial was used to fit all the distance curves. A Python-based software (Robitaille et al. 2013) was specially developed for performing all the computations of this step.

Thus, at the end of the data processing, we obtained the central instant of the maximum apparent approximation ( $t_0$ ) between both satellites, their impact parameter ( $d_0$ ), their relative velocity ( $v_0$ ) at  $t_0$ , also in the plane of the sky, and the errors for all these parameters. Without any scaling,  $d_0$  and  $v_0$  (and their errors) are measured in pixels and pixels per second.

#### 4 RESULTS

The 2016–2018 observational campaign reported in this paper started in 2016 February and ended in 2018 August. A total of 66 events were successfully observed. For 28 mutual approximations, simultaneous observations were made at two or more sites. In total, 104 independent observations were obtained.

The multiple coverage observational strategy reduced the number of events lost because of bad weather conditions or instrumental issues. An extreme example was the event between Io and Europa on 2016 April 19. This approximation was observed by five sites: OPD, FOZ, GOA, UTF and OHP. Fig. 5 contains the distance curves obtained by each observatory. For comparison, we used the nominal pixel scale (Table 1) for each site to transform the apparent distance in the plane of the sky from pixels to arcsec. The differences between the observations and the ephemeris JUP310 from JPL<sup>5</sup> were  $-0.2$ ,  $-4.8$ ,  $-7.8$ ,  $-0.5$  and  $-5.5$  mas and the precision was 3.8, 8.2, 8.2, 12.0 and 5.6 mas, respectively. These observations combined represent an offset of  $-3.8$  mas with a standard deviation of 2.9 mas.

The results of this campaign can be found in Tables 2 and 3, which contain the date of the event and the satellite pairs in the form  $S_iAS_j$ , where 501 stands for Io, 502 for Europa, 503 for Ganymede and 504 for Callisto. We provide the sites involved in each observation (using the alias defined in Table 1). For each site, we give the obtained central instant ( $t_0$ ) and its uncertainties ( $\sigma t_0$ ) in seconds of time and in mas, respectively, and the difference between the observed central instant and that determined by using the (topocentric) ephemeris JUP310 with DE435 ( $\Delta t_0$ ), in seconds of time and in mas. All times are UTC. In the last column, we have the label  $N$  of each mutual approximation, which is a sequential number following the chronological order of the events. Table 2 displays the results of the 48 distance curves obtained in 2016 and Table 3 shows the results of the 25 and 31 curves observed in 2017 and in 2018, respectively.

Our results are also illustrated in Fig. 6, which displays central instant offsets in mas with respect to the JUP310 ephemeris (dashed line at zero offset) for each mutual approximation. The different colours represent different sites and the dotted line is the difference between the NOE-5-2010-GAL.a and JUP310 ephemeris. The rms between our observations and the JUP310

and NOE-5-2010-GAL.a ephemeris were 14.4 and 18.2 mas, respectively.

According to Tables 2 and 3, very few observations had central instants with internal errors worse than the ideal 30 mas suggested in Lainey et al. (2009) and Lainey (2016) for an effective contribution to the study of tidal forces in the Jovian system (i.e. nine observations out of 104, which is about 9 per cent). About 87 per cent (90 observations) had uncertainties below 20 mas and 65 per cent (67 observations) below 10 mas. One extreme example was the mutual approximation between Io and Callisto observed at OPD on 2016 April 12 ( $N = 10$ ). The internal error was 8.9 s (51.6 mas). This event was heavily affected by bad weather, presenting a 20-min gap before the central instant, with observations having to stop just 15 min after the central instant (see Fig. 7). All observations with internal errors worse than about 20 mas were affected at some extent by bad weather conditions and/or instrumental issues, such as gaps in the curve or low S/N. These scenarios were predicted and explored in our simulations in Section 3.2.

#### 5 EPHEMERIS FITTING PROCEDURE

In order to create an ephemeris, it is necessary to fit a dynamical model to the observations. In the case of natural satellites, the fitting is made by using the standard method of variational equations (see Lainey, Duriez & Vienne 2004a, Lainey, Arlot & Vienne 2004b). Here, we present a method for ephemeris developers that allows the addition of central instants from mutual approximations to ephemeris fitting, by the development of more adequate conditional equations to the problem.

In the case of mutual approximations, we should in principle solve for the partial derivatives  $\partial t_0 / \partial c_l$  to obtain the following conditional equation of the problem:

$$t_0^o - t_0^c = \Delta t_0 = \sum \frac{\partial t_0^c}{\partial c_l} \Delta c_l. \quad (2)$$

Here,  $c_l$  represents each of the  $l$  parameters that we are fitting, usually the initial positions and velocities ( $X_0, Y_0, Z_0, \dot{X}_0, \dot{Y}_0, \dot{Z}_0$ ) for each body in the integration, and other parameters such as the masses,  $J_2, J_4$ , etc.,  $\Delta c_l$  represents the correction for each fitted parameter,  $t_0^c$  is the central instant computed by the dynamical model,  $t_0^o$  is the central instant obtained from the observations and the difference  $t_0^o - t_0^c = \Delta t_0$  represents the ‘observed minus computed’ offset.

However, equation (2) cannot be solved analytically and a numerical approach consumes too much CPU time (see Emelyanov 2017). Fortunately, we can develop equivalent equations to the problem that are solvable.

Consider the apparent distance in the plane of the sky  $s_{ij}$  between two satellites  $i$  and  $j$ , where  $s_{ij}$  is minimum at the central instant  $t_0$ , that is,  $(ds^o/dt)(t_0) = 0$ . Knowing this, we can write

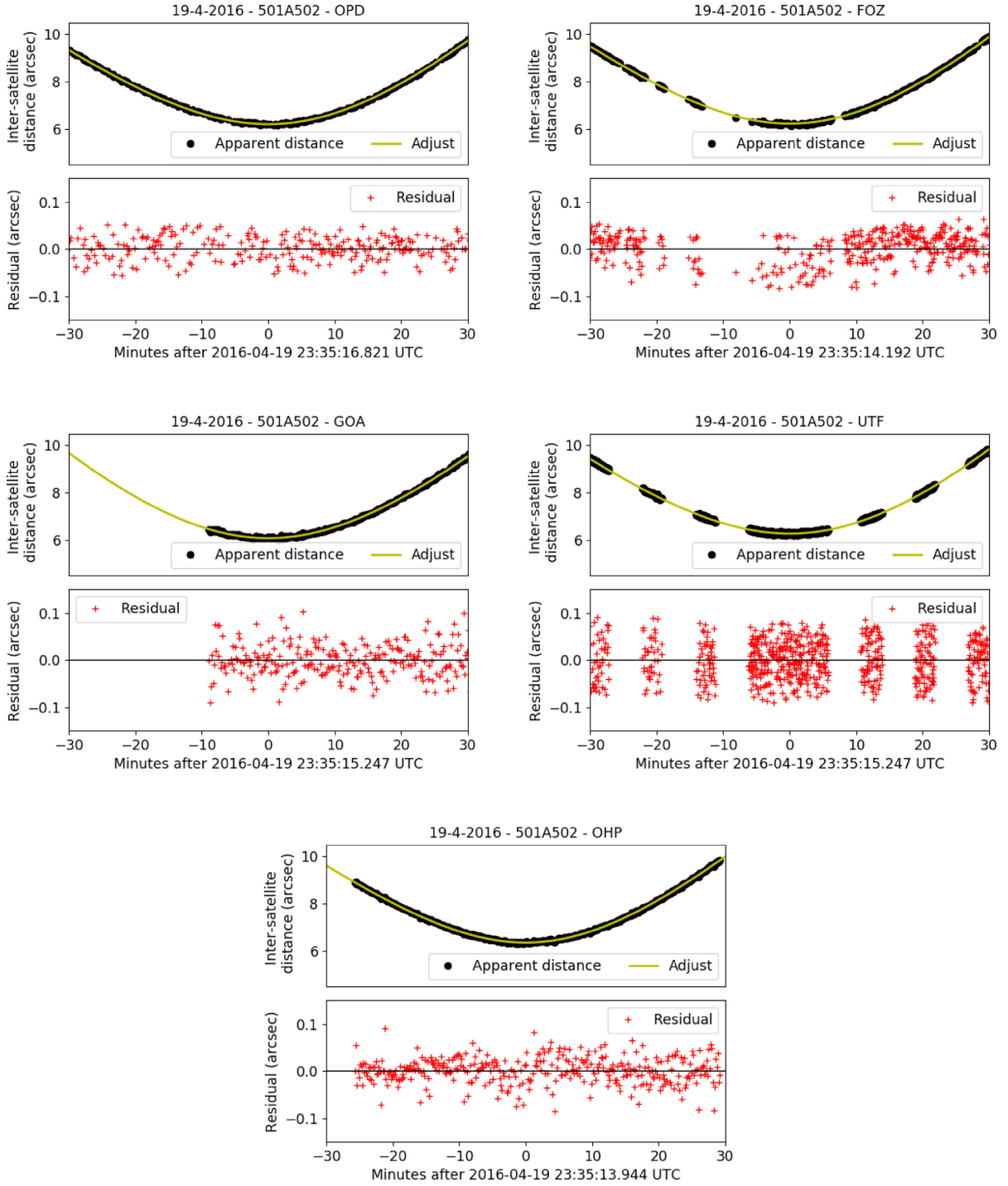
$$\frac{ds^o}{dt}(t_0) - \frac{ds^c}{dt}(t_0) = \sum \frac{\partial}{\partial c_l} \left[ \frac{ds^c}{dt}(t_0) \right] \Delta c_l, \quad (3)$$

where  $(ds^c/dt)(t_0)$  is the value computed by the dynamical model, and the difference  $(ds^o/dt)(t_0) - (ds^c/dt)(t_0)$  also represents an ‘observed minus computed’ offset. Equation (3) is a more suitable conditional equation to the problem. It can be rewritten as follows.

The apparent distance  $s_{ij}$  between satellites  $i$  and  $j$  can be written as

$$s_{ij} = \sqrt{\Delta x_{ij}^2 + \Delta y_{ij}^2}, \quad (4)$$

<sup>5</sup>See <http://www.jpl.nasa.gov/>.



**Figure 5.** Curves of observed apparent distance in the plane of the sky between Io and Europa in the mutual approximation of 2016 April 19 for five sites: OPD, FOZ, GOA, UTF and OHP. Inter-satellite distances,  $d$ , are denoted by black dots and the model fit is shown by the yellow line. In the bottom panel, the red crosses are the residual of the fitting. We used the nominal pixel scale (Table 1) for each site to convert the apparent distances from pixels to arcsec.

with

$$\Delta x_{ij} \simeq (\alpha_i - \alpha_j) \cos(\delta_m), \quad (5)$$

$$\Delta y_{ij} \simeq \delta_i - \delta_j, \quad (6)$$

$$\delta_m = \frac{\delta_i + \delta_j}{2}, \quad (7)$$

where  $\alpha_i$  and  $\alpha_j$  are the satellites' right ascensions,  $\delta_i$  and  $\delta_j$  their declinations and  $\delta_m$  is the mean declination of both satellites, which is the first-order polynomial approximation for gnomonic projection.

**Table 2.** Central instant: results of the mutual approximation campaign for 2016. Note that 501 stands for Io, 502 for Europa, 503 for Ganymede and 504 for Callisto.  $\sigma t_0$  is the central instant error in seconds of time and in mas (using the relative velocity in each event obtained with the ephemeris) and  $\Delta t$  is the comparison between the observation and the ephemeris JUP310 (with DE435) from the JPL in the sense of ‘observation minus ephemeris’ in seconds of time and in mas.  $N$  is a sequential number with time that labels each observed mutual approximation. Time is UTC.

Date (yy-mm-dd)	Event	Observer	$t_0$ (UTC) (hh:mm:ss.ss)	$\sigma t_0$ (s)	$\sigma t_0$ (mas)	$\Delta t_0$ (s)	$\Delta t_0$ (mas)	$N$
2016-02-03	502A503	OPD	04:48:01.1	4.2	30.4	+0.9	+6.3	1
2016-02-08	501A502	FOZ	06:29:38.4	0.6	2.6	+1.5	+6.8	2
2016-02-15	502A503	FOZ	08:39:28.5	1.1	4.8	-0.7	-2.8	3
2016-02-24	501A503	OPD	01:53:25.5	1.1	7.1	-0.2	-1.6	4
		FEG	01:53:27.3	4.0	24.7	+1.5	+9.6	4
2016-02-25	501A503	GOA	23:55:58.2	2.4	8.8	-1.6	-6.0	5
2016-03-04	501A502	GOA	02:09:59.3	2.3	7.7	+1.8	+6.1	6
2016-03-18	501A502	OPD	06:53:17.0	2.5	5.9	+9.7	+22.4	7
2016-04-02	501A502	OPD	05:46:03.2	2.5	7.0	-3.2	-9.2	8
		FOZ	05:45:57.1	2.2	6.4	-9.3	-26.7	8
		FEG	05:45:59.1	3.8	10.8	-7.4	-21.1	8
2016-04-02	501A504	OPD	23:24:20.4	1.2	6.6	-8.1	-44.9	9
		FOZ	23:24:22.4	1.4	7.5	-6.2	-33.9	9
		FEG	23:24:22.3	3.5	19.1	-6.3	-34.5	9
2016-04-12	501A504	OPD	04:35:29.7	8.9	51.6	+5.2	+30.3	10
		FOZ	04:35:31.1	1.1	6.4	+6.6	+38.3	10
		FEG	04:35:29.1	2.5	14.5	+4.7	+27.1	10
2016-04-12	501A502	FOZ	04:45:49.0	10.1	10.5	+19.1	+19.8	11
2016-04-12	502A504	FOZ	05:01:34.6	1.9	11.2	+0.0	+0.1	12
		FEG	05:01:36.1	4.2	25.2	+1.6	+9.8	12
2016-04-12	502A504	OPD	21:17:16.2	0.8	2.9	-7.2	-25.1	13
2016-04-19	501A502	OPD	23:35:15.3	1.0	3.8	-0.1	-0.2	14
		FOZ	23:35:14.2	2.1	8.2	-1.3	-4.8	14
		GOA	23:35:13.3	2.2	8.2	-2.1	-7.8	14
		UTF	23:35:15.2	3.2	12.0	-0.2	-0.6	14
		OHP	23:35:13.9	1.5	5.6	-1.4	-5.5	14
2016-04-20	501A502	OHP	20:15:57.8	1.8	8.7	-3.6	-17.0	15
2016-04-24	502A504	OPD	22:35:12.0	0.5	3.7	-1.5	-11.6	16
		UTF	22:35:13.1	2.6	19.6	-0.4	-3.3	16
2016-04-29	501A503	OPD	00:32:28.1	2.4	16.2	-1.4	-9.2	17
		UTF	00:32:28.6	4.2	28.0	-0.9	-5.8	17
2016-05-02	501A503	OPD	01:08:50.3	1.5	10.5	+0.5	+3.3	18
		FOZ	01:08:50.7	2.3	16.7	+0.8	+6.0	18
		FEG	01:08:49.1	1.8	12.7	-0.7	-4.8	18
		UTF	01:08:51.1	4.5	32.1	+1.3	+9.2	18
2016-05-03	501A503	OPD	01:04:55.4	1.3	4.2	+5.4	+18.2	19
		UTF	01:04:55.5	1.9	6.4	+5.4	+18.4	19
2016-05-06	502A503	OPD	00:59:06.8	6.5	31.6	+3.2	+15.6	20
2016-05-19	502A504	FOZ	22:52:31.9	1.0	6.6	-1.4	-9.1	21
2016-05-27	501A503	FEG	02:00:21.8	5.5	34.2	+0.1	+0.9	22
2016-06-17	502A503	OPD	00:48:02.9	1.3	9.0	-0.3	-2.2	23
		FEG	00:48:07.0	4.8	34.3	+3.8	+26.7	23
2016-06-28	501A502	OPD	23:58:57.1	1.4	6.5	+0.2	+0.8	24
		FEG	23:58:59.0	1.1	5.2	+2.1	+9.7	24
2016-06-29	501A503	OPD	22:36:02.2	0.5	2.9	+1.2	+6.6	25
		FEG	22:36:02.9	1.2	6.7	+1.8	+10.3	25
2016-07-08	501A502	OPD	21:51:35.5	0.6	3.2	+3.0	+14.4	26
		FEG	21:51:32.6	3.3	16.2	+0.0	+0.2	26

The time derivatives of equations (5), (6) and (7) are

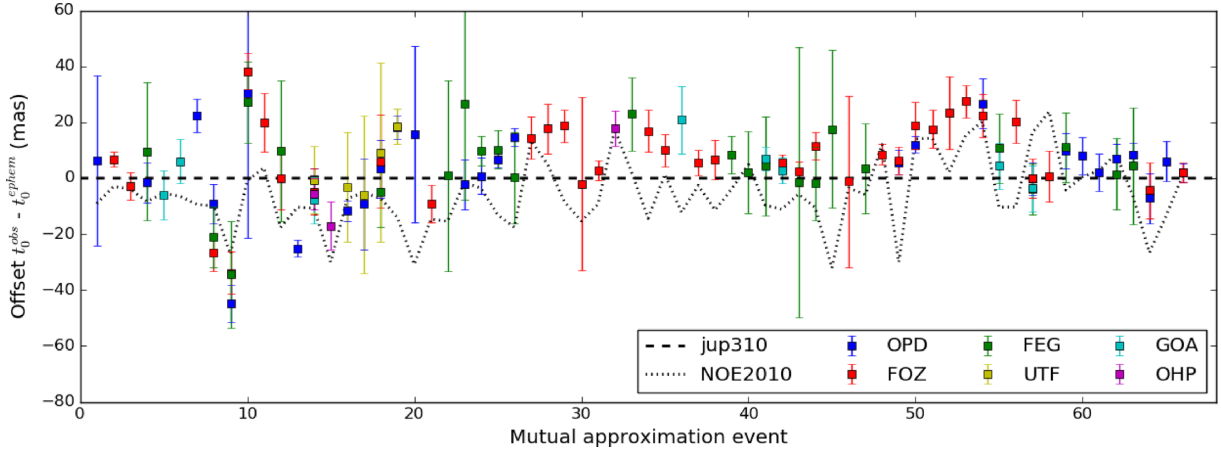
$$\Delta \dot{x}_{ij} \simeq (\dot{\alpha}_i - \dot{\alpha}_j) \cos(\delta_m) - (\alpha_i - \alpha_j) \sin(\delta_m) \dot{\delta}_m, \quad (8) \quad \delta_m = \frac{\delta_i + \delta_j}{2}. \quad (10)$$

By deriving equation (4) over time, we obtain

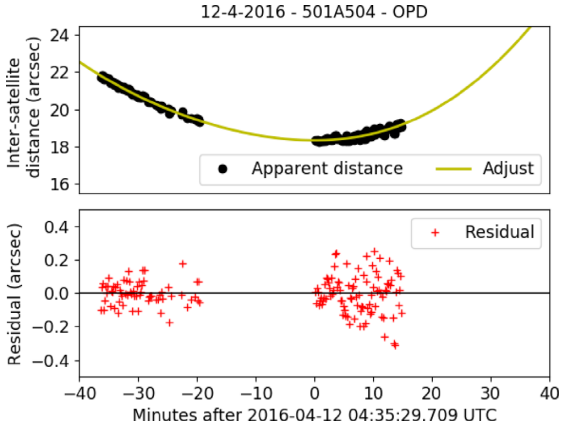
$$\Delta \dot{y}_{ij} \simeq \dot{\delta}_i - \dot{\delta}_j, \quad (9) \quad \frac{ds_{ij}}{dt} = \frac{\Delta x_{ij} \Delta \dot{x}_{ij} + \Delta y_{ij} \Delta \dot{y}_{ij}}{s_{ij}}. \quad (11)$$

**Table 3.** Central instant: results of the mutual approximation campaign for 2017 and 2018. Note that 501 stands for Io, 502 for Europa, 503 for Ganymede and 504 for Callisto.  $\sigma t_0$  is the central instant error in seconds of time and in mas (using the relative velocity in each event obtained with the ephemeris) and  $\Delta t$  is the comparison between the observation and the ephemeris JUP310 (with DE435) from the JPL in the sense of observation minus ephemeris in seconds of time and in mas.  $N$  is a sequential number with time that labels each observed mutual approximation. Time is UTC.

Date (yy-mm-dd)	Event	Observer	$t_0$ (UTC) (hh:mm:ss.ss)	$\sigma t_0$ (s)	$\sigma t_0$ (mas)	$\Delta t_0$ (s)	$\Delta t_0$ (mas)	$N$
2017-02-07	502A503	FOZ	04:36:54.1	1.0	7.5	+2.0	+14.4	27
2017-02-26	502A503	FOZ	04:32:43.5	1.3	9.0	+2.6	+17.7	28
2017-02-27	501A502	FOZ	03:36:51.3	1.1	5.7	+3.6	+18.8	29
2017-03-07	501A502	FOZ	03:00:44.4	32.9	31.0	-2.2	-2.1	30
2017-03-14	501A503	FOZ	07:19:33.8	1.1	3.4	+0.9	+2.8	31
2017-04-04	501A503	OHP	20:43:34.4	0.7	6.3	+1.9	+17.9	32
2017-04-06	501A503	FEG	03:46:43.1	2.2	13.1	+3.9	+23.0	33
2017-04-08	501A502	FOZ	01:52:40.5	1.0	7.6	+2.3	+16.9	34
2017-04-13	501A502	FOZ	05:49:28.3	1.0	5.8	+1.8	+10.0	35
2017-05-06	502A503	GOA	02:16:30.2	1.7	12.1	+2.9	+20.9	36
2017-05-08	501A502	FOZ	01:11:26.5	1.0	4.5	+1.2	+5.5	37
2017-05-13	501A503	FOZ	04:47:32.1	1.0	7.0	+1.0	+6.7	38
2017-05-15	501A502	FEG	03:23:43.1	1.7	6.8	+2.0	+8.4	39
2017-05-31	501A503	FEG	22:30:36.2	27.9	14.7	+4.0	+2.1	40
2017-06-08	501A502	GOA	23:48:58.1	1.8	4.3	+2.9	+6.9	41
		FEG	23:48:57.1	7.5	17.6	+1.9	+4.4	41
2017-06-23	501A502	FOZ	23:17:09.0	1.1	2.8	+2.4	+5.7	42
		GOA	23:17:07.7	1.9	4.6	+1.2	+2.9	42
2017-07-06	501A502	FOZ	22:58:42.6	1.4	3.4	+1.0	+2.4	43
		FEG	22:58:41.1	19.4	48.3	-0.5	-1.3	43
2017-07-25	502A503	FOZ	22:40:24.8	1.2	4.9	+2.9	+11.6	44
		FEG	22:40:21.3	3.3	13.1	-0.5	-1.9	44
2017-08-02	501A502	FEG	23:38:20.0	7.7	28.7	+4.8	+17.6	45
2017-08-10	501A502	FOZ	23:41:23.6	48.2	30.6	-1.9	-1.2	46
2017-08-24	503A504	FEG	22:35:37.6	6.6	16.1	+1.4	+3.3	47
2018-03-05	501A502	FOZ	05:10:29.7	0.6	3.7	-0.4	-2.4	48
2018-03-11	501A503	OPD	05:40:46.7	1.8	4.4	+0.3	+0.6	49
		FOZ	05:40:47.0	2.0	5.0	+0.5	+1.3	49
2018-03-12	501A502	OPD	07:20:57.6	0.5	3.0	+0.1	+0.4	50
		FOZ	07:20:58.8	1.4	8.4	+1.2	+7.3	50
2018-03-17	501A502	FOZ	03:15:03.2	0.8	7.0	+0.2	+1.5	51
2018-03-17	502A504	FOZ	03:41:06.1	2.1	13.0	+1.8	+11.1	52
2018-03-24	501A502	FOZ	05:18:47.9	0.7	5.7	+1.4	+11.3	53
2018-04-06	501A502	OPD	02:40:32.0	1.2	8.8	+1.1	+8.2	54
		FOZ	02:40:31.4	1.0	7.7	+1.2	+8.5	54
2018-06-11	502A503	FEG	23:03:46.0	1.8	12.4	-0.4	-3.0	55
		GOA	23:03:45.1	1.2	8.3	-1.3	-9.2	55
2018-06-19	502A503	FOZ	01:55:19.9	1.1	7.6	+0.3	+2.4	56
2018-06-22	501A503	OPD	02:17:12.6	4.5	5.7	-2.0	-2.5	57
		FOZ	02:17:12.5	5.6	7.0	-4.7	-6.0	57
		FEG	02:17:09.5	7.2	9.0	-5.0	-6.3	57
		GOA	02:17:09.9	6.5	8.2	-2.0	-2.5	57
2018-06-23	501A502	FOZ	00:40:47.4	1.1	9.1	-1.9	-16.1	58
2018-07-07	501A503	OPD	00:30:56.8	1.1	6.3	-0.1	-0.8	59
		FEG	00:30:57.0	2.2	12.5	+0.1	+0.4	59
2018-07-11	502A504	OPD	22:48:02.8	1.4	6.7	-0.4	-1.5	60
2018-07-12	501A504	OPD	00:30:30.1	2.5	6.7	-1.2	-3.2	61
2018-07-12	501A502	OPD	01:07:37.4	1.0	5.2	-0.5	-2.5	62
		FEG	01:07:36.3	2.5	12.8	-1.6	-8.1	62
2018-07-13	502A503	OPD	02:01:30.9	1.1	4.4	+0.1	+0.4	63
		FEG	02:01:29.9	5.4	20.9	-0.9	-3.4	63
2018-07-19	501A504	OPD	01:52:08.6	1.9	8.9	-3.4	-16.2	64
		FOZ	01:52:09.3	2.1	10.1	-2.8	-13.4	64
2018-08-07	502A503	OPD	23:15:18.8	1.3	8.1	-1.0	-6.6	65
2018-08-12	501A502	OPD	23:54:58.4	1.1	3.4	-1.2	-3.5	66
		FOZ	23:54:58.5	1.2	3.5	-1.1	-3.3	66



**Figure 6.** Illustration of the APPROX campaign’s results. The y-axis is the central instant offset relative to the JUP310 ephemeris with DE435 (dashed line at zero offset) and the error bars represent the error of each observation. The x-axis is the event’s label; each colour represents one site. The dotted line represents the difference between the NOE-5-2010-GAL.a and JUP310 ephemeris with DE435.



**Figure 7.** Observed apparent distances in the plane of the sky for Io and Callisto in the mutual approximation of 2016 April 12 seen from OPD. Inter-satellite distances,  $d$ , are denoted by black dots and the model fit is shown by the yellow line. In the bottom panel, the red crosses are the residual of the fitting. We used the nominal pixel scale (Table 1) to convert the apparent distances from pixels to arcsec. The internal error for this observation was large, 8.9 s of time (51.6 mas), due to the central gap and to the lack of observations 15 min after the central instant.

Then, we derive equation (11) over  $c_l$  to obtain

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial c_l} \left( \frac{ds_{ij}^c}{dt}(t_0) \right) &= \frac{1}{s_{ij}} \left[ \Delta \dot{x}_{ij} \frac{\partial \Delta x_{ij}}{\partial c_l} + \Delta x_{ij} \frac{\partial \Delta \dot{x}_{ij}}{\partial c_l} \right. \\ &\quad \left. + \Delta \dot{y}_{ij} \frac{\partial \Delta y_{ij}}{\partial c_l} + \Delta y_{ij} \frac{\partial \Delta \dot{y}_{ij}}{\partial c_l} \right] \\ &\quad - \frac{1}{s_{ij}^3} (\Delta x_{ij} \Delta \dot{x}_{ij} + \Delta y_{ij} \Delta \dot{y}_{ij}) \\ &\quad \times \left[ \Delta x_{ij} \frac{\partial \Delta x_{ij}}{\partial c_l} + \Delta y_{ij} \frac{\partial \Delta y_{ij}}{\partial c_l} \right]. \end{aligned} \quad (12)$$

Therefore, we can write the conditional equation (3) with the use of the explicit form of equation (12).

A similar method has already been tested by Emelyanov (2017) and this has proved to be very efficient when other observations of different types (right ascension, declination, relative distance) are fitted together with the central instants from mutual approximations.

## 6 CONCLUSIONS

The National Observatory (ON) from Brazil, with the collaboration of the IMCCE (Paris Observatory – France) and Valongo Observatory (UFRJ – Brazil), organized the mutual approximation campaign for the Galilean moons (APPROX). This campaign had the participation of six observational sites and obtained 104 distance curves for 66 events. The central instants obtained had an average internal error of 11.3 mas. The external comparisons gave a rms of 14.4 mas with respect to the JPL JUP310 ephemeris and 18.1 mas with the IMCCE NOE-5-2010-GAL.a ephemeris, using the DE435. About 65 per cent of our results had precision better than 10 mas, 87 per cent better than 20 mas and 91 per cent better than 30 mas. Improvements in the study of the tidal force in the Jovian system require positions with a precision better than 30 mas (Lainey et al. 2009; Lainey 2016).

We used the methane narrow-band filter centred at 889 nm with 15 nm width to reduce Jupiter’s scattered light. We remark that the time recorded in the images was carefully corrected by the use of GPS receivers or time calibration software.

The results show that the method of mutual approximations is suitable for small telescopes, which can be used to provide continually high-precision central instants between two satellites.

We also presented a way to fit the observed central instants into dynamical models in order to develop new ephemeris.

The technique of mutual approximations is an alternative high-precision astrometric method that serves to improve the orbits of natural satellites. Unlike mutual phenomena, mutual approximations can be observed at any time independent of the equinox of the host planet. Observational campaigns, such as the one presented here, can increase the accuracy and precision of ephemeris and can be helpful to space missions aimed at the Jovian system, such as

the European Space Agency's mission JUPITER ICy moons Explorer (JUICE)<sup>6</sup> and NASA's mission Europa Clipper.<sup>7</sup>

## ACKNOWLEDGEMENTS

This study was financed in part by the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brazil (CAPES) - Finance Code 001. Part of this research is supported by INCT do e-Universo, Brazil (CNPQ grants 465376/2014-2). Based in part on observations made at the Laboratório Nacional de Astrofísica (LNA), Itajubá-MG, Brazil, and at Observatoire de Haute Provence (CNRS), France. BM is grateful for the CAPES/Cofecub-394/2016-05 grant. RVM acknowledges the following grants: CNPq-306885/2013, CAPES/Cofecub-2506/2015, FAPERJ/PAPDRJ-45/2013 and FAPERJ/CNE/05-2015. MA is grateful for the CNPq (Grants 473002/2013-2 and 308721/2011-0) and FAPERJ (Grant E-26/111.488/2013). JIBC acknowledges CNPq grant 308150/2016-3. RS and OCW acknowledge Fapesp proc. 2016/24561-0, CNPq proc 312813/2013-9 and 305737/2015-5. FBR acknowledges CNPq support, process 309578/2017-5. VL's research was supported by an appointment to the National Aeronautics and Space Administration (NASA) Postdoctoral Program at the NASA Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, administered by the Universities Space Research Association under contract with NASA.

## REFERENCES

- Arlot J.-E. et al., 1982, *A&A*, 111, 151  
 Arlot J.-E. et al., 2012, *A&A*, 544, A29  
 Arlot J.-E. et al., 2013, *A&A*, 557, A4  
 Arlot J.-E. et al., 2014, *A&A*, 572, A120  
 Assafin M., Vieira Martins R., Camargo J. I. B., Andrei A. H., Da Silva Neto D. N., Braga-Ribas F., 2011, in Tanga P., Thuillot W., eds, Gaia follow-up network for the solar system objects: Gaia FUN-SSO Workshop Proceedings. IMCCE, Paris, p. 85  
 Butcher E., Stevens R., 1981, News Letter Kitt Peak National Observatory, 16, 6  
 Charnoz S. et al., 2011, *Icarus*, 216, 535  
 Crida A., Charnoz S., 2012, *Science*, 338, 1196  
 De Sitter W., 1928, *Leiden Ann.*, 16, 1  
 Dias-Oliveira A. et al., 2013, *MNRAS*, 432, 225  
 Emelyanov N. V., 2009, *MNRAS*, 394, 1037  
 Emelyanov N. V., 2017, *MNRAS*, 469, 4889  
 Karkoschka E., 1994, *Icarus*, 111, 174  
 Karkoschka E., 1998, *Icarus*, 133, 134  
 Kiseleva T. P., Izmailov I. S., Kiselev A. A., Khrutskaya E. V., Khovritchev M. Yu., 2008, *Planet. Space Sci.*, 56, 1908  
 Lainey V., 2016, *Celest. Mech. Dyn. Astron.*, 126, 145  
 Lainey V., Duriez L., Vienne A., 2004a, *A&A*, 420, 1171  
 Lainey V., Arlot J.-E., Vienne A., 2004b, *A&A*, 427, 371  
 Lainey V., Arlot J.-E., Karatekin O., Van Van Hoolst T., 2009, *Nature*, 459, 957  
 Lieske J. H., 1987, *A&A*, 176, 146  
 Lindgren L., 1977, *A&A*, 57, 55  
 Morgado B., Assafin M., Vieira-Martins R., Camargo J. I. B., Dias-Oliveira A., Gomes-Júnior A. R., 2016, *MNRAS*, 460, 4086  
 Peng Q. Y., Vienne A., Lainey V., Noyelles B., 2008, *Planet. Space Sci.*, 56, 1807  
 Peng Q. Y., He F., Lainey V., Vienne A., 2012a, *MNRAS*, 419, 1977  
 Peng Q. Y., Vienne A., Zhang Q. F., Desmars J., Yang C. Y., He H. F., 2012b, *AJ*, 144, 170  
 Robitaille T. P. et al., 2013, *A&A*, 558, A33  
 Saquet E. V. et al., 2018, *MNRAS*, 474, 4730
- <sup>1</sup>Observatório Nacional/MCTIC, R. General José Cristino 77, Rio de Janeiro, RJ 20.921-400, Brazil  
<sup>2</sup>Laboratório Interinstitucional de e-Astronomia - LIneA, Rua Gal. José Cristino 77, Rio de Janeiro, RJ 20921-400, Brazil  
<sup>3</sup>Observatório do Valongo/UFRJ, Ladeira Pedro Antonio 43, Rio de Janeiro, RJ 20080-090, Brazil  
<sup>4</sup>Universidade Estadual do Oeste do Paraná (Unioeste), Avenida Tarquínio Joslin dos Santos 1300, Foz do Iguaçu, PR 85870-650, Brazil  
<sup>5</sup>Polo Astronômico Casimiro Montenegro Filho/FPTI-BR, Avenida Tancredo Neves 6731, Foz do Iguaçu, PR 85867-900, Brazil  
<sup>6</sup>UNESP - São Paulo State University, Grupo de Dinâmica Orbital e Planetologia, CEP 12516-410, Guaratinguetá, SP 12516-410, Brazil  
<sup>7</sup>Universidade Federal do Espírito Santo, Av. Fernando Ferrari 514, Vitória, ES 29075-910, Brazil  
<sup>8</sup>Federal University of Technology - Paraná (UTFPR/DAFIS), Av. Sete de Setembro, 3165, CEP 80230-901 - Curitiba - PR - Brazil  
<sup>9</sup>Institut Polytechnique des Sciences Avancées IPSA, 63 bis Boulevard de Brandebourg, 94200 Ivry-sur-Seine, France  
<sup>10</sup>IMCCE, Observatoire de Paris, PSL Research University, CNRS-UMR 8028, Sorbonne Universités, UPMC, Univ. Lille 1, 77 Av. Denfert-Rochereau, 75014 Paris, France  
<sup>11</sup>Escola SESC de Ensino Médio, Avenida Ayrton Senna, 5677, Rio de Janeiro - RJ, 22775-004, Brazil  
<sup>12</sup>Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, 4800 Oak Grove Drive, Pasadena, CA 91109-8099, USA

<sup>6</sup>See <http://sci.esa.int/juice/>.

<sup>7</sup>See <https://www.nasa.gov/europa>.

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



LETTER TO THE EDITOR

# First stellar occultation by the Galilean moon Europa and upcoming events between 2019 and 2021

B. Morgado<sup>1,2</sup>, G. Benedetti-Rossi<sup>1,2</sup>, A. R. Gomes-Júnior<sup>1,2,3,4</sup>, M. Assafin<sup>2,3</sup>, V. Lainey<sup>5,6</sup>, R. Vieira-Martins<sup>1,2,3</sup>, J. I. B. Camargo<sup>1,2</sup>, F. Braga-Ribas<sup>7,2,8</sup>, R. C. Bouffeur<sup>1,2</sup>, J. Fabrega<sup>9</sup>, D. I. Machado<sup>10,11</sup>, A. Maury<sup>9</sup>, L. L. Trabuço<sup>11</sup>, J. R. de Barros<sup>12</sup>, P. Cacella<sup>13</sup>, A. Crispim<sup>7</sup>, C. Jaques<sup>12</sup>, G. Y. Navas<sup>14</sup>, E. Pimentel<sup>12</sup>, F. L. Rommel<sup>1,2,7</sup>, T. de Santana<sup>4</sup>, W. Schoenell<sup>15</sup>, R. Sfair<sup>4</sup>, and O. C. Winter<sup>4</sup>

(Affiliations can be found after the references)

Received 20 March 2019 / Accepted 24 May 2019

## ABSTRACT

**Context.** Bright stellar positions are now known with an uncertainty below 1 mas thanks to *Gaia* DR2. Between 2019–2020, the Galactic plane will be the background of Jupiter. The dense stellar background will lead to an increase in the number of occultations, while the *Gaia* DR2 catalogue will reduce the prediction uncertainties for the shadow path.

**Aims.** We observed a stellar occultation by the Galilean moon Europa (J2) and propose a campaign for observing stellar occultations for all Galilean moons.

**Methods.** During a predicted period of time, we measured the light flux of the occulted star and the object to determine the time when the flux dropped with respect to one or more reference stars, and the time that it rose again for each observational station. The chords obtained from these observations allowed us to determine apparent sizes, oblateness, and positions with kilometre accuracy.

**Results.** We present results obtained from the first stellar occultation by the Galilean moon Europa observed on 2017 March 31. The apparent fitted ellipse presents an equivalent radius of  $1561.2 \pm 3.6$  km and oblatenesses  $0.0010 \pm 0.0028$ . A very precise Europa position was determined with an uncertainty of 0.8 mas. We also present prospects for a campaign to observe the future events that will occur between 2019 and 2021 for all Galilean moons.

**Conclusions.** Stellar occultation is a suitable technique for obtaining physical parameters and highly accurate positions of bright satellites close to their primary. A number of successful events can render the 3D shapes of the Galilean moons with high accuracy. We encourage the observational community (amateurs included) to observe the future predicted events.

**Key words.** methods: observational – techniques: photometric – occultations – planets and satellites: individual: Europa

## 1. Introduction

A stellar occultation occurs when a solar system object passes in front of a star from the point of view of an observer on Earth, causing a temporary drop in the observed flux of the star. This technique allows the determination of sizes and shapes with kilometre precision and to obtain characteristics of the object, such as its albedo, the presence of an atmosphere, rings, jets, or other structures around the body (Sicardy et al. 2011, 2016; Braga-Ribas et al. 2013, 2014; Dias-Oliveira et al. 2015; Benedetti-Rossi et al. 2016; Ortiz et al. 2015, 2017; Leiva et al. 2017; Bérard et al. 2017), or even the detection of topographic features (Dias-Oliveira et al. 2017).

Stellar occultations can also provide very accurate astrometric measurements of the occulted body, with uncertainties that can be as low as 5–10 km or even smaller for some objects (Leiva et al. 2017; Desmars et al. 2019). Compared with other methods in the context of the Galilean moons, classical CCD astrometry enables us to obtain positions with uncertainties in the 300–450 km level (Kiseleva et al. 2008), and relative positions between two close satellites achieve uncertainties of 100 km (Peng et al. 2012). Positions obtained using mutual phenomena have uncertainties at a level of 15–60 km (Saquet et al. 2018; Arlot et al. 2014; Dias-Oliveira et al. 2013; Emelyanov 2009), but they only occur at every equinox of the

host planet (every six years in the case of Jupiter). The technique of mutual approximations also provides positions with uncertainties between 15–60 km, and this does not depend on the equinox of Jupiter (see Morgado et al. 2016, 2019 for details). Stellar occultation is then the only ground-based technique that can furnish astrometric measurements that are comparable with space probes, which usually have uncertainties smaller than 5 km (Tajeddine et al. 2015). In addition, the positions and sizes that can be obtained with stellar occultations are independent of reflectance models, which may have systematic errors due to variations on the satellite surface (Lindgren 1977).

In the context of the Galilean satellites, stellar occultations can provide shapes and sizes with uncertainties that are comparable with those of space probe images, but that are not affected by albedo variations on the satellite surface or by limb fitting, which is highly affected by the solar phase angle. From an astrometric point of view, these events can provide the best ground-based astrometry of these moons, with uncertainties smaller than 1 mas. This is at least one order of magnitude better than other methods.

Between 2019 and 2020, Jupiter will be in a very dense star region, the Galactic centre will be its background. This will only occur again in 2031. The probability of a stellar occultation by the Jovian moons increases dramatically (Gomes-Júnior et al. 2016). This is a great opportunity to observe stellar occultations by the Galilean moons, determine their positions, improve

their ephemerides, and measure their shapes independently of probes. Accurate orbits help to prepare space missions targeting the Jovian system (Dirkx et al. 2016, 2017), and can help in the study of tides (Lainey et al. 2009; Lainey 2016). In the near future, we will have the ESA JUICE<sup>1</sup> and the NASA Europa Clipper<sup>2</sup> missions, which are scheduled for launch in the next decade (2020s). Moreover, only two stellar occultations by Ganymede have been observed in the past: one in 1972 (Carlson et al. 1973) and another in 2016 (D’Aversa et al. 2017). No occultations by Io, Europa, or Callisto are reported. Here we present the results obtained by the first observation of a stellar occultation by Europa, which occurred on 2017 March 31. These results serve as a proof of concept for the 2019–2021 campaign that is being organised.

The prediction method and the observational campaign are outlined in Sect. 2, while the data analysis and the occultation results are given in Sect. 3. The upcoming events for the period 2019–2021 can be found in Sect. 4. Our final remarks are contained in Sect. 5.

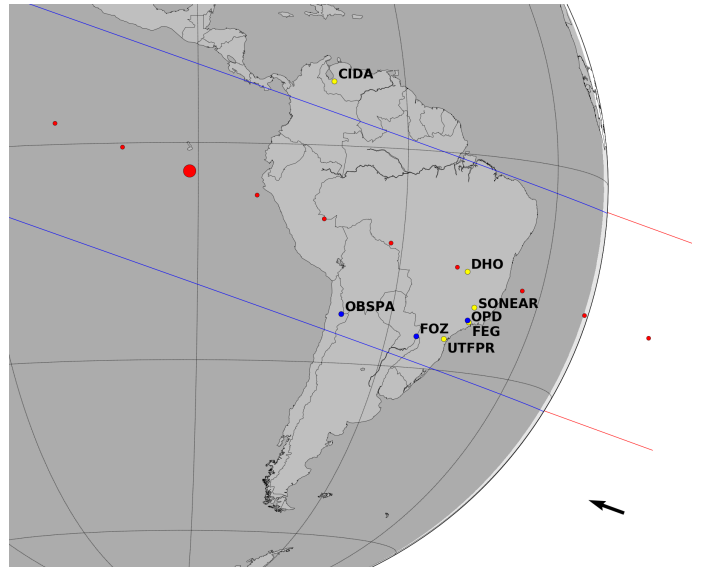
## 2. Prediction and observational campaign

The passage of Jupiter in a region that has the Galactic plane as background, as seen from Earth in the period between 2019–2020, creates a number of opportunities for observing stellar occultations by its satellites because this region has a high density of stars (Gomes-Júnior et al. 2016). This passage motivates the search for events involving the Galilean satellites because the satellites need stars with a magnitude of  $G = 11.5$  or lower, so that the magnitude drop ( $\Delta\text{mag}$ ) can be higher than 0.005 mag. This drop is otherwise very hard to observe with current equipment and techniques.

Following similar procedures as described in Assafin et al. (2010, 2012), we predicted that Europa would occult a star (mag.  $G = 9.5$ ) on 2017 March 31 at 06:44 UTC. The shadow path would be crossing South America with a velocity of  $17.78 \text{ km s}^{-1}$ . The prediction was made using the Europa ephemerides *jup310*<sup>3</sup> with DE435 furnished by the Jet Propulsion Laboratory (JPL), and the stellar position was obtained from the *Gaia* DR1 catalogue (Clementini et al. 2016) because the occultation occurred before the launch of *Gaia* DR2 in April 2018 (Lindegren et al. 2018). The star was then identified in *Gaia* DR2. Its position (right ascension  $\alpha$ , declination  $-\delta$ , and errors) was updated using its proper motion and parallax for the occultation time (2017 March 17 06:44:00 UTC), and its  $G$  mag,

$$\begin{aligned} \alpha_{\text{star}} &= 13^{\text{h}} 12' 15''.5430 \pm 0.16 \text{ mas}, \\ \delta_{\text{star}} &= -05^{\circ} 56' 48''.7526 \pm 0.12 \text{ mas}, \\ G \text{ mag} &= 9.5065. \end{aligned} \quad (1)$$

This occultation was favourable for several potential observers in several countries in South America (Fig. 1). We then organised a campaign to observe this event, and a total of nine stations tried to observe the occultation. They are listed in Table 1. However, due to bad weather conditions, only four were able to obtain data (OPD/B&C, OPD/ROB, FOZ, and OBSPA)<sup>4</sup>. The observation made at Itajubá with the 40 cm telescope was discarded because the signal-to-noise ratio (S/N) was very low, while the other three (OPD/B&C, FOZ, and OBSPA) obtained positive detection.



**Fig. 1.** Occultation by Europa on 2017 March 31. The centre of the body at the time of closest approach between the shadow and the geocentre (CA), at 06:44:36 UTC, is represented by the large red dot. Blue lines represent the size limit of Europa ( $1561.2 \pm 3.6 \text{ km}$ ). The small red dots represent the centre of the body, each separated by 1 min from the reference instant CA. The blue dots are the observers with positive detection, and the yellow dots are observers that were unable to obtain the light curve due to bad weather conditions. The offset between our result and the prediction (using the JPL *jup310* ephemeris) was  $-0.90 \pm 3.1 \text{ km}$  for  $f_c$  and  $-12.3 \pm 2.0 \text{ km}$  for  $g_c$ , see Sect. 3. The black arrow at the bottom represents the direction of motion of the shadow.

Figure 1 presents the post-occultation map. It shows the shadow path of Europa through South America, and the positions of the observation stations. The blue lines represent the size of Europa obtained after the fit (see Sect. 3).

## 3. Data analysis and results

Images from all data sets were corrected for bias and flat-field using standard IRAF<sup>5</sup> procedures. A stacking image procedure<sup>6</sup> developed by us in PYTHON (Astropy Collaboration 2013), following similar procedures as Zhu et al. (2018), was used in FOZ images in order to obtain an S/N that was high enough to emphasise the magnitude drop. The low time-resolution at OPD/ROB (cycle  $\approx 7 \text{ s}$ ) did not allow the use of this technique, and it was not possible to determine the magnitude drop.

Differential aperture photometry was applied with the PRAIA package (Assafin et al. 2011). The calibrator and target apertures were automatically chosen to maximise the S/N for each frame. Io (J1) was set as calibrator in all sets of images because there were no other star in the field of view with a good S/N that could be used for calibration. The light fluxes of Europa and of the occulted star were measured together in the same aperture. The normalised light curves are displayed in Fig. 2, where the black lines are the observations and the red lines are the modelled fitted light curves.

The ingress ( $t_i$ ) and egress ( $t_e$ ) times were determined with a standard  $\chi^2$  procedure between the observational light curve and the model. The model considers a sharp-edge occultation model convolved with Fresnel diffraction, stellar diameter

<sup>1</sup> <http://sci.esa.int/juice/>

<sup>2</sup> <https://www.nasa.gov/europa>

<sup>3</sup> <https://naif.jpl.nasa.gov/naif/toolkit.html>

<sup>4</sup> Alias, defined in Table 1.

<sup>5</sup> <http://iraf.noao.edu/>

<sup>6</sup> More details in Appendix A.

**Table 1.** Observational stations, technical details, and circumstance.

Site Alias Status	Longitude (E) Latitude (N) Altitude (m)	Observers	Telescope aperture CCD Filter	Exposure time cycle (s)	Light-curve rms
Itajubá/MG-Brazil OPD/B&C Positive detection	−45° 34′57.5″ −22° 32′07.8″ 1864	G. Benedetti-Rossi M. Assafin	60 cm Andor/IXon-EM Methane <sup>(1)</sup>	0.60 0.63	0.013
Foz do Iguaçu/PR-Brazil FOZ Positive detection	−54° 35′37.0″ −25° 26′05.0″ 184	D. I. Machado L. L. Trabuco	28 cm Raptor/Merlin Clear	1.00 1.00	0.016
San Pedro de Atacama/Chile OBSPA Positive detection	−68° 10′48.0″ −22° 57′08.0″ 2397	A. Maury J. Fabrega	40 cm ProLine/PL16803 Red <sup>(2)</sup>	0.40 1.41	0.017
Mérida/Venezuela CIDA Weather overcast	−70° 52′21.6″ +08° 47′25.8″ 26	G. R. Navas	100 cm ProLine/PL4240 Red <sup>(2)</sup>	–	–
Brasília/DF-Brazil DHO Weather overcast	−47° 54′39.9″ −15° 53′29.9″ 1064	P. Cacella	50 cm ASI174MM –	–	–
Itajubá/MG-Brazil OPD/ROB Low S/N data	−45° 34′57.5″ −22° 32′07.8″ 1864	W. Schoenell	40 cm ASCOM/KAF16803 Red <sup>(2)</sup>	–	–
Guaratinguetá/SP-Brazil FEG Weather overcast	−45° 11′25.5″ −22° 48′05.5″ 543	R. Sfair T. de Santana O. C. Winter	40 cm Raptor/Merlin –	–	–
Curitiba/PR-Brazil OACEP Weather overcast	−49° 11′45.8″ −25° 28′24.6″ 861	F. Braga-Ribas A. Crispim F. Rommel	25 cm Watec/910HX Clear	–	–
Oliveira/MG-Brasil SONEAR Weather overcast	−43° 59′03.1″ −19° 52′55.0″ 982	C. Jaques E. Pimentel J. R. de Barros	45 cm ML FLI16803 –	–	–

**Notes.** <sup>(1)</sup>Methane filter is a narrow-band filter centred on 889 nm and  $\Delta\lambda = 15$  nm. <sup>(2)</sup>Red filter from the Johnson system.

(projected at the body distance, 0.633 km in our case Bourges et al. 2017), CCD bandwidth, and finite integration time (more details in Braga-Ribas et al. 2013). Table 2 contains the ingress and egress UTC times and the errors for each station with positive detection. Their respective uncertainties are given in seconds and kilometres (calculated using the event velocity of  $17.78 \text{ km s}^{-1}$ ). More information about the light-curve fit procedure is presented in Appendix B.

Each of the ingress and egress times were converted into a star position  $(f, g)$  regarding the body centre, with  $f$  and  $g$  being measured positively toward local celestial east and celestial north, respectively. Each pair of positions, from the same site, is a chord, and each position is a point of which we can fit the five parameters that defines an ellipse: (i and ii) the ellipse centre  $(f_c, g_c)$ , (iii) apparent semi-major axis  $(a')$ , (iv) the apparent oblateness  $(\epsilon' = (a' - b')/a')$ , where  $b'$  is the apparent semi-minor axis), and (v) the position angle of the pole  $P_p$  of  $b'$ . This position angle was fixed as  $24.2534^\circ$ , derived from the pole position reported by Archinal et al. (2018). In Fig. 3 we show the three chords obtained from the occultation and the fitted ellipse. The ellipse parameters are

$$\begin{aligned}
 f_c &= -0.9 \pm 3.1 \text{ km}, \\
 g_c &= -12.3 \pm 2.0 \text{ km}, \\
 a' &= 1562.0 \pm 3.6 \text{ km}, \\
 \epsilon' &= 0.0010 \pm 0.0028, \\
 P_p &= 24.2534^\circ.
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

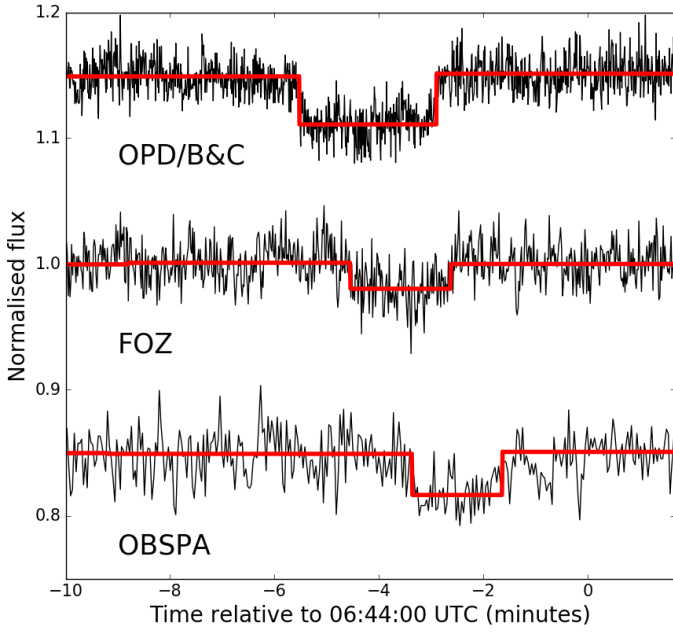
It is important to highlight that the centre position  $(f_c, g_c)$  and the apparent size and shape of the ellipse  $(a', \epsilon')$  are correlated. This correlation decreases with the number of obtained chords, and moreover, with the distribution of these chords in the shadow. Chords in both hemispheres are required to achieve the best results. In our case, the higher correlation was 0.81 between  $g_c$  and  $\epsilon'$ , which is expected because we only had chords in the southern hemisphere of the shadow.

We can compare our results with the values determined by Galileo mission images (Nimmo et al. 2007). Our apparent semi-major axis  $(a' = 1562.0 \pm 3.6 \text{ km})$  was between the axis  $a$  (1562.6 km) and  $b$  (1560.3 km) of the fitted ellipsoid. Our apparent semi-minor axis  $(b' = 1560.4 \pm 5.7 \text{ km})$  is nearly the  $c$  axis of the ellipsoid (1559.5 km). The expected oblateness was between 0.0019 and 0.0005, in comparison with  $0.0010 \pm 0.0028$  that we obtained. The equivalent radius  $(R_{\text{eq}} = a' \sqrt{1 - \epsilon'}) = 1561.2 \pm 3.6 \text{ km})$  agrees with the nominal equivalent radius of  $1560.8 \pm 0.3 \text{ km}$  of Europa. According to Kay et al. (2019), the topographic features of Europa are at a level of some hundreds of metres, therefore it is not possible to infer any topography from our observations.

With the limb fitting, we also obtained a geocentric position for the Europa centre on 2017 March 31 at 06:44:00 UTC of

$$\begin{aligned}
 \alpha_{J2} &= 13^{\text{h}} 12' 15'' 548372 \pm 0.96 \text{ mas}, \\
 \delta_{J2} &= -05^\circ 56' 48'' 687034 \pm 0.62 \text{ mas}.
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

This position has an offset with respect to the JPL *jup310* ephemerides of  $+0.28 \text{ mas}$  and  $+3.81 \text{ mas}$  for  $\Delta\alpha \cos \delta$  and  $\Delta\delta$ ,



**Fig. 2.** Three normalised light curves obtained with positive detection. They are shifted vertically for better viewing. Observational circumstances are given in Table 1. The difference in the depth of the curves is due to the use of different filters.

**Table 2.** Occultation ingress ( $t_i$ ) and egress ( $t_e$ ) times.

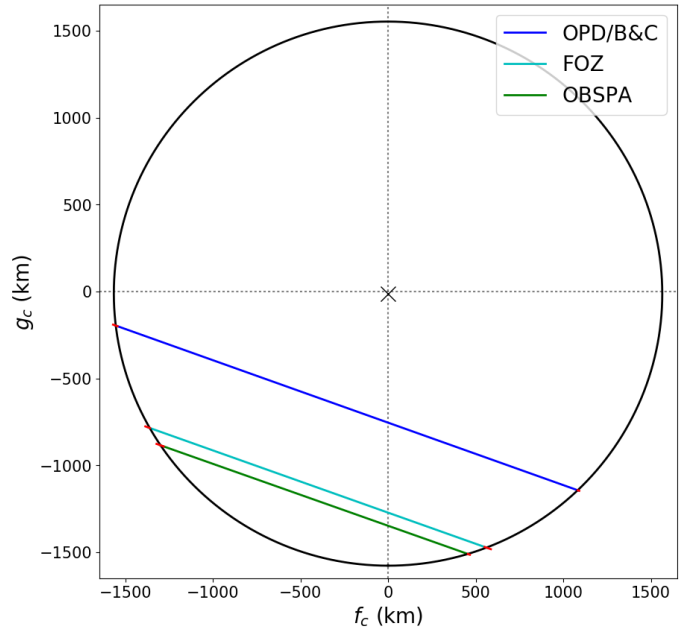
Station	$t_i$ (hh mm ss.ss $\pm$ s) (km)	$t_e$ (hh mm ss.ss $\pm$ s) (km)
OPD/B&C	06:38:28.55 $\pm$ 0.75 (13.3)	06:41:06.15 $\pm$ 0.24 (04.3)
FOZ	06:39:26.07 $\pm$ 0.77 (13.7)	06:41:21.59 $\pm$ 1.07 (19.0)
OBSPA	06:40:38.19 $\pm$ 1.20 (21.3)	06:42:22.85 $\pm$ 0.34 (06.0)

respectively, while the offset with respect to the IMCCE NOE-5-2010-GAL (Lainey et al. 2009) is  $-2.59$  mas and  $-6.01$  mas, respectively, both in the sense of observation minus ephemeris. More details can be found in Appendix C.

#### 4. Future events

Observing very many occultations by the Galilean satellites is required for better understanding their 3D shape (oblateness and pole positions). This in turn enables obtaining a highly accurate absolute position (with the help of *Gaia* DR2 catalogue, which furnishes the star positions) that are to be used in dynamical models and with which high-quality ephemerides can be obtained.

We conducted a search for occultation events that would occur between 2017 and 2021, using the GDR2 catalogue and the JPL *jup310* and DE435 ephemerides. In Table 3 we summarise the occultation predictions between 2019 and 2021. The occultation presented here is highlighted. We also list some parameters that are necessary to produce occultation maps such as the closest approach instant (UTC) of the prediction; C/A, the apparent geocentric distance between the satellite and the star at



**Fig. 3.** Best elliptical limb fit (in black) using the three occultation chords. Blue, cyan, and green lines are the chords from the positive detection obtained at OPD/B&C, FOZ, and OBSPA, respectively. The small red segments at the end of each segment indicate the  $1\sigma$  uncertainty on each chord extremity, derived from the time uncertainties provided in Table 2. The position of the centre of the fitted ellipse is shown as an X, with values of  $f_c = -0.9 \pm 3.1$  km and  $g_c = -12.3 \pm 2.0$  km, and represents the offset with respect to the JPL geocentric ephemeris. The fitted parameters of the ellipse are listed in Table 2.

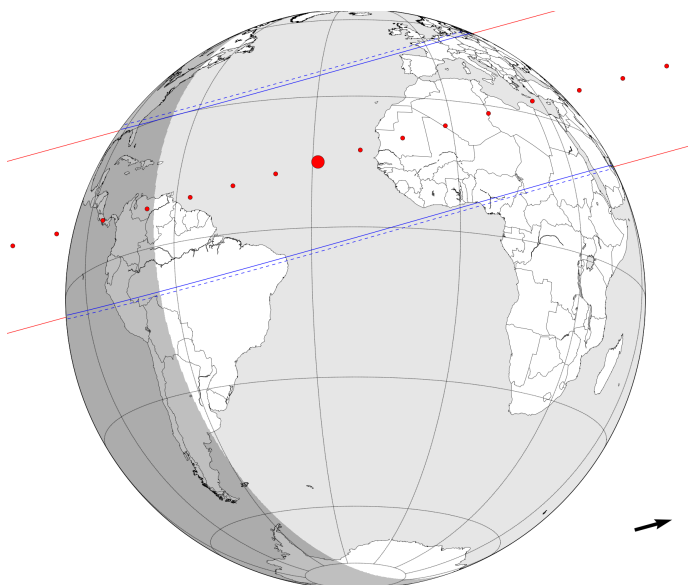
**Table 3.** Predicted stellar occultations by the Galilean moons between 2019 and 2021.

Sat.	Time (UTC)	C/A	P/A	$G$ mag*	$\Delta$ mag
502	2017-03-31 06:44	0.09	19.98	9.5	0.030
502	2019-05-06 20:32	0.58	183.07	10.9	0.008
502	2019-06-04 02:26	0.12	4.46	9.1	0.037
504	2019-06-05 23:12	0.90	182.86	10.2	0.020
501	2019-09-09 02:33	0.26	189.87	11.0	0.008
501	2019-09-21 13:08	1.22	7.97	11.3	0.007
504	2020-06-20 16:03	1.45	348.44	10.9	0.012
502	2020-06-22 02:09	2.07	348.23	11.3	0.005
501	2021-04-02 10:24	1.02	344.64	5.8	0.740
503	2021-04-25 07:55	0.44	160.79	11.1	0.005
504	2021-05-04 23:01	0.90	342.43	10.4	0.027

**Note.** See text for the definitions of geometric elements.

the moment of the geocentric closest approach, in arcseconds; P/A, the satellite position angle regarding the star to be occulted at C/A, in degrees (zero at north of the star, increasing clockwise); magnitude  $G$  of the occulted GDR2 star; and finally, the expected magnitude drop ( $\Delta$ mag) for each event. For more information about the definition and use of these stellar occultation geometric elements, see Assafin et al. (2010, 2012). We present in Table 3 three events by Io, four by Europa, one by Ganymede, and three by Callisto with  $\Delta$ mag higher than 0.005 mag. The prediction maps are shown in the Appendix D.

We draw the attention to the occultation by Io of a mag.  $G$  5.8 star on 2012 April 2. The magnitude drop will be about



**Fig. 4.** Prediction of the occultation by Io on 02 April 2021 10:24 UTC, using JPL DE435 and *jup310* ephemeris. The blue lines represent the expected size limit of Europa. The blue dashed lines are an uncertainty of 20 mas in Europa's position. The red dots represent the centre of the body for a given time, each separated by 1 min. The arrow represents the sense of the shadow's motion. The dark grey and the light grey area represent the night and the day part of the globe, respectively.

0.740 mag. This event can be observed in the South of North America, Central America, and in the North of South America (Fig. 4).

This type of observation is challenging because of the low magnitude drop. We suggest the use of red filters (or a narrow-band methane filter, centred on 889 nm with a width of 15 nm) in these observations. Jupiter should be placed outside the field of view of the camera when possible, which will reduce noise effects caused by scattered light from Jupiter. It is very important to test the equipment configuration (gain, exposure time, etc.) some days before the occultation in order to ensure the best S/N possible.

We also suggest the use of fast cameras with high-cadence images and minimum readout time. Stacking images techniques, such as the one applied here (detailed in Appendix A), can be used to increase the S/N of the images. Telescopes as small as 20 cm (8") can provide useful data. Adaptive optics is also a possibility, with adequate exposure time. For a telescope with a large aperture and a sensitive camera, this could result in the direct detection of a thin atmosphere around a Galilean satellite. Observations with resolutions higher than the Fresnel scale (about 0.44 km at Jupiter) can result in the direct measurement of refraction spikes by a thin atmosphere such as the spikes observed in occultations by Pluto (Dias-Oliveira et al. 2015; Sicardy et al. 2016; Meza et al. 2019).

## 5. Discussion

Stellar occultation is a ground-based technique capable of determining positions, sizes, and shapes with uncertainties of some kilometres. These values are comparable with data obtained with space probes. In this work we took advantage of the beginning of the Jupiter passage through a very dense stellar region, with the Galactic centre as background, and organised an observational campaign to obtain data from a predicted stellar occultation by

the Galilean moon Europa. Its ephemeris indicates that it would pass in front of a mag.  $G = 9.5$  GDR2 star on 2017 March 31. Out of the nine stations in eight sites across South America, three obtained a precise detection of the event.

The fitted ellipse for Europa gives an area equivalent radius of  $1561.2 \pm 3.6$  km. Its absolute position uncertainty is 0.80 mas (2.55 km), representing an offset with respect to the JPL *jup310* ephemeris of 3.82 mas and of 6.54 mas with respect to the NOE-5-2010-GAL ephemeris. This position for Europa at the time of the occultation took advantage of the high-precision position of *Gaia* DR2 stars and the fact that stellar occultations render accurate body-star relative positions.

This is the first reported observation of a stellar occultation by Europa. The favourable configuration of Jupiter, which has the Galactic plane as background, increases the chances of observing other bright star occultations by its main satellites, as discussed in Sect. 4. This configuration will only occur again in 2031. For the future events predicted in the 2019 and 2021, campaigns will be organised in due time.

We encourage the observational community to observe the predicted future stellar occultations. Even the amateur community with telescopes as small as 20 cm (8") can help provide useful data. A stellar occultation provides an apparent size and shape at a specific moment. Combined with the observations of the upcoming events, a 3D shape of these moons can be acquired with kilometre precision and complement space mission data. This information can aid in the study of planetary formation, evolution, and the influence of tides raised by the moons' primary in their orbit. This highlights the importance of these events.

Finally, all this information can also be used together with dynamical models to ensure highly accurate orbits for these moons. These orbits can be helpful for future space probes aimed at the Jovian system, such as JUICE and the Europa Clipper mission.

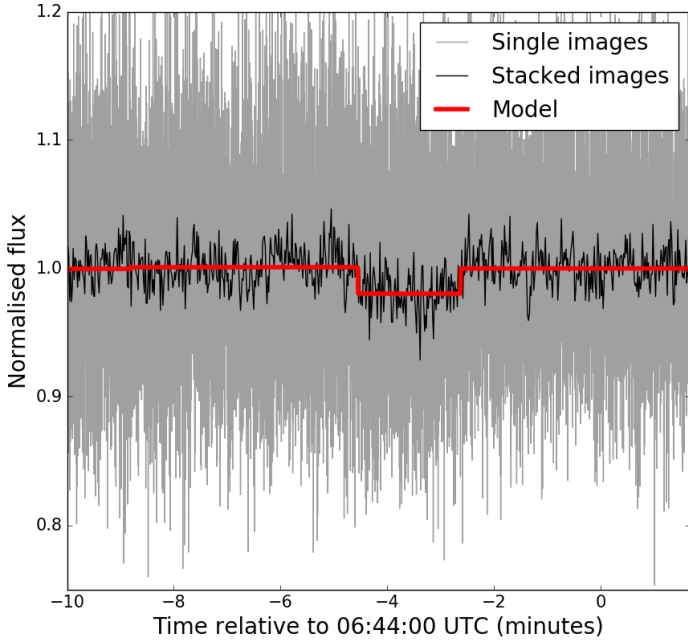
*Acknowledgements.* We thank our anonymous referee for helpful comments. This study was financed by the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Finance Code 001. Part of this research is supported by INCT do e-Universo, Brazil (CNPQ grants 465376/2014-2). Based in part on observations made at the Laboratório Nacional de Astrofísica (LNA), Itajubá-MG, Brazil. BM thanks the CAPES/Cofecub-394/2016-05 grant. G.B.R. acknowledges the support of the CAPES and FAPERJ/PAPDRJ (E26/203.173/2016) grants. ARGJ thanks FAPESP proc. 2018/11239-8. MA thanks CNPq (Grants 427700/2018-3, 310683/2017-3 and 473002/2013-2) and FAPERJ (Grant E-26/111.488/2013). VL's research was supported by an appointment to the NASA Postdoctoral Program at the NASA Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, administered by Universities Space Research Association under contract with NASA. RVM acknowledges the grants CNPq-306885/2013, CAPES/Cofecub-2506/2015, FAPERJ/PAPDRJ-45/2013 and FAPERJ/CNE/05-2015. JIBC acknowledges CNPq grant 308150/2016-3. FBR acknowledges CNPq support, proc. 309578/2017-5. RS and OCW acknowledge Fapesp proc. 2016/24561-0, CNPq proc. 312813/2013-9 and 305737/2015-5.

## References

- Anderson, J. D., Schubert, G., Jacobson, R. A., et al. 1998, *Science*, **281**, 2019
- Archinal, B. A., Acton, C. H., A'Hearn, M. F., et al. 2018, *Celestial Mech. Dyn. Astron.*, **130**, 22
- Arlot, J. E., Emelyanov, N., Varfolomeev, M. I., et al. 2014, *A&A*, **572**, A120
- Assafin, M., Camargo, J. I. B., Vieira Martins, R., et al. 2010, *A&A*, **515**, A32
- Assafin, M., Vieira Martins, R., Camargo, J. I. B., et al. 2011, *Gaia Follow-up Network for the Solar System Objects: Gaia FUN-SSO Workshop Proc.*, 85
- Assafin, M., Camargo, J. I. B., Vieira Martins, R., et al. 2012, *A&A*, **541**, A142
- Astropy Collaboration (Robitaille, T. P., et al.) 2013, *A&A*, **558**, A33
- Benedetti-Rossi, G., Sicardy, B., Buie, M. W., et al. 2016, *AJ*, **152**, 116
- Bérard, D., Sicardy, B., Camargo, J. I. B., et al. 2017, *AJ*, **154**, 144

- Bourges, L., Mella, G., Lafrasse, S., et al. 2017, *VizieR Online Data Catalog*: II/346
- Braga-Ribas, F., Sicardy, B., Ortiz, J. L., et al. 2013, *ApJ*, **773**, 26
- Braga-Ribas, F., Sicardy, B., Ortiz, J. L., et al. 2014, *Nature*, **508**, 72
- Carlson, R. W., Bhattacharyya, J. C., Smith, B. A., et al. 1973, *Science*, **182**, 53
- Chow, G. C. 1960, *Econometrica*, **28**, 591
- Clementini, G., Ripepi, V., Leccia, S., et al. 2016, *A&A*, **595**, A133
- D'Aversa, E., Oliva, F., Sindoni, G., et al. 2017, *Eur. Planet. Sci. Congr.*, **850**
- Desmars, J., Meza, E., Sicardy, B., et al. 2019, *A&A*, **625**, A43
- Dias-Oliveira, A., Vieira-Martins, R., Assafin, M., et al. 2013, *MNRAS*, **432**, 225
- Dias-Oliveira, A., Sicardy, B., Lellouch, E., et al. 2015, *ApJ*, **811**, 53
- Dias-Oliveira, A., Sicardy, B., Ortiz, J. L., et al. 2017, *AJ*, **154**, 22
- Dirkx, D., Lainey, V., Gurvits, L. I., & Visser, P. N. A. M. 2016, *Planet. Space Sci.*, **134**, 82
- Dirkx, D., Gurvits, L. I., Lainey, V., et al. 2017, *Planet. Space Sci.*, **147**, 14
- Emelyanov, N. V. 2009, *MNRAS*, **394**, 1037
- Gomes-Júnior, A. R., Assafin, M., Beauvalet, L., et al. 2016, *MNRAS*, **462**, 1351
- Jia, X., Kivelson, M. G., Khurana, K. K., & Kurth, W. S. 2018, *Nat. Astron.*, **2**, 459
- Kay, J., Schenk, P., & Prockter, L. 2019, *Lunar Planet. Sci. Conf.*, **2975**
- Kiseleva, T. P., Kiselev, A. A., Kalinichenko, O. A., Vasilyeva, N. A., & Khovricheva, M. L. 2008, *Sol. Syst. Res.*, **42**, 414
- Lainey, V. 2016, *Celestial Mech. Dyn. Astron.*, **126**, 145
- Lainey, V., Arlot, J.-E., Karatekin, Ö., & van Hoolst, T. 2009, *Nature*, **459**, 957
- Leiva, R., Sicardy, B., Camargo, J. I. B., et al. 2017, *AJ*, **154**, 159
- Lindgren, L. 1977, *A&A*, **57**, 55
- Lindgren, L., Hernández, J., Bombrun, A., et al. 2018, *A&A*, **616**, A2
- Meza, E., Sicardy, B., Assafin, M., et al. 2019, *A&A*, **625**, A42
- Morgado, B., Assafin, M., Vieira-Martins, R., et al. 2016, *MNRAS*, **460**, 4086
- Morgado, B., Vieira-Martins, R., Assafin, M., et al. 2019, *MNRAS*, **482**, 5190
- Nimmo, F., Thomas, P. C., Pappalardo, R. T., & Moore, W. B. 2007, *Icarus*, **191**, 183
- Ortiz, J. L., Duffard, R., Pinilla-Alonso, N., et al. 2015, *A&A*, **576**, A18
- Ortiz, J. L., Santos-Sanz, P., Sicardy, B., et al. 2017, *Nature*, **550**, 219
- Peng, Q. Y., He, H. F., Lainey, V., & Vienne, A. 2012, *MNRAS*, **419**, 1977
- Roth, L., Saur, J., Retherford, K. D., et al. 2014, *Science*, **343**, 171
- Saquet, E., Emelyanov, N., Robert, V., et al. 2018, *MNRAS*, **474**, 4730
- Seber, G. A. F., & Lee, A. J. 2003, *Linear Regression Analysis* (Wiley)
- Sicardy, B., Ortiz, J. L., Assafin, M., et al. 2011, *Nature*, **478**, 493
- Sicardy, B., Talbot, J., Meza, E., et al. 2016, *ApJ*, **819**, L38
- Sparks, W. B., Hand, K. P., McGrath, M. A., et al. 2016, *ApJ*, **829**, 121
- Sparks, W. B., Richter, M., deWitt, C., et al. 2019, *ApJ*, **871**, L5
- Tajeddine, R., Lainey, V., Cooper, N. J., & Murray, C. D. 2015, *A&A*, **575**, A73
- Zhu, B., Zhao, Y., Ge, J., & Ma, J. 2018, *MNRAS*, **481**, 1469
- 
- <sup>1</sup> Observatório Nacional/MCTIC, R. General José Cristino 77, Rio de Janeiro 20921-400, Brazil  
e-mail: morgado.fis@gmail.com
- <sup>2</sup> Laboratório Interinstitucional de e-Astronomia - LIneA & INCT do e-Universo, Rua Gal. José Cristino 77, Rio de Janeiro 20921-400, Brazil
- <sup>3</sup> Observatório do Valongo/UFRJ, Ladeira Pedro Antonio 43, Rio de Janeiro 20080-090, Brazil
- <sup>4</sup> UNESP – São Paulo State University, 12516-410 Guaratinguetá, São Paulo, Brazil
- <sup>5</sup> Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, 4800 Oak Grove Drive, Pasadena, CA 91109-8099, USA
- <sup>6</sup> IMCCE, Observatoire de Paris, PSL Research University, CNRS-UMR 8028, Sorbonne Universités, UPMC, Univ. Lille 1, 77 Av. Denfert-Rochereau, 75014 Paris, France
- <sup>7</sup> Federal University of Technology – Paraná (UTFPR/DAFIS), Av. Sete de Setembro, 3165, CEP 80230-901 Paraná, Brazil
- <sup>8</sup> LESIA, Observatoire de Paris, Université PSL, CNRS, Sorbonne Université, Univ. Paris Diderot, Sorbonne Paris Cité, 5 place Jules Janssen, 92195 Meudon, France
- <sup>9</sup> San Pedro de Atacama Celestial Explorations, Casilla 21, San Pedro de Atacama, Chile
- <sup>10</sup> Unioeste, Avenida Tarquínio Joslin dos Santos 1300, Foz do Iguaçu 85870-650, Paraná, Brazil
- <sup>11</sup> Polo Astronômico Casimiro Montenegro Filho/FPTI-BR, Avenida Tancredo Neves 6731, Foz do Iguaçu 85867-900 Paraná, Brazil
- <sup>12</sup> Observatório SONEAR, Brazil
- <sup>13</sup> Dogsheaven Observatory, SMPW Q25 CJ1 LT10B Brasília, Brazil
- <sup>14</sup> Research Center of Astronomy, Francisco J. Duarte (CIDA). 264, 5101-A Mérida, Venezuela
- <sup>15</sup> Instituto de Física/UFRGS, Porto Alegre 91501-970, Brazil

## Appendix A: Stacking image procedure



**Fig. A.1.** Normalised light flux from FOZ images with (black line) and without (light gray line) the stacking image procedure. The red line is the modelled light curve. Each stacked image contains the data of 20 single images stacked together.

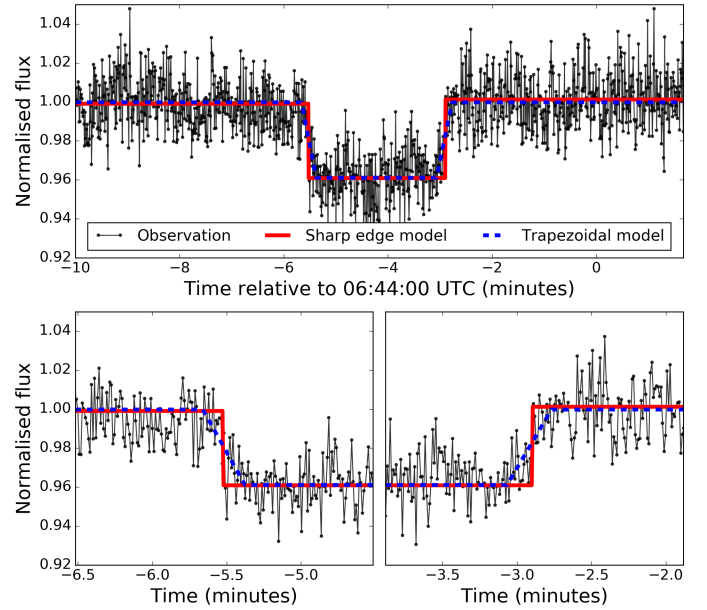
The stacking image procedure was developed with the aim to attenuate the image noise, thereby increasing the image S/N when it is not possible to just integrate over more time. This is the case when the Galilean moons are observed without a filter, as the brightness of Jupiter or even the satellite itself would quickly saturate the CCD image before we achieve an adequate S/N.

The first step in this procedure is to choose a well-sampled object in the images that is to be used as reference to align the images for the stacking. This object should not have a significant motion (in the sky plane) between the first and last image. In our case, in the absence of stars, we used Europa to align the images. Each individual image had an exposure of 0.05 seconds and the same cycle, and the motion of Europa was  $5.39 \text{ mas s}^{-1}$  in the sky plane, corresponding to a motion of  $0.0074 \text{ pixels s}^{-1}$  on the CCD.

We measured the object centroid  $(x, y)$  with a 2D circular symmetric Gaussian fit over pixels within one full-width at half-maximum ( $\text{FWHM} \propto \text{seeing}$ ) from the centre. This was done using the PRAIA package (Assafin et al. 2011). The uncertainty in the centroid measurement was about 36 mas (0.05 pixels). The alignment consists of vertical and horizontal shifts for each image  $(\Delta x, \Delta y)$  relative to a chosen reference image; in our case, the first image.

We performed a stack procedure over each of the 20 images, which resulted in a temporal resolution of 1.0 s. Figure A.1 contains the light curve we obtained using all individual frames (light gray line), the light curve using the stacked images (black line), and the modelled light curve after the fit (red line). Before our procedure, the normalised light curve rms was 0.073, while after the stacking, we were able to achieve 0.016. It is important to highlight that the expected drop would be about 0.021 in flux. Without the stacking image procedure, it would be impossible to determine the ingress and/or the egress times.

## Appendix B: Light-curve fitting procedure



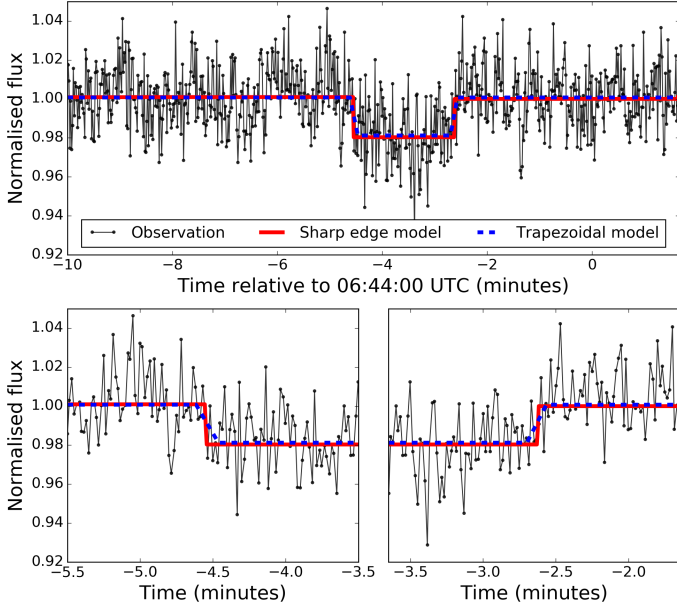
**Fig. B.1.** Normalised light curve obtained at OPD/B&C with a zoom-in at the moment of the occultation. The black dots show the data, while the red lines represent the sharp-edge model for each observation. The dotted blue line shows the trapezoidal model.

The most common geological model of Europa is an ice surface on top of a global ocean (Anderson et al. 1998). The presence of plumes of water vapour (Roth et al. 2014; Jia et al. 2018; Sparks et al. 2016, 2019) is a strong evidence of this model.

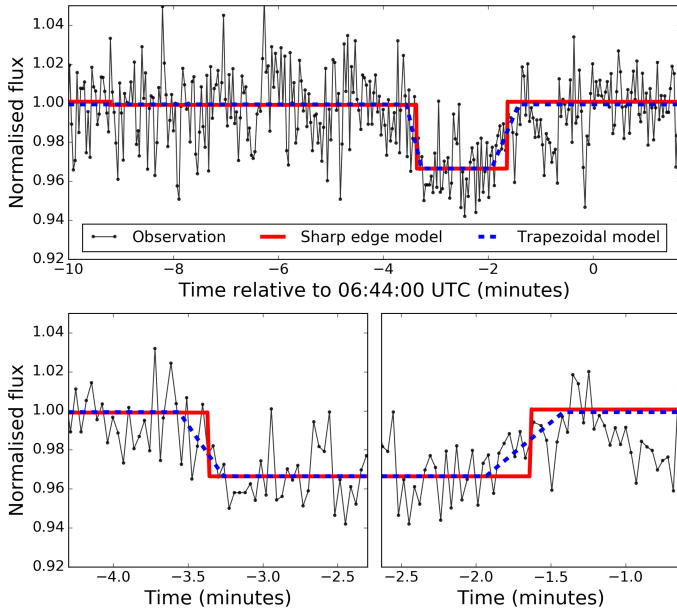
The OPD/B&C light curve presents an apparent smooth flux decay on the ingress and egress times during the passage of the body in front of the star, and this slope would be compatible with the common picture of the Europa geology and water vapour evidence. These features must be analysed with caution, however, because the measurements show some level of correlated noise. To objectively assess the significance of this slope, we tested two scenarios: one simple (sharp-edge model) scenario in which we assumed that there are no slopes during the ingress and egress times, and one more complex scenario (trapezoidal model) with a smooth ingress and egress. It is also straightforward to show that the sharp-edge model is a particular case of a trapezoidal model, allowing us to analyse the decrease in residuals when the number of fitted parameters is increased.

Because the more complex model has fewer degrees of freedom, it should at least fit the observables as well as the more straightforward case. Having set the characteristics of the problem, we used the Fisher-Snedecor F-test (Chow 1960; Seber & Lee 2003) to estimate the probability that the trapezoidal model fits the data better than a more simple sharp-edge model. Under the null hypothesis, the trapezoidal case does not produce a better fit than the standard case, or it could be argued that the slope coefficients are similar. The test follows an F-distribution, and the null hypothesis is rejected when the calculated F value is higher than the expected critical value (or significance).

As an example, we discuss the light curve obtained by OPD/B&C. The normalised chi-square statistics obtained from the sharp edge model was 1.06, whereas the value obtained with the trapezoidal model was 1.04. These models were applied to the data within an interval of five minutes centred at the



**Fig. B.2.** Same as Fig. B.1 for the light curve obtained at FOZ.



**Fig. B.3.** Same as Fig. B.1 for the light curve obtained at OBSPA.

central instant for each station. Using the F distribution, we can predict that within a 95% confidence level, the computed chi-square value for the plume model should lie around 0.74. In this case, increasing the number of model parameters leads only to a better fit of the noise because we found out that the probability of the trapezoidal model to explain the data better is about 17%. Our measurements therefore do not support any further information about the detection of a thin atmosphere (or a plume). The FOZ and OBSPA light curves have lower cadences and therefore a lower time resolution during ingress and egress of the event. The probabilities for these sites are even lower, about 1% and 3% respectively, as expected.

Figures B.1, B.2, and B.3 contain the individual light curves for each observational site (OPD/B&C, FOZ, and OBSPA, respectively) with a zoom (bottom graphs) of two minutes

centred on the ingress and egress times. The  $x$ -axes are the time in minutes relative to 06:44:00 UTC, and the  $y$ -axes are the normalised light flux. The red lines are the sharp-edge model for each observation, and the dotted blue lines are the trapezoidal model.

## Appendix C: Comparison between ephemeris

**Table C.1.** Offset between the geocentric position of Europa obtained from the stellar occultation on 2017 March 31 at 06:44 UTC and different ephemerides in the sense observation minus ephemeris.

	JPL <i>jup310</i> (mas)	IMCCE NOE-5-2010-GAL (mas)
DE438s	$\Delta\alpha$	-7.94
	$\Delta\delta$	-10.91
	$s$	13.46
DE436s	$\Delta\alpha$	-6.68
	$\Delta\delta$	-7.59
	$s$	10.09
DE435	$\Delta\alpha$	-0.27
	$\Delta\delta$	-3.81
	$s$	3.82
DE430	$\Delta\alpha$	-1.67
	$\Delta\delta$	-3.69
	$s$	4.06
INPOP17a	$\Delta\alpha$	+0.63
	$\Delta\delta$	-8.59
	$s$	8.61
INPOP13c	$\Delta\alpha$	-2.64
	$\Delta\delta$	-10.28
	$s$	10.61

The absolute position of Europa obtained here has an uncertainty smaller than 1 mas ( $\sim 3$  km). This level of accuracy is of the same order of magnitude as those obtained from space mission images (Tajeddine et al. 2015). However, our position is completely independent of any variation in the satellite albedo and is not affected by phase angle effects. Our geocentric position for Europa is given in Eq. (C.1),

$$\begin{aligned}\alpha_{J2} &= 13^{\text{h}}12'15''.548372 \pm 0.96 \text{ mas}, \\ \delta_{J2} &= -05^{\circ}56'48''.687034 \pm 0.62 \text{ mas}.\end{aligned}\quad (\text{C.1})$$

Here we compare this position ( $\alpha_{J2}, \delta_{J2}$ ) with different geocentric ephemeris ( $\alpha_{\text{ephem}}, \delta_{\text{ephem}}$ ) using Eq. (C.2),

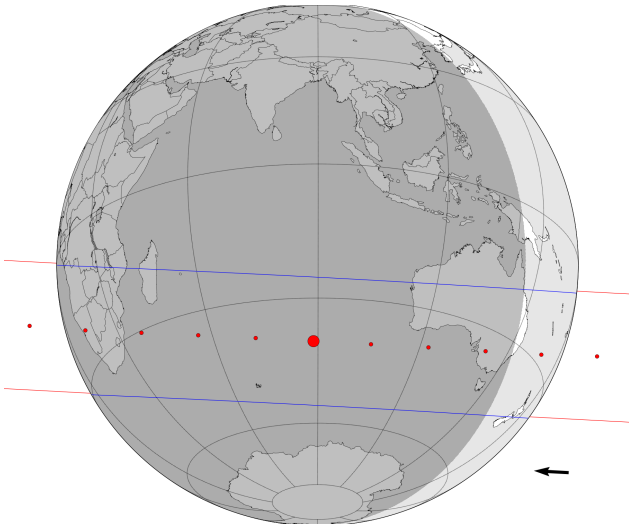
$$\begin{aligned}\Delta\alpha &= \alpha_{J2} - \alpha_{\text{ephem}}, \\ \Delta\delta &= \delta_{J2} - \delta_{\text{ephem}}, \\ s &\simeq \sqrt{\Delta\alpha^2 \cos^2\left(\frac{\delta_{J2} + \delta_{\text{ephem}}}{2}\right) + \Delta\delta^2}.\end{aligned}\quad (\text{C.2})$$

In Table C.1 we present the offset between the Europa position as derived based on this stellar occultation and the ephemeris. We compare our result with 12 ephemerides combinations. We use 6 planetary ephemerides (from the JPL, DE438s, DE436s, DE435, and DE430); and from the IMCCE, INPOP17a and INPOP13c) and two satellite ephemerides (from the JPL, *jup310*; and from the IMCCE, NOE-5-2010-GAL).

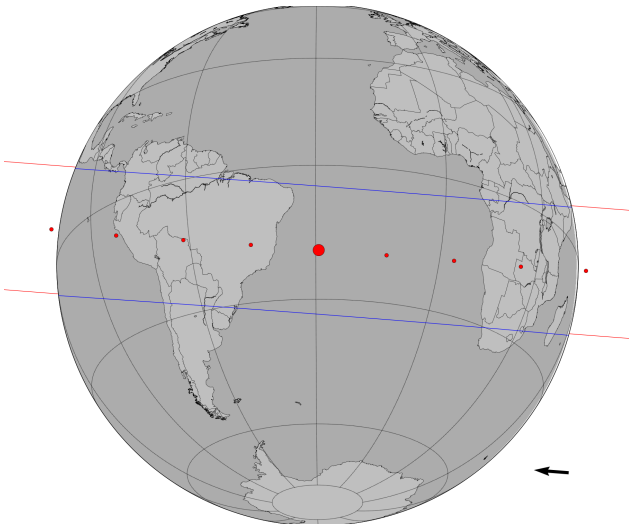


## Appendix D: Future event maps

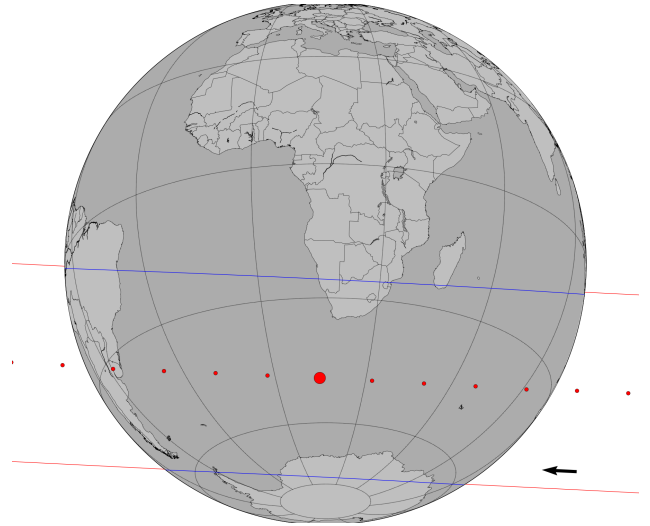
In this appendix we present the stellar occultation maps for the predicted events that will occur between 2019 and 2021 (see Table 3 for more details). We indicate in each figure the satellite that will occult the star, and the date and time of the occultation in UTC. The blue lines represent the expected size limit of the occulting satellite. The red dots are the centre of the body for a given time, each separated by 1 min. The large red dot represents the centre of the body at the time of closest approach (CA) indicated in the figure label. The arrow represents the direction of motion of the shadow. The dark grey and light grey areas represent the night and day part of the globe, respectively.



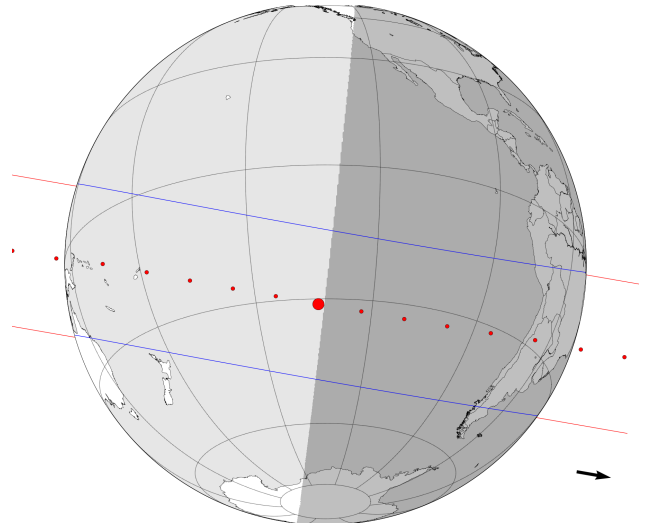
**Fig. D.1.** Occultation of a mag.  $G$  10.9 star by Europa on 2019 May 5, 20:32 UTC. The predicted relative velocity of the event is  $23.1 \text{ km s}^{-1}$ .



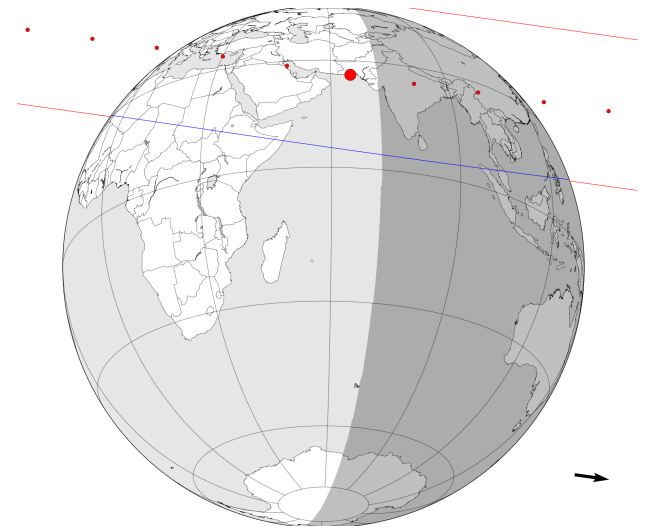
**Fig. D.2.** Occultation of a mag.  $G$  9.1 star by Europa on 2019 June 4, 02:26 UTC. The predicted relative velocity of the event is  $27.3 \text{ km s}^{-1}$ .



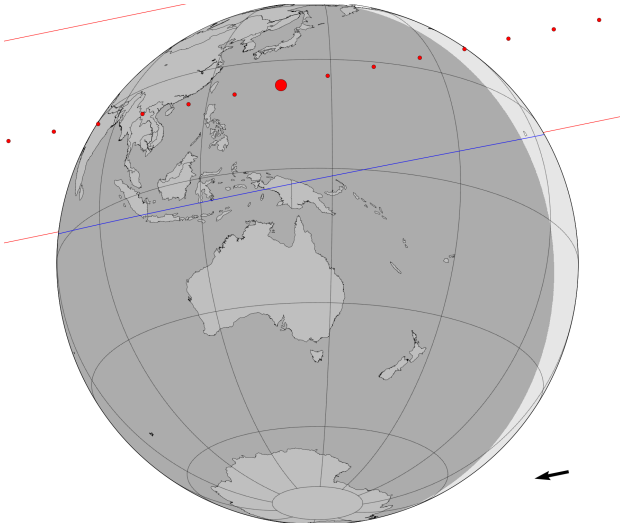
**Fig. D.3.** Occultation of a mag.  $G$  10.2 star by Callisto on 2019 June 5, 23:12 UTC. The predicted relative velocity of the event is  $21.0 \text{ km s}^{-1}$ .



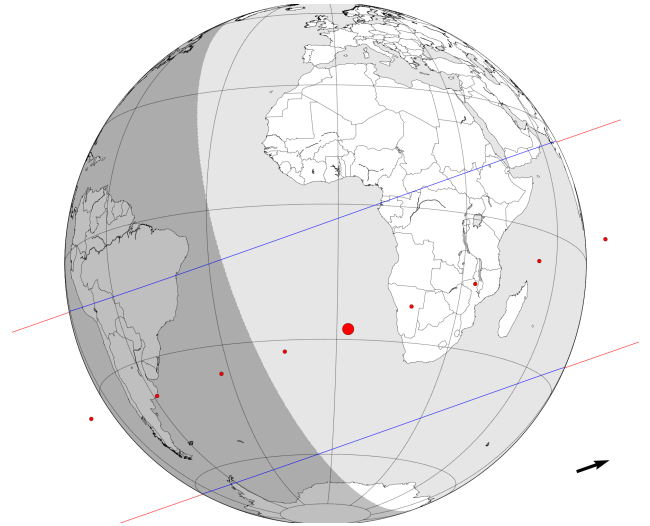
**Fig. D.4.** Occultation of a mag.  $G$  11.0 star by Io on 2019 September 9, 02:33 UTC. The predicted relative velocity of the event is  $18.1 \text{ km s}^{-1}$ .



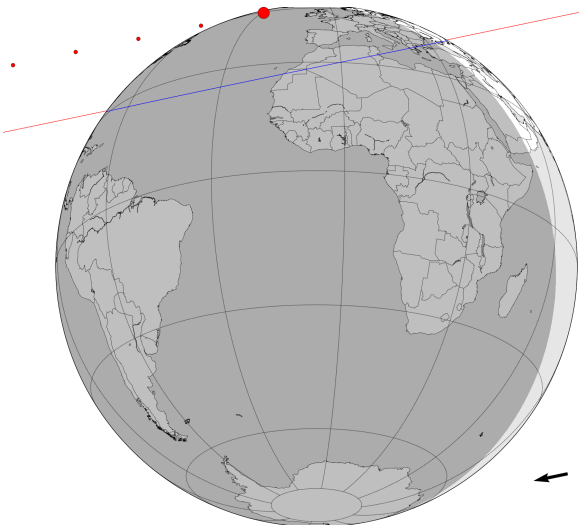
**Fig. D.5.** Occultation of a mag.  $G$  11.3 star by Io on 2019 September 21, 13:08 UTC. The predicted relative velocity of the event is  $26.5 \text{ km s}^{-1}$ .



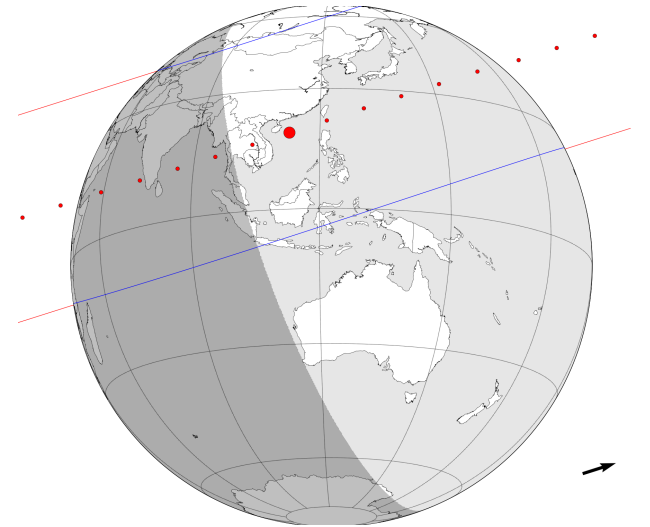
**Fig. D.6.** Occultation of a mag.  $G$  10.9 star by Callisto on 2020 June 20, 16:03 UTC. The predicted relative velocity of the event is  $18.9 \text{ km s}^{-1}$ .



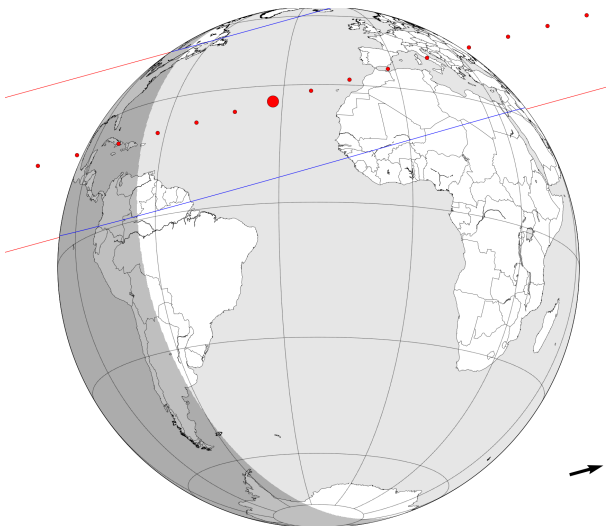
**Fig. D.9.** Occultation of a mag.  $G$  11.1 star by Ganymede on 2021 April 25, 07:55 UTC. The predicted relative velocity of the event is  $27.7 \text{ km s}^{-1}$ .



**Fig. D.7.** Occultation of a mag.  $G$  11.3 star by Europa on 2020 June 22, 02:09 UTC. The predicted relative velocity of the event is  $26.1 \text{ km s}^{-1}$ .

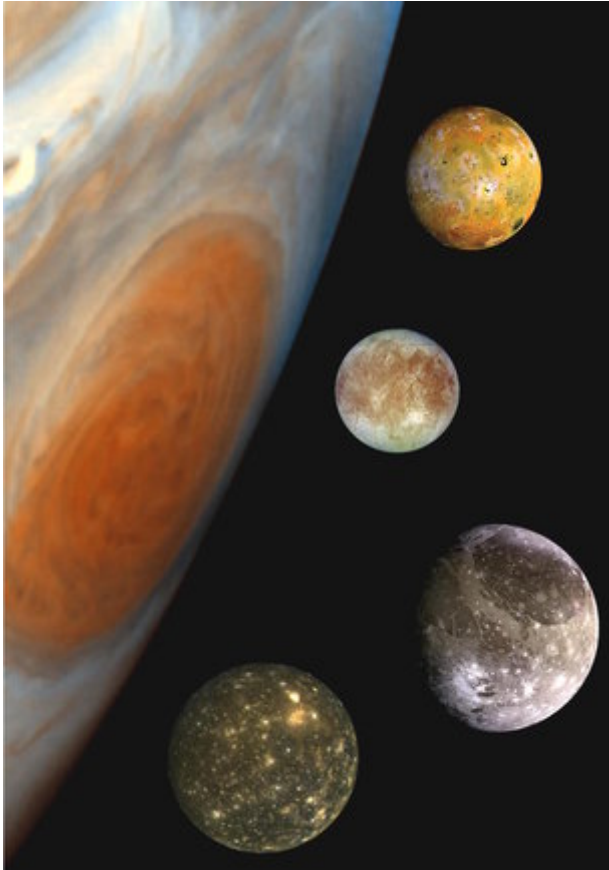


**Fig. D.10.** Occultation of a mag.  $G$  10.4 star by Callisto on 2021 May 4, 23:01 UTC. The predicted relative velocity of the event is  $16.3 \text{ km s}^{-1}$ .



**Fig. D.8.** Occultation of a mag.  $G$  5.8 star by Io on 2021 April 2, 10:24 UTC. The predicted relative velocity of the event is  $16.5 \text{ km s}^{-1}$ .

## ASTRONOMERS SPY EUROPA BLOCKING DISTANT STAR – THANKS TO GAIA



Jupiter's largest moons

25 July 2019

On 31 March 2017, Jupiter's moon Europa passed in front of a background star – a rare event that was captured for the first time by ground-based telescopes thanks to data provided by ESA's Gaia spacecraft.

Previously, observatories had only managed to watch two of Jupiter's other moons – Io and Ganymede – during such an event.

Gaia has been operating in space since late 2013. The mission aims to produce a three-dimensional map of our Galaxy, and characterise the myriad stars that call the Milky Way home. It has been immensely successful so far, revealing the [locations and motions of over one billion stars](#).

Knowing the precise locations of the stars we see in the sky allows scientists to predict when various bodies in the Solar System will appear to pass in front of a background star from a given vantage point: an event known as a stellar occultation.

Gaia is no stranger to such events – the spacecraft helped astronomers make unique observations of [Neptune's moon Triton as it passed in front of a distant star](#) in 2017, revealing more about the moon's atmosphere and properties.

Occultations are hugely valuable; they enable measurements of the characteristics of the foreground body (size, shape, position, and more), and can reveal structures like rings, jets, and atmospheres. Such measurements can be made from the ground – something that Bruno Morgado of the Brazilian National Observatory and LIneA, Brazil, and colleagues took advantage of to explore Jupiter's moon Europa.

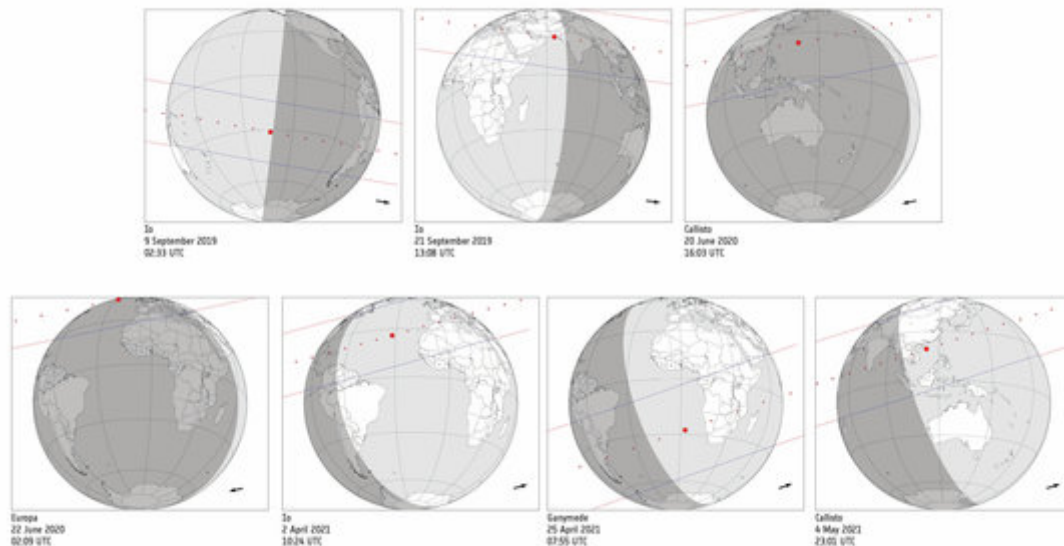
"We used data from Gaia's first data release to forecast that, from our viewpoint in South America, Europa would pass in front of a bright background star in March 2017 – and to predict the best location from which to observe this occultation," said Bruno, lead researcher of a [new paper](#) reporting the findings from the 2017 occultation. Gaia's first data release was provided in September 2016.

"This gave us a wonderful opportunity to explore Europa, as the technique offers an accuracy comparable to that of images obtained by space probes."

The Gaia data showed that the event would be visible from a thick band slicing from north-west to south-east across South America. Three observatories located in Brazil and

Chile were able to capture data – a total of eight sites attempted, but many experienced poor weather conditions.

In-keeping with previous measurements, the observations refined Europa's radius to 1561.2 km, precisely determined Europa's position in space and in relation to its host planet, Jupiter, and characterised the moon's shape. Rather than being exactly spherical, Europa is known to be an ellipsoid. The observations show the moon to measure 1562 km when measured across in one direction (the so-called apparent 'semi-major' axis), and 1560.4 km when measured across the other (the apparent 'semi-minor' axis).



Upcoming stellar occultations by Jupiter's four largest moons

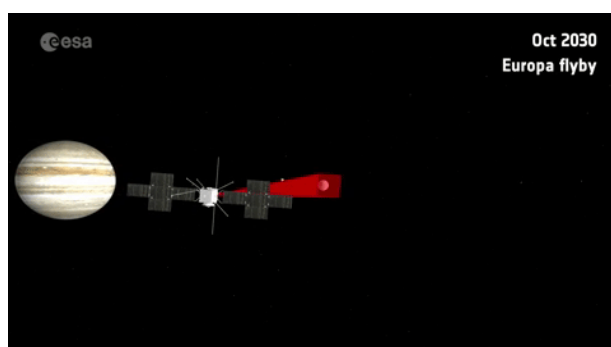
"It's likely that we'll be able to observe far more occultations like this by Jupiter's moons in 2019 and 2020," adds Bruno. "Jupiter is passing through a patch of sky that has the galactic centre in the background, making it drastically more likely that its moons will pass in front of bright background stars. This would really help us to pin down their three-dimensional shapes and positions – not only for Jupiter's four largest moons, but for smaller, more irregularly-shaped ones, too."

Using Gaia's second data release, provided in April 2018, the scientists predict the dates of further occultations of bright stars by Europa, Io, Ganymede and Callisto in coming years, and list a total of 10 events through 2019 and 2021. Future events comprise stellar occultations by Europa (22 June 2020), Callisto (20 June 2020, 4 May 2021), Io (9 and 21 September 2019, 2 April 2021), and Ganymede (25 April 2021).

Three have already taken place in 2019, two of which – stellar occultations by Europa (4 June) and Callisto (5 June) – were also observed by the researchers, and for which the data are still under analysis.

The upcoming occultations will be observable even with amateur telescopes as small as 20 cm from various regions around the world. The favourable position of Jupiter, with the galactic plane in the background, will only occur again in 2031.

"Stellar occultation studies allow us to learn about moons in the Solar System from afar, and are also relevant for future missions that will visit these worlds," says Timo Prusti, ESA Gaia Project Scientist. "As this result shows, Gaia is a hugely versatile mission: it not only advances our knowledge of stars, but also of the Solar System more widely."



An accurate knowledge of Europa's orbit will help to prepare space missions targeting the Jovian system such as [ESA's JUperiter ICy moons Explorer](#) (Juice) and NASA's Europa Clipper, both of which are scheduled for launch in the next decade.

Juice will fly by Europa during its tour of the Jovian system

"These kinds of observations are hugely exciting," says Olivier Witasse, ESA's Juice Project Scientist. "Juice will reach Jupiter in 2029; having the best possible knowledge of the positions of the system's moons will help us to prepare for the mission navigation and future data analysis, and plan all of the science we intend to do.

"This science depends upon us knowing things such as accurate moon trajectories and understanding how close a spacecraft will come to a given body, so the better our knowledge, the better this planning – and the subsequent data analysis – will be."

### **Notes for editors**

"[First stellar occultation by the Galilean moon Europa and upcoming events between 2019 and 2021](#)" by B. Morgado et al. (2019), is published in *Astronomy & Astrophysics*.

Details of past and future stellar occultation observing campaigns for Jupiter's moons and other Solar System objects will be listed here: <http://lesia.obspm.fr/lucky-star/campaigns.php>

[Gaia](#) was launched in 2013 to create the most precise three-dimensional map of more than one billion stars in the Milky Way. The mission has released two lots of data thus far: [Gaia Data Release 1](#) in 2016 and [Gaia Data Release 2](#) in 2018. [More releases](#) will follow in the coming years.

[Juice](#) is the first large-class mission in ESA's Cosmic Vision 2015–2025 programme. It is planned for launch in 2022, and will complete a unique tour of Jupiter and its large ocean-bearing moons Europa, Ganymede and Callisto after it arrives in 2029.

### **For more information, please contact:**

Bruno Morgado  
Observatório Nacional/MCTIC, Brazil; LIneA, Brazil  
Email: [brunomorgado@on.br](mailto:brunomorgado@on.br)

Timo Prusti  
ESA Gaia Project Scientist  
Email: [tprusti@cosmos.esa.int](mailto:tprusti@cosmos.esa.int)

Olivier Witasse  
ESA Juice Project Scientist  
Email: [Olivier.Witasse@esa.int](mailto:Olivier.Witasse@esa.int)

### **Related links**

[http://www.esa.int/Our\\_Activities/Space\\_Science/Gaia](http://www.esa.int/Our_Activities/Space_Science/Gaia)

Gaia Data Release 2 Media Kit

<http://sci.esa.int/gaia/60174-media-kit-for-gaia-data-release-2/>

Operations

[http://www.esa.int/Our\\_Activities/Operations](http://www.esa.int/Our_Activities/Operations)

Gaia overview

[http://www.esa.int/Our\\_Activities/Space\\_Science/Gaia/Gaia\\_overview](http://www.esa.int/Our_Activities/Space_Science/Gaia/Gaia_overview)

Gaia factsheet

[http://www.esa.int/Our\\_Activities/Space\\_Science/Gaia/Gaia\\_factsheet](http://www.esa.int/Our_Activities/Space_Science/Gaia/Gaia_factsheet)

### Frequently asked questions

[http://www.esa.int/Our\\_Activities/Space\\_Science/Gaia/Frequently\\_Asked\\_Questions\\_about\\_Gaia](http://www.esa.int/Our_Activities/Space_Science/Gaia/Frequently_Asked_Questions_about_Gaia)

### Gaia brochure

[http://www.esa.int/About\\_Us/ESA\\_Publications/ESA\\_BR-296\\_Gaia\\_ESA\\_s\\_galactic\\_census](http://www.esa.int/About_Us/ESA_Publications/ESA_BR-296_Gaia_ESA_s_galactic_census)

### Hipparcos mission

<http://sci.esa.int/science-e/www/area/index.cfm?fareaid=20>

### For Media

[http://www.esa.int/For\\_Media/Photos/Highlights/Gaia](http://www.esa.int/For_Media/Photos/Highlights/Gaia)

### In depth

<http://sci.esa.int/gaia>

### For Educators

<http://sci.esa.int/science-e/www/area/index.cfm?fareaid=84>

<http://www.esa.int/esaKIDSen/OurUniverse.html>

### How many stars are there in the Universe?

[http://www.esa.int/Our\\_Activities/Space\\_Science/Herschel/How\\_many\\_stars\\_are\\_there\\_in\\_the\\_Universe](http://www.esa.int/Our_Activities/Space_Science/Herschel/How_many_stars_are_there_in_the_Universe)

### The billion-pixel camera

[http://www.esa.int/Our\\_Activities/Space\\_Science/Exploring\\_space/The\\_billion-pixel\\_camera](http://www.esa.int/Our_Activities/Space_Science/Exploring_space/The_billion-pixel_camera)

### Gaia spacecraft testing

[http://sci.esa.int/science-e/www/object/index.cfm?fobjectid=31544&farchive\\_objectypeid=31&farchive\\_objectid=30928](http://sci.esa.int/science-e/www/object/index.cfm?fobjectid=31544&farchive_objectypeid=31&farchive_objectid=30928)

### Vodcast: Charting the Galaxy - from Hipparcos to Gaia

<http://sci.esa.int/science-e/www/object/index.cfm?fobjectid=45772&fattributeid=885>

### Little books of Gaia

<http://sci.esa.int/science-e/www/object/index.cfm?fobjectid=35010>

### Make a Gaia model

[https://www.cosmos.esa.int/documents/29201/375989/Gaia+paper+model\\_credits+-+John+Jogerst\\_English.pdf/02f75f8f-d90f-4326-986a-5502180d4c82](https://www.cosmos.esa.int/documents/29201/375989/Gaia+paper+model_credits+-+John+Jogerst_English.pdf/02f75f8f-d90f-4326-986a-5502180d4c82)

### Explore stellar neighbourhood in 3D

<http://workshop.chromeexperiments.com/stars/>

### Gaia launch campaign photos

<http://sci.esa.int/gaia-launch-campaign-photos/>

---

Copyright 2000 - 2019 © European Space Agency. All rights reserved.



ELSEVIER

Contents lists available at ScienceDirect

Planetary and Space Science

journal homepage: [www.elsevier.com/locate/pss](http://www.elsevier.com/locate/pss)

## The 2014–2015 Brazilian mutual phenomena campaign for the Jovian satellites and improved results for the 2009 events<sup>☆</sup>

B. Morgado<sup>a,b,c,\*</sup>, R. Vieira-Martins<sup>a,b,c</sup>, M. Assafin<sup>b,c</sup>, A. Dias-Oliveira<sup>a,b,d</sup>, D.I. Machado<sup>e,f</sup>, J.I.B. Camargo<sup>a,b</sup>, M. Malacarne<sup>g</sup>, R. Sfair<sup>h</sup>, O.C. Winter<sup>h</sup>, F. Braga-Ribas<sup>i,a,b</sup>, G. Benedetti-Rossi<sup>a,b</sup>, L.A. Boldrin<sup>h</sup>, B.C.B. Camargo<sup>h</sup>, H.S. Gaspar<sup>h</sup>, A.R. Gomes-Júnior<sup>a,b,c,h</sup>, J.O. Miranda<sup>g</sup>, T. de Santana<sup>h</sup>, L.L. Trabuco<sup>f</sup>

<sup>a</sup> Observatório Nacional/MCTIC, R. General José Cristino 77, Rio de Janeiro, RJ, 20921-400, Brazil

<sup>b</sup> Laboratório Interinstitucional de e-Astronomia - LIneA and INCT do e-Universo, Rua Gal. José Cristino 77, Rio de Janeiro, RJ, 20921-400, Brazil

<sup>c</sup> Observatório do Valongo/UFRJ, Ladeira Pedro Antonio 43, Rio de Janeiro, RJ, 20080-090, Brazil

<sup>d</sup> Escola SESC de Ensino Médio, Avenida Ayrton Senna, 5677, Rio de Janeiro, RJ, 22775-004, Brazil

<sup>e</sup> Universidade Estadual do Oeste do Paraná (Unioeste), Avenida Tarquínio Joslin dos Santos 1300, Foz do Iguaçu, PR, 85870-650, Brazil

<sup>f</sup> Polo Astronômico Casimiro Montenegro Filho/FPTI-BR, Avenida Tancredo Neves 6731, Foz do Iguaçu, PR, 85867-900, Brazil

<sup>g</sup> Universidade Federal do Espírito Santo, Av. Fernando Ferrari 514, Vitória, ES, 29075-910, Brazil

<sup>h</sup> UNESP - São Paulo State University, Grupo de Dinâmica Orbital e Planetologia, CEP 12516-410, Guaratinguetá, SP, 12516-410, Brazil

<sup>i</sup> Federal University of Technology - Paraná (UTFPR/DAFIS), Av. Sete de Setembro, 3165, Curitiba, PR, 80230-901, Brazil

### ARTICLE INFO

#### Keywords:

Methods: data analysis

Astrometry

Planets and satellites: individual: Io

Europa

Ganymede

Callisto

Amalthea

### ABSTRACT

Progress in astrometry and orbital modelling of planetary moons in the last decade enabled better determinations of their orbits. These studies need accurate positions spread over extended periods. We present the results of the 2014–2015 Brazilian campaign for 40 mutual events from 47 observed light curves by the Galilean satellites plus one eclipse of Amalthea by Ganymede. We also reanalysed and updated results for 25 mutual events observed in the 2009 campaign.

All telescopes were equipped with narrow-band filters centred at 889 nm with a width of 15 nm to eliminate the scattered light from Jupiter. The albedos' ratio was determined using images before and after each event. We simulated images of moons, umbra, and penumbra in the sky plane, and integrated their fluxes to compute albedos, simulate light curves and fit them to the observed ones using a chi-square fitting procedure. For that, we used the complete version of the Oren-Nayer reflectance model. The relative satellite positions mean uncertainty was 11.2 mas ( $\sim 35$  km) and 10.1 mas ( $\sim 31$  km) for the 2014–2015 and 2009 campaigns respectively. The simulated and observed ASCII light curve files are freely available in electronic form at the *Natural Satellites DataBase* (NSDB).

The 40/25 mutual events from our 2014–2015/2009 campaigns represent a significant contribution of 17%/15% in comparison with the PHEMU campaigns lead by the IMCCE. Besides that, our result for the eclipse of Amalthea is only the 4<sup>th</sup> such measurement ever published after the three ones observed by the 2014–2015 international PHEMU campaign. Our results are suitable for new orbital/ephemeris determinations for the Galilean moons and Amalthea.

### 1. Introduction

Mutual phenomena between natural satellites – occultations and eclipses – have been successfully used to improve the orbital studies of these moons. For the Galilean satellites, they have been systematically

observed since 1976 (Aksnes and Franklin, 1976). These phenomena occur as the Earth and the Sun cross the orbital plane of the satellites. For Jupiter, they happen every six years.

The photometry of these events offers a reliable source of very precise relative positions between two satellites. They often achieve un-

<sup>☆</sup> Based in part on observations made at the Laboratório Nacional de Astrofísica (LNA), Itajubá-MG, Brazil.

\* Corresponding author. Observatório Nacional/MCTIC, R. General José Cristino 77, Rio de Janeiro, RJ, 20921-400, Brazil.

E-mail address: [brunomorgado@on.br](mailto:brunomorgado@on.br) (B. Morgado).

<https://doi.org/10.1016/j.pss.2019.104736>

Received 6 July 2019; Received in revised form 29 August 2019; Accepted 3 September 2019

Available online xxxx

0032-0633/© 2019 Elsevier Ltd. All rights reserved.

certainties bellow 5 mas ( $\sim 15$  km) (Emelyanov, 2009; Dias-Oliveira et al., 2013; Arlot et al., 2014a; Saquet et al., 2018). These relative positions can constrain the orbital studies of these moons and give us hints about their structure and formation processes (Lainey et al., 2004b; a, 2009, 2017).

The uncertainty of the positions obtained from mutual phenomena is usually smaller than the ones obtained by other methods. For instance, classical CCD astrometry achieves uncertainties around 100 mas ( $\sim 300$  km) (Kiseleva et al., 2008). For satellite-pair distances, the uncertainties are at the 30 mas level ( $\sim 90$  km) (Peng et al., 2012). Mutual approximations, based in the same geometrical configuration of mutual occultations, achieve uncertainties at the 10 mas level ( $\sim 30$  km) (Morgado et al., 2016, 2019).

In this paper, we present results for 47 light curves, 31 occultations and 16 eclipses, representing 40 mutual events between the Galilean moons observed by three stations in Brazil, during the 2014–2015 mutual phenomena campaign. We also present one event, an eclipse involving the inner satellite Amalthea (J5). We also used our improved methods to re-analyse 25 light curves, 13 occultations and 12 eclipses, of 25 mutual phenomena observed by our group during the 2009 mutual phenomena campaign. We compared the new results with those by Dias-Oliveira et al. (2013), Arlot et al. (2014a) and Morgado et al. (2016).

In Section 2 we detail the observational campaigns. In Section 3 we present the photometry used to produce the observed light curves and describe the new, improved light-curve fitting procedures developed and used in this work. Section 4.1 contains new results from the re-analysis of 25 mutual events observed in 2009 and the comparison with the older results. In Section 4.2, we present the results for the 47 light curves involving 40 mutual events observed from Brazil during the 2014–2015 campaign. In Section 4.3, we present the result for the eclipse involving Amalthea. Our conclusions are set on Section 5.

## 2. Mutual phenomena campaign details

Every six years, during Jupiter equinox, we can observe mutual occultations and eclipses between Jupiter's regular satellites. The results presented here come from the collaboration between five Brazilian institutes. The prediction of these events was provided by the *Institut de Mécanique Céleste et de Calcul des Ephémérides* (IMCCE)<sup>1</sup> (Arlot et al., 2014a, b).

The 2009 mutual phenomena campaign was the first large attempt of the kind carried out in Brazil for the Galilean moons. Observations and instruments are described in detail in Dias-Oliveira et al. (2013). We re-analysed 25 mutual events encompassing 25 light curves, 13 from occultations and 12 from eclipses, and obtained new results for this campaign. Discrepancies between the results obtained by Dias-Oliveira et al. (2013) and by Arlot et al. (2014a) motivated this re-analysis, see more details in Section 4.1.

The last Brazilian mutual phenomena campaign of 2014–2015 obtained data from three telescopes spread on the South and South-East of Brazil, with apertures ranging between 28 and 60 cm. We obtained 47 light curves, 31 for occultations and 16 for eclipses, from 40 events observed between November 2014 and June 2015. In Table 1 we present the stations, observers and instrumental details of each station. It also contains the number of light curves obtained by each observatory. Moreover, we added the Minor Planet Centre (MPC) observatory code of the station (XXX for the station without a code).

In Table 2, we list the observational details of each observed event. It contains the date of the event and the satellites' pairs in the form " $S_1oS_2$ " for occultation and " $S_1eS_2$ " for eclipses, where 1 stands for Io, 2 for Europa, 3 for Ganymede and 4 for Callisto. We furnish the sites involved in each observation (using the alias defined in Table 1). For each event,

**Table 1**  
2014–2015 mutual phenomena campaign observer list.

City/Country	Longitude	Observers	Telescope	N° of positive detections
Station alias	Latitude		CCD	
MPC code	Height			
Itajubá/MG, Brazil	45° 34' 57" W	B. Morgado	60 cm	20
OPD	22° 32' 07" S	H. S. Gaspar	Andor/ IKon-L	
874	1.864 km	R. Sfair B. C. B. Camargo T. Santana L. A. Boldrin M. E. Huaman G. Benedetti-Rossi A. R. Gomes-Júnior		
Foz do Iguaçu/ PR, Brazil	54° 35' 37" W	D. I. Machado	28 cm	22
FOZ	25° 26' 05" S	L. L. Trabuco	SBIG/ST- 7X-ME	
X57	0.184 km			
Vitória/ES, Brazil	40° 19' 00" W	M. Malacarne	35 cm	5
GOA	20° 17' 52" S	J. O. Miranda	SBIG/ST- 8X-ME	
XXX	0.026 km			

we give the solar phase angle ( $i$ ) and the zenith distance ( $z$ ), both in degrees. In the last column, we list the instrumental albedos' ratio of the involved satellites (and its uncertainty), determined by using images before and after the event. This albedos' ratio is only needed for occultations.

In all observations we used a narrow band filter centred at 889 nm with a width of 15 nm. This bandpass is in the methane absorption region of the spectrum. We chose this filter because in this spectral region, Jupiter's albedo drops to 0.05 due to the absorption in the upper atmosphere (Karkoschka, 1994, 1998). Fig. 1 shows an example of an image obtained with the 0.6 m Zeiss telescope from OPD. This filter has been successfully used in the 2009 mutual phenomena campaign (Dias-Oliveira et al., 2013) and the mutual approximation campaigns started in 2014 (Morgado et al., 2016, 2019).

## 3. Light curve analysis

In mutual phenomena, one can determine relative positions between the satellites through the analysis of the events' light curves. In our procedure, we simulate theoretical light curves and use them to fit the observed ones.

The parameters of interest are: (i) the impact parameter ( $s_0$ ), the smallest apparent angular distance in the sky plane between both satellite's centres in the case of occultations or between the eclipsed satellite centre and the centre of the eclipsing shadow in the sky plane for eclipses, both cases in a topocentric frame; (ii) the central instant ( $t_0$ ), the instant of time that this smallest distance occurs; and (iii) the apparent relative velocity ( $v_0$ ) between both satellites in the sky plane.

In the supplementary material, we also provide the inter-satellite tangential coordinates ( $X$ ,  $Y$ ). For occultations, these coordinates between both satellites' centres are in a topocentric frame. For mutual eclipses, these coordinates are in a topocentric frame and the mean difference between the eclipsed satellite centre and the centre of the eclipsing satellite's shadow in the sky plane.

### 3.1. Obtaining the observed light-curves

Firstly all images were corrected by Bias and Flat-Field using standard

<sup>1</sup> Website: <http://nsdb.imcce.fr/multisat/nsszph515he.htm>.



**Table 2**  
Mutual events and observation conditions.

Date (yy-mm-dd)	Event ( $S_1 \times S_2$ )	Obs.	i ( $^\circ$ )	z ( $^\circ$ )	Ratio of Albedo
14-11-02	4o1	OPD	10.60	73.49	$3.56 \pm 0.03$
14-11-19	4o2	OPD	10.69	43.44	$3.59 \pm 0.02$
14-12-20	2o1	FOZ	8.63	50.72	$0.97 \pm 0.03$
14-12-21	4e1	FOZ	8.52	77.19	–
14-12-21	3o1	FOZ	8.52	65.78	$1.65 \pm 0.19$
14-12-24	2e3	FOZ	8.13	40.85	–
15-01-21	2e1	FOZ	3.45	46.09	–
15-02-02	3o2	FOZ	0.95	67.15	$1.53 \pm 0.09$
15-02-22	2o1	OPD	3.20	41.50	$0.99 \pm 0.04$
15-02-22	2e1	OPD	3.20	43.44	–
15-03-01	2o1	FOZ	4.57	57.20	$1.01 \pm 0.06$
15-03-01	2e1	FOZ	4.58	65.89	–
15-03-03	3o1	OPD	4.94	62.37	$1.56 \pm 0.03$
15-03-03	3o1	FOZ	4.94	58.30	$1.56 \pm 0.03$
15-03-06	1e2	OPD	5.46	43.08	–
15-03-09	3e2	OPD	6.14	44.04	–
15-03-13	1e2	FOZ	6.79	48.89	–
15-03-13	1e3	FOZ	6.66	60.76	–
15-03-16	4o2	FOZ	7.11	48.84	$3.58 \pm 0.03$
15-03-17	3e2	FOZ	7.27	58.36	–
15-03-18	2e1	GOA	7.54	41.46	–
15-03-24	3o4	OPD	8.22	45.53	$0.41 \pm 0.03$
15-03-24	3o4	FOZ	8.22	46.49	$0.41 \pm 0.03$
15-03-25	2o1	FOZ	8.47	46.28	$0.99 \pm 0.04$
15-03-25	2o1	GOA	8.47	42.75	$0.99 \pm 0.04$
15-03-26	2e1	OPD	8.48	52.32	–
15-04-02	2o1	OPD	9.25	62.96	$1.01 \pm 0.07$
15-04-02	2o1	FOZ	9.25	59.06	$1.01 \pm 0.07$
15-04-02	2e1	OPD	9.26	82.45	–
15-04-03	1o3	FOZ	9.43	46.38	$0.75 \pm 0.13$
15-04-06	1e2	FOZ	9.70	46.72	–
15-04-12	2e3	FOZ	10.09	65.99	–
15-04-14	1e2	OPD	10.22	69.43	–
15-04-17	4o1	OPD	10.43	54.20	$3.90 \pm 0.08$
15-04-17	4o1	GOA	10.43	55.82	$3.90 \pm 0.08$
15-04-18	4o3	OPD	10.48	44.23	$2.32 \pm 0.05$
15-04-18	1o3	OPD	10.44	72.62	$0.64 \pm 0.11$
15-04-25	1o3	OPD	10.73	58.34	$0.69 \pm 0.07$
15-04-25	1o3	FOZ	10.73	55.16	$0.63 \pm 0.07$
15-04-26	2o1	OPD	10.75	43.56	$1.04 \pm 0.15$
15-04-29	3o1	OPD	10.80	67.89	$1.60 \pm 0.06$
15-04-29	3o1	GOA	10.80	70.74	$1.60 \pm 0.06$
15-05-03	2o1	OPD	10.85	61.83	$0.96 \pm 0.07$
15-05-05	3o2	FOZ	10.85	47.24	$1.61 \pm 0.06$
15-05-13	3o2	OPD	10.77	86.09	$1.48 \pm 0.07$
15-06-04	2o1	FOZ	9.72	56.26	$1.01 \pm 0.05$
15-06-18	3o1	GOA	8.59	59.64	$1.58 \pm 0.04$
15-03-02	3e5	1.60	3.17	50.90	–

Note: The ratio of albedo is in the sense  $S_2/S_1$  for each event.



**Fig. 1.** Image of Jupiter, Io (J1), Europa (J2) and Callisto (J4) obtained with the 0.6 m diameter Zeiss telescope of the *Observatório Pico dos Dias*, equipped with a methane filter on 2014 November 19. The planet and the satellites present about the same brightness due to the use of the narrow-band filter, centred at  $\lambda_0 = 889$  nm with 15 nm width.

procedures with the Image Reduction and Analysis Facility (IRAF) (Butcher and Stevens, 1981). Then, we determined the light flux of the targets in the images by differential aperture photometry using the PRAIA package (Assafin et al., 2011). During an occultation, both satellites are measured together in the same aperture, and a third satellite is used as calibrator. In the case of eclipses, the eclipsed satellite is measured alone in the aperture and the eclipsing satellite (or any other) is used as calibrator. The light curve is then normalised by a polynomial fit so that the flux ratio outside the flux drop gets equal to 1.0, and the flux drop can be adequately evaluated.

During the photometry of mutual events, one must take care with the possibility of a parasitic flux, as pointed out by Emel'yanov (2017) and Arlot et al. (2017). The origin of this flux is likely to be the background (mostly Jupiter's scattered light) or the CCD detector. In our case, we attenuate this parasitic flux with the Methane filter and a rigorous calibration process. Tests showed that the parasitic flux in our images is one order of magnitude below the noise of our observations.

### 3.2. Simulating light curves

The procedures utilised here follow the same principles outlined in Assafin et al. (2009) and Dias-Oliveira et al. (2013). However, improvements were made in almost every step, as explained in sections 3.2.1, 3.2.2 and 3.3.

The parameters needed in the modelling of a mutual occultation or eclipse can be separated into two complementary types. The first refers to physical characteristics: sizes and shapes of each satellite, and the satellites' albedo for occultations. The second type relates to dynamics, and are the parameters of interest:  $s_0$ ,  $t_0$  and  $v_0$ .

Physical parameters such as radius and shape are known from space probes' data. Albedos are determined from auxiliary observations made before and after events with the same instrument setup. The apparent separation in the sky plane between both satellites can be written as a function of the time and the dynamical parameters using equation (1) (Assafin et al., 2009).

$$s(t) = \sqrt{s_0^2 + v_0^2(t - t_0)^2} \quad (1)$$

We also need a reflectance model to take into account the phase effect and how the surface of the satellite will reflect the sunlight. For eclipses, we further need some information about the Sun, such as its radius and a model to consider the Sun's limb darkening.

We could do simulations with triaxial bodies with varying albedo, but not for practical purposes, due to photometry limitations. Thus, satellites are considered as spheres with a known appropriate radius, and the albedo is uniform along the surface. The relative velocity between both satellites is constant during the mutual event (a few minutes only). For notation, the occulting/eclipsing is denoted  $Sat_1$  and  $Sat_2$  is the occulted/eclipsed one.

In the simulations of occultations and eclipses, we used the same geometric relations described in detail in Dias-Oliveira et al. (2013).

#### 3.2.1. Occultation

The first step in simulating a light curve of a mutual occultation is the production of a 2D satellite apparent profile, simulating how the body reflects the sunlight as seen by an observer on Earth. As pointed out by Vasundhara et al. (2017), it is essential to use a realistic intensity distribution for the satellite.

However, this approach demands previous knowledge about the satellite surface (albedo maps) that can change with time or even for different effective wavelengths, it is important to highlight that these maps are not known for the wavelength of our observations ( $\lambda_0 = 889$  nm). The same applies to the Hapke scattering law (Hapke, 1981, 1984; Hapke and Wells, 1981, 1986, 2002, 2008, 2012) used by Emel'yanov (2009), Arlot et al. (2014a) and Saquet et al. (2018), which requires unknown parameters in the wavelength band of our observations.

We successfully solved these issues by adopting a generalisation of Lambert scattering law given by Oren and Nayar (1994). The Oren-Nayar model takes into account the direction of radiance and the roughness of the surface in a natural way, so that the reflectance depends only of the albedo and in one more parameter that very smoothly tunes a wide range of surface roughness, and most importantly, regardless of the wavelength. This model realistically reproduces the illumination of an object in modern computer graphic scenes for movies and for the full Moon. (Oren and Nayar, 1994). In Dias-Oliveira et al. (2013) a simplified version of the model was used. Here, we implemented the complete version in Oren and Nayar (1994), taking into account the direct illumination and all inter-reflection components of the radiance.

The albedo ratio between the satellites is determined independently, by using observations right before and after the mutual event with the same instrument setup. In Dias-Oliveira et al. (2013), analytic expressions involving the terminator were used to take solar phase angle effects into account in the evaluation of the flux measurements of albedo observations. Here, following a more rigorous approach, we also simulated the 2D profiles of the satellites for these observations, to better determine the effective area and reflectance of the satellites to compute more accurate albedos.

In fact, first we measured the light fluxes between both satellites ( $F_1$ ,  $F_2$ ) separately using images right before or after the occultation. In the other hand, we compute the 2D profile of each satellites for the given instants and obtained the simulated light flux for each satellite ( $F_{S1}$ ,  $F_{S2}$ ), this simulations already take into consideration the size of the satellite and the phase angle. The ratio of albedo ( $A_1/A_2$ ) can be determined using Equation (2). We considered each satellite's albedo as uniform, due to the lack of information about albedo variations for the wavelength of our observations.

$$\frac{F_1}{F_2} = \frac{A_1 F_{s1}}{A_2 F_{s2}} \quad (2)$$

Similar to Dias-Oliveira et al. (2013) we discretise the satellite into a 2D profile with elements of a given spatial resolution. However, unlike Dias-Oliveira et al. (2013), we created 2D satellite profiles with much better spatial resolutions, 1 mas ( $\sim 3$  km), avoiding eventual round off errors in the simulated flux counts. The profiles were positioned for each instant of time ( $t$ ) using the separation between the satellites, overlapping the occulted satellite with the occulting one when necessary, obtaining a new combined 2D profile of both satellites. The light flux ( $F(t)$ ) was numerically integrated over the combined 2D profile for a given instant ( $t$ ). Then, this is repeated for every instant ( $t$ ) of the event to produce the simulated light curve. This simulated light curve was then normalised by the sums of individual fluxes ( $F_1 + F_2$ ). Fig. 2 shows a simulated light curve for the event when Europa occulted Io on February 22, 2015. The

black dots indicate seven instants for which the respective 2D profiles are displayed on each corresponding box. For this event the albedo ratio was 0.960, as determined before the event.

### 3.2.2. Eclipse

Following Dias-Oliveira et al. (2013), we developed a numerical 2D mask that incorporates the two regions of the eclipsing satellite's shadow, the umbra and the penumbra. This mask was then applied to the 2D profile of the eclipsed satellite, considering the separation between both satellites as seen from the heliocentre. Once again, the spatial resolution was set as 1 mas ( $\sim 3$  km).

For the penumbra region, the fraction of sunlight that reaches the eclipsed satellite was computed by using a numerical method. The solar limb darkening was taken into account by using Hestroffer and Magnan (1998) empirical law, with parameters set for the 889 nm spectral region.

The light flux was numerically integrated for a given instant by using the profile after the mask was applied ( $F(t)$ ). Then the light curve was normalised using the Light flux of the eclipsed satellite ( $F_2$ ). Fig. 3 is a simulated light curve for the event when Europa eclipsed Ganymede on April 12, 2015. The black dots represent seven instants for which the respective 2D profiles are displayed.

### 3.3. Fitting procedure

We took a somewhat different approach from that in Dias-Oliveira et al. (2013). Here, the parameters of interest were determined by the minimisation of the Chi-square test, Eq. (3), where the simulated light curve is compared with the observed one.

$$\chi^2(N - P) = \sum \frac{(LC_{obs} - LC_{model})^2}{\sigma^2} \quad (3)$$

$N$  is the number of observations used in the process, and  $P$  is the number of parameters fitted ( $P = 3$ ).  $\sigma$  is the light curve's standard deviation outside the event (the noise). The parameters ( $s_0, t_0$  and  $v_0$ ) for which the chi-square is minimum ( $\chi^2 = \chi_{min}^2$ ) were set as the solution for the observations. The normalised  $\chi^2$  is expected to be around 1 for good fittings.

Initially, a large range of parameter values was tested, then the ranges were narrowed as the iterative process proceeded. For computing speed, the spatial resolution was degraded in the first steps and then is set to the nominal value of 1 mas as we approached the  $\chi^2$  minimum.

The uncertainty of each parameter ( $1\sigma$  error bar) was determined by changing that parameter from its nominal solution value, so that  $\chi^2$  changes from  $\chi_{min}^2$  to  $\chi_{min}^2 + 1$ . This procedure is repeated for each parameter:  $t_0$ ,  $s_0$  and  $v_0$ .

The procedures described in Section 3 were developed as a PYTHON

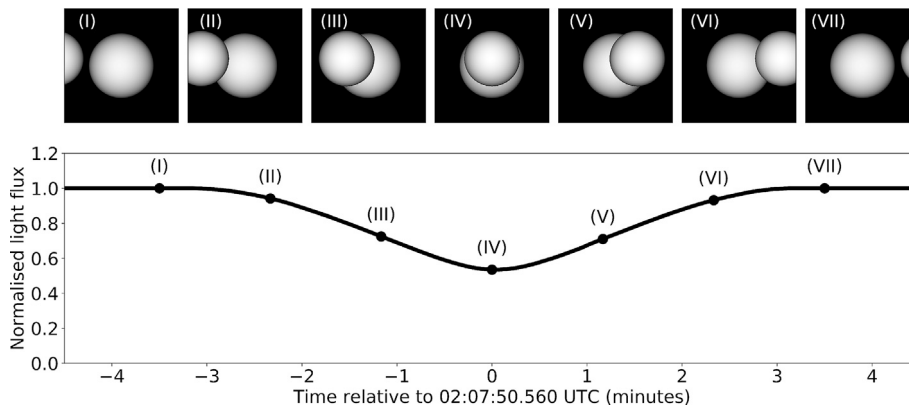


Fig. 2. Occultation simulation. Io was occulted by Europa on February 22, 2015, at 02:07 UTC as seen at OPD. The bottom panel shows the simulated light curve and seven instants (black dots) were highlighted. The 2D profiles for each instant are displayed in the top panel. The albedo ratio was 0.960, as determined before the event. The profile resolution is 1 mas ( $\sim 3.2$  km).

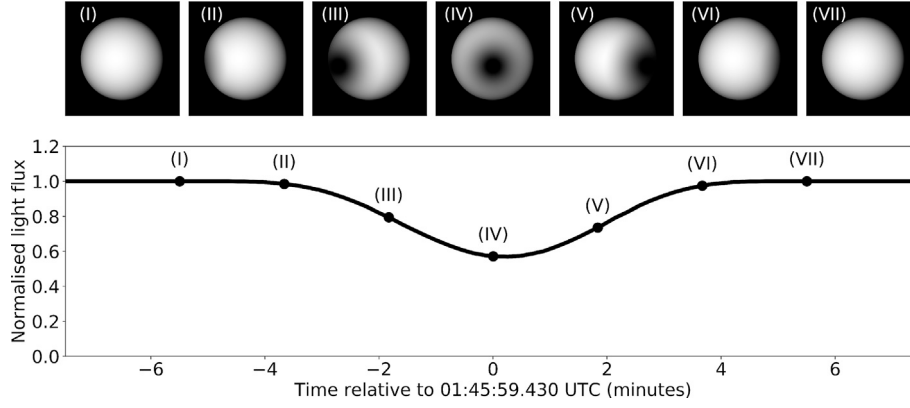


Fig. 3. Eclipse simulation. Ganymede was eclipsed by Europa on April 12, 2015 at 01:46 UTC as seen at FOZ. The bottom panel shows the simulated light curve and seven instants (black dots) were highlighted. The 2D profiles for each instant are displayed in the top panel. The profile resolution was 1 mas ( $\sim 3.6$  km).

software that analyses and fits observed light curves. This software uses functions from NUMPY, ASTROPY (Robitaille et al., 2013), SCIPY and MATPLOTLIB libraries.

#### 4. Results of the mutual phenomena campaigns

##### 4.1. Re-analysis of the mutual phenomena between the Galilean moons - 2009

From April to October of 2009, 25 light curves for 25 mutual events between the Galilean moons, 13 occultations and 12 eclipses, were observed by our group with the 60 cm Zeiss telescope of the *Observatório Pico dos Dias* (OPD) using the methane filter. These events were analysed by Dias-Oliveira et al. (2013) and by Arlot et al. (2014a). However, the results obtained by both presented a significant difference (higher than  $3\sigma$ ).

More recently, Morgado et al. (2016) analysed 5 mutual

approximations that were auxiliary observations designed for albedo determinations made immediately before and after mutual occultations from the 2009 campaign. The mutual approximation technique is based on the same geometrical parameters that describe a mutual occultation (Morgado et al., 2016, 2019). From the measurements of the separation between both satellites, this technique allows for determining the time of maximum apparent approach between these satellites, which can be directly compared with the central instant from the occultation. The results obtained with this independent technique agree within the errors with the results obtained by Arlot et al. (2014a).

The discrepancy of the results between Dias-Oliveira et al. (2013) and Arlot et al. (2014a), the agreement between the later with Morgado et al. (2016) for 5 events, and the significant improvements in our light curve fitting procedure motivated us to re-analyse our 2009 campaign data.

Here, we present our updated results for the 2009 events in Table 3. Table 3 is organised as follows: the date of the event and the satellites' pairs in the form " $S_1oS_2$ " for occultation and " $S_1eS_2$ " for eclipses, where 1

Table 3  
Updated results of the 2009 mutual phenomena campaign observed in Brazil.

Date	Event	Obs.	$t_0 \pm \sigma_{t_0}$ (UTC)	$\Delta t_0$	$s_0 \pm \sigma_{s_0}$	$\Delta s_0$	$v_0 \pm \sigma_{v_0}$	$\Delta v_0$	rms	N	$\chi^2$
(yy-mm-dd)	( $S_1xS_2$ )		(hh:mm:ss.s $\pm$ s.s)	(mas)	(mas)	(mas)	(mas/s)	(mas/s)			
09-04-27	3o1	OPD	06:42:53.5 $\pm$ 0.6	-00.8	121.0 $\pm$ 20.0	-09.2	6.26 $\pm$ 0.02	-0.01	0.010	0801	1.005
09-05-09	2o1	OPD	07:21:54.9 $\pm$ 0.7	+01.5	538.0 $\pm$ 14.3	-02.3	7.50 $\pm$ 0.03	-0.03	0.010	0580	1.007
09-05-21	1o2	OPD	05:29:44.3 $\pm$ 0.7	-00.2	033.6 $\pm$ 21.1	+26.5	6.36 $\pm$ 0.06	-0.00	0.014	0869	1.005
09-05-28	1o2	OPD	07:44:17.6 $\pm$ 0.4	+00.0	219.1 $\pm$ 17.5	+47.0	6.26 $\pm$ 0.03	-0.01	0.007	0801	1.005
09-06-10	3e4	OPD	07:29:37.4 $\pm$ 1.2	+14.2	315.0 $\pm$ 17.9	+22.8	3.96 $\pm$ 0.03	+0.01	0.009	1285	1.003
09-06-16	3e1	OPD	08:45:10.5 $\pm$ 1.2	-25.6	928.4 $\pm$ 13.3	+19.8	1.52 $\pm$ 0.01	-0.00	0.008	2697	1.001
09-06-19	4e2	OPD	05:11:36.3 $\pm$ 0.2	+25.1	489.1 $\pm$ 13.1	+02.7	5.06 $\pm$ 0.01	+0.02	0.007	0901	1.004
09-06-19	4e1	OPD	08:32:49.4 $\pm$ 1.0	+15.6	930.1 $\pm$ 13.5	+05.9	5.29 $\pm$ 0.05	+0.02	0.006	1201	1.003
09-06-20	4e1	OPD	05:09:45.8 $\pm$ 1.3	-22.6	530.5 $\pm$ 12.8	+01.5	1.26 $\pm$ 0.01	-0.01	0.006	2326	1.002
09-06-20	4e1	OPD	09:37:28.5 $\pm$ 1.3	+31.6	412.3 $\pm$ 18.5	-08.4	1.39 $\pm$ 0.01	+0.00	0.013	1704	1.002
09-06-22	1o2	OPD	03:27:54.8 $\pm$ 1.6	+12.0	576.1 $\pm$ 14.0	+23.7	5.78 $\pm$ 0.03	-0.03	0.010	0905	1.004
09-06-29	1o2	OPD	05:38:28.7 $\pm$ 0.8	+00.5	606.4 $\pm$ 13.3	+10.0	5.51 $\pm$ 0.02	-0.01	0.004	0801	1.005
09-07-04	1e3	OPD	06:25:13.5 $\pm$ 0.5	-12.7	395.5 $\pm$ 16.3	-19.8	7.27 $\pm$ 0.04	+0.02	0.008	1641	1.002
09-07-06	1e2	OPD	06:17:16.1 $\pm$ 1.8	+06.2	718.5 $\pm$ 14.2	-12.2	4.79 $\pm$ 0.12	+0.02	0.006	2001	1.002
09-07-06	1o2	OPD	07:48:34.5 $\pm$ 0.5	+17.4	603.5 $\pm$ 12.9	-05.5	5.34 $\pm$ 0.01	-0.03	0.005	1004	1.004
09-07-08	3e1	OPD	08:31:14.5 $\pm$ 0.2	+30.1	223.9 $\pm$ 14.7	-07.2	5.96 $\pm$ 0.01	+0.02	0.007	1758	1.002
09-07-13	1e2	OPD	08:38:46.3 $\pm$ 1.7	+10.3	623.4 $\pm$ 15.3	-08.0	4.46 $\pm$ 0.11	+0.02	0.012	2001	1.002
09-08-07	1e2	OPD	05:14:54.9 $\pm$ 1.3	+12.4	444.6 $\pm$ 15.1	+34.8	3.09 $\pm$ 0.03	+0.01	0.021	1775	1.002
09-08-07	1o2	OPD	05:37:48.4 $\pm$ 0.8	-08.8	283.1 $\pm$ 20.3	-18.7	3.77 $\pm$ 0.01	-0.01	0.008	1664	1.002
09-08-12	3o2	OPD	02:10:59.1 $\pm$ 3.9	+01.0	1059.1 $\pm$ 13.1	-24.7	2.71 $\pm$ 0.02	-0.01	0.004	1296	1.003
09-08-22	1o2	OPD	04:07:54.9 $\pm$ 2.2	+16.1	674.5 $\pm$ 12.9	+11.2	1.80 $\pm$ 0.01	+0.00	0.004	2454	1.002
09-09-16	1o2	OPD	00:46:04.4 $\pm$ 0.7	-12.6	580.4 $\pm$ 15.0	+06.5	3.71 $\pm$ 0.02	+0.00	0.011	0976	1.004
09-09-16	1e2	OPD	02:15:11.0 $\pm$ 0.4	+04.0	172.4 $\pm$ 12.9	+00.8	3.53 $\pm$ 0.02	+0.02	0.007	1095	1.004
09-10-24	3o2	OPD	00:35:33.9 $\pm$ 1.5	+00.8	629.1 $\pm$ 13.6	-48.8	4.17 $\pm$ 0.02	-0.01	0.008	1032	1.004
09-10-25	1o2	OPD	01:21:30.8 $\pm$ 3.9	+01.0	580.6 $\pm$ 17.5	+08.5	5.35 $\pm$ 0.07	-0.01	0.014	0252	1.016

Note: The results for the mutual phenomena campaign of 2009.  $t_0$  stand for the UTC central instant,  $s_0$  is the impact parameter and  $v_0$  is the apparent relative velocity in the sky plane. Also contains the uncertainty in each parameter ( $\sigma_{t_0}$ ,  $\sigma_{s_0}$  and  $\sigma_{v_0}$ ) and the difference between the fitted ones and the ones expected from the ephemeris *jup310* and DE435 ( $\Delta t_0$ ,  $\Delta s_0$  and  $\Delta v_0$ ). In the last columns, we have the rms between the observed light fluxes and the fitted ones, the number of images utilised ( $N$ ) and the normalised  $\chi^2$  of our fit.

Table 4

Comparison of the updated results for the 2009 mutual events with Arlot et al. (2014a), Dias-Oliveira et al. (2013) e Morgado et al. (2016).

Date (yy-mm-dd)	Event (S <sub>1</sub> xS <sub>2</sub> )	Obs.	Central instant (t <sub>0</sub> )			Impact parameter (s <sub>0</sub> )		
			[2] - [1]	[3] - [1]	[4] - [1]	[2] - [1]	[3] - [1]	[4] - [1]
09-04-27	3o1	OPD	-0.65	-7.15	-	+0.15	-0.74	-
09-05-09	2o1	OPD	+0.78	-2.34	-0.12	+0.23	+0.97	-
09-05-21	1o2	OPD	+0.28	-4.94	-	+3.30	+1.05	-
09-05-28	1o2	OPD	+0.98	-9.24	+0.57	-0.00	-2.36	-
09-06-10	3e4	OPD	+0.13	+1.54	-	+0.13	+1.56	-
09-06-16	3e1	OPD	+0.99	-1.99	-	-0.12	+8.81	-
09-06-19	4e2	OPD	-1.87	+0.99	-	+0.03	+4.45	-
09-06-19	4e1	OPD	-0.83	+0.62	-	+0.04	+8.26	-
09-06-20	4e1	OPD	-0.70	+1.14	-	+0.08	-4.27	-
09-06-20	4e1	OPD	-0.03	-2.85	-	-0.13	+9.77	-
09-06-22	1o2	OPD	+0.27	-2.18	-0.07	+0.16	-0.79	-
09-06-29	1o2	OPD	+0.31	-5.30	-	+0.07	-0.86	-
09-07-04	1e3	OPD	-0.03	+1.17	-	-0.26	+4.57	-
09-07-06	1o2	OPD	-0.13	+0.25	-0.30	+0.14	+5.74	-
09-07-06	1e2	OPD	+0.50	-4.89	-	+0.09	-0.01	-
09-07-08	3e1	OPD	-0.61	+1.33	-	-0.04	+1.84	-
09-07-13	1e2	OPD	-0.31	+0.22	-	+0.18	+8.36	-
09-08-07	1o2	OPD	-0.22	+0.29	+0.44	+0.32	+7.38	-
09-08-07	1e2	OPD	-0.34	-1.71	-	-0.09	-0.17	-
09-08-12	3o2	OPD	+0.83	+0.60	-	-0.12	+0.50	-
09-08-22	1o2	OPD	+0.31	+0.29	-	+0.07	-0.99	-
09-09-16	1e2	OPD	-0.64	+3.52	-	-0.23	-1.43	-
09-09-16	1o2	OPD	+0.51	-0.43	-	-0.22	+1.02	-
09-10-24	3o2	OPD	-0.25	+14.15	-	-0.26	+2.78	-
09-10-25	1o2	OPD	+0.62	+1.56	-	+0.23	-0.98	-
Mean			-0.00	-0.61	+0.10	+0.15	+2.18	-
Standard deviation			0.67	4.34	0.34	0.67	3.91	-

Note: [1] This project, [2] Arlot et al. (2014a), [3] Dias-Oliveira et al. (2013), [4] Morgado et al. (2016). Comparison between the different reduction process divided by the uncertainty of each parameter.

stands for Io, 2 for Europa, 3 for Ganymede and 4 for Callisto. We furnish the sites involved in each observation (using the alias defined in Table 1). For each event, we give the obtained central instant (t<sub>0</sub>) and its uncertainty (σ<sub>t0</sub>) in seconds of time, and the ephemeris offset (Δt<sub>0</sub>) in mas; the impact parameter (s<sub>0</sub>), its uncertainty (σ<sub>s0</sub>) and its offset (Δs<sub>0</sub>) in mas; and the relative velocity (v<sub>0</sub>), its uncertainty (σ<sub>v0</sub>) and its offset (Δv<sub>0</sub>) in mas per second. All times are UTC. In the last columns, we have the rms between the observed light fluxes and the fitted ones, the number of images utilised (N) and the normalised χ<sup>2</sup> of our fit.

The corresponding inter-satellite tangential coordinates (X and Y) in the sense occulting/eclipsing satellite minus occulted/eclipsed satellite for the central instant can be found in the supplementary material, such form is the same presented by Emelyanov and Gilbert (2006); Emelyanov (2009); Arlot et al. (2014a); Saquet et al. (2018). The plots of the re-fitted light curves are available as online material in the supplementary material. The simulated and observed ASCII light curve files are freely available in electronic form at the NSDB.<sup>2</sup>

The re-analysis resulted in a mean uncertainty of 15.3 mas (~ 46 km) for the impact parameter and 4.9 mas (~ 15 km) for the central instant. In Table 4, we compare the updated results with the ones from Arlot et al. (2014a), Dias-Oliveira et al. (2013) and Morgado et al. (2016). The error of each parameter normalises the differences. If the value is less than one, both results agree within 1σ. At the bottom, we have the mean difference and the standard deviation for each parameter.

The updated results now agree with those by Arlot et al. (2014a) and Morgado et al. (2016) within 1σ. We have a rms of 9.9 mas (~ 30 km) and 14.8 mas (~ 45 km) in comparison with the JPL's<sup>3</sup> and the IMCCE's<sup>4</sup> ephemeris.

<sup>2</sup> Website: <http://nsdb.imcce.fr/nsdb/home.html>.

<sup>3</sup> The JPL ephemeris utilised was *jup310* and DE435.

<sup>4</sup> The IMCCE ephemeris utilised was NOE-5-2010-GAL and DE435.

#### 4.2. Mutual phenomena between the Galilean moons - 2014–2015

Here we present the results concerning the latest campaign. We obtained new 47 light curves, 31 occultations and 16 eclipses, from 40 events observed by 3 stations in the South and South-East of Brazil.

An example is the event where Europa occulted Io on February 22, 2015. The observed light curve is illustrated in Fig. 4. In the upper panel, the black dots are the light flux observed and the red line the model fitted. The bottom panel contains the residuals in the sense observation minus model. For this event, the offset for the central instant was +6.5

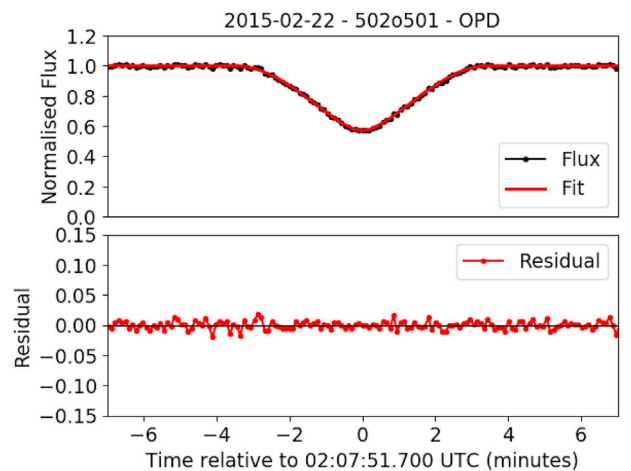


Fig. 4. Light curve of the event where Io was occulted by Europa on February 22, 2015, observed with the 0.60 m telescope at OPD. The measured normalised flux is denoted by black dots and the fitted model represented by the red line. In the bottom panel, the red dots are the residuals of the fitting in the sense observation minus fit. (For interpretation of the references to colour in this figure legend, the reader is referred to the Web version of this article.)

mas ( $\sim 21$  km) and for the impact parameter  $-0.8$  mas ( $\sim 3$  km). The offsets regard to the JPL's *jup310* and the DE435 ephemeris.

A second example is the case when Europa eclipsed Ganymede on April 12, 2015. The observed light curve is illustrated in Fig. 5. For this event, the offset for the central instant was  $+13.6$  mas ( $\sim 49$  km), and for the impact parameter  $+9.6$  mas ( $\sim 35$  km).

The multiple coverage observational strategy reduced the number of events lost by overcast weather or instrumental issues. An example was the Io occultation by Ganymede on March 03, 2015, OPD and FOZ observed this event. Also, two other stations in the USA observed this event, one in Arnold (AAC) and another in Scottsdale (SCO). These observations were made in the context of the international mutual phenomena campaign PHEMU15, (Saquet et al., 2018; Emel'yanov, 2017). Both light curves are available at the NSDB. In Fig. 6 we compare our light curves (OPD and FOZ) with the ones analysed by Saquet et al. (2018) (AAC and SCO). The central instant obtained by the observations agrees within  $2\sigma$ . Notice that all curves present similar features and we highlight the small residual in our light curves.

The results for these events are presented in Table 5. Table 5 is organised as follows: the date of the event and the satellites' pairs in the form " $S_1oS_2$ " for occultation and " $S_1eS_2$ " for eclipses, where 1 stands for Io, 2 for Europa, 3 for Ganymede and 4 for Callisto. We furnish the sites involved in each observation (using the alias defined in Table 1). For each event, we give the obtained central instant ( $t_0$ ) and its uncertainty ( $\sigma_{t_0}$ ) in seconds of time, and the ephemeris offset ( $\Delta t_0$ ) in mas; the impact parameter ( $s_0$ ), its uncertainty ( $\sigma_{s_0}$ ) and the offset ( $\Delta s_0$ ) in mas; and the relative velocity ( $v_0$ ), its uncertainty ( $\sigma_{v_0}$ ) and the offset ( $\Delta v_0$ ) in mas per second. All times are UTC. In the last columns, we have the rms between the observational curves and the fitted ones, the number of images utilised ( $N$ ) and the normalised  $\chi^2$  of our fit.

The corresponding inter-satellite tangential coordinates ( $X$  and  $Y$ ) in the sense occulting/eclipsing satellite minus occulted/eclipsed satellite for the central instant can be found in the supplementary material, such formalism is the same presented by Emel'yanov and Gilbert (2006); Emel'yanov (2009); Arlot et al. (2014a); Saquet et al. (2018). The plots of the fitted light curves are available as online material in the supplementary material. The simulated and observed light curve ASCII files are freely available in electronic form at the NSDB.

The mean uncertainty of our results is  $14.8$  mas ( $\sim 45$  km) for the impact parameter and  $7.5$  mas ( $\sim 23$  km) for the central instant. The rms relative to JPL ephemeris was  $9.2$  mas ( $\sim 28$  km) and  $13.5$  mas ( $\sim 40$  km) relative to IMCCE ephemeris.

From the 2014–2015 events, 10 were also analysed using a different procedure and published by Saquet et al. (2018). In average, the comparison between this procedure and ours agrees within  $1\sigma$ .

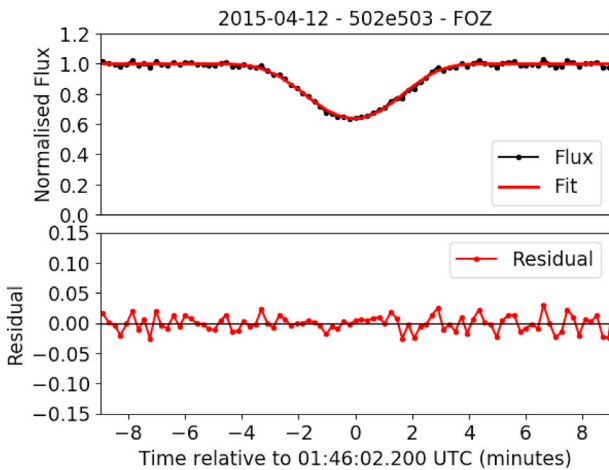


Fig. 5. Light curve of the event when Ganymede was eclipsed by Europa on April 12, 2015, observed with the 0.28 m telescope at FOZ.

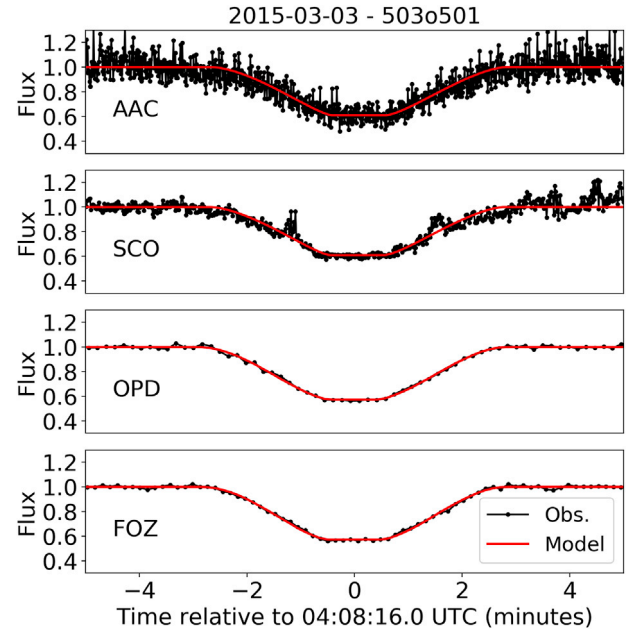


Fig. 6. Light curves of the event where Io was occulted by Ganymede on March 03, 2015, observed at AAC, SCO, OPD and FOZ, respectively. The AAC and SCO light curves were reduced and analysed by Saquet et al. (2018).

#### 4.3. Amalthea eclipsed by Ganymede - 02 March 2015

One particular event in our 2014–2015 observational campaign was the eclipse of Amalthea by Ganymede. The astrometry of this inner satellite is not easy to be done due to its proximity to Jupiter (major semi-axis equal to 2.54 Jupiter's radius). Often, coronagraphy techniques are needed to separate this object from Jupiter's scattered light (Kulyk et al., 2002; Veiga and Vieira Martins, 2005; Robert et al., 2017). The positional uncertainty of classical astrometry for this satellite is in the 120 mas level ( $\sim 360$  km).

The observation of mutual eclipses involving Galilean moons and inner satellite was strongly advocated by Vachier et al. (2002). The first registration of this kind of event was given by Christou et al. (2010), regarding three eclipses of Amalthea observed during the 2009 mutual phenomena campaign. More recently, Saquet et al. (2016) also analysed three more eclipses of Amalthea and the first observation of an eclipse of Thebe during the 2014–2015 campaign.

Here we present the results of one eclipse of Amalthea by Ganymede observed on March, 2 of 2015 at the 1.6 m Perkin-Elmer telescope of the *Observatório Pico dos Dias* (OPD, MPC code: 874). This observation was made using the iKon-L CCD camera with the narrow Methane filter.<sup>5</sup>

After correcting by Bias and Flat-Field using the same procedure described above, we applied a digital coronagraphy technique to reduce the influence of Jupiter brightness in the images, this coronagraphy was done using the PRAIA package (Assafin et al., 2008, 2009). Briefly, the procedure is as follows. The centroid of the bright object is iteratively determined. Concentric rings with radius  $R$  are formed for each image pixel at a distance  $R$  to the centroid. Quartile statistics of weighted fluxes inside each ring are performed, and for each image pixel an average count is assigned. The result is an improved profile with cleaner pixel counts that better represent the bright object. The profile is then subtracted from the original image, resulting in the final coronagraphed (science) image, see Fig. 7.

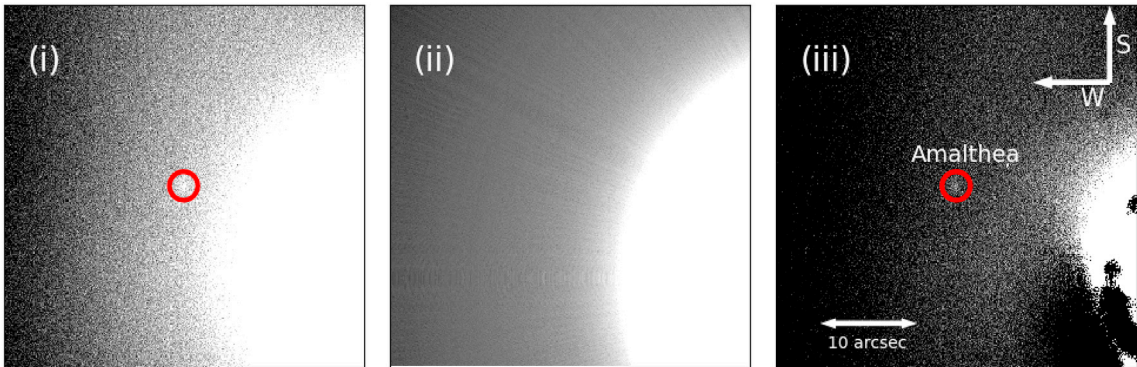
Aperture photometry was done using the PRAIA package, where the size of the aperture was manually determined to maximise the signal to

<sup>5</sup> Centred at 889 nm with a width of 15 nm.

**Table 5**  
Results of the 2014–2015 mutual phenomena campaign observed in Brazil.

Date (yy-mm-dd)	Event ( $S_1 \times S_2$ )	Obs.	$t_0 \pm \sigma_{t_0}$ (UTC) (hh:mm:ss.s $\pm$ s.s)	$\Delta t_0$ (mas)	$s_0 \pm \sigma_{s_0}$ (mas)	$\Delta s_0$ (mas)	$v_0 \pm \sigma_{v_0}$ (mas/s)	$\Delta v_0$ (mas/s)	rms	N	$\chi^2$
14-11-02	4o1	OPD	06:02:14.8 $\pm$ 1.9	-07.2	288.0 $\pm$ 18.6	-05.0	1.83 $\pm$ 0.03	+0.00	0.041	230	1.018
14-11-19	4o2	OPD	07:37:43.9 $\pm$ 0.2	+00.7	301.3 $\pm$ 6.0	+00.2	5.04 $\pm$ 0.03	+0.01	0.010	194	1.021
14-12-20	2o1	FOZ	05:41:38.7 $\pm$ 0.8	-03.0	162.4 $\pm$ 8.5	-17.5	1.62 $\pm$ 0.02	-0.00	0.008	376	1.011
14-12-21	4e1	FOZ	03:22:39.2 $\pm$ 1.5	+00.1	253.3 $\pm$ 9.0	+26.2	2.58 $\pm$ 0.02	+0.00	0.018	281	1.014
14-12-21	3o1	FOZ	04:17:20.7 $\pm$ 3.2	-00.8	455.1 $\pm$ 16.1	+14.0	3.66 $\pm$ 0.03	-0.01	0.151	244	1.017
14-12-24	2e3	FOZ	06:35:06.5 $\pm$ 1.1	-00.8	255.2 $\pm$ 8.8	+09.5	1.93 $\pm$ 0.02	+0.00	0.014	359	1.011
15-01-21	2e1	FOZ	03:52:29.3 $\pm$ 1.0	+00.8	457.5 $\pm$ 3.8	+12.8	3.08 $\pm$ 0.04	+0.00	0.008	141	1.029
15-02-02	3o2	FOZ	07:56:42.3 $\pm$ 1.9	-02.3	85.0 $\pm$ 27.4	+08.0	7.78 $\pm$ 0.05	-0.01	0.022	110	1.038
15-02-22	2o1	OPD	02:07:51.7 $\pm$ 0.2	+06.5	125.0 $\pm$ 12.9	-00.8	5.55 $\pm$ 0.03	-0.02	0.007	201	1.020
15-02-22	2e1	OPD	02:45:11.0 $\pm$ 0.3	+04.1	17.0 $\pm$ 9.6	+07.5	4.62 $\pm$ 0.03	+0.02	0.013	186	1.022
15-03-01	2o1	FOZ	04:12:38.3 $\pm$ 0.7	-00.7	17.6 $\pm$ 10.5	+16.8	5.73 $\pm$ 0.04	-0.01	0.012	131	1.031
15-03-01	2e1	FOZ	05:05:06.7 $\pm$ 2.4	+06.6	94.6 $\pm$ 33.3	-06.8	4.94 $\pm$ 0.04	+0.00	0.059	132	1.031
15-03-03	3o1	OPD	04:08:16.3 $\pm$ 0.5	+00.3	95.0 $\pm$ 14.4	+32.3	8.53 $\pm$ 0.05	-0.03	0.010	100	1.042
15-03-03	3o1	FOZ	04:08:15.5 $\pm$ 0.6	-07.0	86.8 $\pm$ 10.8	+23.7	8.50 $\pm$ 0.05	-0.02	0.010	107	1.039
15-03-06	1e2	OPD	01:16:16.6 $\pm$ 0.4	+09.4	570.9 $\pm$ 4.0	+06.2	7.50 $\pm$ 0.04	+0.04	0.005	124	1.033
15-03-09	3e2	OPD	23:39:32.6 $\pm$ 0.3	+08.1	67.7 $\pm$ 7.2	+02.6	5.87 $\pm$ 0.03	+0.03	0.012	213	1.019
15-03-13	1e2	FOZ	03:29:09.9 $\pm$ 1.1	+10.8	445.2 $\pm$ 20.0	+03.7	7.42 $\pm$ 0.03	+0.03	0.020	198	1.021
15-03-13	1e3	FOZ	23:29:44.5 $\pm$ 1.3	+04.0	236.3 $\pm$ 4.4	+08.5	1.56 $\pm$ 0.02	-0.00	0.015	408	1.010
15-03-16	4o2	FOZ	01:38:58.1 $\pm$ 0.3	-00.5	373.0 $\pm$ 6.3	+02.0	3.59 $\pm$ 0.03	-0.00	0.013	246	1.017
15-03-17	3e2	FOZ	02:53:15.2 $\pm$ 0.2	+08.2	225.4 $\pm$ 14.4	-03.1	5.77 $\pm$ 0.03	+0.02	0.012	234	1.017
15-03-18	2e1	GOA	22:50:43.6 $\pm$ 1.9	+06.1	398.2 $\pm$ 25.2	-02.7	5.55 $\pm$ 0.02	+0.02	0.058	288	1.014
15-03-24	3o4	OPD	00:14:41.4 $\pm$ 0.9	-38.1	499.0 $\pm$ 13.9	-16.0	5.39 $\pm$ 0.03	-0.01	0.006	182	1.022
15-03-24	3o4	FOZ	00:14:41.6 $\pm$ 0.8	-37.5	519.1 $\pm$ 9.9	+03.5	5.38 $\pm$ 0.03	-0.01	0.008	207	1.020
15-03-25	2o1	FOZ	23:35:01.6 $\pm$ 1.1	+00.8	400.2 $\pm$ 13.2	+01.7	6.34 $\pm$ 0.06	-0.02	0.011	083	1.051
15-03-25	2o1	GOA	23:35:01.3 $\pm$ 0.7	-01.5	398.9 $\pm$ 6.6	+00.7	6.40 $\pm$ 0.05	-0.04	0.006	092	1.045
15-03-26	2e1	OPD	01:07:48.0 $\pm$ 5.3	+10.3	516.7 $\pm$ 44.7	-12.2	5.78 $\pm$ 0.04	+0.02	0.048	151	1.027
15-04-02	2o1	OPD	01:43:55.9 $\pm$ 0.7	+00.0	479.5 $\pm$ 5.7	-00.5	6.46 $\pm$ 0.06	-0.02	0.005	082	1.051
15-04-02	2o1	FOZ	01:43:55.6 $\pm$ 1.3	-02.3	482.3 $\pm$ 15.0	+02.5	6.50 $\pm$ 0.05	-0.03	0.011	104	1.040
15-04-02	2e1	OPD	03:24:16.8 $\pm$ 3.1	+07.8	658.7 $\pm$ 19.1	-02.1	6.02 $\pm$ 0.04	+0.01	0.018	129	1.032
15-04-03	1o3	FOZ	22:58:19.0 $\pm$ 5.9	+05.7	737.3 $\pm$ 6.0	-05.5	1.23 $\pm$ 0.02	+0.01	0.021	383	1.011
15-04-06	1e2	FOZ	23:16:40.4 $\pm$ 0.2	+11.3	54.2 $\pm$ 10.8	+04.2	6.96 $\pm$ 0.04	+0.02	0.007	152	1.027
15-04-12	2e3	FOZ	01:46:02.2 $\pm$ 1.0	+13.6	142.6 $\pm$ 8.3	+09.6	4.96 $\pm$ 0.04	+0.00	0.013	121	1.034
15-04-14	1e2	OPD	01:30:58.3 $\pm$ 0.4	+10.4	49.4 $\pm$ 8.5	-01.5	6.83 $\pm$ 0.05	+0.01	0.024	093	1.045
15-04-17	4o1	OPD	23:47:06.9 $\pm$ 0.9	-01.3	711.5 $\pm$ 4.5	+01.8	5.05 $\pm$ 0.05	-0.01	0.007	101	1.041
15-04-17	4o1	GOA	23:47:06.9 $\pm$ 0.9	-01.0	712.1 $\pm$ 5.1	+02.7	5.06 $\pm$ 0.04	-0.02	0.010	128	1.032
15-04-18	4o3	OPD	01:32:30.4 $\pm$ 0.9	-02.3	69.5 $\pm$ 15.1	+06.8	5.02 $\pm$ 0.03	-0.00	0.021	161	1.025
15-04-18	1o3	OPD	20:54:45.6 $\pm$ 3.7	-02.0	699.4 $\pm$ 33.0	+03.3	5.50 $\pm$ 0.04	+0.01	0.047	119	1.035
15-04-25	1o3	OPD	23:45:28.1 $\pm$ 1.3	+00.5	679.2 $\pm$ 7.5	-02.3	6.05 $\pm$ 0.05	-0.02	0.007	100	1.042
15-04-25	1o3	FOZ	23:45:26.7 $\pm$ 3.3	-08.0	685.0 $\pm$ 28.8	+03.8	5.95 $\pm$ 0.04	+0.01	0.014	133	1.031
15-04-26	2o1	OPD	21:25:00.0 $\pm$ 3.4	+01.8	584.6 $\pm$ 27.6	+00.5	7.08 $\pm$ 0.08	-0.07	0.029	064	1.067
15-04-29	3o1	OPD	00:29:06.9 $\pm$ 1.2	-15.6	661.3 $\pm$ 19.2	-04.0	6.92 $\pm$ 0.06	-0.01	0.009	087	1.048
15-04-29	3o1	GOA	00:29:07.6 $\pm$ 2.4	-10.5	663.8 $\pm$ 22.2	-01.7	7.00 $\pm$ 0.05	-0.04	0.026	095	1.044
15-05-03	2o1	OPD	23:39:19.6 .. 2.2	-08.1	571.1 $\pm$ 25.6	+11.5	6.83 $\pm$ 0.08	-0.04	0.033	063	1.068
15-05-05	3o2	FOZ	21:54:22.0 $\pm$ 2.4	+00.3	780.5 $\pm$ 21.9	-01.7	5.30 $\pm$ 0.04	-0.01	0.010	117	1.035
15-05-13	3o2	OPD	01:13:50.0 $\pm$ 3.0	+06.5	593.2 $\pm$ 27.1	+03.5	5.04 .. 0.04	-0.01	0.038	137	1.030
15-06-04	2o1	FOZ	21:55:27.9 .. 0.2	-01.8	160.8 $\pm$ 6.3	-06.8	6.89 $\pm$ 0.05	-0.02	0.009	094	1.044
15-06-18	3o1	GOA	21:01:51.0 $\pm$ 1.1	+01.0	237.6 $\pm$ 18.6	+10.7	3.82 $\pm$ 0.03	-0.02	0.017	215	1.019
15-03-02	3e5	1.60	23:17:06.0 $\pm$ 2.3	-22.5	391.3 $\pm$ 76.3	+20.9	8.44 $\pm$ 0.53	-0.09	0.101	060	1.080

Note: Similar as the note in Table 3 for the mutual phenomena campaign of the 2014–2015.



**Fig. 7.** Digital coronagraphy on an image containing part of Jupiter and its inner satellite Amalthea, as obtained on 02 March 2015, with the 1.6 m PerkinElmer telescope. The left panel (i) displays the original image. The central panel (ii) shows the clean bright object profile (Jupiter) obtained. The right panel (iii) displays the final coronagraphed image (see text).

noise ratio. The light curve simulation and fitting procedure were the same described in Sections 3.2.2 and 3.3. Notice that Amalthea's triaxial shape is  $125 \times 73 \times 64$  km (uncertainty of 2 km in each axis; Thomas et al. (1998)) and its rotation phase during the event was unknown. However, without any loss of precision, in our simulations, we considered Amalthea as an equivalent sphere with a radius equal to 83.5 km. Because of the time resolution of the observations (8 s), the spherical shape was indistinguishable from the elliptical one.

The light curve of this event is illustrated in Fig. 8. We obtained a central instant with an uncertainty of 19.4 mas ( $\sim 58.2$  km) and an impact parameter with an uncertainty of 76.3 mas ( $\sim 228$  km). This corresponds to a mean uncertainty of 47.8 mas ( $\sim 143$  km). The result of this event is displayed in the last line of Table 5. The positions obtained by Christou et al. (2010) had mean uncertainty of 82 mas ( $\sim 246$  km) and the ones obtained by Saquet et al. (2016) had a mean uncertainty of 45 mas ( $\sim 135$  km).

## 5. Conclusions

We presented in this paper the results for 40 mutual events from the observation and analysis of 47 light curves, 31 occultations and 16 eclipses, obtained during the 2014–2015 mutual phenomena campaign between the Galilean satellites. The observations were made at three stations in the South and South-East of Brazil, using telescopes with diameters ranging between 28 and 60 cm. We also obtained updated results from the re-analysis of 25 mutual events, 13 occultations and 12 eclipses, observed in Brazil by our group in 2009 with a 60 cm aperture telescope. In all observations, we used a narrow band methane filter centred at 889 nm with a width of 15 nm, that eliminates Jupiter's scattered light.

We used the Oren-Nayer model (Oren and Nayar, 1994) to characterise the reflectance of the surface of the satellites. It is a generalisation of Lambert's scattering law. The main advantage of this model is that it does not require previous knowledge about the satellite surface, and delivers excellent results. The albedo ratio was instrumentally obtained by using satellite observations before and after the mutual occultations, and the same light curve simulation routines that take into account solar phase angle and surface reflectance. In our procedure, the simulated light curves fitted to the observed ones had a normalised chi-square very close to 1.0, indicating good agreement of our model to the data.

The updated results for 2009 now agree within  $1\sigma$  with those from Arlot et al. (2014a) and from Morgado et al. (2016). The internal mean uncertainty was 10.1 mas ( $\sim 31$  km). For the 2014–2015 campaign, the mean uncertainty was 11.2 mas ( $\sim 35$  km). There is no significant difference between the quality of the data for both campaigns. Our result is comparable with other independent observations during the same campaign, such as the 23 light curves observed by Vasundhara et al.

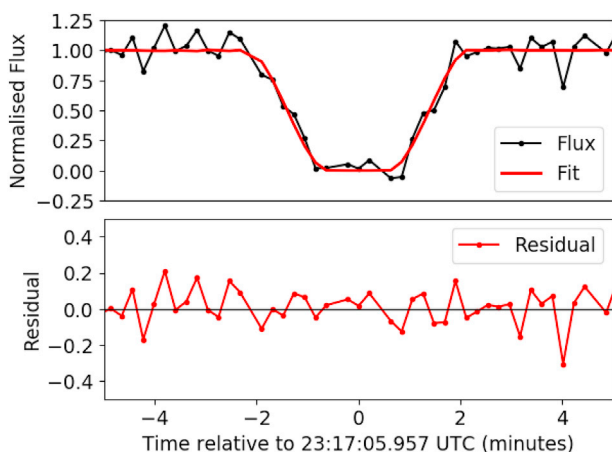


Fig. 8. Light curve of the event when Amalthea was eclipsed by Ganymede on March 02, 2015, observed with the 1.6 m telescope at OPD.

(2017) and the 21 light curves observed by Zhang et al. (2019), which report uncertainties in the 10 and 20 mas level (30 and 60 km), respectively. Saquet et al. (2018) published the light curves of the international campaign organised by the IMCCE. It reunites 609 light curves with a mean internal uncertainty of 24 mas ( $\sim 75$  km).<sup>6</sup> From these 609 light curves, 10 were observed by our group, the parameters obtained by Saquet et al. (2018) agree, on average, within  $1\sigma$  with the results presented here.

Compared to the 236 mutual events covered by the 2014–2015 international PHEMU campaign lead by the IMCCE, Observatoire de Paris (Saquet et al., 2018), the 40 ones covered by our 2014–2015 campaign (with only 5 events in common) represent a significant contribution of about 17%. Notice that this campaign was favourable for the north hemisphere, enhancing the weight of our southern results due to parallax effects. Equally, our new results for the 25 events represent about 15% of the 172 mutual events covered by the international PHEMU campaign of 2009 (Arlot et al., 2014a). In a similar way, our result for the eclipse by Amalthea is only the 4<sup>th</sup> such measurement ever published for the 2014–2015 campaign, after the 3 ones observed by Saquet et al. (2016), representing a significant contribution to the orbit of this inner satellite of Jupiter. All the data are freely available to anyone at NSDB for further research and orbital fitting.

All these results can be used to improve the orbit and ephemeris of the Galilean satellites (plus Amalthea) taking into account the tidal forces, as pointed out by Lainey et al. (2009).

The next mutual phenomena events for the Galilean satellites will occur in 2021 and will favour the southern hemisphere, due to Jupiter's declination. An observational campaign such as this one will be organised in due time, the prediction of these events are already in the IMCCE website<sup>7</sup> (Arlot and Emelyanov, 2019). These campaigns can increase the accuracy and precision of ephemeris and can be helpful to space missions aimed at the Jovian system. For example, we have the ESA mission JUICE<sup>8</sup> and NASA's mission Europa Clipper,<sup>9</sup> scheduled to be launched in the next decade (2020s).

## Acknowledgements

We thank our anonymous referee and N. Emelyanov for helpful comments. This study was financed by the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Finance Code 001. Part of this research is supported by INCT do e-Universo, Brazil (CNPQ grants 465376/2014-2). BM thanks the CAPES/Cofecub-394/2016-05 grant. RVM acknowledges the grants: CNPq-304544/2017-5, 401903/2016-8, Capes/Cofecub-2506/2015, FAPERJ: PAPDRJ-45/2013 and E-26/203.026/2015. MA thanks CNPq (Grants 427700/2018-3, 310683/2017-3 and 473002/2013-2) and FAPERJ (Grant E-26/111.488/2013). JIBC acknowledges CNPq grants 308489/2013-6 and 308150/2016-3. RS and OCW acknowledges Fapesp proc. 2016/24561-0 and 2011/08171-3, CNPq proc. 312813/2013-9 and 305737/2015-5. FBR acknowledges CNPq support, proc. 309578/2017-5. GBR thanks to the support of the CAPES and FAPERJ/PAPDRJ (E26/203.173/2016) grants. ARGJ thanks FAPESP proc. 2018/11239-8. This collaboration, as part of the Encelade working group, has been supported by the International Space Sciences Institute (ISSI) in Bern, Switzerland.

## Appendix A. Supplementary data

Supplementary data to this article can be found online at <https://doi.org/10.1016/j.pss.2019.104736>.

<sup>6</sup> The standard deviation after fitting the light curves.

<sup>7</sup> Website: <http://nsdb.imcce.fr/multisat/nssephme.htm>.

<sup>8</sup> Website: <http://sci.esa.int/juice/>.

<sup>9</sup> Website: <https://www.nasa.gov/europa/>.

## References

- Aksnes, K., Franklin, F.A., 1976. Mutual phenomena of the Galilean satellites in 1973. III. Final results from 91 light curves. *Astron. J.* 81, 464–481. <https://doi.org/10.1086/111908>.
- Arlot, J.E., Emelyanov, N., 2019. Natural satellites mutual phenomena observations: Achievements and future. *Planet. Space Sci.* 169, 70–77. <https://doi.org/10.1016/j.pss.2019.02.004>.
- Arlot, J.E., Emelyanov, N., Varfolomeev, M.I., Amossé, A., Arena, C., Assafin, M., Barbieri, L., Bolzoni, S., Bragas-Ribas, F., Camargo, J.I.B., Casarramona, F., Casas, R., Christou, A., Colas, F., Collard, A., Combe, S., Constantinescu, M., Dangl, G., De Cat, P., Degenhardt, S., Delcroix, M., Dias-Oliveira, A., Dourneau, G., Douvris, A., Druon, C., Ellington, C.K., Estraviz, G., Farissier, P., Farmakopoulos, A., Garlitz, J., Gault, D., George, T., Gorda, S.Y., Grismore, J., Guo, D.F., Herald, D., Ida, M., Ishida, M., Ivanov, A.V., Klemt, B., Koshkin, N., Le Campion, J.F., Liakos, A., Liao, S.L., Li, S.N., Loader, B., Lopresti, C., Lo Savio, E., Marchini, A., Marino, G., Masi, G., Massallé, A., Maulella, R., McFarland, J., Miyashita, K., Napoli, C., Noyelles, B., Pauwels, T., Pavlov, H., Peng, Q.Y., Perelló, C., Priban, V., Prost, J., Razemon, S., Rousselle, J.P., Rovira, J., Ruisi, R., Ruocco, N., Salvaggio, F., Sbaruffatti, G., Shakun, L., Scheck, A., Sciuto, C., da Silva Neto, D.N., Sinyayeva, N.V., Sofia, A., Sonka, A., Talbot, J., Tang, Z.H., Tejfel, V.G., Thuillot, W., Tigani, K., Timerson, B., Tontodonati, E., Tsamis, V., Unwin, M., Venable, R., Vieira-Martins, R., Vilar, J., Vingerhoets, P., Watanabe, H., Yin, H.X., Yu, Y., Zambelli, R., 2014a. The PHEMU09 catalogue and astrometric results of the observations of the mutual occultations and eclipses of the Galilean satellites of Jupiter made in 2009. *Astron. Astrophys.* 572, A120. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201423854>.
- Arlot, J.E., Saquet, E., Robert, V., Lainey, V., 2014b. The Phemu 2015 campaign of observations of the mutual events of the Galilean satellites of Jupiter. In: *European Planetary Science Congress*, pp. EPSC2014-E2057.
- Arlot, J.E., Cooper, N., Emelyanov, N., Lainey, V., Meunier, L.E., Murray, C., Oberst, J., Pascu, D., Pasewaldt, A., Robert, V., Tajeddine, R., Willner, K., 2017. Natural satellites astrometric data from either space probes and ground-based observatories produced by the European consortium “ESPaCE”. *Notes Scientifiques et Techniques de l’Institut de Mécanique Celeste* 105.
- Assafin, M., Campos, R.P., Vieira Martins, R., da Silva Neto, D.N., Camargo, J.I.B., Andrei, A.H., 2008. Instrumental and digital coronagraphy for the observation of the Uranus satellites’ upcoming mutual events. *Planet. Space Sci.* 56, 1882–1887. <https://doi.org/10.1016/j.pss.2007.05.030>.
- Assafin, M., Vieira-Martins, R., Braga-Ribas, F., Camargo, J.I.B., da Silva Neto, D.N., Andrei, A.H., 2009. Observations and analysis of mutual events between the Uranus main satellites. *Astron. J.* 137, 4046–4053. <https://doi.org/10.1088/0004-6256/137/4/4046>.
- Assafin, M., Vieira Martins, R., Camargo, J.I.B., Andrei, A.H., Da Silva Neto, D.N., Braga-Ribas, F., 2011. Praia - platform for reduction of astronomical images automatically. In: *Gaia Follow-Up Network for the Solar System Objects : Gaia FUN-SSO Workshop Proceedings*, pp. 85–88.
- Butcher, H., Stevens, R., 1981. Image reduction and analysis facility development. *Kitt Peak National Observatory Newsletter* 16, 6.
- Christou, A.A., Lewis, F., Roche, P., Hidas, M.G., Brown, T.M., 2010. Observational detection of eclipses of J5 Amalthea by the Galilean satellites. *Astron. Astrophys.* 522, A6. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201014822> arXiv:1104.0042.
- Dias-Oliveira, A., Vieira-Martins, R., Assafin, M., Camargo, J.I.B., Braga-Ribas, F., da Silva Neto, D.N., Gaspar, H.S., Pires dos Santos, P.M., Domingos, R.C., Boldrin, L.A.G., Izidoro, A., Carvalho, J.P.S., Sfair, R., Sampaio, J.C., Winter, O.C., 2013. Analysis of 25 mutual eclipses and occultations between the Galilean satellites observed from Brazil in 2009. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 432, 225–242. <https://doi.org/10.1093/mnras/stt447>.
- Emel’yanov, N.V., 2017. Current problems of dynamics of moons of planets and binary asteroids based on observations. *Sol. Syst. Res.* 51, 20–37. <https://doi.org/10.1134/S0038094617010014>.
- Emelyanov, N.V., 2009. Mutual occultations and eclipses of the Galilean satellites of Jupiter in 2002–2003: final astrometric results. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 394, 1037–1044. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2009.14398.x>.
- Emelyanov, N.V., Gilbert, R., 2006. Astrometric results of observations of mutual occultations and eclipses of the Galilean satellites of Jupiter in 2003. *Astron. Astrophys.* 453, 1141–1149. <https://doi.org/10.1051/0004-6361:20064810>.
- Hapke, B., 1981. Bidirectional reflectance spectroscopy. 1. Theory. *J. Geophys. Res.* 86, 4571–4586.
- Hapke, B., 1984. Bidirectional reflectance spectroscopy 3. Correction for macroscopic roughness. *Icarus* 59, 41–59. [https://doi.org/10.1016/0019-1035\(84\)90054-X](https://doi.org/10.1016/0019-1035(84)90054-X).
- Hapke, B., 1986. Bidirectional reflectance spectroscopy 4. The extinction coefficient and the opposition effect. *Icarus* 67, 264–280. [https://doi.org/10.1016/0019-1035\(86\)90108-9](https://doi.org/10.1016/0019-1035(86)90108-9).
- Hapke, B., 2002. Bidirectional reflectance spectroscopy. 5. The coherent backscatter opposition effect and anisotropic scattering. *Icarus* 157, 523–534. <https://doi.org/10.1006/icar.2002.6853>.
- Hapke, B., 2008. Bidirectional reflectance spectroscopy. 6. Effects of porosity. *Icarus* 195, 918–926. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2008.01.003>.
- Hapke, B., 2012. Bidirectional reflectance spectroscopy 7. The single particle phase function hockey stick relation. *Icarus* 221, 1079–1083. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2012.10.022>.
- Hapke, B., Wells, E., 1981. Bidirectional reflectance spectroscopy. 2. Experiments and observations. *J. Geophys. Res.* 86, 3055–3060. <https://doi.org/10.1029/JB086iB04p03055>.
- Hestroffer, D., Magnan, C., 1998. Wavelength dependency of the Solar limb darkening. *Astron. Astrophys.* 333, 338–342.
- Karkoschka, E., 1994. Spectrophotometry of the Jovian planets and titan at 300- to 1000-nm wavelength: the methane spectrum. *Icarus* 111, 174–192. <https://doi.org/10.1006/icar.1994.1139>.
- Karkoschka, E., 1998. Methane, ammonia, and temperature measurements of the jovian planets and titan from CCD-spectrophotometry. *Icarus* 133, 134–146. <https://doi.org/10.1006/icar.1998.5913>.
- Kiseleva, T.P., Kiselev, A.A., Kalinichenko, O.A., Vasilyeva, N.A., Khovrichcheva, M.L., 2008. Results of astrometric observations of jupiter’s galilean satellites at the pulkovo observatory from 1986 to 2005. *Sol. Syst. Res.* 42, 414–433. <https://doi.org/10.1134/S0038094608050055>.
- Kulyk, I., Jockers, K., Karpov, N., Sergeev, A., 2002. Astrometric CCD observations of the inner Jovian satellites in 1999–2000. *Astron. Astrophys.* 383, 724–728. <https://doi.org/10.1051/0004-6361:20011770>.
- Lainey, V., Arlot, J.E., Vienne, A., 2004a. New accurate ephemerides for the Galilean satellites of Jupiter. II. Fitting the observations. *Astron. Astrophys.* 427, 371–376. <https://doi.org/10.1051/0004-6361:20041271>.
- Lainey, V., Duriez, L., Vienne, A., 2004b. New accurate ephemerides for the Galilean satellites of Jupiter. I. Numerical integration of elaborated equations of motion. *Astron. Astrophys.* 420, 1171–1183. <https://doi.org/10.1051/0004-6361:20034565>.
- Lainey, V., Arlot, J.E., Karatekin, Ö., van Hoolst, T., 2009. Strong tidal dissipation in Io and Jupiter from astrometric observations. *Nature* 459, 957–959. <https://doi.org/10.1038/nature08108>.
- Lainey, V., Jacobson, R.A., Tajeddine, R., Cooper, N.J., Murray, C., Robert, V., Tobie, G., Guillot, T., Mathis, S., Remus, F., Desmars, J., Arlot, J.E., De Cuyper, J.P., Dehant, V., Pascu, D., Thuillot, W., Le Poncin-Lafitte, C., Zahn, J.P., 2017. New constraints on Saturn’s interior from Cassini astrometric data. *Icarus* 281, 286–296. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2016.07.014> arXiv:1510.05870.
- Morgado, B., Assafin, M., Vieira-Martins, R., Camargo, J.I.B., Dias-Oliveira, A., Gomes-Júnior, A.R., 2016. Astrometry of mutual approximations between natural satellites. Application to the Galilean moons. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 460, 4086–4097. <https://doi.org/10.1093/mnras/stw1244> arXiv:1605.06573.
- Morgado, B., Vieira-Martins, R., Assafin, M., Machado, D.L., Camargo, J.I.B., Sfair, R., Malacarne, M., Braga-Ribas, F., Robert, V., Bassallo, T., Benedetti-Rossi, G., Boldrin, L.A., Borderes-Motta, G., Camargo, B.C.B., Crispim, A., Dias-Oliveira, A., Gomes-Júnior, A.R., Lainey, V., Miranda, J.O., Moura, T.S., Ribeiro, F.K., Santana, T., Santos-Filho, S., Trabuco, L.L., Winter, O.C., Yamashita, T.A.R., 2019. Approx - mutual approximations between the Galilean moons: the 2016–2018 observational campaign. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 482, 5190–5200. <https://doi.org/10.1093/mnras/sty3040> arXiv:1811.02913.
- Oren, M., Nayar, S.K., 1994. Generalization of Lambert’s reflectance model. In: *Proceedings of the 21st Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*. ACM, New York, NY, USA, pp. 239–246. <https://doi.org/10.1145/192161.192213>.
- Peng, Q.Y., He, H.F., Lainey, V., Vienne, A., 2012. Precise CCD positions of Galilean satellite-pairs. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 419, 1977–1982. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2011.19852.x>.
- Robert, V., Saquet, E., Colas, F., Arlot, J.E., 2017. CCD astrometric observations of Amalthea and Thebe in the Gaia era. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 467, 694–698. <https://doi.org/10.1093/mnras/stx123>.
- Astropy Collaboration, Robitaille, T.P., Tollerud, E.J., Greenfield, P., Droettboom, M., Bray, E., Aldcroft, T., Davis, M., Ginsburg, A., Price-Whelan, A.M., Kerzendorf, W.E., Conley, A., Crighton, N., Barbary, K., Muna, D., Ferguson, H., Grollier, F., Parikh, M.M., Nair, P.H., Unther, H.M., Deil, C., Woillez, J., Conseil, S., Kramer, R., Turner, J.E.H., Singer, L., Fox, R., Weaver, B.A., Zabalza, V., Edwards, Z.I., Azulec Bostrom, K., Burke, D.J., Casey, A.R., Crawford, S.M., Dencheva, N., Ely, J., Jenness, T., Labrie, K., Lim, P.L., Pierfederici, F., Pontzen, A., Ptak, A., Riechers, B., Servillat, M., Streicher, O., 2013. Astropy: a community Python package for astronomy. *Astron. Astrophys.* 558, A33. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201322068> arXiv:1307.6212.
- Saquet, E., Emelyanov, N., Colas, F., Arlot, J.E., Robert, V., Christophe, B., Dechambre, O., 2016. Eclipses of the inner satellites of Jupiter observed in 2015. *Astron. Astrophys.* 591, A42. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201628246> arXiv:1605.06935.
- Saquet, E., Emelyanov, N., Robert, V., Arlot, J.E., Anbazhagan, P., Baillié, K., Bardecker, J., Berezhnoy, A.A., Bretton, M., Campos, F., Capannoli, L., Carry, B., Castet, M., Charbonnier, Y., Chernikov, M.M., Christou, A., Colas, F., Coliac, J.F., Dangl, G., Dechambre, O., Delcroix, M., Dias-Oliveira, A., Drillaud, C., Duchemin, Y., Dunford, R., Dupouy, P., Ellington, C., Fabre, P., Filipov, V.A., Finnegan, J., Foglia, S., Font, D., Gaillard, B., Galli, G., Garlitz, J., Gasmi, A., Gaspar, H.S., Gault, D., Gazeas, K., George, T., Gorda, S.Y., Gorshakov, D.L., Gualdoni, C., Guhl, K., Halir, K., Hanna, W., Henry, X., Herald, V.G., Houdin, G., Ito, Y., Izmailov, I.S., Jacobsen, J., Jones, A., Kamoun, S., Kardasis, E., Karimov, A.M., Khovritchev, M.Y., Kulikova, A.M., Laborde, J., Lainey, V., Lavaysiere, M., Le Guen, P., Leroy, A., Loader, B., Lopez, O.C., Lyashenko, A.Y., Lyssenko, P.G., Machado, D.L., Maigurova, N., Manek, J., Marchini, A., Midavaine, T., Montier, J., Morgado, B.E., Naumov, K.N., Nedelcu, A., Newman, J., Ohlert, J.M., Oksanen, A., Pavlov, H., Prescusi, E., Pomazan, A., Popescu, M., Pratt, A., Raskhozhev, V.N., Resch, J.M., Robilliard, D., Roschina, E., Rothenberg, E., Rottenborn, M., Rusov, S.A., Saby, F., Sayka, L.F., Selvakumar, G., Signoret, F., Slesarenko, V.Y., Sokov, E.N., Soldateschi, J., Sonka, A., Soutie, G., Talbot, J., Tejfel, V.G., Thuillot, W., Timerson, B., Toma, R., Torsellini, S., Trabuco, L.L., Traverse, P., Tsamis, V., Unwin, M., Abbeel, F.V.D., Vand enbruaene, H., Vasundhara, R., Velikodsky, Y.I., Vienne, A., Vilar, J., Vugnon, J.M., Wuensche, N., Zeleny, P., 2018. The PHEMU15 catalogue and astrometric results of



- the Jupiter's Galilean satellite mutual occultation and eclipse observations made in 2014-2015. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 474, 4730–4739. <https://doi.org/10.1093/mnras/stx2957>.
- Thomas, P.C., Burns, J.A., Rossier, L., Simonelli, D., Veverka, J., Chapman, C.R., Klaasen, K., Johnson, T.V., Belton, M.J.S., Galileo Solid State Imaging Team, 1998. The small inner satellites of jupiter. *Icarus* 135, 360–371. <https://doi.org/10.1006/icar.1998.5976>.
- Vachier, F., Arlot, J.E., Thuillot, W., 2002. Mutual phenomena involving J5 Amalthea in 2002-2003. *Astron. Astrophys.* 394, L19–L21. <https://doi.org/10.1051/0004-6361:20021329>.
- Vasundhara, R., Selvakumar, G., Anbazhagan, P., 2017. Analysis of mutual events of Galilean satellites observed from VBO during 2014-2015. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 468, 501–508. <https://doi.org/10.1093/mnras/stx437> arXiv:1704.03518.
- Veiga, C.H., Vieira Martins, R., 2005. CCD astrometric observations of Amalthea and Thebe. *Astron. Astrophys.* 437, 1147–1150. <https://doi.org/10.1051/0004-6361:20042387>.
- Zhang, X.L., Han, X.L., Arlot, J.E., 2019. Mutual events between Galilean satellites observed with SARA 0.9 m and 0.6 m telescopes during 2014-2015. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 483, 4518–4524. <https://doi.org/10.1093/mnras/sty3030>.



## The PHEMU15 catalogue and astrometric results of the Jupiter's Galilean satellite mutual occultation and eclipse observations made in 2014–2015

E. Saquet,<sup>1,2★</sup> N. Emelyanov,<sup>2,3★</sup> V. Robert,<sup>1,2</sup> J.-E. Arlot,<sup>2</sup> P. Anbazhagan,<sup>4</sup> K. Baillié,<sup>2</sup> J. Bardecker,<sup>5</sup> A. A. Berezhnoy,<sup>3</sup> M. Bretton,<sup>6</sup> F. Campos,<sup>7</sup> L. Capannoli,<sup>8</sup> B. Carry,<sup>2,9</sup> M. Castet,<sup>10</sup> Y. Charbonnier,<sup>11</sup> M. M. Chernikov,<sup>12</sup> A. Christou,<sup>13</sup> F. Colas,<sup>2</sup> J.-F. Coliac,<sup>14</sup> G. Dangel,<sup>15</sup> O. Dechambre,<sup>16</sup> M. Delcroix,<sup>17</sup> A. Dias-Oliveira,<sup>18</sup> C. Drillaud,<sup>19</sup> Y. Duchemin,<sup>2</sup> R. Dunford,<sup>20</sup> P. Dupouy,<sup>21</sup> C. Ellington,<sup>22</sup> P. Fabre,<sup>11</sup> V. A. Filippov,<sup>23</sup> J. Finnegan,<sup>13</sup> S. Foglia,<sup>24</sup> D. Font,<sup>6</sup> B. Gaillard,<sup>10</sup> G. Galli,<sup>24</sup> J. Garlitz,<sup>25</sup> A. Gasmi,<sup>8</sup> H. S. Gaspar,<sup>26</sup> D. Gault,<sup>27</sup> K. Gazeas,<sup>28</sup> T. George,<sup>29</sup> S. Y. Gorda,<sup>30</sup> D. L. Gorshanov,<sup>31</sup> C. Gualdoni,<sup>32</sup> K. Guhl,<sup>33,34</sup> K. Halir,<sup>35</sup> W. Hanna,<sup>36</sup> X. Henry,<sup>11</sup> D. Herald,<sup>37</sup> G. Houdin,<sup>38</sup> Y. Ito,<sup>39</sup> I. S. Izmailov,<sup>31</sup> J. Jacobsen,<sup>40</sup> A. Jones,<sup>41</sup> S. Kamoun,<sup>42</sup> E. Kardasis,<sup>43</sup> A. M. Karimov,<sup>23</sup> M. Y. Khovritchev,<sup>31</sup> A. M. Kulikova,<sup>31</sup> J. Laborde,<sup>21</sup> V. Lainey,<sup>2</sup> M. Lavayssière,<sup>21</sup> P. Le Guen,<sup>11</sup> A. Leroy,<sup>10</sup> B. Loader,<sup>44</sup> O. C. Lopez,<sup>45,46</sup> A. Y. Lyashenko,<sup>31</sup> P. G. Lyssenko,<sup>23</sup> D. I. Machado,<sup>47,48</sup> N. Maigurova,<sup>49</sup> J. Manek,<sup>50</sup> A. Marchini,<sup>51</sup> T. Midavaine,<sup>52</sup> J. Montier,<sup>53</sup> B. E. Morgado,<sup>18,54</sup> K. N. Naumov,<sup>31</sup> A. Nedelcu,<sup>55</sup> J. Newman,<sup>56</sup> J. M. Ohlert,<sup>57,58</sup> A. Oksanen,<sup>59</sup> H. Pavlov,<sup>60</sup> E. Petrescu,<sup>61</sup> A. Pomazan,<sup>49</sup> M. Popescu,<sup>55</sup> A. Pratt,<sup>62</sup> V. N. Raskhozhev,<sup>12</sup> J.-M. Resch,<sup>11</sup> D. Robilliard,<sup>53</sup> E. Roschina,<sup>31</sup> E. Rothenberg,<sup>34</sup> M. Rottenborn,<sup>63</sup> S. A. Rusov,<sup>31</sup> F. Saby,<sup>11</sup> L. F. Saya,<sup>8</sup> G. Selvakumar,<sup>4</sup> F. Signoret,<sup>64</sup> V. Y. Slesarenko,<sup>31</sup> E. N. Sokov,<sup>31</sup> J. Soldateschi,<sup>51</sup> A. Sonka,<sup>55</sup> G. Soulie,<sup>21</sup> J. Talbot,<sup>65</sup> V. G. Tejfel,<sup>22</sup> W. Thuillot,<sup>2</sup> B. Timerson,<sup>66</sup> R. Toma,<sup>13</sup> S. Torsellini,<sup>8</sup> L.L. Trabuco,<sup>48</sup> P. Traverse,<sup>67</sup> V. Tsamis,<sup>68</sup> M. Unwin,<sup>69</sup> F. Van Den Abbeel,<sup>70</sup> H. Vandenbruaene,<sup>71</sup> R. Vasundhara,<sup>4</sup> Y. I. Velikodsky,<sup>72</sup> A. Vienne,<sup>2,73</sup> J. Vilar,<sup>74</sup> J.-M. Vugnon,<sup>75</sup> N. Wuensche<sup>76</sup> and P. Zeleny<sup>77</sup>

*Affiliations are listed at the end of the paper*

Accepted 2017 November 8. Received 2017 November 3; in original form 2017 August 28

### ABSTRACT

During the 2014–2015 mutual events season, the Institut de Mécanique Céleste et de Calcul des Éphémérides (IMCCE), Paris, France, and the Sternberg Astronomical Institute (SAI), Moscow, Russia, led an international observation campaign to record ground-based photometric observations of Galilean moon mutual occultations and eclipses. We focused on processing the complete photometric observations data base to compute new accurate astrometric positions. We used our method to derive astrometric positions from the light curves of the events.

\* E-mail: [eleonore.saquet@obspm.fr](mailto:eleonore.saquet@obspm.fr) (ES); [emelia@sai.msu.ru](mailto:emelia@sai.msu.ru) (NE)





## APÊNDICE B – Artigos publicados em projetos paralelos

Aqui listamos todos os artigos que foram publicados em projetos paralelos onde tive participação. Note que estes artigos não possuem conexão direta com o projeto explicitado nesta tese. Incluo neste apêndice a lista destes artigos e suas primeiras páginas. Destes artigos, seis já foram publicados em revistas internacionais, dois artigos estão aceitos para publicação e um foi submetido em 23 de Julho de 2019 e estamos esperando a resposta do revisor.

Em Gomes-Júnior et al. (2015) publicamos a astrometria dos satélites irregulares de Júpiter e Saturno para mais de 23 anos de observações. A minha participação foi com observações de aproximadamente 10 noites nos telescópios do OPD. Já em Gomes-Júnior et al. (2016) apresentamos a previsão de ocultações estelares por satélites irregulares, onde colaborei com a observação que foi utilizada para testar a qualidade das predições.

Como membro do grupo de astrometria do Rio eu participei ativamente das observações do grupo que visavam a astrometria de objetos transnetunianos (TNO) e Centauros no contexto de prever as ocultações estelares por estes objetos. Além disso, participei também das observações destas ocultações. Dessa forma, as observações que colaborei para o centauro Chariklo foram utilizadas em Leiva et al. (2017), as observações do planeta anão Haumea foram utilizadas em Ortiz et al. (2017) e as observações do planeta anão Plutão foram utilizadas em Desmars et al. (2019) e em Meza et al. (2019).

Em Benedetti-Rossi et al. (2019) apresentamos os resultados de ocultações estelares pelo TNO 2003VS2. Neste artigo eu participei observando o evento que aconteceu em novembro de 2014 no telescópio do OPD, e também, auxiliei na redução dos dados obtidos em Santa Rosa na Argentina para a ocultação que aconteceu em 07 de novembro de 2014. Em Braga-Ribas et al. (aceito) apresentamos um banco de dados com informações das ocultações por TNOs, centauros, troianos e satélites naturais. A minha participação foi com a observação e redução de diversas ocultações nos últimos 6 anos.

Em Santos-Filho et al. (aceito) apresentamos os resultados da astrometria dos satélites de Urano – Miranda, Ariel, Umbriel, Titânia e Oberon – aplicando a técnica das aproximações mútuas. Sou o terceiro autor neste artigo e tive uma participação chave com a adaptação da técnica e de softwares para este sistema. Além disso, tive participação nas observações, destacando que fiz a observação e análise de um evento em 2015 que deu início ao projeto.

Por fim, em Gomes-Júnior et al. (submetido) apresentamos os resultados das primeiras ocultações estelares observadas pelo satélite irregular de Saturno Phoebe (SIX). Minha contribuição principal foi com a redução e análise de imagens para a curva de luz de rotação deste objeto.

- 2015** – A. R. Gomes-Júnior, M. Assafin, R. Vieira-Martins, J.-E. Arlot, J. I. B. Camargo, F. Braga-Ribas, D. N. da Silva Neto, A. H. Andrei, A. Dias-Oliveira, **B.E.Morgado**, G. Benedetti-Rossi, Y. Duchemin, J. Desmars, V. Lainey e W. Thuillot. (2015). Astrometric positions for 18 irregular satellites of giant planets from 23 years of observations. *Astronomy and Astrophysics*, v. 580.
- 2016** – A. R. Gomes-Júnior, M. Assafin, L. Beauvalet, J. Desmars, R. Vieira-Martins, J. I. B. Camargo, **B.E.Morgado** e F. Braga-Ribas. (2016). New orbits of irregular satellites designed for the predictions of stellar occultations up to 2020, based on thousands of new observations. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 462, n. 2.
- 2017** – R. Leiva, B. Sicardy, J. I. B. Camargo, J.-L. Ortiz, J. Desmars, D. Bérard, E. Lellouch, E. Meza, P. Kervella, C. Snodgrass, R. Duffard, N. Morales, A. R. Gomes-Júnior, G. Benedetti-Rossi, R. Vieira-Martins, F. Braga-Ribas, M. Assafin, **B.E.Morgado**, F. Colas, C. De Witt, A. A. Sickafoose, H. Breytenbach, J.-L. Dauvergne, P. Schoenau, L. Maquet, K.-L. Bath, H.-J. Bode, A. Cool, B. Lade, S. Kerr e D. Herald. (2017). Size and Shape of Chariklo from Multi-epoch Stellar Occultations. *Astronomical Journal*, v. 154, n. 4.
- 2017** – J. L. Ortiz, P. Santos-Sanz, B. Sicardy, G. Benedetti-Rossi, D. Bérard, N. Morales, R. Duffard, F. Braga-Ribas, U. Hopp, C. Ries, V. Nascimbeni, F. Marzari, V. Granata, A. Pál, C. Kiss, T. Pribulla, R. Komžík, K. Hornoch, P. Pravec, P. Bacci, M. Maestripieri, L. Nerli, L. Mazzei, M. Bachini, F. Martinelli, G. Succi, F. Ciabattari, H. Mikuz, A. Carbognani, B. Gaehrken, S. Mottola, S. Hellmich, F. L. Rommel, E. Fernández-Valenzuela, A. Campo Bagatin, S. Cikota, A. Cikota, J. Lecacheux, R. Vieira-Martins, J. I. B. Camargo, M. Assafin, F. Colas, R. Behrend, J. Desmars, E. Meza, A. Alvarez-Candal, W. Beisker, A. R. Gomes-Júnior, **B.E.Morgado**, F. Roques, F. Vachier, J. Berthier, T. G. Mueller, J. M. Madiedo, O. Unsalan, E. Sonbas, N. Karaman, O. Erece, D. T. Koseoglu, T. Ozisik, S. Kalkan, Y. Guney, M. S. Niaei, O. Satir, C. Yesilyaprak, C. Puskullu, A. Kabas, O. Demircan, J. Alikakos, V. Charmandaris, G. Leto, J. Ohlert, J. M. Christille, R. Szakáts, A. Takácsné Farkas, E. Varga-Verebélyi, G. Marton, A. Marciniak, P. Bartczak, T. Santana-Ros, M. Butkiewicz-Bąk, G. Dudziński, V. Alí-Lagoa, K. Gazeas, L. Tzouganatos, N. Paschalis, V. Tsamis, A. Sánchez-Lavega, S. Pérez-Hoyos, R. Hueso, J. C. Guirado,

V. Peris e R. Iglesias-Marzoa. (2017). The size, shape, density and ring of the dwarf planet Haumea from a stellar occultation. *Nature*, v. 550, n. 7675.

- 2019** – E. Meza, B. Sicardy, M. Assafin, J. L. Ortiz, T. Bertrand, E. Lellouch, J. Desmars, F. Forget, D. Bérard, A. Doressoundiram, J. Lecacheux, J. Marques Oliveira, F. Roques, T. Widemann, F. Colas, F. Vachier, S. Renner, R. Leiva, F. Braga-Ribas, G. Benedetti-Rossi, J. I. B. Camargo, A. Dias-Oliveira, **B.Morgado**, A. R. Gomes-Júnior, R. Vieira-Martins, R. Behrend, A. Castro Tirado, R. Duffard, N. Morales, P. Santos-Sanz, M. Jelínek, R. Cunniffe, R. Querel, M. Harnisch, R. Jansen, A. Pennell, S. Todd, V. D. Ivanov, C. Opitom, M. Gillon, E. Jehin, J. Manfroid, J. Pollock, D. E. Reichart, J. B. Haislip, K. M. Ivarsen, A. P. LaCluyze, A. Maury, R. Gil-Hutton, V. Dhillon, S. Littlefair, T. Marsh, C. Veillet, K.-L. Bath, W. Beisker, H.-J. Bode, M. Kretlow, D. Herald, D. Gault, S. Kerr, H. Pavlov, O. Faragó, O. Klös, E. Frappa, M. Lavayssière, A. A. Cole, A. B. Giles, J. G. Greenhill, K. M. Hill, M. W. Buie, C. B. Olkin, E. F. Young, L. A. Young, L. H. Wasserman, M. Devogèle, R. G. French, F. B. Bianco, F. Marchis, N. Brosch, S. Kaspi, D. Polishook, I. Manulis, M. Ait Moulay Larbi, Z. Benkhaldoun, A. Daassou, Y. El Azhari, Y. Moulane, J. Broughton, J. Milner, T. Dobosz, G. Bolt, B. Lade, A. Gilmore, P. Kilmartin, W. H. Allen, P. B. Graham, B. Loader, G. McKay, J. Talbot, S. Parker, L. Abe, Ph. Bendjoya, J.-P. Rivet, D. Vernet, L. Di Fabrizio, V. Lorenzi, A. Magazzú, E. Molinari, K. Gazeas, L. Tzouganatos, A. Carbognani, G. Bonnoli, A. Marchini, G. Leto, R. Zanmar-Sanchez, L. Mancini60, B. Kattentidt, M. Dohrmann, K. Guhl, W. Rothe, K. Walzel, G. Wortmann, A. Eberle, D. Hampf, J. Ohlert, G. Krannich, G. Murawsky, B. Gährken, D. Gloistein, S. Alonso, A. Román, J.-E. Communal, F. Jabet, S. deVisscher, J. Sérot, T. Janik, Z. Moravec, P. Machado, A. Selva, C. Perelló, J. Rovira, M. Conti, R. Papini, F. Salvaggio, A. Noschese, V. Tsamis, K. Tigani, P. Barroy, M. Irzyk, D. Neel, J. P. Godard, D. Lanoiselée, P. Sogorb, D. Vérilhac, M. Bretton, F. Signoret, F. Ciabattari, R. Naves, M. Boutet, J. De Queiroz, P. Lindner, K. Lindner, P. Enskonatus, G. Dangl, T. Tordai, H. Eichler, J. Hattenbach, C. Peterson, L. A. Molnar e R. R. Howell. (2019). Lower atmosphere and pressure evolution on Pluto from ground-based stellar occultations, 1988–2016, *Astronomy and Astrophysics*, v. 625.
- 2019** – J. Desmars, E. Meza, B. Sicardy, M. Assafin, J. I. B. Camargo, F. Braga-Ribas, G. Benedetti-Rossi, A. Dias-Oliveira, **B.Morgado**, A. R. Gomes-Júnior, R. Vieira-Martins, R. Behrend, J. L. Ortiz, R. Duffard, N. Morales e P. Santos-Sanz. (2019). Pluto's ephemeris from ground-based stellar occultations (1988–2016), *Astronomy and Astrophysics*, v. 625.

**2019** – G. Benedetti-Rossi, P. Santos-Sanz, J. L. Ortiz, M. Assafin, B. Sicardy, N. Morales, R. Vieira-Martins, R. Duffard, F. Braga-Ribas, F. L. Rommel, J. I. B. Camargo, J. Desmars, A. F. Colas, F. Vachier, Alvarez-Candal, E. Fernández-Valenzuela, L. Almenares, R. Artola, T.-P. Baum, D. Bérard, F. Bianco, N. Brosch, V. Buso, A. Ceretta, C. A. Colazo, A. R. Gomes-Júnior, V. D. Ivanov, E. Jehin, S. Kaspi, J. Lecacheux, A. Maury, R. Melia, S. Moindrot, **B.Morgado**, C. Opitom, A. Peyrot, J. Pollock, A. Pratt, S. Roland, J. Spagnotto, G. Tancredi, J.-P. Teng, P. Cacella, M. Emilio, F. Feys, R. Gil-Hutton, C. Jacques, D. I. Machado, M. Malacarne, I. Manulis, A. C. Milone, G. Rojas e R. Sfair. The trans-Neptunian object (84922) 2003 VS2 through stellar occultations. *Astronomical Journal*, 158, 159.

**Aceito** – F. Braga-Ribas, A. Crispim, R. Vieira-Martins, B. Sicardy, J. L. Ortiz, M. Assafin, J. I. B. Camargo, J. Desmars, J. Lecacheux, P. Santos-Sanz, R. Duffard, G. Benedetti-Rossi, A. R. Gomes-Júnior, **B.Morgado**, F. L. Rommel, G. Margoti e C. L. Pereira. Database on detected stellar occultations by small outer Solar System objects. *Journal of Physics: Conference Series*, aceito em 23/07/2019.

**Aceito** – S. Santos-Filho, M. Assafin, **B.E.Morgado**, R. Vieira-Martins, J. I. B. Camargo, A. R. Gomes-Júnior e G. Benedetti-Rossi. Mutual approximations between the 5 main moons of Uranus. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, aceito em 08/10/2019.

**Submetido** – A. R. Gomes-Júnior, M. Assafin, F. Braga-Ribas, G. Benedetti-Rossi, **B.Morgado**, J. I. B. Camargo, R. Vieira-Martins, J. Desmars, T. Barry, D. Giles, W. Hanna, T. Hayamizu, T. Hirose, A. De Horta, R. Horvat, K. Hosoi, E. Jehin, S. Kerr, E. Fernández-Lajús, D. I. Machado, L. A. Mammana, D. Maybour, M. Owada e C. Snodgrass. The first observed stellar occultations by the irregular satellite Phoebe and improved rotational period. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, submetido em 16/09/2019.



# Astrometric positions for 18 irregular satellites of giant planets from 23 years of observations<sup>★,★★,★★★,★★★★</sup>

A. R. Gomes-Júnior<sup>1</sup>, M. Assafin<sup>1,4</sup>, R. Vieira-Martins<sup>1,2,3,4</sup>, J.-E. Arlot<sup>4</sup>, J. I. B. Camargo<sup>2,3</sup>, F. Braga-Ribas<sup>2,5</sup>, D. N. da Silva Neto<sup>6</sup>, A. H. Andrei<sup>1,2,4</sup>, A. Dias-Oliveira<sup>2</sup>, B. E. Morgado<sup>1</sup>, G. Benedetti-Rossi<sup>2</sup>, Y. Duchemin<sup>4,7</sup>, J. Desmars<sup>4</sup>, V. Lainey<sup>4</sup>, and W. Thuillot<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Observatório do Valongo/UFRJ, Ladeira Pedro Antônio 43, CEP 20.080-090 Rio de Janeiro – RJ, Brazil  
e-mail: altair08@astro.ufrj.br

<sup>2</sup> Observatório Nacional/MCT, R. General José Cristino 77, CEP 20921-400 Rio de Janeiro – RJ, Brazil  
e-mail: rvm@on.br

<sup>3</sup> Laboratório Interinstitucional de e-Astronomia – LIneA, Rua Gal. José Cristino 77, Rio de Janeiro, RJ 20921-400, Brazil

<sup>4</sup> Institut de mécanique céleste et de calcul des éphémérides – Observatoire de Paris, UMR 8028 du CNRS, 77 av. Denfert-Rochereau, 75014 Paris, France  
e-mail: arlot@imcce.fr

<sup>5</sup> Federal University of Technology – Paraná (UTFPR/DAFIS), Rua Sete de Setembro, 3165, CEP 80230-901 Curitiba, PR, Brazil

<sup>6</sup> Centro Universitário Estadual da Zona Oeste, Av. Manual Caldeira de Alvarenga 1203, CEP 23.070-200 Rio de Janeiro RJ, Brazil

<sup>7</sup> ESIGELEC-IRSEEM, Technopôle du Madrillet, Avenue Galilée, 76801 Saint-Etienne du Rouvray, France

Received 7 April 2015 / Accepted 6 May 2015

## ABSTRACT

**Context.** The irregular satellites of the giant planets are believed to have been captured during the evolution of the solar system. Knowing their physical parameters, such as size, density, and albedo is important for constraining where they came from and how they were captured. The best way to obtain these parameters are observations in situ by spacecrafts or from stellar occultations by the objects. Both techniques demand that the orbits are well known.

**Aims.** We aimed to obtain good astrometric positions of irregular satellites to improve their orbits and ephemeris.

**Methods.** We identified and reduced observations of several irregular satellites from three databases containing more than 8000 images obtained between 1992 and 2014 at three sites (Observatório do Pico dos Dias, Observatoire de Haute-Provence, and European Southern Observatory – La Silla). We used the software Platform for Reduction of Astronomical Images Automatically (PRAIA) to make the astrometric reduction of the CCD frames. The UCAC4 catalog represented the International Celestial Reference System in the reductions. Identification of the satellites in the frames was done through their ephemerides as determined from the SPICE/NAIF kernels. Some procedures were followed to overcome missing or incomplete information (coordinates, date), mostly for the older images.

**Results.** We managed to obtain more than 6000 positions for 18 irregular satellites: 12 of Jupiter, 4 of Saturn, 1 of Uranus (Sycorax), and 1 of Neptune (Nereid). For some satellites the number of obtained positions is more than 50% of what was used in earlier orbital numerical integrations.

**Conclusions.** Comparison of our positions with recent JPL ephemeris suggests there are systematic errors in the orbits for some of the irregular satellites. The most evident case was an error in the inclination of Carme.

**Key words.** planets and satellites: general – planets and satellites: individual: Jupiter – planets and satellites: individual: Saturn – astrometry

## 1. Introduction

The irregular satellites of the giant planets are smaller than the regular moons, having more eccentric, inclined, distant, and in most cases, retrograde orbits. Owing to their orbital

\* Position tables are only available at the CDS via anonymous ftp to [cdsarc.u-strasbg.fr](http://cdsarc.u-strasbg.fr) (130.79.128.5) or via <http://cdsarc.u-strasbg.fr/viz-bin/qcat?J/A+A/580/A76> and IAU NSDC database at [www.imcce.fr/nsdc](http://www.imcce.fr/nsdc)

\*\* Partially based on observations made at Laboratório Nacional de Astrofísica (LNA), Itajubá-MG, Brazil.

\*\*\* Partially based on observations through the ESO runs 079.A-9202(A), 075.C-0154, 077.C-0283 and 079.C-0345.

\*\*\*\* Partially based on observations made at Observatoire de Haute Provence (OHP), 04870 Saint-Michel l'observatoire, France.

configurations, it is largely accepted that these objects were captured in the early solar system (Sheppard & Jewitt 2003).

Because they are faint, the majority of these objects were only discovered in the last century<sup>1</sup>. They were never visited by a spacecraft, with the exception of Himalia, Phoebe, and Nereid, in a flyby by the Cassini space probe in 2000 for Himalia (Porco et al. 2003) and in 2004 for Phoebe (Desmars et al. 2013) and in a flyby by the Voyager 2 space probe in 1989 for Nereid (Smith et al. 1989). Even in situ, they were still opportunity target observations resulting in not optimal measurements, with size errors of 10 km for Himalia and 25 km for Nereid (Thomas et al. 1991). The exception is Phoebe with a very accurate measurement of size with a mean radius error of 0.7 km (Thomas 2010).

<sup>1</sup> Website: [http://ssd.jpl.nasa.gov/?sat\\_discovery](http://ssd.jpl.nasa.gov/?sat_discovery)

# New orbits of irregular satellites designed for the predictions of stellar occultations up to 2020, based on thousands of new observations

A. R. Gomes-Júnior,<sup>1</sup>★ M. Assafin,<sup>1</sup>† L. Beauvalet,<sup>2,3</sup>★ J. Desmars,<sup>4</sup>  
R. Vieira-Martins,<sup>1,2,5</sup>† J. I. B. Camargo,<sup>2,5</sup> B. E. Morgado<sup>1,2</sup> and F. Braga-Ribas<sup>2,6</sup>

<sup>1</sup>Observatório do Valongo/UFRJ, Ladeira Pedro Antônio 43, CEP 20080-090 Rio de Janeiro, RJ, Brazil

<sup>2</sup>Observatório Nacional/MCTI, R. General José Cristino 77, CEP 20921-400 Rio de Janeiro, RJ, Brazil

<sup>3</sup>Observatoire de Paris/SYRTE, 77 Avenue Denfert Rochereau, F-75014 Paris, France

<sup>4</sup>IMCCE, Observatoire de Paris, PSL Research University, CNRS, Sorbonne Universités, UPMC Univ Paris 06, Univ. Lille, 77 Avenue Denfert Rochereau, F-75014 Paris, France

<sup>5</sup>Laboratório Interinstitucional de e-Astronomia – LIneA, Rua Gal. José Cristino 77, 20921-400 Rio de Janeiro, RJ, Brazil

<sup>6</sup>Federal University of Technology – Paraná (UTFPR / DAFIS), Rua Sete de Setembro 3165, CEP 80230-901 Curitiba, PR, Brazil

Accepted 2016 July 14. Received 2016 July 13; in original form 2016 June 2

## ABSTRACT

Gomes-Júnior et al. published 3613 positions for the eight largest irregular satellites of Jupiter and 1787 positions for the largest irregular satellite of Saturn, Phoebe. These observations were made between 1995 and 2014 and have an estimated error of about 60–80 mas. Based on this set of positions, we derived new orbits for the eight largest irregular satellites of Jupiter: Himalia, Elara, Pasiphae, Carme, Lysithea, Sinope, Ananke and Leda. For Phoebe we updated the ephemeris from Desmars et al. using 75 per cent more positions than the previous one. Because of their orbital characteristics, it is common belief that the irregular satellites were captured by the giant planets in the early Solar system, but there is no consensus for a single model explaining where they were formed. Size, shape, albedo and composition would help to trace back their true origin, but these physical parameters are yet poorly known for irregular satellites. The observation of stellar occultations would allow for the determination of such parameters. Indeed Jupiter will cross the galactic plane in 2019–2020 and Saturn in 2018, improving a lot the chances of observing such events in the near future. Using the derived ephemerides and the UCAC4 catalogue we managed to identify 5442 candidate stellar occultations between 2016 January and 2020 December for the nine satellites studied here. We discussed how the successful observation of a stellar occultation by these objects is possible and present some potential occultations.

**Key words:** ephemerides – occultations – planets and satellites: general – planets and satellites: individual: Jovian and Saturnian irregular satellites.

## 1 INTRODUCTION

Irregular satellites revolve around giant planets at large distances in eccentric, highly inclined and frequently retrograde orbits. Because of these peculiar orbits, it is largely accepted that these objects did not form by accretion around their planet, but were captured in the early Solar system (Sheppard 2006).

There is no consensus for a single model explaining where the irregular satellites were formed. Čuk & Burns (2004) showed that

the progenitor of the Himalia group may have originated in heliocentric orbits similar to the Hilda asteroid group. Sheppard (2006) stated that the irregular satellites may be some of the objects that were formed within the giant planets region.

Grav et al. (2003) and Grav & Bauer (2007) showed that the irregular satellites from the giant planets have their colours and spectral slopes similar to C-, D- and P-type asteroids, Centaurs and trans-neptunian objects (TNOs). This suggests that they may have come from different locations in the early Solar system.

Sheppard (2006) and Jewitt & Haghighipour (2007) also explored the possibility that the irregular satellites originated as comets or TNOs. TNOs are highly interesting objects that, due to their large heliocentric distances, may be highly preserved with physical properties similar to those they had when they were formed (Barucci, Brown & Emery 2008). This is even more true for the smaller

\*E-mail: [altair08@astro.ufrj.br](mailto:altair08@astro.ufrj.br) (ARG-J); [massaf@astro.ufrj.br](mailto:massaf@astro.ufrj.br) (MA); [laurene.beauvalet@obspm.fr](mailto:laurene.beauvalet@obspm.fr) (LB)

† Affiliated researcher at Observatoire de Paris/IMCCE, 77 Avenue Denfert Rochereau, 75014 Paris, France.



## Size and Shape of Chariklo from Multi-epoch Stellar Occultations\*

R. Leiva<sup>1,2</sup> , B. Sicardy<sup>1</sup> , J. I. B. Camargo<sup>3,4</sup>, J.-L. Ortiz<sup>5</sup>, J. Desmars<sup>1</sup>, D. Bérard<sup>1</sup> , E. Lellouch<sup>6</sup> , E. Meza<sup>1</sup> ,  
P. Kervella<sup>1,7</sup> , C. Snodgrass<sup>8</sup> , R. Duffard<sup>5</sup> , N. Morales<sup>5</sup>, A. R. Gomes-Júnior<sup>9</sup>, G. Benedetti-Rossi<sup>3,4</sup> ,  
R. Vieira-Martins<sup>3,4,9</sup>, F. Braga-Ribas<sup>3,4,10</sup>, M. Assafin<sup>9</sup> , B. E. Morgado<sup>3</sup>, F. Colas<sup>11</sup>, C. De Witt<sup>12</sup>, A. A. Sickafoose<sup>13,14</sup>,  
H. Breytenbach<sup>13,15</sup>, J.-L. Dauvergne<sup>16</sup> , P. Schoenau<sup>12</sup>, L. Maquet<sup>11</sup> , K.-L. Bath<sup>12,17</sup>, H.-J. Bode<sup>12,17,25</sup>, A. Cool<sup>18,19</sup>,  
B. Lade<sup>18,19,20</sup>, S. Kerr<sup>21,22</sup>, and D. Herald<sup>21,23,24</sup>

<sup>1</sup> LESIA/Observatoire de Paris, CNRS UMR 8109, Université Pierre et Marie Curie, Université Paris-Diderot,  
5 place Jules Janssen, F-92195 Meudon Cédex, France; [mlleiva@uc.cl](mailto:mlleiva@uc.cl)

<sup>2</sup> Instituto de Astrofísica, Facultad de Física, Pontificia Universidad Católica de Chile, Av. Vicuña Mackenna 4860, Santiago, Chile  
<sup>3</sup> Observatório Nacional/MCTIC, Rua General José Cristino 77, RJ 20921-400, Rio de Janeiro, Brazil

<sup>4</sup> Laboratório Interinstitucional de e-Astronomia—LIneA, Rua General José Cristino 77, RJ 20921-400, Rio de Janeiro, Brazil  
<sup>5</sup> Instituto de Astrofísica de Andalucía, CSIC, Glorieta de la Astronomía s/n, E-18008, Granada, Spain

<sup>6</sup> LESIA, Observatoire de Paris, PSL Research University, CNRS, Sorbonne Universités, UPMC Univ. Paris 06,  
Univ. Paris Diderot, Sorbonne Paris Cité, 5 place Jules Janssen, F-92195 Meudon, France

<sup>7</sup> Unidad Mixta Internacional Franco-Chilena de Astronomía (CNRS UMI 3386), Departamento de Astronomía,  
Universidad de Chile, Camino El Observatorio 1515, Las Condes, Santiago, Chile

<sup>8</sup> School of Physical Sciences, The Open University, Milton Keynes, MK7 6AA, UK

<sup>9</sup> Observatório do Valongo/UFRJ, Ladeira Pedro Antonio 43, RJ 20.080-090, Rio de Janeiro, Brazil

<sup>10</sup> Federal University of Technology - Paraná (UTFPR/DAFIS), Rua Sete de Setembro, 3165, CEP 80230-901, Curitiba, PR, Brazil

<sup>11</sup> IMCCE, Observatoire de Paris, PSL Research University, CNRS, Sorbonne Universités,  
UPMC Univ. Paris 06, 77 Av. Denfert-Rochereau, F-75014, Paris, France

<sup>12</sup> IOTA/ES, Barthold-Knaust-Strasse 8, D-30459 Hannover, Germany

<sup>13</sup> South African Astronomical Observatory, P.O. Box 9, 7935 Observatory, South Africa

<sup>14</sup> Department of Earth, Atmospheric, and Planetary Sciences, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA 02139-4307, USA

<sup>15</sup> Department of Astronomy, University of Cape Town, Rondebosch, Cape Town, 7700, South Africa

<sup>16</sup> AFA/Ciel et Espace, 17 Emile Deutsch de la Meurthe, F-75014, Paris, France

<sup>17</sup> Internationale Amateursternwarte e. V. IAS, Hakos/Namibia and Bichler Str. 46, D-81479, Munich, Germany

<sup>18</sup> Defence Science & Technology Group, P.O. Box 1500, Edinburgh SA 5111, Australia

<sup>19</sup> The Heights Observatory, 12 Augustus St, Modbury Heights SA 5092, Australia

<sup>20</sup> Stockport Observatory, Astronomical Society of South Australia, Stockport, SA, Australia

<sup>21</sup> Occultation Section of the Royal Astronomical Society of New Zealand (RASNZ), P.O. Box 3181, Wellington, New Zealand

<sup>22</sup> Astronomical Association of Queensland, 5 Curtis Street, Pimpama QLD 4209, Australia

<sup>23</sup> International Occultation Timing Association (IOTA), P.O. Box 7152, Kent, WA 98042, USA

<sup>24</sup> Canberra Astronomical Society, Canberra, ACT, Australia

Received 2017 July 7; revised 2017 August 28; accepted 2017 August 28; published 2017 September 22

### Abstract

We use data from five stellar occultations observed between 2013 and 2016 to constrain Chariklo’s size and shape, and the ring reflectivity. We consider four possible models for Chariklo (sphere, Maclaurin spheroid, triaxial ellipsoid, and Jacobi ellipsoid), and we use a Bayesian approach to estimate the corresponding parameters. The spherical model has a radius  $R = 129 \pm 3$  km. The Maclaurin model has equatorial and polar radii  $a = b = 143^{+3}_{-6}$  km and  $c = 96^{+14}_{-4}$  km, respectively, with density  $970^{+300}_{-180}$  kg m<sup>-3</sup>. The ellipsoidal model has semiaxes  $a = 148^{+6}_{-4}$  km,  $b = 132^{+6}_{-5}$  km, and  $c = 102^{+10}_{-8}$  km. Finally, the Jacobi model has semiaxes  $a = 157 \pm 4$  km,  $b = 139 \pm 4$  km, and  $c = 86 \pm 1$  km, and density  $796^{+2}_{-4}$  kg m<sup>-3</sup>. Depending on the model, we obtain topographic features of 6–11 km, typical of Saturn icy satellites with similar size and density. We constrain Chariklo’s geometric albedo between 3.1% (sphere) and 4.9% (ellipsoid), while the ring  $I/F$  reflectivity is less constrained between 0.6% (Jacobi) and 8.9% (sphere). The ellipsoid model explains both the optical light curve and the long-term photometry variation of the system, giving a plausible value for the geometric albedo of the ring particles of 10%–15%. The derived mass of Chariklo of  $6\text{--}8 \times 10^{18}$  kg places the rings close to 3:1 resonance between the ring mean motion and Chariklo’s rotation period.

**Key words:** methods: statistical – minor planets, asteroids: individual (Chariklo) – occultations – planets and satellites: rings

### 1. Introduction

The Centaur object (10199) Chariklo is the only small object of the solar system known thus far to show the unambiguous

presence of a ring system. It was discovered during a ground-based stellar occultation in 2013 (Braga-Ribas et al. 2014), and confirmed by several subsequent observations (Bérard et al. 2017).

Meanwhile, the basic physical characteristics of Chariklo remain fragmentary. Chariklo’s radius estimations, taken from thermal measurements, vary from 108 to 151 km, with geometric albedo in the range 4%–8% (Jewitt & Kalas 1998; Altenhoff et al. 2001; Sekiguchi et al. 2012; Bauer et al. 2013;

\* Based on observations obtained at the Southern Astrophysical Research (SOAR) telescope, which is a joint project of the Ministério da Ciência, Tecnologia, e Inovação (MCTI) da República Federativa do Brasil, the U.S. National Optical Astronomy Observatory (NOAO), the University of North Carolina at Chapel Hill (UNC), and Michigan State University (MSU).

<sup>25</sup> Deceased, 2017 July 16.

# The size, shape, density and ring of the dwarf planet Haumea from a stellar occultation

J. L. Ortiz<sup>1</sup>, P. Santos-Sanz<sup>1</sup>, B. Sicardy<sup>2</sup>, G. Benedetti-Rossi<sup>3</sup>, D. Bérard<sup>2</sup>, N. Morales<sup>1</sup>, R. Duffard<sup>1</sup>, F. Braga-Ribas<sup>3,4</sup>, U. Hopp<sup>5,6</sup>, C. Ries<sup>5</sup>, V. Nascimbene<sup>7,8</sup>, F. Marzari<sup>9</sup>, V. Granata<sup>7,8</sup>, A. Pál<sup>10</sup>, C. Kiss<sup>10</sup>, T. Pribulla<sup>11</sup>, R. Komžík<sup>11</sup>, K. Hornoch<sup>12</sup>, P. Pravec<sup>12</sup>, P. Bacci<sup>13</sup>, M. Mastrapieri<sup>13</sup>, L. Nerli<sup>13</sup>, L. Mazzei<sup>13</sup>, M. Bachini<sup>14,15</sup>, F. Martinelli<sup>15</sup>, G. Succi<sup>14,15</sup>, F. Ciabattari<sup>16</sup>, H. Mikuz<sup>17</sup>, A. Carbognani<sup>18</sup>, B. Gährken<sup>19</sup>, S. Mottola<sup>20</sup>, S. Hellmich<sup>20</sup>, F. L. Rommel<sup>4</sup>, E. Fernández-Valenzuela<sup>1</sup>, A. Campo Bagatin<sup>21,22</sup>, S. Cikota<sup>23,24</sup>, A. Cikota<sup>25</sup>, J. Lecacheux<sup>2</sup>, R. Vieira-Martins<sup>3,26,27,28</sup>, J. I. B. Camargo<sup>3,27</sup>, M. Assafin<sup>28</sup>, F. Colas<sup>26</sup>, R. Behrend<sup>29</sup>, J. Desmars<sup>2</sup>, E. Meza<sup>2</sup>, A. Alvarez-Candal<sup>3</sup>, W. Beisker<sup>30</sup>, A. R. Gomes-Junior<sup>28</sup>, B. E. Morgado<sup>3</sup>, F. Roques<sup>2</sup>, F. Vachier<sup>26</sup>, J. Berthier<sup>26</sup>, T. G. Mueller<sup>6</sup>, J. M. Madiedo<sup>31</sup>, O. Unsalan<sup>32</sup>, E. Sonbas<sup>33</sup>, N. Karaman<sup>33</sup>, O. Erece<sup>34</sup>, D. T. Koseoglu<sup>34</sup>, T. Ozisik<sup>34</sup>, S. Kalkan<sup>35</sup>, Y. Guney<sup>36</sup>, M. S. Niaei<sup>37</sup>, O. Satir<sup>37</sup>, C. Yesilyaprak<sup>37,38</sup>, C. Puskullu<sup>39</sup>, A. Kabas<sup>39</sup>, O. Demircan<sup>39</sup>, J. Alikakos<sup>40</sup>, V. Charmandaris<sup>40,41</sup>, G. Leto<sup>42</sup>, J. Ohlert<sup>43,44</sup>, J. M. Christille<sup>18</sup>, R. Szakáts<sup>10</sup>, A. Takácsné Farkas<sup>10</sup>, E. Varga-Verebélyi<sup>10</sup>, G. Marton<sup>10</sup>, A. Marciniak<sup>45</sup>, P. Bartczak<sup>45</sup>, T. Santana-Ros<sup>45</sup>, M. Butkiewicz-Bak<sup>45</sup>, G. Dudziński<sup>45</sup>, V. Alf-Lagoa<sup>6</sup>, K. Gazeas<sup>46</sup>, L. Tzouganas<sup>46</sup>, N. Paschalis<sup>47</sup>, V. Tsamis<sup>48</sup>, A. Sánchez-Lavega<sup>49</sup>, S. Pérez-Hoyos<sup>49</sup>, R. Hueso<sup>49</sup>, J. C. Guirado<sup>50,51</sup>, V. Peris<sup>50</sup> & R. Iglesias-Marzoa<sup>52,53</sup>

**Haumea—one of the four known trans-Neptunian dwarf planets—is a very elongated and rapidly rotating body<sup>1–3</sup>. In contrast to other dwarf planets<sup>4–6</sup>, its size, shape, albedo and density are not well constrained. The Centaur Chariklo was the first body other than a giant planet known to have a ring system<sup>7</sup>, and the Centaur Chiron was later found to possess something similar to Chariklo's rings<sup>8,9</sup>. Here we report observations from multiple Earth-based observatories of Haumea passing in front of a distant star (a multi-chord stellar occultation). Secondary events observed around the main body of Haumea are consistent with the presence of a ring with an opacity of 0.5, width of 70 kilometres and radius of about 2,287 kilometres. The ring is coplanar with both Haumea's equator and the orbit of its satellite Hi'iaka. The radius of the ring places it close to the 3:1 mean-motion resonance with Haumea's spin period—that is, Haumea rotates three times on its axis in the time that a ring particle completes one revolution. The occultation by the main body provides an instantaneous elliptical projected shape with axes of about 1,704 kilometres and 1,138 kilometres. Combined with rotational light**

**curves, the occultation constrains the three-dimensional orientation of Haumea and its triaxial shape, which is inconsistent with a homogeneous body in hydrostatic equilibrium. Haumea's largest axis is at least 2,322 kilometres, larger than previously thought, implying an upper limit for its density of 1,885 kilograms per cubic metre and a geometric albedo of 0.51, both smaller than previous estimates<sup>1,10,11</sup>. In addition, this estimate of the density of Haumea is closer to that of Pluto than are previous estimates, in line with expectations. No global nitrogen- or methane-dominated atmosphere was detected.**

Within our programme of physical characterization of trans-Neptunian objects (TNOs), we predicted an occultation of the star URAT1 533–182543 by the dwarf planet (136108) Haumea and arranged observations as explained in Methods. Positive occultation detections were obtained on 21 January 2017, from twelve telescopes at ten different observatories. The instruments and the main features of each station are listed in Table 1.

As detailed in Methods (see also Fig. 1), the light curves (the normalized flux from the star plus Haumea versus time) show deep

<sup>1</sup>Instituto de Astrofísica de Andalucía (CSIC), Glorieta de la Astronomía S/N, 18008-Granada, Spain. <sup>2</sup>LESIA, Observatoire de Paris, PSL Research University, CNRS, Sorbonne Universités, UPMC Universités Paris 06, Universités Paris Diderot, Sorbonne Paris Cité, France. <sup>3</sup>Observatório Nacional/MCTIC, Rua General José Cristino 77, Rio de Janeiro CEP 20921-400, Brazil. <sup>4</sup>Federal University of Technology-Paraná (UTFPR/DAFIS), Rua Sete de Setembro 3165, CEP 80230-901 Curitiba, Brazil. <sup>5</sup>Universitäts-Sternwarte München, München, Scheiner Straße 1, D-81679 München, Germany. <sup>6</sup>Max-Planck-Institut für Extraterrestrische Physik, D-85741 Garching, Germany. <sup>7</sup>Dipartimento di Fisica e Astronomia, 'G. Galilei', Università degli Studi di Padova, Vicolo dell'Osservatorio 3, I-35122 Padova, Italy. <sup>8</sup>INAF—Osservatorio Astronomico di Padova, vicolo dell'Osservatorio 5, I-35122 Padova, Italy. <sup>9</sup>Dipartimento di Fisica, University of Padova, via Marzolo 8, 35131 Padova, Italy. <sup>10</sup>Konkoly Observatory, Research Centre for Astronomy and Earth Sciences, Hungarian Academy of Sciences, Konkoly Thege 15-17, H-1121 Budapest, Hungary. <sup>11</sup>Astronomical Institute, Slovak Academy of Sciences, 059 60 Tatranská Lomnica, Slovakia. <sup>12</sup>Astronomical Institute, Academy of Sciences of the Czech Republic, Fričova 298, 251 65 Ondřejov Czech Republic. <sup>13</sup>Astronomical Observatory San Marcello Pistoiese CARA Project, San Marcello Pistoiese, Pistoia, Italy. <sup>14</sup>Osservatorio astronomico di Tavolaia, Santa Maria a Monte, Italy. <sup>15</sup>Lajatico Astronomical Centre, Via Mulini a Vento 9 Orciatice, cap 56030 Lajatico, Italy. <sup>16</sup>Osservatorio Astronomico di Monte Agliale, Via Cune Motrone, I-55023 Borgo a Mozzano, Italy. <sup>17</sup>Črni Vrh Observatory, Predgrizje 29A, 5274 Črni Vrh nad Idrijo, Slovenia. <sup>18</sup>Astronomical Observatory of the Autonomous Region of the Aosta Valley (OAVdA), Lignan 39, 11020 Nus, Italy. <sup>19</sup>Bayerische Volkssternwarte München, Rosenheimer Straße 145h, D-81671 München, Germany. <sup>20</sup>German Aerospace Center (DLR), Institute of Planetary Research, Rutherfordstraße 2, 12489 Berlin, Germany. <sup>21</sup>Departamento de Física, Ingeniería de Sistemas y Teoría de la Señal, Universidad de Alicante, PO Box 99, E-03080 Alicante, Spain. <sup>22</sup>Instituto Universitario de Física Aplicada a las Ciencias y la Tecnología, Universidad de Alicante, PO Box 99, E-03080 Alicante, Spain. <sup>23</sup>University of Zagreb, Faculty of Electrical Engineering and Computing, Department of Applied Physics, Unska 3, 10000 Zagreb, Croatia. <sup>24</sup>Ruder Bošković Institute, Bijenička cesta 54, 10000 Zagreb, Croatia. <sup>25</sup>European Southern Observatory, Karl-Schwarzschild-Straße 2, 85748 Garching bei München, Germany. <sup>26</sup>IMCCE/Observatoire de Paris, 77 Avenue Denfert Rochereau, 75014 Paris, France. <sup>27</sup>Laboratório Interinstitucional de e-Astronomia-LInEA, Rua General José Cristino 77, Rio de Janeiro CEP 20921-400, Brazil. <sup>28</sup>Observatório do Valongo/UFRJ, Ladeira Pedro Antônio 43, Rio de Janeiro CEP 20080-090, Brazil. <sup>29</sup>Observatoire de Genève, CH1290 Sauverny, Switzerland. <sup>30</sup>International Occultation Timing Association—European Section (IOTA-ES) Bartold-Knausstraße 8, D-30459 Hannover, Germany. <sup>31</sup>Facultad de Ciencias Experimentales, Universidad de Huelva, Avenida de las Fuerzas Armadas, 21071 Huelva, Spain. <sup>32</sup>Ege University, Faculty of Science, Department of Physics, 35100 Izmir, Turkey. <sup>33</sup>University of Adiyaman, Department of Physics, 02040 Adiyaman, Turkey. <sup>34</sup>TUBITAK National Observatory (TUG), Akdeniz University Campus, 07058 Antalya, Turkey. <sup>35</sup>Ondokuz Mayıs University Observatory, Space Research Center, 55200 Kurupelit, Turkey. <sup>36</sup>Atatürk University, Science Faculty, Department of Physics, 25240 Erzurum, Turkey. <sup>37</sup>Atatürk University, Astrophysics Research and Application Center (ATASAM), 25240 Erzurum, Turkey. <sup>38</sup>Atatürk University, Science Faculty, Department of Astronomy and Astrophysics, 25240 Erzurum, Turkey. <sup>39</sup>Canakkale Onsekiz Mart University, Astrophysics Research Center (ARC) and Ulupinar Observatory (UPO), Canakkale, Turkey. <sup>40</sup>Institute for Astronomy, Astrophysics, Space Applications and Remote Sensing, National Observatory of Athens, GR-15236 Penteli, Greece. <sup>41</sup>Department of Physics, University of Crete, GR-71003 Heraklion, Greece. <sup>42</sup>INAF—Catania Astrophysical Observatory, Via Santa Sofia 78, I-95123 Catania, Italy. <sup>43</sup>Michael Adrian Observatorium, Astronomie Stiftung Trebur, Fichtenstraße 7, 65468 Trebur, Germany. <sup>44</sup>University of Applied Sciences, Technische Hochschule Mittelhessen, Wilhelm-Leuschner-Straße 13, D-61169 Friedberg, Germany. <sup>45</sup>Astronomical Observatory Institute, Faculty of Physics, A. Mickiewicz University, Stoleczna 36, 60-286 Poznań, Poland. <sup>46</sup>Section of Astrophysics, Astronomy and Mechanics, Department of Physics, National and Kapodistrian University of Athens, GR-15784 Athens, Greece. <sup>47</sup>Nunki Observatory, Skiathos Island 37002, Greece. <sup>48</sup>Ellinogermaniki Agogi Observatory, Dimitriou Panagea street, GR-15351 Athens, Greece. <sup>49</sup>Departamento de Física Aplicada I, Escuela de Ingeniería de Bilbao, Universidad del País Vasco UPV/EHU, Plaza Torres Quevedo 1, 48013 Bilbao, Spain. <sup>50</sup>Observatori Astronòmic de la Universitat de València, Catedrático José Beltrán, 2, 46980 Paterna, Spain. <sup>51</sup>Departament d'Astronomia i Astrofísica, Universitat de València, Calle Dr Moliner 50, E-46100 Burjassot, Spain. <sup>52</sup>Centro de Estudios de Física del Cosmos de Aragón, Plaza de San Juan 1, 2ª planta, 44001 Teruel, Spain. <sup>53</sup>Departamento de Astrofísica, Universidad de La Laguna, Avenida Astrofísico Fco Sánchez, 38200 La Laguna, Spain.

# Lower atmosphere and pressure evolution on Pluto from ground-based stellar occultations, 1988–2016

E. Meza<sup>1,\*</sup>, B. Sicardy<sup>1</sup>, M. Assafin<sup>2,3</sup>, J. L. Ortiz<sup>4</sup>, T. Bertrand<sup>5</sup>, E. Lellouch<sup>1</sup>, J. Desmars<sup>1</sup>, F. Forget<sup>6</sup>, D. Bérard<sup>1</sup>, A. Doressoundiram<sup>1</sup>, J. Lecacheux<sup>1</sup>, J. Marques Oliveira<sup>1</sup>, F. Roques<sup>1</sup>, T. Widemann<sup>1</sup>, F. Colas<sup>7</sup>, F. Vachier<sup>7</sup>, S. Renner<sup>7,8</sup>, R. Leiva<sup>9</sup>, F. Braga-Ribas<sup>1,3,10</sup>, G. Benedetti-Rossi<sup>3</sup>, J. I. B. Camargo<sup>3</sup>, A. Dias-Oliveira<sup>3</sup>, B. Morgado<sup>3</sup>, A. R. Gomes-Júnior<sup>3</sup>, R. Vieira-Martins<sup>3</sup>, R. Behrend<sup>11</sup>, A. Castro Tirado<sup>4</sup>, R. Duffard<sup>4</sup>, N. Morales<sup>4</sup>, P. Santos-Sanz<sup>4</sup>, M. Jelínek<sup>12</sup>, R. Cunniffe<sup>13</sup>, R. Queral<sup>14</sup>, M. Harnisch<sup>15,16</sup>, R. Jansen<sup>15,16</sup>, A. Pennell<sup>15,16</sup>, S. Todd<sup>15,16</sup>, V. D. Ivanov<sup>17</sup>, C. Opitom<sup>17</sup>, M. Gillon<sup>18</sup>, E. Jehin<sup>18</sup>, J. Manfroid<sup>18</sup>, J. Pollock<sup>19</sup>, D. E. Reichart<sup>20</sup>, J. B. Haislip<sup>20</sup>, K. M. Ivarsen<sup>20</sup>, A. P. LaCluyze<sup>21</sup>, A. Maury<sup>22</sup>, R. Gil-Hutton<sup>23</sup>, V. Dhillon<sup>24,25</sup>, S. Littlefair<sup>24</sup>, T. Marsh<sup>26</sup>, C. Veillet<sup>27</sup>, K.-L. Bath<sup>28,29</sup>, W. Beisker<sup>28,29</sup>, H.-J. Bode<sup>28,29,†</sup>, M. Kretlow<sup>28,29</sup>, D. Herald<sup>15,30,31</sup>, D. Gault<sup>15,32,33</sup>, S. Kerr<sup>15,34</sup>, H. Pavlov<sup>30</sup>, O. Faragó<sup>29,†</sup>, O. Klös<sup>29</sup>, E. Frappa<sup>35</sup>, M. Lavayssière<sup>35</sup>, A. A. Cole<sup>36</sup>, A. B. Giles<sup>36</sup>, J. G. Greenhill<sup>36,†</sup>, K. M. Hill<sup>36</sup>, M. W. Buie<sup>9</sup>, C. B. Olkin<sup>9</sup>, E. F. Young<sup>9</sup>, L. A. Young<sup>9</sup>, L. H. Wasserman<sup>37</sup>, M. Devogèle<sup>37</sup>, R. G. French<sup>38</sup>, F. B. Bianco<sup>39,40,41,42</sup>, F. Marchis<sup>1,43</sup>, N. Brosch<sup>44</sup>, S. Kaspi<sup>44</sup>, D. Polishook<sup>45</sup>, I. Manulis<sup>45</sup>, M. Ait Moulay Larbi<sup>46</sup>, Z. Benkhaldoun<sup>46</sup>, A. Daassou<sup>46</sup>, Y. El Azhari<sup>46</sup>, Y. Moulane<sup>18,46</sup>, J. Broughton<sup>15</sup>, J. Milner<sup>15</sup>, T. Dobosz<sup>47</sup>, G. Bolt<sup>48</sup>, B. Lade<sup>49</sup>, A. Gilmore<sup>50</sup>, P. Kilmartin<sup>50</sup>, W. H. Allen<sup>15</sup>, P. B. Graham<sup>15,51</sup>, B. Loader<sup>15,30</sup>, G. McKay<sup>15</sup>, J. Talbot<sup>15</sup>, S. Parker<sup>52</sup>, L. Abe<sup>53</sup>, Ph. Bendjoya<sup>53</sup>, J.-P. Rivet<sup>53</sup>, D. Vernet<sup>53</sup>, L. Di Fabrizio<sup>54</sup>, V. Lorenzi<sup>25,54</sup>, A. Magazzù<sup>54</sup>, E. Molinari<sup>54,55</sup>, K. Gazeas<sup>56</sup>, L. Tzouganatos<sup>56</sup>, A. Carbognani<sup>57</sup>, G. Bonnoli<sup>58</sup>, A. Marchini<sup>29,58</sup>, G. Leto<sup>59</sup>, R. Zanmar Sanchez<sup>59</sup>, L. Mancini<sup>60,61,62,63</sup>, B. Kattentidt<sup>29</sup>, M. Dohrmann<sup>29,64</sup>, K. Guhl<sup>29,64</sup>, W. Rothe<sup>29,64</sup>, K. Walzel<sup>64</sup>, G. Wortmann<sup>64</sup>, A. Eberle<sup>65</sup>, D. Hampf<sup>65</sup>, J. Ohlert<sup>66,67</sup>, G. Krannich<sup>68</sup>, G. Murawsky<sup>69</sup>, B. Gährken<sup>70</sup>, D. Gloistein<sup>71</sup>, S. Alonso<sup>72</sup>, A. Román<sup>73</sup>, J.-E. Communal<sup>74</sup>, F. Jabel<sup>75</sup>, S. deVisscher<sup>76</sup>, J. Sérot<sup>77</sup>, T. Janik<sup>78</sup>, Z. Moravec<sup>78</sup>, P. Machado<sup>79</sup>, A. Selva<sup>29,80</sup>, C. Perello<sup>29,80</sup>, J. Rovira<sup>29,80</sup>, M. Conti<sup>81</sup>, R. Papini<sup>29,81</sup>, F. Salvaggio<sup>29,81</sup>, A. Noschese<sup>29,82</sup>, V. Tsamis<sup>29,83</sup>, K. Tigani<sup>83</sup>, P. Barroy<sup>84</sup>, M. Irzyk<sup>84</sup>, D. Neel<sup>84</sup>, J. P. Godard<sup>84</sup>, D. Lanoiselée<sup>84</sup>, P. Sogorb<sup>84</sup>, D. Vérilhac<sup>85</sup>, M. Bretton<sup>86</sup>, F. Signoret<sup>87</sup>, F. Ciabattari<sup>88</sup>, R. Naves<sup>29</sup>, M. Boutet<sup>89</sup>, J. De Queiroz<sup>29</sup>, P. Lindner<sup>29</sup>, K. Lindner<sup>29</sup>, P. Enskonatus<sup>29</sup>, G. Dangl<sup>29</sup>, T. Tordai<sup>29</sup>, H. Eichler<sup>90</sup>, J. Hattenbach<sup>90</sup>, C. Peterson<sup>91</sup>, L. A. Molnar<sup>92</sup>, and R. R. Howell<sup>93</sup>

(Affiliations can be found after the references)

Received 19 September 2018 / Accepted 1 March 2019

## ABSTRACT

**Context.** The tenuous nitrogen (N<sub>2</sub>) atmosphere on Pluto undergoes strong seasonal effects due to high obliquity and orbital eccentricity, and has recently (July 2015) been observed by the New Horizons spacecraft.

**Aims.** The main goals of this study are (i) to construct a well calibrated record of the seasonal evolution of surface pressure on Pluto and (ii) to constrain the structure of the lower atmosphere using a central flash observed in 2015.

**Methods.** Eleven stellar occultations by Pluto observed between 2002 and 2016 are used to retrieve atmospheric profiles (density, pressure, temperature) between altitude levels of ~5 and ~380 km (i.e. pressures from ~10 μbar to 10 nbar).

**Results.** (i) Pressure has suffered a monotonic increase from 1988 to 2016, that is compared to a seasonal volatile transport model, from which tight constraints on a combination of albedo and emissivity of N<sub>2</sub> ice are derived. (ii) A central flash observed on 2015 June 29 is consistent with New Horizons REX profiles, provided that (a) large diurnal temperature variations (not expected by current models) occur over Sputnik Planitia; and/or (b) hazes with tangential optical depth of ~0.3 are present at 4–7 km altitude levels; and/or (c) the nominal REX density values are overestimated by an implausibly large factor of ~20%; and/or (d) higher terrains block part of the flash in the Charon facing hemisphere.

**Key words.** methods: observational – methods: data analysis – planets and satellites: atmospheres – techniques: photometric – planets and satellites: physical evolution – planets and satellites: terrestrial planets

\* Partly based on observations made with the Ultracam camera at the Very Large Telescope (VLT Paranal), under program ID 079.C-0345(F), the ESO camera NACO at VLT, under program IDs 079.C-0345(B), 089.C-0314(C) and 291.C- 5016, the ESO camera ISAAC at VLT under program ID 085.C-0225(A), the ESO camera SOFI at NTT Paranal, under program ID 085.C-0225(B), the WFI camera at 2.2 m La Silla,

under program ID's 079.A-9202(A), 075.C-0154, 077.C-0283, 079.C-0345, 088.C-0434(A), 089.C-0356(A), 090.C-0118(A) and 091.C-0454(A), the Laboratório Nacional de Astrofísica (LNA), Itajubá – MG, Brazil, the Southern Astrophysical Research (SOAR) telescope, and the Italian Telescopio Nazionale Galileo (TNG).

† Deceased.

# Pluto's ephemeris from ground-based stellar occultations (1988–2016)

J. Desmars<sup>1</sup>, E. Meza<sup>1</sup>, B. Sicardy<sup>1</sup>, M. Assafin<sup>2</sup>, J. I. B. Camargo<sup>3</sup>, F. Braga-Ribas<sup>4,3,1</sup>, G. Benedetti-Rossi<sup>3</sup>, A. Dias-Oliveira<sup>5,3</sup>, B. Morgado<sup>3</sup>, A. R. Gomes-Júnior<sup>6,2</sup>, R. Vieira-Martins<sup>3</sup>, R. Behrend<sup>7</sup>, J. L. Ortiz<sup>8</sup>, R. Duffard<sup>8</sup>, N. Morales<sup>8</sup>, and P. Santos Sanz<sup>8</sup>

<sup>1</sup> LESIA, Observatoire de Paris, Université PSL, CNRS, Sorbonne Université, Univ. Paris Diderot, Sorbonne Paris Cité, 5 place Jules Janssen, 92195 Meudon, France  
e-mail: [josselin.desmars@obspm.fr](mailto:josselin.desmars@obspm.fr)

<sup>2</sup> Observatório do Valongo/UFRJ, Ladeira Pedro Antonio 43, Rio de Janeiro, RJ 20080-090, Brazil

<sup>3</sup> Observatório Nacional/MCTIC, Laboratório Interinstitucional de e-Astronomia-LIneA and INCT do e-Universo, Rua General José Cristino 77, Rio de Janeiro 20921-400, Brazil

<sup>4</sup> Federal University of Technology – Paraná (UTFPR/DAFIS), Rua Sete de Setembro 3165, 80230-901 Curitiba, Brazil

<sup>5</sup> Escola SESC de Ensino Médio, Avenida Ayrton Senna 5677, Rio de Janeiro, RJ 22775-004, Brazil

<sup>6</sup> UNESP – São Paulo State University, Grupo de Dinâmica Orbital e Planetologia, 12516-410 Guaratinguetá, Brazil

<sup>7</sup> Geneva Observatory, 1290 Sauverny, Switzerland

<sup>8</sup> Instituto de Astrofísica de Andalucía (IAA-CSIC), Glorieta de la Astronomía s/n, 18008 Granada, Spain

Received 21 December 2018 / Accepted 8 March 2019

## ABSTRACT

**Context.** From 1988 to 2016, several stellar occultations have been observed to characterise Pluto's atmosphere and its evolution. From each stellar occultation, an accurate astrometric position of Pluto at the observation epoch is derived. These positions mainly depend on the position of the occulted star and the precision of the timing.

**Aims.** We present 19 Pluto's astrometric positions derived from occultations from 1988 to 2016. Using *Gaia* DR2 for the positions of the occulted stars, the accuracy of these positions is estimated at 2–10 mas, depending on the observation circumstances. From these astrometric positions, we derive an updated ephemeris of Pluto's system barycentre using the NIMA code.

**Methods.** The astrometric positions were derived by fitting the light curves of the occultation by a model of Pluto's atmosphere. The fits provide the observed position of the centre for a reference star position. In most cases other publications provided the circumstances of the occultation such as the coordinates of the stations, timing, and impact parameter, i.e. the closest distance between the station and centre of the shadow. From these parameters, we used a procedure based on the Bessel method to derive an astrometric position.

**Results.** We derive accurate Pluto's astrometric positions from 1988 to 2016. These positions are used to refine the orbit of Pluto's system barycentre providing an ephemeris, accurate to the milliarcsecond level, over the period 2000–2020, allowing for better predictions for future stellar occultations.

**Key words.** astrometry – celestial mechanics – ephemerides – occultations – Kuiper belt objects: individual: Pluto

## 1. Introduction

Stellar occultation is a unique technique to obtain the physical parameters of distant objects or to probe their atmosphere and surroundings. For instance, [Meza et al. \(2019\)](#) have used 11 stellar occultations by Pluto from 2002 to 2016 to study the evolution of Pluto's atmosphere. Meanwhile, occultations allow an accurate determination of the relative position of the centre of the body compared to the position of the occulted star, leading to an accurate astrometric position of Pluto at the time of occultation if the star position is also known accurately.

The accuracy of the position of the body mainly depends on the knowledge of the shape and size of the body, modelling of the atmosphere, precision of the timing system, velocity of the occultation, exposure time of the camera, precision of the stellar position, and magnitude of the occulted star. Since the publication of the *Gaia* catalogues in September 2016 for the first release ([Gaia Collaboration 2016](#)) and moreover with the second release in April 2018 ([Gaia Collaboration 2018](#)) including proper

motions and trigonometric parallaxes of the stars, the precision of the stellar catalogues can now reach a tenth of a milliarcsecond. For comparison, before *Gaia* catalogues, the precision of stellar catalogues such as UCAC2 ([Zacharias et al. 2004](#)) or UCAC4 ([Zacharias et al. 2013](#)), was about 50–100 mas per star including zonal errors. With *Gaia*, the precision of positions deduced from occultations is expected to be around few milliarcseconds, taking into account the systematic errors. Thanks to the accuracy of the *Gaia* DR2 catalogue, occultations can provide the most accurate astrometric measurement of a body in the outer solar system.

In this paper, we present the astrometric positions we derived from occultations presented in [Meza et al. \(2019; Sect. 2.1\)](#) and in other publications (Sect. 2.2). We detail a method to derive astrometric positions from other publications, knowing the circumstances of occultations: timing and impact parameter (Appendix). Finally, in Sect. 3 we present a refined ephemeris of Pluto's system barycentre and we discuss the improvement in the predictions of future occultations by Pluto at a milliarcsecond level accuracy as well as the geometry of past events (Sect. 4).

# Database on detected stellar occultations by small outer Solar System objects

**F Braga-Ribas<sup>1,2,3</sup>, A Crispim<sup>1</sup>, R Vieira-Martins<sup>3,4</sup>, B Sicardy<sup>2</sup>, J L Ortiz<sup>5</sup>, M Assafin<sup>6</sup>, J I B Camargo<sup>3,4</sup>, J Desmars<sup>2</sup>, J Lecacheux<sup>2</sup>, P Santos-Sanz<sup>5</sup>, R Duffard<sup>5</sup>, G Benedetti-Rossi<sup>2,4</sup>, A R Gomes-Júnior<sup>8</sup>, B Morgado<sup>3,4</sup>, F L Rommel<sup>3,4</sup>, G Margoti<sup>1</sup> and C L Pereira<sup>1</sup>.**

<sup>1</sup> Federal University of Technology Paraná (UTFPR-DAFIS), Curitiba, Brazil;

<sup>2</sup> LESIA, Observatoire de Paris, PSL Research University, CNRS, Sorbonne Université, UPMC Univ. Paris 06, Univ. Paris Diderot, Sorbonne Paris Cité;

<sup>3</sup> Observatório Nacional (ON/MCTIC), Rio de Janeiro, Brazil

<sup>4</sup> Laboratório Interinstitucional de e-Astronomia (LIneA) & INCT do e-Universo, Rio de Janeiro, Brazil

<sup>5</sup> Instituto de Astrofísica de Andalucía, IAA-CSIC, Glorieta de la Astronomía s/n, 18008 Granada, Spain

<sup>6</sup> Observatório do Valongo/UFRJ, Rio de Janeiro, Brazil

<sup>7</sup> UNESP, Guaratinguet, Brazil

E-mail: [ribas@on.br](mailto:ribas@on.br)

**Abstract.** Review: Stellar occultation by objects of the Solar System is a powerful technique that allows measurements of size and shape of the small bodies, with accuracies in the order of the kilometre. In addition, the occultation star probes the surroundings of the object, allowing the study of putative rings/debris or atmosphere around it. Since 2009, more than 60 events by trans-Neptunian and Centaur objects have been detected, involving more than 30 different bodies. Some remarkable results were achieved, such as the discovery of rings around Chariklo and Haumea, or the high albedo of Eris and the lack of global atmosphere around Makemake, the discovery of the double shape of 2014 MU<sub>69</sub>, among others. After the release of Gaia catalogues, predictions became more accurate, leading to an increasing number of successful observations of occultation events. To keep track of the results achieved with this technique we created a database to gather all the detected events worldwide. The database is presented as an electronic table (<http://occultations.ct.utfpr.edu.br/>), where the main information obtained from any occultation by small outer solar system objects are listed. The structure and term definitions used in the database are presented here as well as some simple statistics that can be done with the occultation results presented in the database.













## 1. Introduction

Small outer Solar System objects are remnants of our system formation that are orbiting the Sun beyond Jupiter's orbit. They are divided into different groups according to their dynamical properties. They are known as the Trojans, the Centaurs and the Trans-Neptunian Objects (TNOs for short).

The study of these small distant bodies is relevant in the context of the Solar System dynamical evolution. It is believed that they are pristine objects of an evolved planetesimal



## The Trans-Neptunian Object (84922) 2003 VS<sub>2</sub> through Stellar Occultations

Gustavo Benedetti-Rossi<sup>1,2,3</sup> , P. Santos-Sanz<sup>4</sup> , J. L. Ortiz<sup>4</sup>, M. Assafin<sup>5</sup> , B. Sicardy<sup>3,6</sup> , N. Morales<sup>4</sup>, R. Vieira-Martins<sup>1,2,7</sup>,  
R. Duffard<sup>4</sup> , F. Braga-Ribas<sup>1,2,3,8</sup> , F. L. Rommel<sup>1,2</sup>, J. I. B. Camargo<sup>1,2</sup>, J. Desmars<sup>3</sup>, A. F. Colas<sup>7</sup>, F. Vachier<sup>7</sup> ,  
A. Alvarez-Candal<sup>1</sup>, E. Fernández-Valenzuela<sup>9</sup> , L. Almenares<sup>10</sup>, R. Artola<sup>11</sup>, T.-P. Baum<sup>12</sup>, R. Behrend<sup>13</sup>, D. Bérard<sup>3</sup> ,  
F. B. Bianco<sup>14,15,16,17</sup> , N. Brosch<sup>18</sup>, A. Ceretta<sup>19</sup>, C. A. Colazo<sup>11</sup>, A. R. Gomes-Junior<sup>2,20</sup>, V. D. Ivanov<sup>21</sup> , E. Jehin<sup>22</sup>,  
S. Kaspi<sup>18</sup>, J. Lecacheux<sup>3</sup>, A. Maury<sup>23</sup>, R. Melia<sup>11</sup>, S. Moindrot<sup>24</sup>, B. Morgado<sup>1,2</sup>, C. Opitom<sup>25</sup>, A. Peyrot<sup>12</sup>, J. Pollock<sup>26</sup>, A. Pratt<sup>27</sup>,  
S. Roland<sup>28</sup>, J. Spagnotto<sup>29</sup>, G. Tancredi<sup>10</sup>, J.-P. Teng<sup>12</sup>, P. Caçella<sup>30</sup>, M. Emilio<sup>1,31</sup> , F. Feys<sup>27</sup>, R. Gil-Hutton<sup>32</sup>, C. Jacques<sup>33</sup>,  
D. I. Machado<sup>34,35</sup>, M. Malacarne<sup>36</sup>, I. Manulis<sup>37</sup>, A. C. Milone<sup>38</sup>, G. Rojas<sup>39</sup>, and R. Sfair<sup>20</sup>

<sup>1</sup> Observatório Nacional (ON/MCTIC), Rua Gal. José Cristino, 77—Bairro Imperial de São Cristóvão, Rio de Janeiro, Brazil; [gugabrossi@gmail.com](mailto:gugabrossi@gmail.com), [gustavo.benedetti-rossi@obspm.fr](mailto:gustavo.benedetti-rossi@obspm.fr), [gustavorossi@on.br](mailto:gustavorossi@on.br)

<sup>2</sup> Laboratório Interinstitucional de e-Astronomia (LIneA) & INCT do e-Universo, Rio de Janeiro, Brazil

<sup>3</sup> LESIA, Observatoire de Paris—Section Meudon, 5 Place Jules Janssen—92195 Meudon Cedex, France

<sup>4</sup> Instituto de Astrofísica de Andalucía, IAA-CSIC, Glorieta de la Astronomía s/n, E-18008 Granada, Spain

<sup>5</sup> Observatório do Valongo/UFRJ, Ladeira Pedro Antonio 43, Rio de Janeiro, 20080-090, Brazil

<sup>6</sup> PSL Research University, CNRS, Sorbonne Université, UPMC Univ. Paris 06, Univ. Paris Diderot, Sorbonne Paris Cité, France

<sup>7</sup> IMCCE/Observatoire de Paris, CNRS UMR F-8028, Paris, France

<sup>8</sup> Federal University of Technology—Paraná (UTFPR/DAFIS), Av. Sete de Setembro, 3165, CEP 80230-901, Curitiba/PR, Brazil

<sup>9</sup> Florida Space Institute, University of Central Florida, 12354 Research Parkway, Partnership 1, Suite 211, Orlando, FL, USA

<sup>10</sup> Departamento de Astronomía, Facultad de Ciencias, Montevideo, Uruguay

<sup>11</sup> Estación Astrofísica de Bosque Alegre, Cordoba, Argentina

<sup>12</sup> Observatoire Astronomique des Makes, Les Makes, F-97421—La Rivière, Ile de la Réunion, France

<sup>13</sup> Observatoire de Genève, CH-1290 Sauverny, Switzerland

<sup>14</sup> University of Delaware, Department of Physics and Astronomy, USA

<sup>15</sup> University of Delaware, Joseph R. Biden Jr. School for Public Policy and Administration, USA

<sup>16</sup> University of Delaware, Data Science Institute, USA

<sup>17</sup> New York University, Center for Urban Science and Progress, USA

<sup>18</sup> School of Physics & Astronomy and Wise Observatory, Tel Aviv University, Israel

<sup>19</sup> Observatorio Astronómico Los Molinos, MEC, Uruguay

<sup>20</sup> UNESP—São Paulo State University, Grupo de Dinâmica Orbital e Planetologia, CEP 12516-410, Guaratinguetá, SP, Brazil

<sup>21</sup> ESO, Karl-Schwarzschild-Str. 2, D-85748 Garching bei München, Germany

<sup>22</sup> STAR Institute—University of Liège, Allée du 6 Août 17, B-4000 Liège, Belgium

<sup>23</sup> San Pedro de Atacama Celestial Explorations, Casilla 21, San Pedro de Atacama 1410000, Chile

<sup>24</sup> Observatoire de Puimichel, F-04700—Puimichel, France

<sup>25</sup> European Southern Observatory—Alonso de Cordova 3107, Vitacura, Santiago, Chile

<sup>26</sup> Physics and Astronomy Department, Appalachian State University, Boone, NC 28608, USA

<sup>27</sup> IOTA/ES—International Occultation Timing Association/European Section, Germany

<sup>28</sup> CURE, Universidad de la Republica, Uruguay

<sup>29</sup> Observatorio El Catalejo, Santa Rosa, La Pampa, Argentina

<sup>30</sup> DogsHeaven Observatory X87, Brasília, Brazil

<sup>31</sup> Universidade Estadual de Ponta Grossa, O.A.—DEGEO, Avenida Carlos Cavalcanti 4748, Ponta Grossa 84030-900, PR, Brazil

<sup>32</sup> Grupo de Ciencias Planetarias, Departamento de Geofísica y Astronomía, San Juan National University and CONICET, Av. José I. de la Roza 590(0), J5402DCS, San Juan, Argentina

<sup>33</sup> Southern Observatory for Near Earth Asteroids Research (SONEAR), Brazil

<sup>34</sup> Universidade Estadual do Oeste do Paraná (Unioeste), Avenida Tarquínio Joslin dos Santos 1300, Foz do Iguaçu, PR 85870-650, Brazil

<sup>35</sup> Polo Astronômico Casimiro Montenegro Filho/FPTI-BR, Avenida Tancredo Neves 6731, Foz do Iguaçu, PR 85867-900, Brazil

<sup>36</sup> Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), Brazil

<sup>37</sup> Weizmann Institute of Science, Rehovot, Israel

<sup>38</sup> Astrophysics Division, National Institute for Space Research (INPE), Av. dos Astronautas 1758, São José dos Campos, SP, 12227-010, Brazil

<sup>39</sup> Observatório Astronômico—Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), São Carlos, Brazil

Received 2019 May 27; revised 2019 August 8; accepted 2019 August 11; published 2019 September 27

### Abstract

We present results from three world-wide campaigns that resulted in the detections of two single-chord and one multi-chord stellar occultations by the plutino object (84922) 2003 VS<sub>2</sub>. From the single-chord occultations in 2013 and 2014 we obtained accurate astrometric positions for the object, while from the multi-chord occultation on 2014 November 7, we obtained the parameters of the best-fitting ellipse to the limb of the body at the time of occultation. We also obtained short-term photometry data for the body in order to derive its rotational phase during the occultation. The rotational light curve present a peak-to-peak amplitude of  $0.141 \pm 0.009$  mag. This allows us to reconstruct the 3D shape of the body, with principal semi-axes of  $a = 313.8 \pm 7.1$  km,  $b = 265.5^{+8.8}_{-9.8}$  km, and  $c = 247.3^{+26.6}_{-43.6}$  km, which is not consistent with a Jacobi triaxial equilibrium figure. The derived spherical volume equivalent diameter of  $548.3^{+29.5}_{-44.6}$  km is about 5% larger than the radiometric diameter of 2003 VS<sub>2</sub> derived from *Herschel* data of  $523 \pm 35$  km, but still compatible with it within error bars. From those results we can also derive the geometric albedo ( $0.123^{+0.015}_{-0.014}$ ) and, under the assumption that the object is a Maclaurin spheroid, the density  $\rho = 1400^{+1000}_{-300}$  for the plutino. The disappearances and reappearances of the star



# Mutual approximations between the 5 main moons of Uranus

S. Santos-Filho<sup>1\*</sup>, M. Assafin<sup>1,3</sup>, B. E. Morgado<sup>2,3</sup>, R. Vieira-Martins<sup>1,2,3</sup>, J. I. B. Camargo<sup>2,3</sup>,  
A. R. Gomes-Júnior<sup>3,4</sup>, and G. Benedetti-Rossi<sup>2,3,5</sup>,

<sup>1</sup>*Observatório do Valongo/UFRJ, Ladeira do Pedro Antonio 43, Rio de Janeiro, RJ 20.080-090, Brazil*

<sup>2</sup>*Observatório Nacional/MCTI, R. General José Cristino 77, Rio de Janeiro, RJ 20.921-400, Brazil*

<sup>3</sup>*Laboratório Interinstitucional de e-Astronomia - LInEA, Rua Gal. José Cristino 77, Rio de Janeiro, RJ 20921-400, Brazil*

<sup>4</sup>*UNESP - São Paulo State University, Grupo de Dinâmica Orbital e Planetologia, CEP 12516-410, Guaratinguetá, SP 12516-410, Brazil*

<sup>5</sup>*LESIA, Observatoire de Paris - Section Meudon, 5 Place Jules Janssen - 92195 Meudon Cedex*

in original form 2019

## ABSTRACT

Doing high precision astrometry on Uranus’ moons is currently quite challenging. No probes will orbit the system before 2040. New high precision mutual phenomena measurements will only occur in 2050. Besides, Uranus is slowly passing through a sky region without much stars, which difficults mapping FOV distortions below 50 mas. In this context, the new astrometric technique of mutual approximations comes at handy. It measures central instants at closest approach between two moving satellites in the sky plane. Measurements are made on small portions of the FOV, benefiting from the so called *precision premium*. Approximations and mutual phenomena share geometric principles and parameters, with similar precision in central instant as indicated by first applications to the Jovian moons. However, mutual phenomena can only be observed at the planet’s equinoxes, while approximations occur always. Central instants don’t depend on reference stars and are useful on orbit and ephemeris fittings. Here, we present results for 23 mutual approximations between the five main Uranus satellites observed in Brazil during 2015-2018 with a 1.6 m aperture telescope. Digital coronagraphy mitigated Uranus’ scattered light, improving measurements for Miranda, Ariel and Umbriel. We measured the impact parameter and relative velocity in milliarcsecond unities for the first time by using a variant of the method. Relative position errors, including Miranda, were 45 mas per coordinate, twice better than in classical CCD astrometry for this satellite, and comparable to mutual phenomena. This shows the potential of mutual approximations for improving the current orbits and ephemerides of Uranus’ moons.

**Key words:** methods: data analysis – astrometry – ephemerides – planets and satellites: individual: Miranda, Ariel, Umbriel, Titania, Oberon.

## 1 INTRODUCTION

Astrometry of the natural satellites of planets allows for the improvement of the dynamic models of their orbits (Jacobson 2014), which in turn enriches the study of the origin (Charnoz et al. 2011; Crida & Charnoz 2012) and evolution (Lainey 2008; Lainey et al. 2009) of these bodies. In addition, it brings important links and constrains to the formation and evolution of the Solar System (Nogueira et al. 2011). Dynamics knowledge also improves ephemeris, allowing for the astrophysical investigation of natural satellites in other rich ways, such as in space exploration and through stellar occultations.

When Voyager II visited Uranus’ moons in 1986 (Smith et al. 1986), the solar sub-point was in their southern hemispheres. Now their equator and north parts are visible. This raises interest for

studies on the newly illuminated surfaces of these bodies. Are they different from the south? Are there new features that can tell more about the forces and physics that modelled the satellites’ surfaces? These topics are on the scope of future space probe missions to be launched from 2030 on, to arrive at the Uranus system from 2040 on (Hofstadter et al. 2019). Ephemeris work is crucial for the planning and successful execution of missions in the spacial exploration of moon systems.

Stellar occultations add great physical knowledge to solar system bodies in general and to natural satellites alike (Sicardy et al. 2006a,b; Widemann 2009; Morgado et al. 2019a). Accurate and precise shape, size and albedo measurements of the moons, and also the exploration of their surrounding environments, including atmospheres, can be made from the ground independently from the phase angle illumination of the Sun. The success in observing a stellar occultation at the right time and place depends upon good

\* E-mail: sergiosantos@astro.ufrj.br

# The first observed stellar occultations by the irregular satellite Phoebe and improved rotational period<sup>\*</sup>

A. R. Gomes-Júnior<sup>1,2,3,†</sup>, M. Assafin<sup>2,3,‡</sup>, F. Braga-Ribas<sup>4,5</sup>, G. Benedetti-Rossi<sup>6,5,3</sup>,  
 B. Morgado<sup>5,3</sup>, J. I. B. Camargo<sup>5,3</sup>, R. Vieira-Martins<sup>5,3,2,‡</sup>, J. Desmars<sup>6</sup>, T. Barry<sup>7</sup>,  
 D. Giles<sup>7</sup>, W. Hanna<sup>8</sup>, T. Hayamizu<sup>9</sup>, T. Hirose<sup>9</sup>, A. De Horta<sup>7</sup>, R. Horvat<sup>7</sup>, K. Hosoi<sup>9</sup>,  
 E. Jehin<sup>10</sup>, S. Kerr<sup>11,12</sup>, E. Fernández-Lajús<sup>13,14</sup>, M. I. Machado<sup>15,16</sup>, L. A. Mammana<sup>13,14</sup>,  
 D. Maybour<sup>7</sup>, M. Owada<sup>9</sup>, C. Snodgrass<sup>17</sup>

<sup>1</sup>UNESP - São Paulo State University, Grupo de Dinâmica Orbital e Planetologia, CEP 12516-410, Guaratinguetá, SP, Brazil

<sup>2</sup>Observatório do Valongo/UFRJ, Ladeira Pedro Antônio 43, CEP 20.080-090 Rio de Janeiro - RJ, Brazil

<sup>3</sup>Laboratório Interinstitucional de e-Astronomia - LIneA, Rua Gal. José Cristino 77, Rio de Janeiro, RJ 20921-400, Brazil

<sup>4</sup>Federal University of Technology - Paraná (UTFPR / DAFIS), Rua Sete de Setembro, 3165, CEP 80230-901, Curitiba, PR, Brazil

<sup>5</sup>Observatório Nacional/MCTI, R. General José Cristino 77, CEP 20921-400 Rio de Janeiro - RJ, Brazil

<sup>6</sup>LESIA, Observatoire de Paris – Section Meudon, 5 Place Jules Janssen – 92195 Meudon Cedex

<sup>7</sup>Penrith Observatory, Western Sydney University, School of Computing, Engineering and Mathematics, Kingswood, NSW, AUS

<sup>8</sup>Royal Astronomical Society of New Zealand, Occultation Section; International Occultation Timing Association (IOTA), Desert Springs, NT 0870, Australia

<sup>9</sup>Japan Occultation Information Network (JOIN), Japan

<sup>10</sup>Institut d’Astrophysique de l’Université de Liège, Allée du 6 Août 17, B-4000 Liège, Belgique

<sup>11</sup>Astronomical Association of Queensland, QLD, Australia

<sup>12</sup>Occultation Section of the Royal Astronomical Society of New Zealand (RASNZ), Wellington, New Zealand

<sup>13</sup>Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas - Universidad Nacional de La Plata, Paseo del Bosque S/N - 1900, La Plata, Argentina

<sup>14</sup>Complejo Astronómico El Leoncito (CASLEO), Av. España 1512 Sur, J5402DSP - San Juan – Argentina

<sup>15</sup>Polo Astronômico Casimiro Montenegro Filho/FPTI-BR, Avenida Tancredo Neves 6731, CEP 85867-900, Foz do Iguaçu, PR, Brazil.

<sup>16</sup>Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Avenida Tarquínio Joslin dos Santos, 1300, CEP 85870-650, Foz do Iguaçu, PR, Brazil.

<sup>17</sup>Planetary and Space Sciences, Department of Physical Sciences, The Open University, Milton Keynes, MK7 6AA, UK

<sup>‡</sup>Affiliated researcher at Observatoire de Paris/IMCCE, 77 Avenue Denfert Rochereau 75014 Paris, France

Accepted XXX. Received YYY; in original form ZZZ

## ABSTRACT

We report six stellar occultations by (SIX) Phoebe, satellite of Saturn, obtained between 06 July 2017 and 07 June 2019. The 06 July 2017 event was the first stellar occultation by an irregular satellite ever observed. The chords of the occultations were compared to a 3D shape model of the satellite, obtained from Cassini observations. The chords could not fit to the model using the sub-observer point derived from literature, as expected from the propagation of the error in the rotation period. A procedure was developed to identify the correct sub-observer longitude and thus, to improve the rotation period. The difference between our results and the predicted sub-observer longitude suggests two possible solutions for a new rotation period of Phoebe, and by comparing with observed rotational light curves and single-chord stellar occultations, we manage to identify the most probable solution as  $9.273653 \text{ h} \pm 0.07 \text{ s}$ . From the stellar occultations, we also obtained for Phoebe 6 geocentric positions in the ICRS as realised by the Gaia-DR2 with uncertainties at the 1-mas level.

**Key words:** occultations - planets and satellites: individual: Phoebe

## 1 INTRODUCTION

Phoebe was the first irregular satellite to be discovered, in 1898, by William Henry Pickering (Pickering 1899). It was also the first object to be identified with a retrograde orbit by Ross (1905). Until the year 2000, it was the only known Saturnian irregular satellite (Gladman et al. 2001).

<sup>\*</sup> Based on observations obtained at the Southern Astrophysical Research (SOAR) telescope, which is a joint project of the Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações (MCTIC) do Brasil, the U.S. National Optical Astronomy Observatory (NOAO), the University of North Carolina at Chapel Hill (UNC), and Michigan State University (MSU)

<sup>†</sup> E-mail: altairgomesjr@gmail.com, altair.gomes@unesp.br, altair.gomes@linea.gov.br



## APÊNDICE C – Mapa dos observadores

Neste apêndice incluímos mapas contendo as localizações dos observadores que colaboraram para este projeto. A Tabela 23 contém a lista com todos os observatórios que participaram dos projetos desta tese, suas coordenadas e o observador principal de cada estação. A Figura 86 contém os participantes da campanha dos fenômenos mútuos, as Figuras 87 e 88 contém os participantes das campanhas das aproximações mútuas. A Figura 89 contém os observadores que participaram da campanha para a ocultação estelar por Europa que ocorreu em 31 de março de 2017.

Tabela 23 – Lista de observatórios que colaboraram com este projeto.

Sigla	Longitude	Latitude	Observador Principal
OPD	45° 34' 57" O	22° 32' 07" S	B. Morgado
FOZ	54° 35' 37" O	25° 26' 05" S	D. I. Machado
FEG	45° 11' 25" O	22° 48' 05" S	R. Sfair
GOA	40° 19' 00" O	20° 17' 52" S	M. Malacarne
UTFPR	49° 11' 45" O	25° 28' 24" S	F. Braga-Ribas
OBSPA	68° 10' 48" O	22° 57' 08" S	A. Maury
CIDA	70° 52' 21" O	08° 47' 25" N	G. R. Navas
DHO	47° 54' 39" O	15° 53' 30" S	P. Cacella
SONEAR	43° 59' 03" O	19° 52' 55" S	C. Jacques
OHP	05° 42' 56" E	43° 55' 54" N	V. Robert



Figura 86 – Mapa com as localizações dos participantes da campanha dos fenômenos mútuos de 2014-2015.



Figura 87 – Mapa com as localizações dos participantes brasileiros da campanha das aproximações mútuas de 2016-2019.



Figura 88 – Mapa com a localização do *Observatoire de Haute-Provence* que colaborou com a campanha das aproximações mútuas.



Figura 89 – Mapa com as localizações dos participantes da campanha para a observação da ocultação estelar por Europa em 31 de março de 2017.





## APÊNDICE D – Curvas de luz dos fenômenos mútuos

Neste apêndice disponibilizamos um conjunto de curvas de luz observadas durante a campanha dos fenômenos mútuos de 2014-2015 e de 2009. Reunimos 13 curvas de luz. Os eventos estão organizados em ordem cronológica. Esta seleção não foi baseada na qualidade dos dados, mas sim na diversidade das curvas. Note que temos curtas com baixo ruído, alto ruído, baixa queda de fluxo, alta queda de fluxo, com e sem platô central e com resoluções temporais diversas.

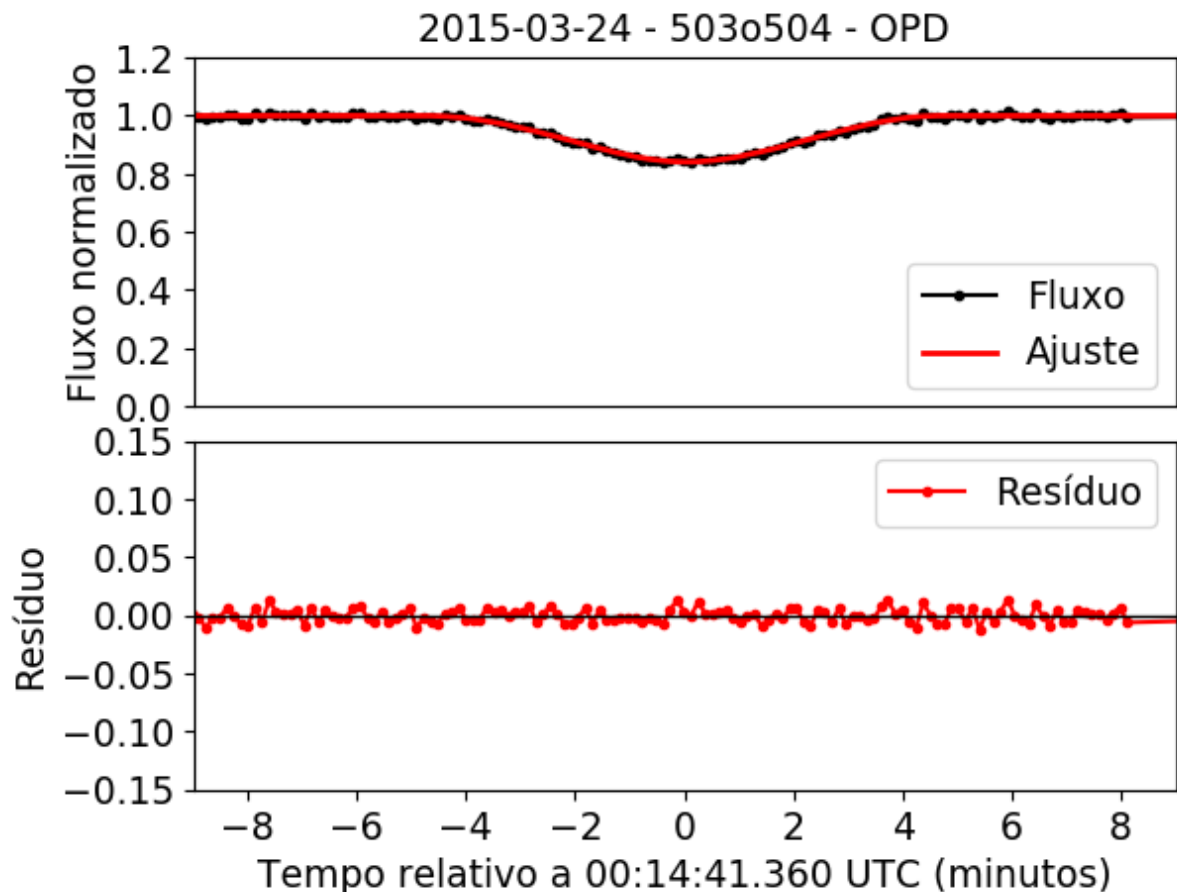


Figura 90 – Curva de luz de um fenômeno mútuo. No gráfico superior, os pontos preto são os fluxos de luz normalizados obtidas das imagens e a linha vermelha é o ajuste do modelo. No gráfico inferior os pontos vermelhos são os resíduos do modelo ajustado no sentido observação menos ajuste.

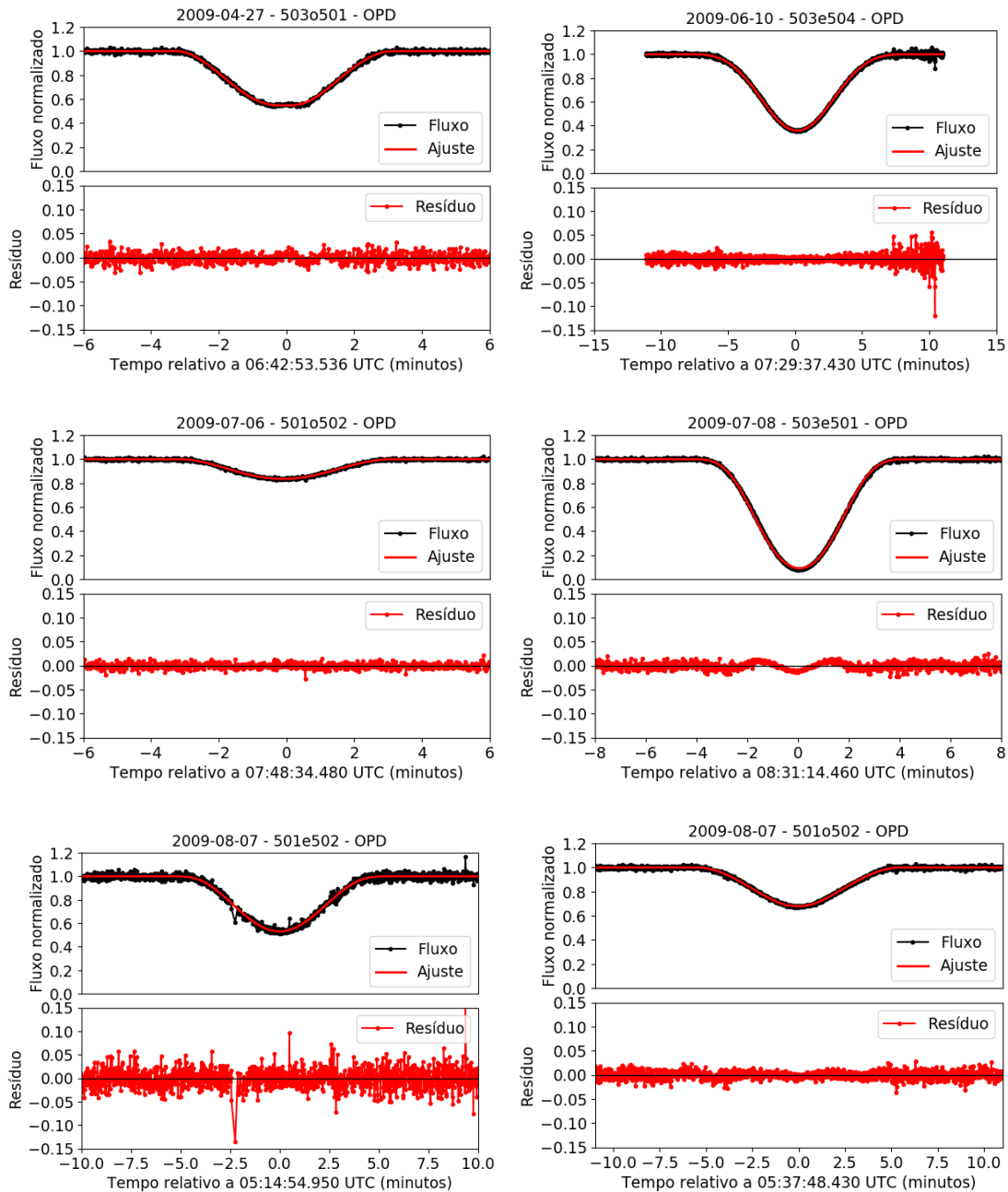


Figura 91 – Seleção de fenômenos mútuos observados durante a campanha de 2009.

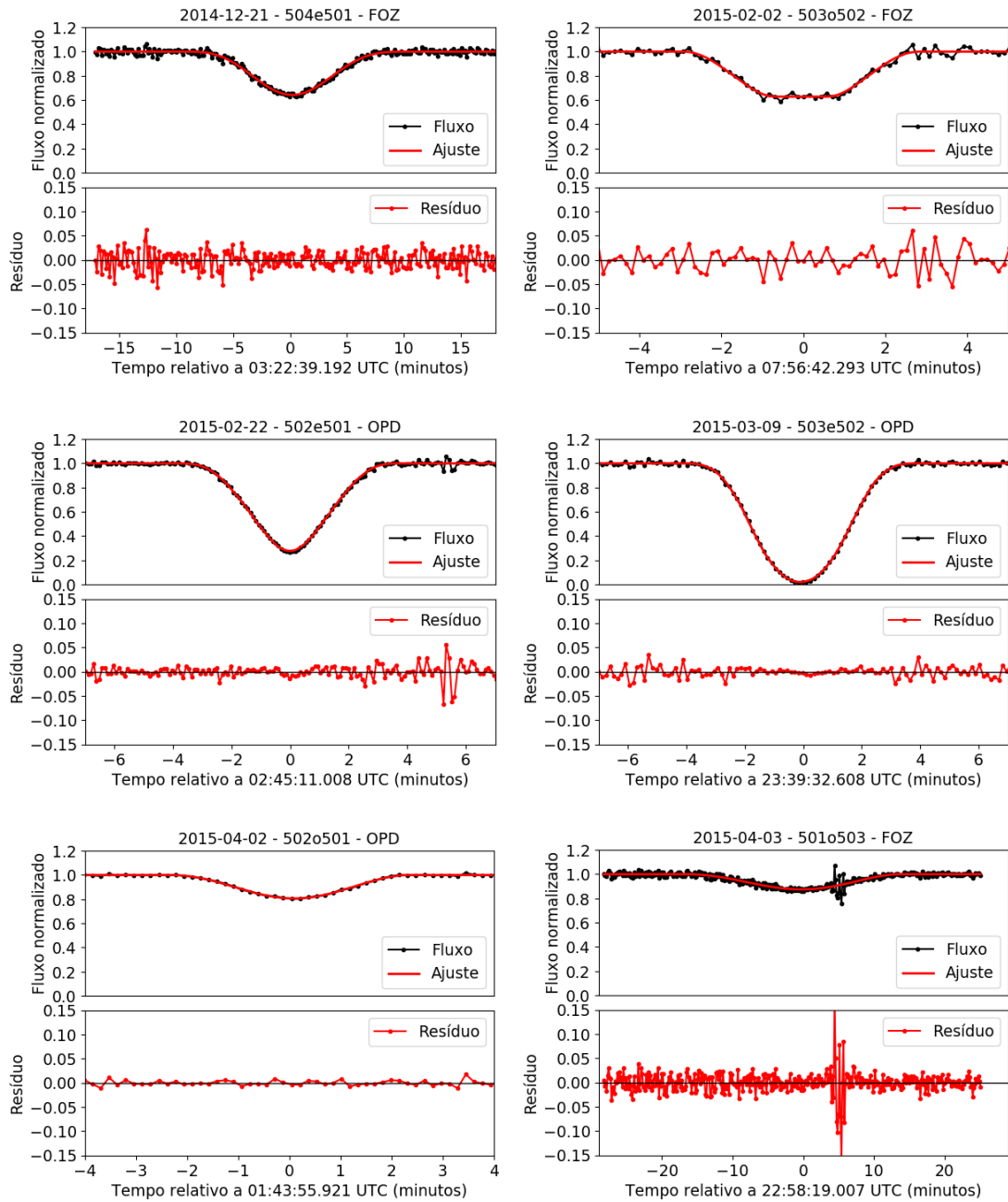


Figura 92 – Seleção de fenômenos mútuos observados durante a campanha de 2014-2015.



## APÊNDICE E – Curvas de separação das aproximações mútuas

Neste apêndice disponibilizamos um conjunto de curvas de separação observadas durante a campanha das aproximações mútuas de 2016-2019. Reunimos 25 curvas de separações. Os eventos estão organizados em ordem cronológica. As curvas aqui reunidas foram escolhidas a enfatizarem a variedade da qualidade dos dados. Além disso, chamamos a atenção para como as diferentes velocidades relativas afetam a concavidade da curva de separação.

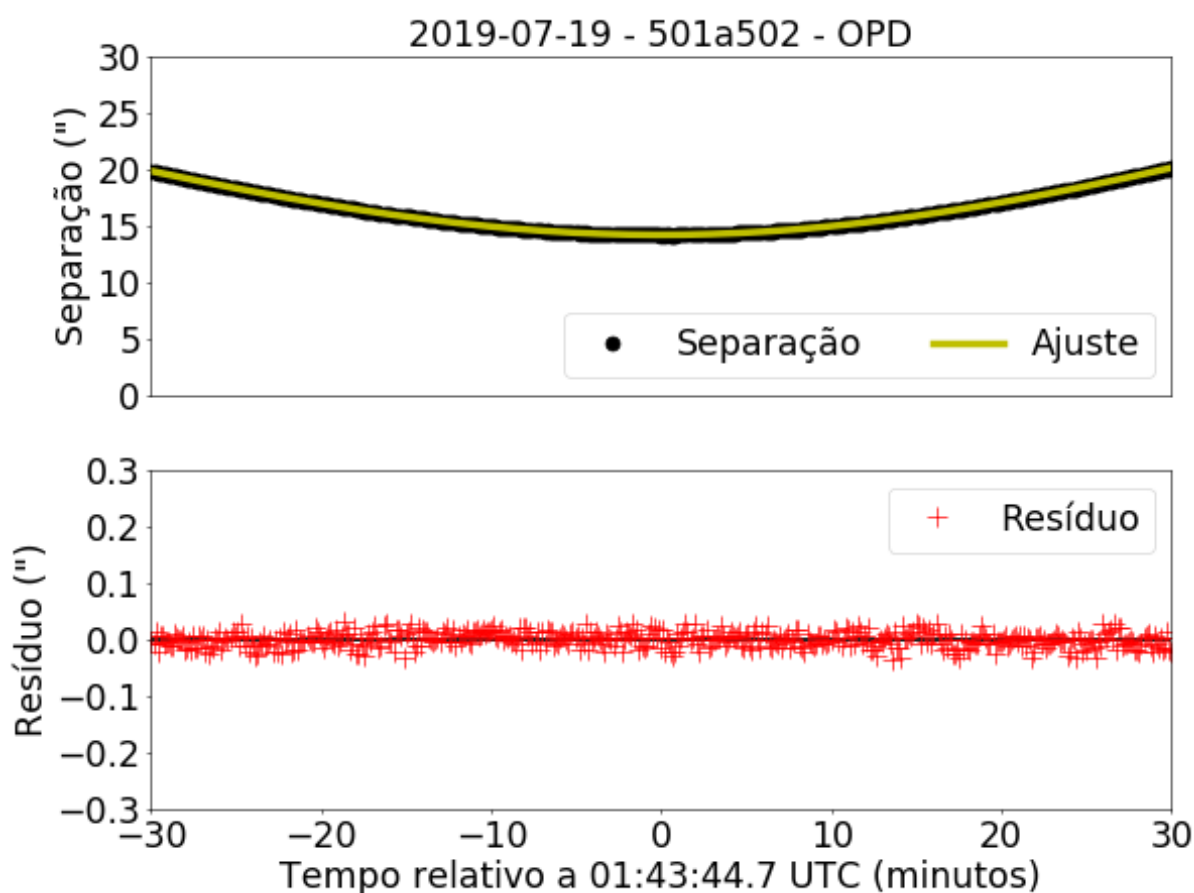


Figura 93 – Curva de separação de uma aproximação mútua. No gráfico superior, os pontos preto são as separações obtidas das imagens e a linha amarela é o ajuste polinomial ao quadrado da distância. No gráfico inferior as cruces vermelhas são os resíduos do modelo ajustado no sentido observação menos ajuste.

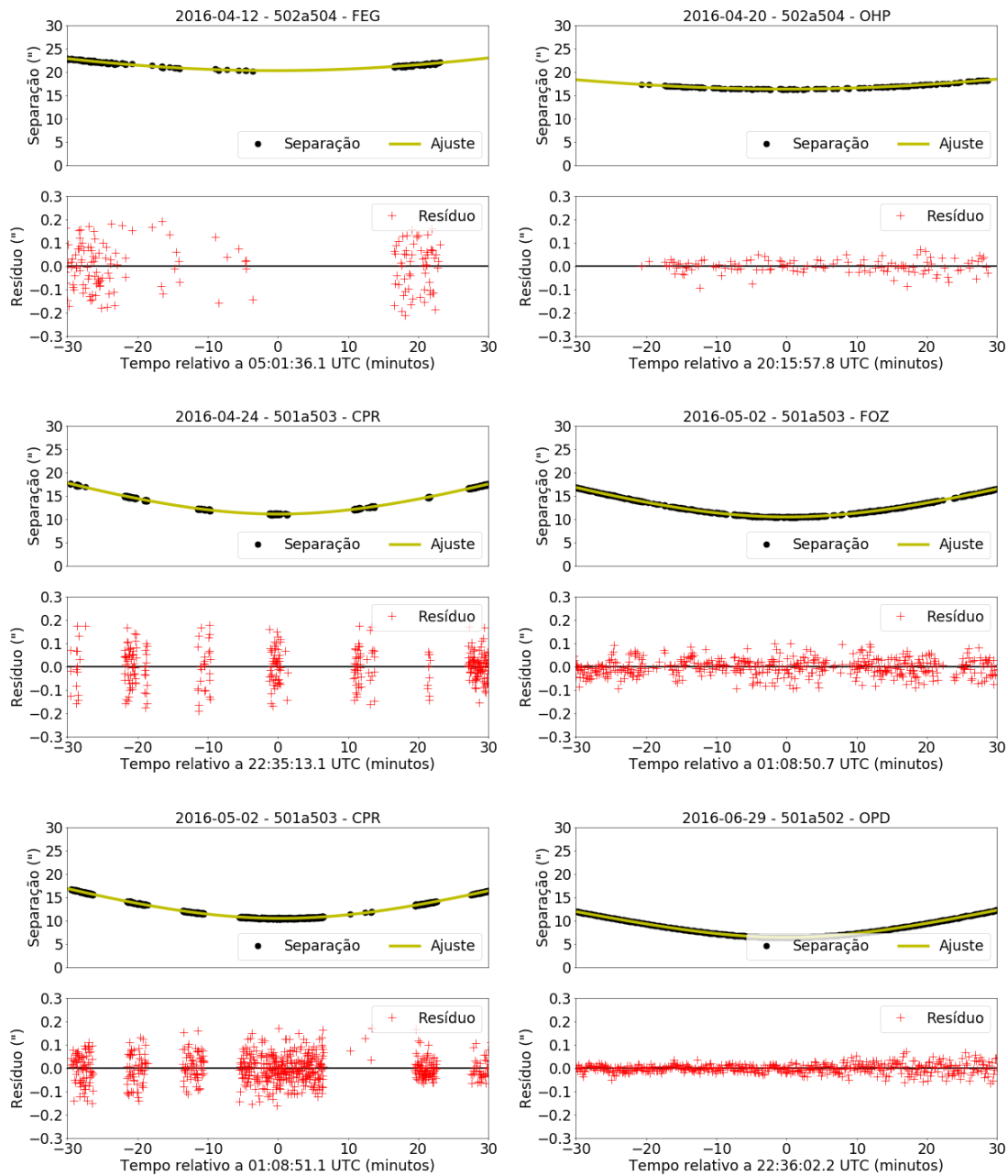


Figura 94 – Seleção de aproximações mútuas observadas durante a campanha de 2016.

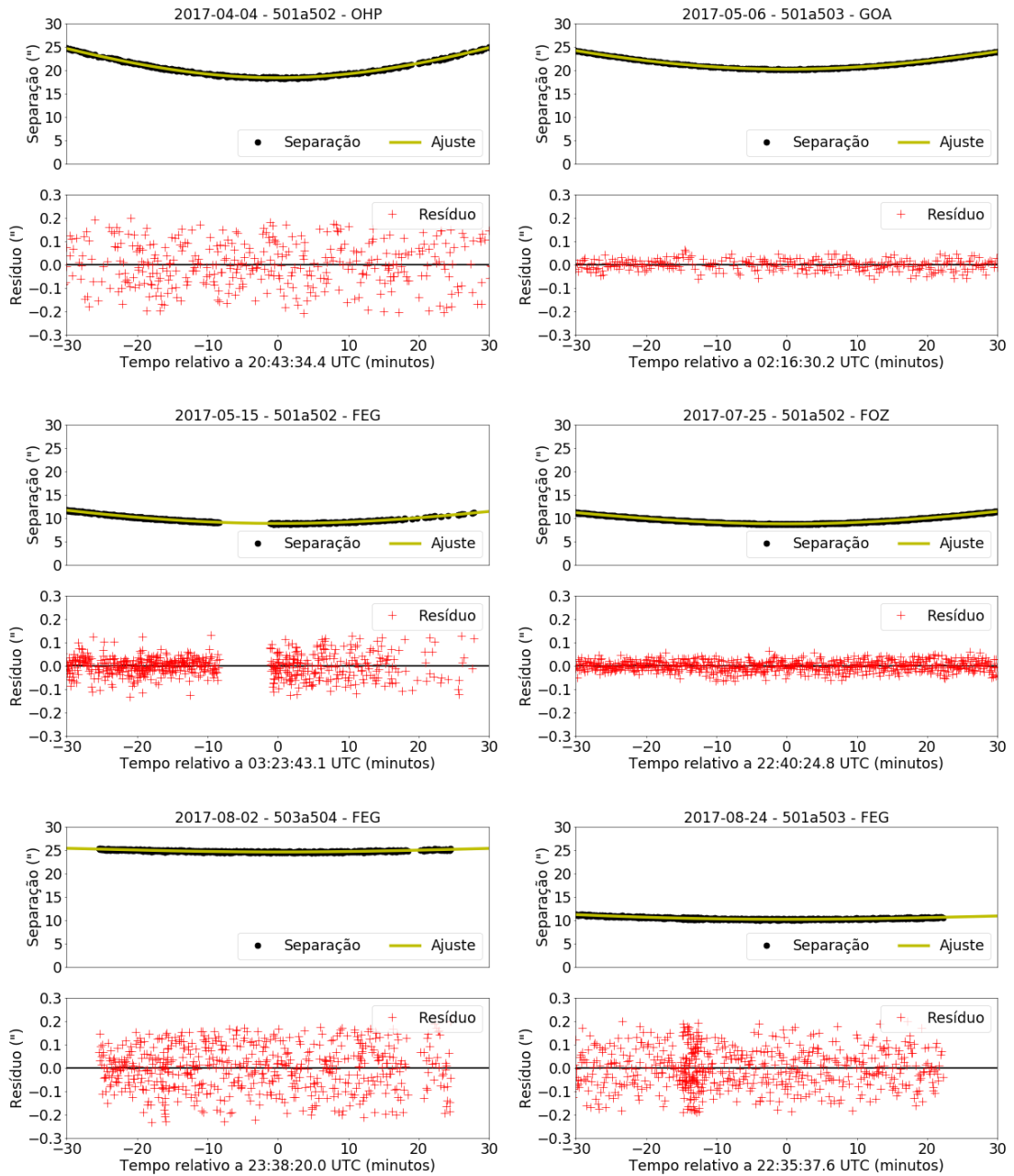


Figura 95 – Seleção de aproximações mútuas observadas durante a campanha de 2017.



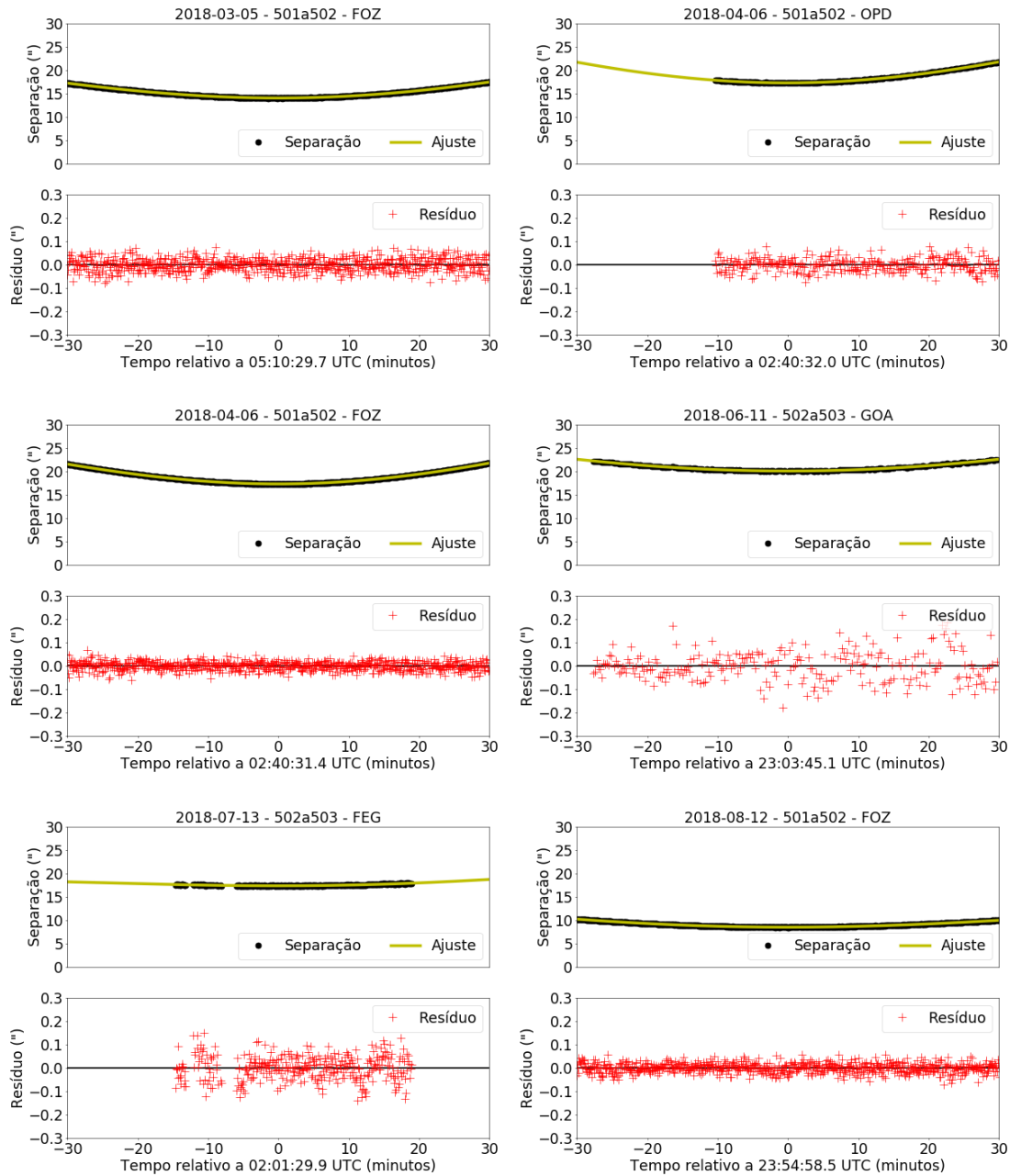


Figura 96 – Seleção de aproximações mútuas observadas durante a campanha de 2018.

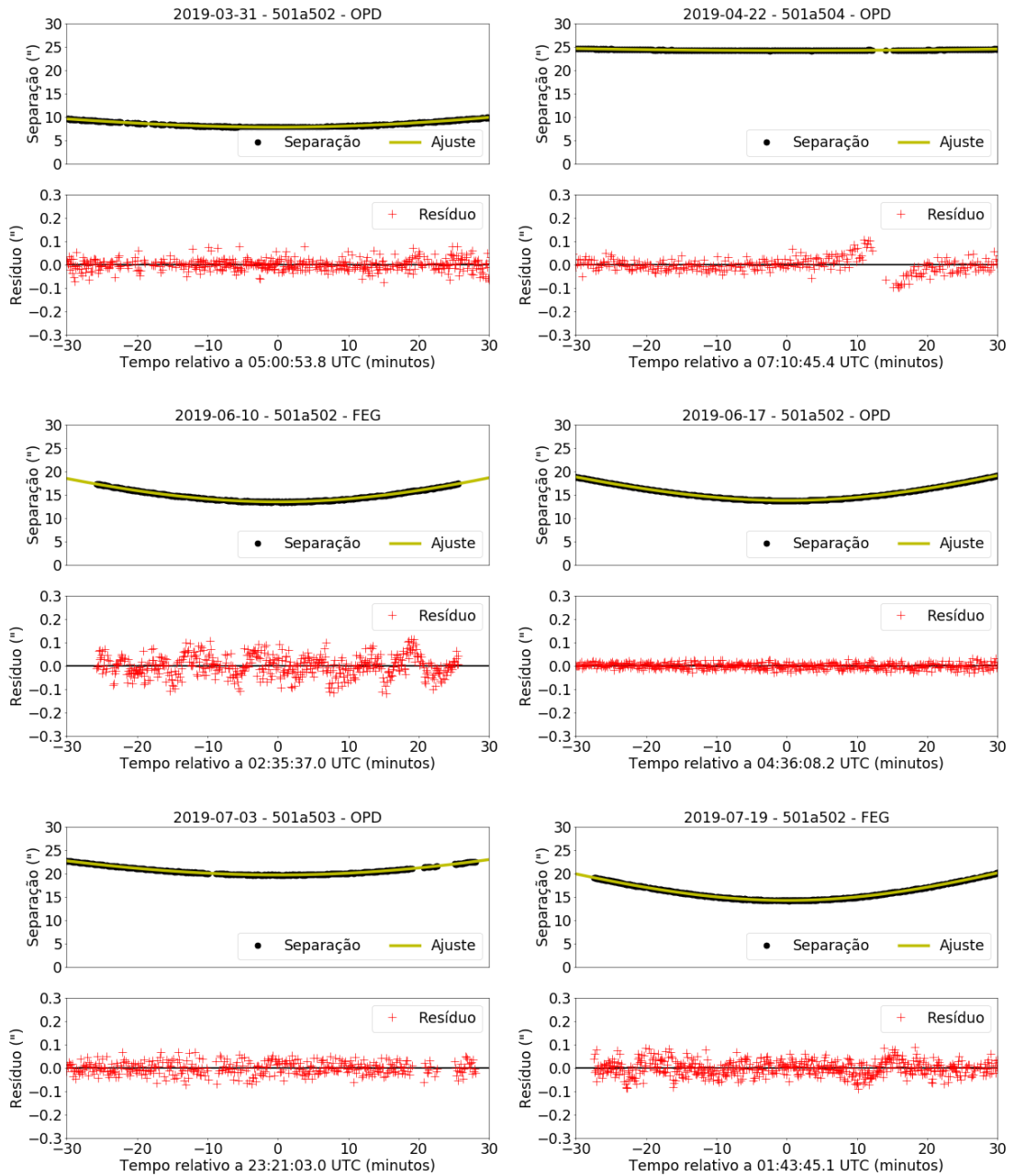


Figura 97 – Seleção de aproximações mútuas observadas durante a campanha de 2019.



## APÊNDICE F – Mapas das futuras ocultações estelares

Neste apêndice apresentamos os mapas das ocultações estelares que irão acontecer entre outubro de 2019 e dezembro de 2021 listados na Tabela 15. Está indicado na legenda de cada figura o satélite envolvido a hora e data do evento (UTC), a magnitude da estrela ocultada e a velocidade do evento. As linhas azuis demarcam o tamanho previsto (diâmetro) da sombra na Terra, os pontos vermelhos marcam o centro do satélite a cada minuto, o ponto maior é o instante da mínima separação entre o centro do satélite e a estrela em relação ao geocentro. A seta no canto inferior direito demarca o sentido do movimento da sombra, a parte em cinza escuro do globo representa a noite e cinza claro o dia.

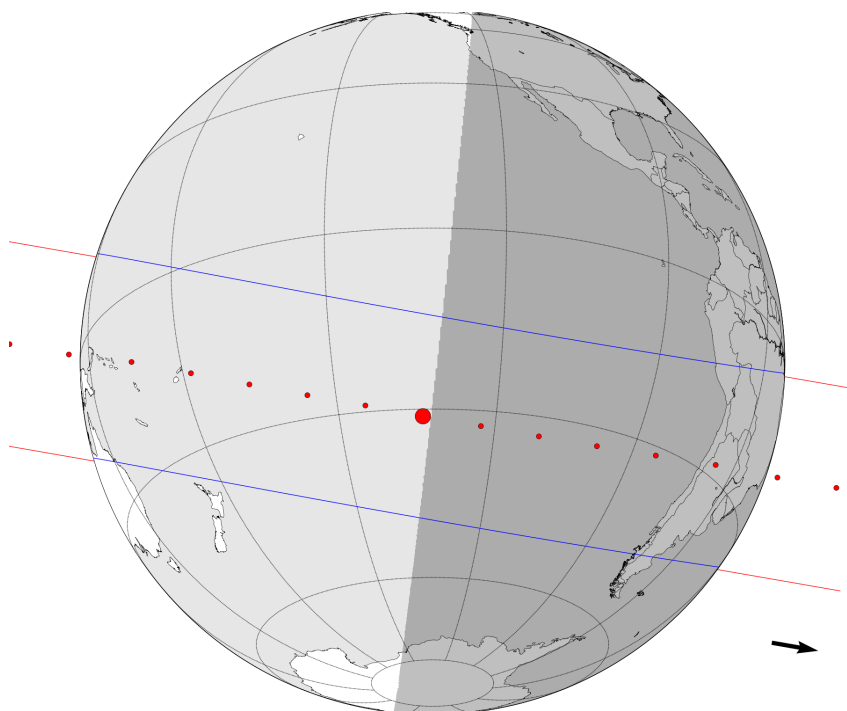


Figura 98 – Ocultação de uma estrela GDR2 de magnitude G 11,0 por Io em 09 de setembro de 2019 às 02:33 UTC. A velocidade prevista deste evento é de 18,1 km/s

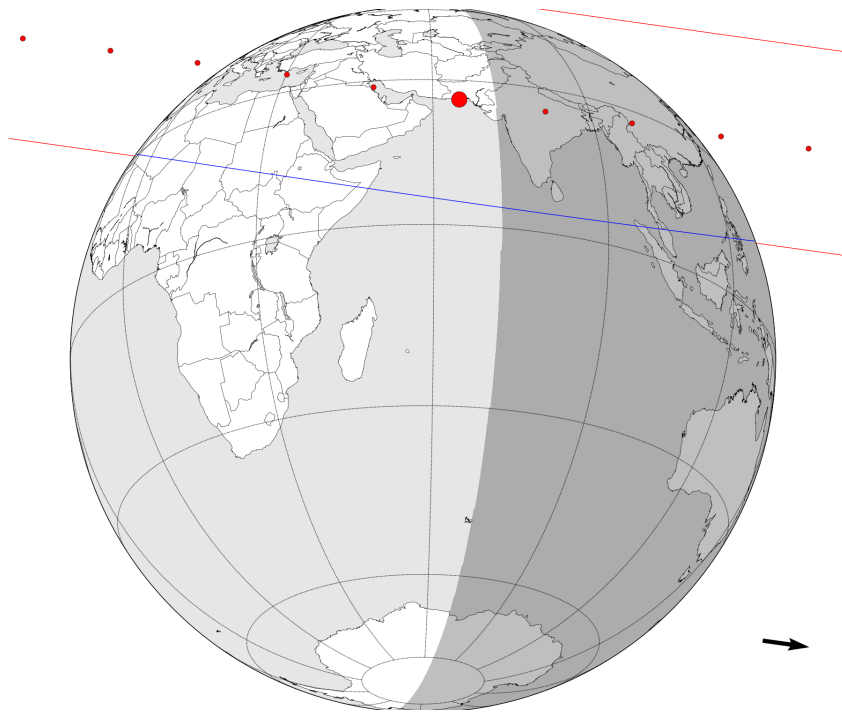


Figura 99 – Ocultação de uma estrela GDR2 de magnitude G 11,3 por Io em 21 de setembro de 2019 às 13:08 UTC. A velocidade prevista deste evento é de 26,5 km/s

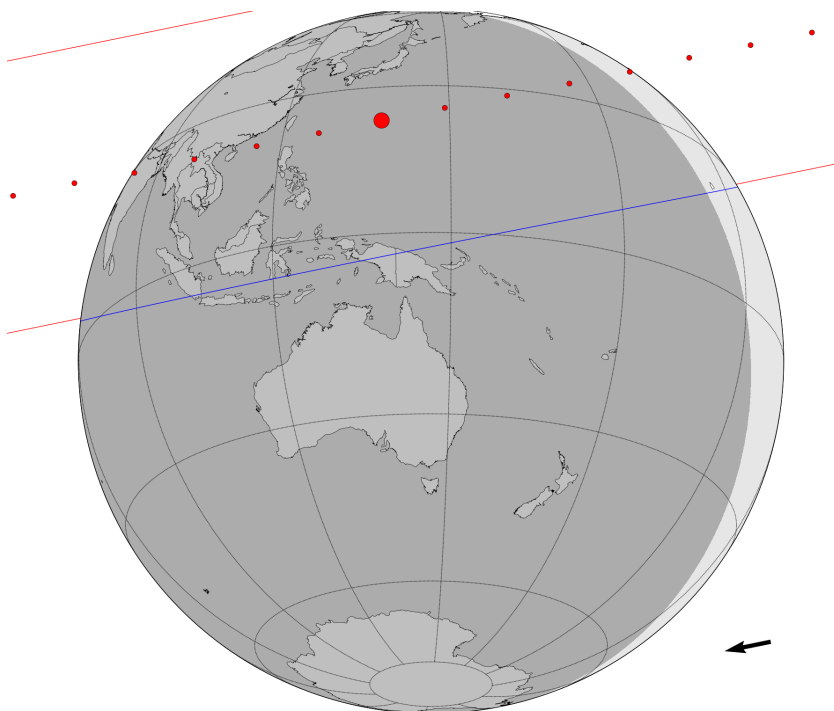


Figura 100 – Ocultação de uma estrela GDR2 de magnitude G 10,9 por Calisto em 20 de junho de 2020 às 16:03 UTC. A velocidade prevista deste evento é de 18,9 km/s

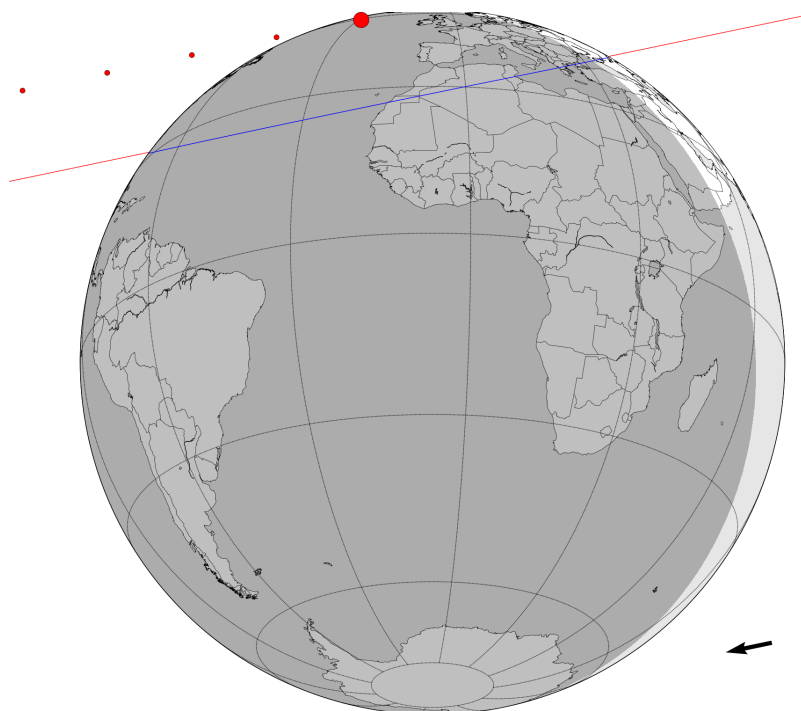


Figura 101 – Ocultação de uma estrela GDR2 de magnitude G 11,3 por Europa em 22 de junho de 2020 às 02:09 UTC. A velocidade prevista deste evento é de 26,1 km/s

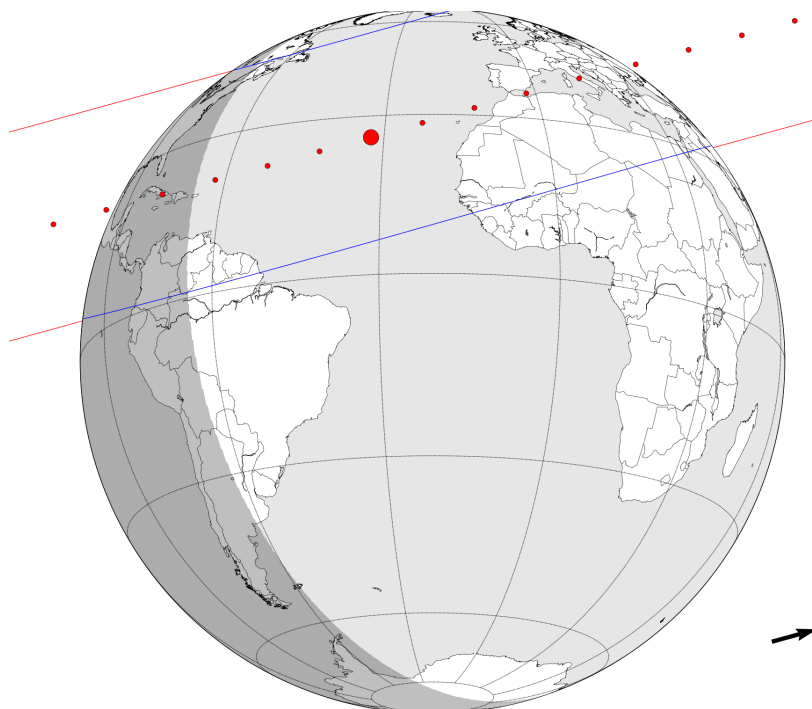


Figura 102 – Ocultação de uma estrela GDR2 de magnitude G 5,8 por Io em 02 de abril de 2021 às 10:24 UTC. A velocidade prevista deste evento é de 16,5 km/s

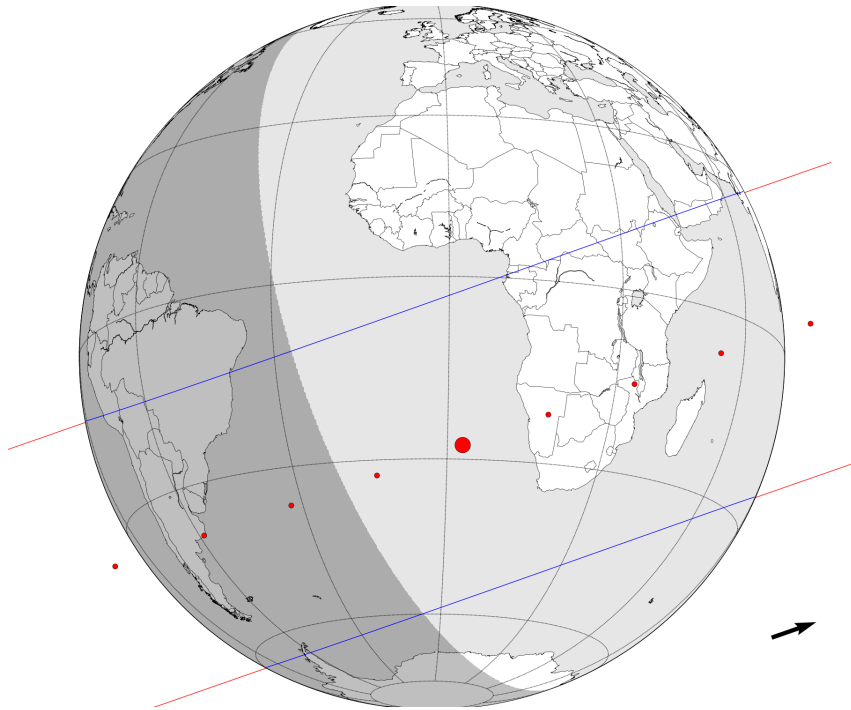


Figura 103 – Ocultação de uma estrela GDR2 de magnitude G 11,1 por Ganímedes em 25 de abril de 2021 às 07:55 UTC. A velocidade prevista deste evento é de 27,7 km/s

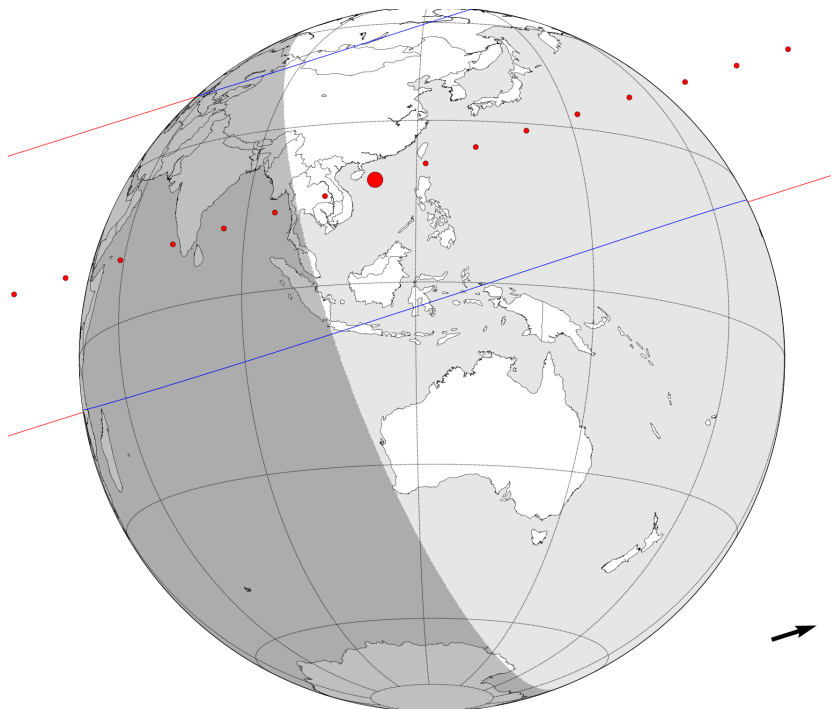


Figura 104 – Ocultação de uma estrela GDR2 de magnitude G 10,4 por Calisto em 04 de maio de 2021 às 23:01 UTC. A velocidade prevista deste evento é de 16,3 km/s

