Universidade Federal do Rio de Janeiro Centro de Ciências Matemáticas e da Natureza Observatório do Valongo

Alex Dias de Oliveira

FENÔMENOS MÚTUOS ENTRE OS SATÉLITES GALILEANOS DE JÚPITER



Alex Dias de Oliveira

FENÔMENOS MÚTUOS ENTRE OS SATÉLITES GALILEANOS DE JÚPITER

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Astronomia, Observatório do Valongo, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Astronomia.

Orientadores: Prof. Dr. Roberto Vieira Martins; Prof. Dr. Marcelo Assafin.

Rio de Janeiro Fevereiro de 2011 Oliveira, Alex Dias Fenômenos Mútuos entre os Satélites Galileanos de Júpiter
/Alex Dias de Oliveira - Rio de Janeiro: UFRJ/ OV, 2011 xix, 83f.:il; 30 cm
Orientadores: Roberto Vieira Martins; Marcelo Assafin. Dissertação (mestrado) - UFRJ/ OV/ Programa de Pós-graduação
em Astronomia, 2011. Referências Bibliográficas: f: 103-105. 1.Fenômenos Mútuos 2.Satélites Galileanos de Júpiter 3.Fotometria
Diferencial 4. Modelo Numérico de Redução 5.Modelagem (ocultações/eclipses)
6. Fenômenos Mútuos I. Vieira-Martins, Roberto.
II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Observatório do Valongo, Programa de Pós-graduação em Astronomia, 2011 III. Título.

FENÔMENOS MÚTUOS ENTRE OS SATÉLITES GALILEANOS DE JÚPITER

Alex Dias de Oliveira

Orientadores: Prof. Dr. Roberto Vieira Martins, Prof. Dr. Marcelo Assafin.

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

Aprovada por:

Presidente, Prof. Dr. Roberto Vieira Martins - ON/MCT

Prof. Dr. (Prof. Dr. Marcelo Assafin - OV/UFRJ

Prof. Dr. (Prof. DR. Francisco Jablonski - INPE/MCT

Prof. Dr. (Prof. Dr. Julio Camargo - ON/MCT

Prof. Dr. (Prof. Dr. Gustavo Porto de Mello - OV/UFRJ (suplente)

Prof. Dr. (Prof. Dr. Dario da Silva Neto - UEZO (suplente)

Rio de Janeiro Fevereiro de 2011 "Filho. Quando sentir-se cansado e desanimado pelos obstáculos que a vida colocar em seu caminho, pense naquilo que você mesmo costumava dizer sobre sua vida acadêmica: Ninguém disse que seria fácil. Erga a cabeça, siga em frente e lembre-se que eu sempre estarei do seu lado, Papai. "

Tenho a impressão de ter sido uma criança brincando à beira-mar, divertindo-me em descobrir uma pedrinha mais lisa ou uma concha mais bonita que as outras, enquanto o imenso oceano da verdade continua misteriosos diante de meus olhos...

 $Is a a c\ Newton$

Agradecimentos

Depois de muito esforço, dedicação e superação consegui chegar até este importante ponto em minha jornada. E tudo isso teria sido impossível sem o apoio de muitos. A todos que dedicaram a mim uma parte do seu tempo e atenção, sinceramente, muito obrigado.

Ao meu orientador, Dr. Roberto Veira Martins, que me deu suporte, foi paciente e exigente quando devia ser, trazendo a tona o melhor de mim, ao longo destes dois anos.

Ao grupo de trabalho, em especial, Prof. Dr. Marcelo Assafin, Dr. Julio Camargo, e Me. Felipe Braga Ribas, pela paciência e dedicação com a qual me auxiliaram e ensinaram sempre que necessário.

Aos meu pais Wilton Bezerra de Oliveira e Aparecida Heliane Dias Campos de quem sempre tive apoio incondicional em toda a minha vida até mesmo quando decidi, contra sua vontade, me aventurar pelo "assustador" Rio de Janeiro. Não sei o que seria da minha vida sem a dedicação, apoio e amor de vocês dois.

Aos meus irmãos e cunhada que sempre mantém o ambiente familiar divertido e aconchegante a cada volta minha. Ao meu sobrinho e afilhado que é sempre tão esperto e engraçado, enchendo minha vida de alegria.

Aos meus amigos da república, ou como carinhosamente apelidamos "Galera do barraco", que foram uma verdadeira família que encontrei no Rio, com os quais passei momentos de dificuldades e descontrações, seja indo a praia num simples domingo de Sol ou em uma viagem maluca para outro estado. Obrigado pela paciência e atenção.

Ao Observatório do Valongo por ter propiciado toda a infra-estrutura necessária para minha formação e realização deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Ricardo Reis Cordeiro por ter sido meu mentor na gradução. Obrigado pelo apoio e dedicação em todo o processo de seleção do mestrado, e por ter me proporcionado o primeiro contato com a pesquisa científica mostrando a beleza da programação e da física computacional.

Ao Prof. Dr. Francisco Jablonski pela avaliação e valiosa contribuição ao trabalho.

Resumo

A partir de estudos da evolução orbital dos planetas gigantes, e seus sistemas de anéis e satélites, é possível compreender melhor aspectos físicos e dinâmicos da formação e evolução do Sistema Solar. No caso dos satélites tal estudo é feito através de modelos dinâmicos que requerem dados precisos sobre a posição e velocidade orbital, com os quais é possível verificar efeitos de perturbações orbitais bem fracas como as devidas às marés. Uma forma de obter estes dados é através da análise da curva de luz, que representa a variação do fluxo de luz em função do tempo, obtida em observações fotométricas durante os equinócios destes planetas quando ocorrem, para um observador na Terra, eclipses e ocultações entre os satélites. Estes eventos, que têm duração de poucos minutos, são chamados de fenômenos mútuos e, devido à sua importância, campanhas internacionais de observações são organizadas nestes períodos. Para Júpiter, os fenômenos mútuos entre os satélites galileanos podem ser observados a cada seis anos e em 2009, no Brasil, houve uma campanha para observações destes eventos no OPD/LNA a partir de uma cooperação entre pesquisadores do ON/MCT, OV/UFRJ, UNESP-Guaratinguetá e UEZO. Neste trabalho são apresentados 24 eventos (12 ocultações e 12 eclipses) envolvendo os 4 satélites Galileanos de Júpiter (Io, Europa, Ganimede e Calisto) assim como o método de redução e análise dos dados. Estes fenômenos foram observados no telescópio de 0,60 m Zeiss do Observatório Pico dos Dias (LNA/Brasil) equipado com um filtro de banda estreita (20 nm) centrado em 890 nm que bloqueia a maior parte da contaminação da luz do planeta na imagem. Com fotometria diferencial feita nas imagens, calibradas a partir do CCD, geraram-se curvas de luz que foram ajustadas a partir de um modelo de redução, desenvolvido para este trabalho, que faz simulações numéricas dos eventos considerando efeitos do ângulo de fase solar e queda gradativa de luz ao longo da penumbra, no caso de eclipses. Com este modelo foi possível determinar os valores dos parâmetros que definem

o comportamento e forma da curva de luz (parâmetro de impacto, velocidade relativa e instante central). Os demais parâmetros que influenciam o comportamento da curva de luz, e foram mantido fixos durante o ajuste, são o ângulo de fase solar, os raios dos satélites e a razão de albedos. O ângulo de fase e os raios dos satélites porque já são bem determinados com precisões maiores do que as alcançadas com eventos mútuos e, além disso, este último possui uma grande correlação com o parâmetro de impacto. A razão de albedos porque também possui grande correlação com o parâmetro de impacto e seu valor pode ser determinado a partir de imagens tomadas próximas ao evento. Os resultados foram comparados com a teoria atualmente mais precisa para o sistema, usada para gerar a efeméride (Lainey *et al.* 2009) e exibiram valores próximos aos da teoria, alcançando precisões médias de 3,448 s para o instante central, 79,5 m/s (0,002 mas/s) para a velocidade relativa e 6,25 km (1,79 mas) para o parâmetro de impacto, este último sendo duas ordens de grandeza mais preciso do que o obtido com a técnica clássica de astrometria.

Palavras-chave: Satélites Galileanos de Júpiter (Io, Europa, Ganymede, Calisto); Fotometria Diferencial; Modelo Numérico (eclipse/ocultação); Ângulo de Fase Solar; Fenômenos Mútuos.

Abstract

From studies of the orbital evolution of the giant planets and their systems of rings and satellites, it is possible to better understand physical and dynamical aspects of the formation and evolution of the Solar System. In the case of the satellites this study is done using models that require precise data on the position and orbital speed of these satellites, with which one can check the effects of very weak orbital perturbations as those due to tides. One way to obtain these data is by examining the light curve, which represents the flux of light as a function of time, obtained from photometric observations during the equinoxes of these planets when, to an observer on Earth, eclipses and occultations between satellites occur. These events, which last a few minutes, are called mutual phenomena and because of their importance, international campaigns of observations are arranged in these periods. For Jupiter, the phenomena between the Galilean satellites can be observed every six years and in 2009, in Brazil, there was a campaign to observe these events at the OPD / LNA from a cooperation between researchers from the ON / MCT, OV / UFRJ, UNESP - Guaratinguetá and UEZO. This study presents 24 events (12 eclipses occultations and 12) involving the four Galilean satellites of Jupiter (Io, Europa, Ganymede and Callisto) as well as the reduction method and data analysis. These phenomena were observed with the 0.60 m Zeiss telescope at the Pico dos Dias Observatory (LNA / Brazil) equipped with a narrowband filter (20 nm) centered at 890 nm that blocks most of the contamination from the planet's light in the image. With differential photometry made in the images, calibrated from the CCD, we generated light curves that have been adjusted by a reduction model, developed for this work, which makes numerical simulations of the events considering effects of solar phase angle and the gradual drop of light along the penumbra, in the case of eclipses. With this model it was

possible to determine the values of the parameters that define the behavior and shape of the light curve (impact parameter, relative velocity, central instant). The other parameters that influence the behaviour of the light curve, and were held fixed during the fit, are the solar phase angle, the radii of the satellites and the albedos ratio. The phase angle and the radii of the satellites where kept fixed, because they are already well determined with accuracies greater than those achieved with mutual events and, besides that, the latter has a high correlation with the impact parameter. The albedo ratios whre kept fixed because they also have high correlation with the impact parameter and its value can be determined from images taken close to the event. The results were compared with the currently most accurate theory for the system, used to generate the ephemeris (Lainey *et al.* 2009) and exhibited values close to the theory, reaching an accuracy that averages of 0.432 s for the central instant, 79.5 m/s (0.002 mas/s) for relative speed and 6.25 km (1.79 mas) for the impact parameter, this last one being two orders of magnitude more accurate than that obtained with the classic technique of astrometry.

Keywords: Galilean satellites of Jupiter (Io, Europa, Ganymede, Callisto); Diferencial Photometry; Numerical Model (eclipse/occultation); Solar Phase Angle; Mutual Phenomena.

Sumário

1	Introdução														
2	Obs	servações													
	2.1	Campanha de Observação	24												
		2.1.1 Seleção de Eventos e Observações	24												
	2.2	Equipamentos	29												
		2.2.1 Telescópio	29												
		2.2.2 Sensores	29												
		2.2.3 Filtro	31												
3	Trat	tamento das Imagens	34												
	3.1	Calibração	34												
	3.2	Coronografia	36												
	3.3	Fotometria	40												
4	Moo	delagem Teórica	46												
	4.1	Fenômenos Mútuos	46												
	4.2	Fase Solar	47												
	4.3	Parâmetro de Impacto	50												
	4.4	Instante Central	50												
	4.5	Velocidade Relativa	50												
	4.6	Razão de Albedos	51												
	4.7	Raios	52												
	4.8	Modelagem Geométrica	53												

		4.8.1 Ocultações	53
		4.8.2 Eclipses	56
	4.9	Modelo Numérico	62
5	Res	ultados	64
	5.1	Europa oculta Io - 09 de Maio de 2009	65
	5.2	Europa oculta Io - 21 de Maio de 2009	66
	5.3	Europa oculta Io - 28 de Maio de 2009	68
	5.4	Ganymede eclipsa Calisto - 10 de Junho de 2009	69
	5.5	Ganymede eclipsa Io - 16 de Junho de 2009	71
	5.6	Calisto eclipsa Europa - 19 de Junho de 2009	72
	5.7	Calisto eclipsa Io - 19 de Junho de 2009	74
	5.8	Calisto eclipsa Io - 20 de Junho de 2009	75
	5.9	Calisto eclipsa Io - 20 de Junho de 2009	77
	5.10	Io oculta Europa - 22 de Junho de 2009	78
	5.11	Io oculta Europa - 29 de Junho de 2009	80
	5.12	Io eclipsa Ganymede - 04 de Julho de 2009	81
	5.13	Io eclipsa Europa - 06 de Julho de 2009	82
	5.14	Io oculta Europa - 06 de Julho de 2009	83
	5.15	Ganymede eclipsa Io - 08 de Julho de 2009	85
	5.16	Io eclipsa Europa - 13 de Julho de 2009	86
	5.17	Io eclipsa Europa - 07 de Agosto de 2009	87
	5.18	Io oculta Europa - 07 de Agosto de 2009	88
	5.19	Ganymede oculta Europa - 12 de Agosto de 2009	90
	5.20	Io oculta Europa - 22 de Agosto de 2009	91
	5.21	Io oculta Europa - 16 de Setembro de 2009	92
	5.22	Io eclipsa Europa - 16 de Setembro de 2009	94
	5.23	Ganymede oculta Europa - 24 de Outubro de 2009	95
	5.24	Io oculta Europa - 25 de Outubro de 2009	96
	5.25	Sumário dos Resultados	98

6	Conclusão	101
A	Diâmetro da Sombra	106
В	Projeções no plano do Sol	110
\mathbf{C}	Análise da Efeméride	115

Lista de Figuras

2.1	Júpiter, Io, Europa e Ganymede	26
2.2	Júpiter e Europa	26
2.3	Eficiencia quântica CCD301	30
2.4	Eficiencia quântica CCDS800	31
2.5	Albedo de Júpiter diversos comprimentos de onda	31
2.6	Transmissividade do Filtro de metano	32
2.7	Eficiência quântica CCDS800 combinada ao filtro de metano	32
2.8	Eficiência quântica CCD301 combinada ao filtro de metano	33
2.9	Júpiter, Calisto e Io	33
3.1	Master bias	35
3.2	Master flat-field	36
3.3	Imagem a ser coronografada	37
3.4	Perfil da luz de Júpiter	37
3.5	Imagem coronografada digitalmente	38
3.6	Teste 1 coronografia A	39
3.7	Teste 1 coronografia B	39
3.8	Diferença entre a fotometria com e sem coronografia	40
3.9	Fotometria Europa occ Io	44
3.10	Fotometria Ganymede ecl Calisto	44
3.11	Fotometria Ganymede ecl Io	45
3.12	Fotometria Ganymede ecl Io	45
4.1	Ângulo de fase	47

4.2	Forma dos discos aparentes	48
4.3	Projeção geométrica da sombra	49
4.4	Disco aparente de sombra	49
4.5	Vetores-estado	54
4.6	Direção da velocidade relativa	55
4.7	Geomteria do eclipse - Raios da penumbra e umbra	57
4.8	Geometria do eclipse - Queda de luz na penumbra	59
4.9	Modelagem queda de fluxo	60
5.1	Europa oculta Io - 09/05/2009	66
5.2	Io oculta Europa - 21/05/2009	67
5.3	Io oculta Europa - 28/05/2009	68
5.4	Ganymede eclipsa Calisto - 10/06/2009	70
5.5	Ganymede eclipsa Io - 16/06/2009	72
5.6	Calisto eclipsa Europa - 19/06/2009	73
5.7	Calisto eclipsa Io - 19/06/2009	74
5.8	Calisto eclipsa Io - 20/06/2009	76
5.9	Calisto eclipsa Io - 20/06/2009	77
5.10	Io oculta Europa - 22/06/2009	79
5.11	Io oculta Europa - 29/06/2009	80
5.12	Io eclipsa Ganymede - 04/07/2009	81
5.13	Io eclipsa Europa - 06/07/2009 $\ldots \ldots \ldots$	83
5.14	Io oculta Europa - 06/07/2009	84
5.15	Ganymende eclipsa Io - 08/07/2009	85
5.16	Io eclipsa Europa - 13/07/2009 \ldots	86
5.17	Io eclipsa Europa - 07/08/2009	88
5.18	Io oculta Europa - 07/08/2009	89
5.19	Ganymede oculta Europa - 12/08/2009 	91
5.20	Io oculta Europa - 22/08/2009	92
5.21	Io oculta Europa - 16/09/2009	93

5.22	Io eclipsa Europa - 16/09/2009
5.23	Ganymede oculta Europa - 24/10/2009 \ldots
5.24	Io oculta Europa - 25/10/2009
A.1	Diagrama 1 para modelagem da sombra
A.2	Diagrama 2 para modelagem da sombra
B.1	Sistemas Cartesianos no Plano de Observação
B.2	Distâncias Definidas no Plano de Observação
В.3	Sistemas Cartesianos no Plano do Sol
C.1	Caminho (Efeméride) - 1
C.2	Caminho (Efeméride) - 2
C.3	Caminho (Efeméride) - 3
C.4	Caminho (Efeméride) - 4
C.5	Caminho (Efeméride) - 4
C.6	Curva de luz teórica - 2 occ 1 $09/05/2009$ \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots 120
C.7	Curva de luz teórica - 1 occ2 $21/05/2009$
C.8	Curva de luz teórica - 1 occ2 $28/05/2009$
C.9	Curva de luz teórica - 3 ecl 4 $10/06/2009$
C.10	Curva de luz teórica - 3 ecl 1 $16/06/2009$
C.21	Curva de luz teórica - 1 ecl2 $13/07/2009$
C.11	Curva de luz teórica - 4 ecl 2 $19/06/2009$
C.12	Curva de luz teórica - 4ecl 1 $19/06/2009$
C.13	Curva de luz teórica - 4ecl 1 $20/06/2009$
C.14	Curva de luz teórica - 4ecl 1 $20/06/2009$
C.15	Curva de luz teórica - 1 occ2 $22/06/2009$
C.16	Curva de luz teórica - 1 occ2 $29/06/2009$
C.17	Curva de luz teórica - 1 ecl 3 $04/07/2009$
C.18	Curva de luz teórica - 1 ecl2 $06/07/2009$
C.19	Curva de luz teórica - 1 occ2 $06/07/2009$

C.20 Curva de luz teórica - 3 ecl 1 $08/07/2009$	126
C.22 Curva de luz teórica - 1 ecl2 $07/08/2009$	126
C.23 Curva de luz teórica - 1 occ2 07/08/2009 $\hfill \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots$	126
C.24 Curva de luz teórica - 3 occ2 $12/08/2009$ \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots	127
C.25 Curva de luz teórica - 1 occ2 22/08/2009 $\hfill \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots$	127
C.26 Curva de luz teórica - 1 occ2 16/09/2009 $\hfill \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots$	127
C.27 Curva de luz teórica - 1 ecl 2 $16/09/2009$	128
C.28 Curva de luz teórica - 3 occ2 $24/10/2009$ \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots	128
C.29 Curva de luz teórica - 1 occ2 $25/10/2009$	128

Lista de Tabelas

2.1	Pesquisadores da campanha	•	 •	•					•			•	 •	25
2.2	Eventos previstos observados	•							•					27
2.3	Eventos deste trabalho	•							•					28
2.4	CCD 301	•							•					29
2.5	CCD S800	•							•					30
3.1	Abertura de fotometria	•												42
3.2	Teste eventos sem calibrador	•	 •	•	•	•••	•	•	•	•••	•	•	 •	43
4.1	Raios dos satélites	•		•	•				•		•	•		53
5.1	Parâmetros reduzidos - 2 occ1 $\left(09/05/2009\right)$.	•							•					66
5.2	Parâmetros reduzidos - 1 occ2 $\left(21/05/2009\right)$.	•							•					67
5.3	Parâmetros reduzidos - 1 occ2 $\left(28/05/2009\right)$.	•							•					69
5.4	Parâmetros reduzidos - 3 ecl 4 $\left(10/06/2009\right)$.	•							•					71
5.5	Parâmetros reduzidos - 3 ecl1 (16/06/2009) $$	•							•					72
5.6	Parâmetros reduzidos - 4 ecl2 (19/06/2009) $$								•					73
5.7	Parâmetros reduzidos - 4 ecl 1 $\left(19/06/2009\right)$.	•							•					75
5.8	Parâmetros reduzidos - 4 ecl 1 $\left(20/06/2009\right)$.								•					76
5.9	Parâmetros reduzidos - 4ecl 1 $\left(20/06/2009\right)$.													78
5.10	Parâmetros reduzidos - 1 occ2 $\left(22/06/2009\right)$.	•											 •	79
5.11	Parâmetros reduzidos - 1 occ2 $\left(29/06/2009\right)$.	•											 •	81
5.12	Parâmetros reduzidos - 1 ecl 3 $\left(04/07/2009\right)$.	•							•					82
5.13	Parâmetros reduzidos - 1 ecl2 $\left(06/07/2009\right)$.													83

5.14	Parâmetros reduzidos - 1 occ2 (06/07/2009)	84
5.15	Parâmetros reduzidos - 3ecl 1 $(08/07/2009)$	86
5.16	Parâmetros reduzidos - 1ecl 2 $(13/07/2009)$	87
5.17	Parâmetros reduzidos - 1ecl 2 $(07/08/2009)$	88
5.18	Parâmetros reduzidos - 1 occ2 (07/08/2009)	90
5.19	Parâmetros reduzidos - 3 occ2 (12/08/2009)	91
5.20	Parâmetros reduzidos - 1 occ2 (22/08/2009)	92
5.21	Parâmetros reduzidos - 10cc2 (16/09/2009)	93
5.22	Parâmetros reduzidos - 1ecl 2 $(16/09/2009)$	95
5.23	Parâmetros reduzidos - 3 occ2 (24/10/2009)	96
5.24	Parâmetros reduzidos - 1 occ2 (25/10/2009)	97
5.25	Comparação dos Resultados	.00
A.1	variação da Sombra	.09

Capítulo 1

Introdução

A compreensão dos aspectos físicos e dinâmicos da formação e evolução do Sistema Solar encontra uma boa contribuição nos estudos das órbitas dos planetas exteriores e de seus sistemas de anéis e satélites(Arlot & Stavinschi 2007). Isso porque tais sistemas evoluem, em torno do planeta, de forma semelhante ao próprio Sistema Solar porém, consideravelmente mais rápido. As órbitas destes sistemas de satélites são estudadas através de modelos dinâmicos (analíticos ou numéricos) que calculam previsões de efemérides para estes corpos e as comparam com as posições astrométricas. Com posições suficientemente precisas, é possível medir os efeitos de perturbação orbital bem fracos como os efeitos de maré (Arlot 2008) que, em função de sua pequena intensidade, causam variações muito pequenas na órbita dos satélites. A determinação dos efeitos de maré permite obter informações sobre a estrutura interna dos planetas e satélites e determinar detalhes fundamentais da sua evolução como a passagem e eventual captura em ressonância na história passada do sistema (Noyelles & Vienne 2007).

Informações sobre a posição astrométrica destes satélites podem ser obtida de duas formas. Através da astrometria tradicional, que mede a posição do corpo em relação estrelas de catálogo presente no campo, ou a astrometria por fotometria que será discutida a frente. Para o caso do sistema de Júpiter, objetivo de estudo deste trabalho, a astrometria tradicional não é uma ferramente muito eficiente porque, como o planeta possui um brilho muito alto (mag. entre -2 e -3) assim como os seus satélites (mag. 5), o tempo de exposição das imagens deve ser feito em intervalos curtos de tempo e isso faz com que faltem estrelas de referência astrométrica na imagem. Nestes casos a precisão alcançada fica entre 134 a 170 mas (*milisegundo de arco*) para posições relativas entres os satélites (Kiseleva *et al.* 2008).

A outra opção é a astrometria por fotometria, feita a partir da análise da intensidade e forma da queda de fluxo sofrida pelo satélite quando o mesmo participa de um evento mútuo (ocultação e/ou eclipse entre os satélites), que consegue alcançar precisões entre 50 e 60 mas (Emelyanov 2009), três vezes maior em relação à outra técnica. Neste trabalho, com esta técnica, chega-se a precisões internas muito maiores, da ordem de 0,55 mas. Os eventos mútuos ocorrem próximos aos equinócios dos planetas, quando o Sol passa pelo equador destes corpos já que os satélites encontram-se basicamente neste plano e, comparada a distância destes planetas, a Terra está muito próxima ao Sol. Com estes eventos, como mencionado anteriormente, é possível conseguir precisão na posição relativa destes satélites de apenas poucos mas (veja também Assafin *et al.* (2009)) e portanto, eles são de grande importância no estudo da evolução e formação do Sistema Solar (Arlot & Stavinschi 2007). Porém tais fenômenos ocorrem apenas duas vezes em uma órbita ou seja, a cada 6 anos para Júpiter, 15 para Saturno e 42 para Urano e têm pouca duração.

Em função de sua importância e raridade, modelos acurados de previsões são construídos (Arlot 2008) e campanhas internacionais são organizadas para a observação destes fenômenos. Desde a primeira observação de eventos mútuos realizada em 1973 para os satélites de Júpiter (Aksnes & Franklin 1976) até os dias de hoje foram inúmeras campanhas realizadas com o aprimoramento das técnicas de observação e redução de imagens ao longo dos anos (veja Lainey *et al.* (2009) para mais informações sobre observações de eventos mútuos). No Brasil, a pioneira na área foi Zulema Abraham que observou fenômenos mútuos entre os satélites de Júpiter em 1979 (Abraham 1979), seguida por Franciso Jablonski e Jair Barroso Jr. que, em colaboração internacional, observaram eventos mútuos entre os satélites de Júpiter em 1985 obtendo como resultado dois artigos (Barroso *et al.* (1987) e Arlot *et al.* (1990)). A partir de então algumas poucas observações de fenômenos mútuos de satélites de Júpiter e Saturno foram feitas. Recentemente, em 2007, foi realizada uma campanha, no Brasil, para a observação dos fenômenos mútuos entre os satélites de Urano que, como ocorrem apenas a cada 42 anos, foi observado pela primeira vez com a tecnologia CCD (Braga-Ribas (2009) e Assafin *et al.* (2009)).

Além da precisão obtida com os resultados, a observação de fenômenos mútuos possui a vantagem de poder ser prevista com muita antecedência, o que permite a estruturação e organização de campanhas observacionais, e de poder ser feita com telescópios de pequenos diâmetros (50 cm), em função da magnitude dos satélites. Porém, quando ocorrem, são em grande número exigindo uma grande quantidade de observadores. Além disso, como são eventos que ocorrem próximos ao planeta, são necessárias técnicas de observação e tratamentos de imagens elaborados (Arlot 2008b).

Com eventos entre os satélites de Júpiter previstos para 2009, uma campanha de observação foi organizada no Brasil com a colaboração de 18 pesquisadores de 4 instituições (ON, UFRJ, UEZO, Unesp-Guaratinguetá). A campanha, que teve como responsável o Prof. Dr. Roberto Vieira Martins (ON), foi observada no Observatório do Pico dos Dias (OPD), localizado na cidade de Brasópolis (MG) e gerenciado pelo Laboratório Nacional de Astrofísica. Foi elaborada com base nas predições de Arlot (2008), para o OPD, que se encontram disponíveis em uma lista na página do IMCCE¹. Dos eventos selecionados, 30 foram observados com sucesso dos quais 24 foram reduzidos e compõem o escopo deste trabalho que teve como objetivo a observação, tratamento, redução e análise destes fenômenos.

Como foi mencionado, a observação e tratamento das imagens requerem técnicas específicas para os eventos. O capítulo 2 deste trabalho possui, além de dados sobre a campanha de observação e seus participantes, informações sobre as técnicas de observação adotada e escolha do equipamento utilizado. As imagens, após obtidas, foram calibradas por características do CCD utilizado com o pacote IRAF (*"Images Reduction and Analysis Facility"* - Butcher & Stevens (1981)) e reduzidas com o pacote PRAIA (Plataforma de Redução Automática de Imagens Astrométricas - Assafin (2006)). Com este pacote é feita a fotometria diferencial, que contabiliza o fluxo do objeto alvo na imagem usando um outro objeto brilhante e isolado para comparação, e, caso seja necessário, a "coronografia digital" que consiste em um procedimento onde o gradiente de luz de um objeto muito brilhante presente na imagem é determinado e retirado para uma análise melhorada dos dados. Em seguida é construído uma curva de luz para cada evento que consiste em um gráfico da razão de fluxo dos satélites em evento (Alvo/Calibrador) em função do tempo. Todos estes procedimentos são descritos no capítulo 3, inclusive a coronografia digital que, em função do filtro utilizado nas observações, não se fez necessária.

O comportamento desta curva de luz é ditado por 7 grandezas, sendo 4 dinâmicas ou geométricas (velocidade relativa entre os satélites, ângulo de fase solar, instante de maior aproximação e valor da menor distância entre os centros dos satélites nas ocultações, ou entre o centro de um satélite e da sombra nos eclipses) e 3 físicas (razão de albedos, e os raios geométricos aparentes dos dois satélites). O ângulo de fase solar e os raios dos satélites são bem determinados por informações de efemérides e de sondas respectivamente e a razão de albedos é calculada a partir imagens feitas nas proximidades do evento. Combinando estes 4 parâmetros fixos em um modelo de redução é possível obter, a partir da curva de luz, os restantes.

Para tal foi desenvolvido um modelo de redução que, a partir de estimativas para os 3 parâmetros dinâmicos restantes faz uma simulação numérica do evento em questão, produzindo uma curva de luz que é comparada à observada por mínimos quadrados não linear. Esta comparação resulta em correções aplicadas aos parâmetros para uma nova simulação numérica e o procedimento é repetido até se obter convergência entre as curvas. Este modelo constrói as simulações levando em consideração, não só as deformações geométricas que o ângulo de fase solar produz na figura aparente dos satélites para um observador na Terra (Stone 1999), como também a queda gradativa da luz de um satélite ao entrar na penumbra durante um eclipse. As implicações geométricas do ângulo de fase bem como a construção geométrica do modelo estão detalhadas no capítulo 4 e apêndices

 $^{^{1} \}rm ftp://ftp.imcce.fr/pub/ephem/satel/phemu09/visibility/vtri-itajuba.txt$

 $A \in B$.

Com este modelo foi possível obter, a partir das curvas de luz, os parâmetros do evento com precisões que variaram entre: 0,072 s a 1,185 s para o instante central, 0,53 km a 17,9 km para o parâmetro de impacto e 4 m/s a 389 m/s para a velocidade relativa. O capítulo 5 contém as 24 curvas de luz reduzidas com os respectivos resultados obtidos, acompanhados de uma breve discussão sobre os resultados e as condições de observação de cada evento. Há também uma comparação entre os resultados obtidos com o ajuste feito pelo modelo e com a teoria mais precisa para o sistema, utilizada para gerar a efeméride (Lainey *et al.* 2009). O capítulo 6 é uma conclusão geral do trabalho realizado na campanha e dos resultados nela obtidos.

O autor deste trabalho participou ativamente da observação dos eventos da campanha e foi responsável pelo tratamento e redução das imagens, além do desenvolvimento e aplicação do modelo numérico tanto teórica quanto computacionalmente.

Capítulo 2

Observações

Como foi mencionado no capítulo anterior, foi realizada em 2009 uma campanha para observar os eventos mútuos entre os satélite galileanos de Júpiter. Este capítulo irá tratar das observações dos eventos abordando, desde a seleção e organização da campanha, a partir das previsões, até a descrição do equipamento, detalhando o filtro e os sensores utilizados bem como suas características relevantes ao trabalho.

2.1 Campanha de Observação

A campanha de observação para os fenômenos mútuos de Júpiter no Brasil foi realizada por pesquisadores de 4 instituições do Rio de Janeiro e São Paulo (tabela 2.1). As observações foram realizadas no Observatório do Pico dos Dias (OPD) na cidade de Brasópolis (MG) que é gerenciado pelo Laboratório Nacional de Astrofísica (LNA). O sítio, com 1.864 metros de altitude, fica localizado nas coordenadas geográficas $\lambda = +45^{0}32'57''$, $\phi = -22^{0}32'22''$ e possui registro na União Astronômica Internacional de número 874.

2.1.1 Seleção de Eventos e Observações

A lista de eventos previstos para 2009-2010 (Arlot 2008) foi disponibilizada na rede através do portal do "Institut de Mécanique Céleste et de Calcul des Éphémérides" (IMCCE)¹ do Observatório de Paris. No mesmo portal foi possível ainda selecionar os eventos que seriam visíveis dado um determinado sítio de observação. A lista gerada para o OPD² continha 66 eventos, distribuídos em 54 noites, dos quais 55 foram selecionados (correspondendo a 45 noites) descartando os que possuíam queda de fluxo prevista igual a zero e os que ocorreram com elevação inferior a 30 graus.

Todas as noites foram contempladas com tempo de telescópio cobrindo 9 meses, das quais 22 foram perdidas por condições meteorológicas desfavoráveis. Nas 23 noites res-

 $^{^{1}} ftp://ftp.imcce.fr/pub/ephem/satel/phemu09/phemu09_132 ts.txt$

 $^{^{2} \}rm ftp://ftp.imcce.fr/pub/ephem/satel/phemu09/visibility/vtri-itajuba.txt$

Campanha brasileira para observação dos fenômenos mútuos de Júpiter 2009								
Observador/Pesquisador	Instituição							
Roberto Vieira Martins (RVM)	Observatório Nacional - RJ							
Marcelo Assafin (MA)	Universidade Federal do Rio de Janeiro - RJ							
Alex Dias de Oliveira (ADO)	Universidade Federal do Rio de Janeiro - RJ							
Felipe Braga Ribas (FBR)	Observatório Nacional - RJ							
Júlio I. B. Camargo (JIBC)	Observatório Nacional - RJ							
Dario N. da Silva Neto (DSN)	Universidade Estadual da Zona Oeste - RJ							
Oton Winter (OW)	UESP - Guaratinguetá/SP							
Priscila M. P. dos Santos (PP)	UESP - Guaratinguetá/SP							
Rosana A. N. de Araújo (RA)	UESP - Guaratinguetá/SP							
Helton S. Gaspar (HG)	UESP - Guaratinguetá/SP							
Luiz A. G. Boldrin (LB)	UESP - Guaratinguetá/SP							
Rafael Sfair (RS)	UESP - Guaratinguetá/SP							
Jarbas Cordeiro Sampaio (JS)	UESP - Guaratinguetá/SP							
Rita de Cássia (RC)	UESP - Guaratinguetá/SP							
André Izidoro Costa (AI)	UESP - Guaratinguetá/SP							
Saymon Santana (SS)	UESP - Guaratinguetá/SP							
Alexandre Pinho (AP)	UESP - Guaratinguetá/SP							
Jean P. S. Carvalho (JC)	UESP - Guaratinguetá/SP							

Tabela 2.1: Lista de pesquisadores que participaram da campanha observacional brasileira para os fenômenos mútuos de Júpiter de 2009

tantes foram observados 31 eventos (Tabela 2.2) dos quais 6 foram descartados. Destes, 4 apresentaram problemas de redução que ainda não foram solucionados (Ganymede occ Io - 27/04/2009; Ganymede ecl Europa - 12/08/2009; Io occ Europa - 15/08/2009 e Io occ Europa - 18/11/2009). Um evento, devido à grandes variações de céu, não apresentou qualidade fotométrica suficiente para análise (Io ecl Ganymede - 15/08/2009). Um último não apresentou queda de fluxo (Ganymede oculta Europa - 12/08/2009)

As imagens obtidas para os fenômenos foram tomadas de forma a conter no campo os satélites envolvidos no evento e, sempre que possível, um terceiro satélite ou até mesmo Júpiter, para ser usado como calibrador para fotometria (Fig. 2.1). Ainda assim, em função do pequeno campo do CCD não foi possível manter um calibrador fotométrico na imagem para dois eventos. Uma ocultação de Europa por Io que ocorreu em 07 de agosto e uma ocultação de Europa por Ganymede em 12 de agosto.

O tempo de exposição variou entre 1 e 2 segundos dependendo das condições meteorológicas e duração do evento. As integrações ocorriam em um intervalo de 30 minutos antes e depois dos instantes previstos para início e término do evento. Este longo tempo de integração era uma medida de cautela para que fosse possível obter, o mais próximo do evento, imagens com os satélites envolvidos já afastados e bem resolvidos para determinação da razão de albedos (seção 4.6).



Figura 2.1: Imagem de Júpiter e três satélites galileanos (Euroa, Io e Ganymede) momentos antes do evento (Ganymede ecl Io - 08/07/2009) feita no telescópio Zeiss com o CCDS800 e equipado com o filtro de banda estreita de 890 nm, escala de placa 0,370 "/pixel, campo, na figura, de 4, 2' × 2, 4'

Os 25 eventos aproveitados são constituídos de 12 ocultações, 12 eclipses e um evento duplo (tabela 2.3). Destes, apenas o fenômeno duplo não será discutido neste trabalho.



Figura 2.2: Imagem de Júpiter e Europa tomadas em 27/05/2009 CCD301 (campo da figura de 3, $2' \times 2, 5'$) com filtro I (a) e Metano (b)

Eventos Previstos Observados									
Data	Evento	Tipo	Queda mag.	Z (graus)	Duração (s)				
27/04/2009	Ganymede occ Io	Т	0,321	52,69	372				
09/05/2009	Europa occ Io	Р	0,149	34,26	201				
21/05/2009	Io occ Europa	Т	0,425	53,31	300				
28/05/2009	Io occ Europa	Р	0,371	14,700	307				
10/06/2009	Ganymede ecl Calisto	А	0,473	9,81	364				
16/06/2009	Ganymede ecl Io	Р	0,203	22,54	692				
19/06/2009	Calisto ecl Europa	Р	0,521	29,21	25				
19/06/2009	Calisto ecl Io	1	0,348	22,12	1				
20/06/2009	Calisto ecl Io	Р	0,483	28,89	842				
20/06/2009	Calisto ec l Io $^{\rm 2}$	Р	0,519	28,65	785				
22/06/2009	Io occ Europa	Р	0,174	$50,\!29$	312				
29/06/2009	Io occ Europa	Р	0,157	14,83	323				
04/07/2009	Io ecl Ganymede	А	0,332	9,85	199				
06/07/2009	Io ecl Europa	Р	0,151	9,9	87				
06/07/2009	Io occ Europa	Р	0,156	27,54	343				
08/07/2009	Ganymede ecl Io	Р	0,687	39,05	283				
13/07/2009	Io ecl Europa	Р	0,235	40,75	189				
07/08/2009	Io ecl Europa	Р	0,493	23,67	432				
07/08/2009	Io occ Europa	Р	0,319	28,87	592				
12/08/2009	Ganymede ecl Europa	Р	0,996	21,68	865				
12/08/2009	Ganymede occ Europa	3	3	3	3				
14/08/2009	Io ecl Europa ⁴	Р	0,528	67,18	533				
14/08/2009	Io occ Europa ⁴	Р	0,388	67,46	698				
15/08/2009	Io occ Europa	Р	0,090	45,02	2339				
15/08/2009	Io ecl Ganymede	Р	0,282	45,02	359				
22/08/2009	Io occ Europa	Р	0,159	23,33	1058				
16/09/2009	Io occ Europa	Р	0,189	6,15	518				
16/09/2009	Io ecl Europa	Р	0,741	22,19	425				
24/10/2009	Ganymede occ Europa	Р	0,143	34,33	501				
25/10/2009	Io occ Europa	Р	0,156	45,96	309				
18/11/2009	Io occ Europa	Р	0,270	36,60	291				

Tabela 2.2: Aqui estão os 31 eventos observados com as respectivas datas (coluna 1), satélites envolvidos e evento, onde *ecl* significa eclipse e *occ* ocultação(coluna2), tipo de evento [T = total, A = Anular ou P = parcial](coluna 3), queda de fluxo prevista (coluna 4), distância zenital (coluna 5) e duração (coluna 6) segundo as previsões de Arlot (2008).

Eventos Deste Trabalho									
Data	Evento	CCD	Seeing	Observador(es)	N^0 Img.				
09/05/2009	Europa occ Io	301	1.697"	DSN, JIBC, RC, HG	1401				
21/05/2009	Io occ Europa	301	1.860"	MA, ADO, PP, HG	1302				
28/05/2009	Io occ Europa	301	1.896"	MA, FBR, PP, LB	802				
10/06/2009	Ganymede ecl Calisto	301	1.983"	MA, HG, LB	1301				
16/06/2009	Ganymede ecl Io	301	1.806"	JIBC	2701				
19/06/2009	Calisto ecl Europa	301	2.135"	MA, JIBC, HG	1201				
19/06/2009	Calisto ecl Io	301	1.629"	MA, JIBC, HG	1201				
20/06/2009	Calisto ecl Io	S800	1.230"	MA, HG	2500				
20/06/2009	Calisto ec l Io $^{\rm 2}$	S800	1.747"	MA, HG	2273				
22/06/2009	Io occ Europa	301	1.230"	MA, JIBC, HG, AI, JC	2500				
29/06/2009	Io occ Europa	301	2.253"	FBR, JS, AI	1000				
04/07/2009	Io ecl Ganymede	301	2.242"	HG, JC	1801				
06/07/2009	Io ecl Europa	301	1.886"	HG	2000				
06/07/2009	Io occ Europa	301	1.926"	HG	1200				
08/07/2009	Ganymede ecl Io	301	1.806"	DSN, PS	1800				
13/07/2009	Io ecl Europa	301	1.886"	ADO, FBR, PS	2000				
07/08/2009	Io ecl Europa	301	1.995"	LB, RC	1800				
07/08/2009	Io occ Europa	301	2.012"	LB, RC	1700				
12/08/2009	Ganymede occ Europa	301	2.483"	HG, PP	1400				
14/08/2009	Io ecl e occ Europa ⁴	301	2.178"	AI, HG	1600				
$\boxed{22/08/2009}$	Io occ Europa	301	2.412"	ADO, PP	2500				
16/09/2009	Io occ Europa	301	2.536"	RC, HG	1400				
16/09/2009	Io ecl Europa	301	2.044"	RC, HG	1100				
24/10/2009	Ganymede occ Europa	301	3.850"	RS, HG, JIBC	2600				
25/10/2009	Io occ Europa	301	3.850"	RS, HG, JIBC	500				

Tabela 2.3: Esta tabela contém os eventos que foram observados e que serão discutidos neste trabalho além do evento duplo que ocorreu em 14 de agosto. Possui também o nome dado ao sensor CCD (subseção 2.2.2) que foi utilizado para o evento, *Seeing* da noite e as iniciais dos observadores cujos nomes estão dispostos na tabela 2.1.

¹Não há previsão para o tipo ou duração do evento;

 $^{^{2}}$ O mesmo evento ocorreu duas vezes na mesma noite. O primeiro as 5h09m30s (TU) e o segundo as 9h38m00s (TU);

 $^{^3\}mathrm{Previsão}$ não disponível em (Arlot 2008) para este evento;

 $^{^4{\}rm Fenômeno}$ duplo que não será discutido neste trabalho.

2.2 Equipamentos

2.2.1 Telescópio

O Observatório do Pico dos Dias conta com 3 telescópios que poderiam ser usados para esta campanha de observação. Boller & Chivens (IAGUSP) e Zeiss, ambos com 0,60 m de abertura e o Perkin-Elmer de 1,60 m de abertura. A grande quantidade de fenômenos selecionados exigiria uma quantidade de tempo de telescópio impraticável para o Perkin-Elmer ou para Boller & Chivens, no entanto o Zeiss é pouco solicitado pela comunidade, já que seu sistema de apontamento é manual e acompanhamento totalmente mecânico. Essas dificuldades são facilmente contornáveis para as exigências da campanha, então ele foi escolhido e utilizado para todos os eventos, a não ser para o do dia 20 de junho, que foi observado no Perkin-Elmer.

O Zeiss possui escala de placa de 27,5 segundos de arco/mm e distância focal equivalente de 7500mm com razão focal de f/12,5.

2.2.2 Sensores

Foram usados dois tipos de sensores CCD ("Charge Coupled Device") de modelos EEV-CCD02-06-1-206 denominado CCD301(tabela 2.4) e EDVCCD47-20 denominado CCDS800 (tabela 2.5). Ambos são retro-iluminados e permitem trabalhar no modo "frame-transfer", ou seja, eles fazem a integração de uma imagem enquanto descarregam a anterior, eliminando assim o tempo "morto" entre imagens sequênciais. Isso é de grande importância para os fenômenos mútuos pois são fenômenos de curta duração (poucos minutos), com a velocidade relativa entre os satélites mantedo-se sempre acima de 6 km/s e onde se consegue uma precisão espacial da ordem de quilômetros. Estes dois fatores combinados fazem com que fique clara a necessidade de imagens obtidas com o menor intervalo de tempo possível entre elas.

EEV CCD02-06-1-206					
Número de Pixels	385 x 578				
Tamanho do pixel (μ m)	22 x 22				
Corrente de escuro (e-/pixel/h)	$30 \pmod{\text{medida a 200K}}$				
Saturação $(-e/pixel)$	310.000				
Ganho	4				
Modo	Lento	Rápido			
Ruído de leitura (e- rms)	5,3 12,8				
Fator de Conversão (e-/ADU)	2,5	2,5			

Tabela 2.4: Informações técnicas do CCD301 fornecidas pelo Laboratório Nacional de Astrofísica

E2V CCD47-20							
Número de Pixels	1024 x 1024						
Tamanho do pixel (μ m)	13,5 x 13,5						
Corrente de escuro $(e-/pixel/h)$	$58 \pmod{228}{100}$						
Saturação (-e/pixel)	104.000						
Modo (kHz)	100	200	400	800	1000		
Ruído de leitura (e- rms) Canal A	3,77	4,45	5,28	8,86	12,65		
Ganho (e-/ADU) Canal A	0,28	0,62	0,75	2,32	4,05		
Ruído de leitura (e- rms) Canal B	3,84	4,51	5,34	9,20	13,13		
Ganho (e-/ADU) Canal B	0,29	0,63	0,76	2,35	4,07		

Tabela 2.5: Informações técnicas do CCDS800 fornecidas pelo Laboratório Nacional de Astrofísica

O CCD301 possui 385×578 pixels de $22 \times 22 \ \mu m$ de tamanho, dos quais 385×289 são efetivamente usados para imageamento, correspondendo a um campo de $3, 85' \times 2, 91'$ no telescópio Zeiss. Seu nível de saturação é atingido com 310.000 elétrons por pixel. A Fig. 2.3 mostra a eficiência quântica deste CCD em função do comprimento de onda.



Figura 2.3: Eficiência quântica do CCD301 em função do comprimento de onda fornecidade pelo portal do OPD/LNA^4 com destaque para a região em torno de 890 nm (seção 2.2.3).

Já o CCDS800 tem uma vantagem sobre o CCD301 pois possui 1024×2048 pixels de $13.5 \times 13.5 \ \mu\text{m}$ de tamanho, dos quais 1024×1024 são efetivamente usados para imageamento o que, no Zeiss, resulta em um campo de $6, 32' \times 6, 32'$. Além disso ele mantém a linearidade até um limite maior de contagens saturando com 104.000 elétrons por pixel. Sua eficiência quântica em função do comprimento de onda é mostrada na Fig. 2.4.

Vale lembrar que exposições eram feitas de forma a manter as contagens máximas dos satélites e de Júpiter em torno de 15.000 ADU's (*analogic-to-digital unit*), garantindo assim a linearidade dos CCDs.



Figura 2.4: Eficiência quântica do CCDS800 em função do comprimento de onda fornecida pelo portal do OPD/LNA⁶ com destaque para a região em torno de 890 nm (seção 2.2.3).

2.2.3 Filtro

A observação de fenômenos mútuos entre satélites encontra um grande obstáculo em função do brilho intenso dos planetas em sua vizinhança. Isso porque luz do planeta espalhada na imagem provoca um aumento na contagem de fundo de céu diminuíndo a razão do sinal sobre o ruído S/R que acarreta em um aumento da incerteza da magnitude (Newberry 1991). Portanto, faz-se necessário o uso de técnicas de observação e/ou tratamento de imagens para remover esta contribuição luminosa. Conhecendo-se o perfil de emissão e absorção da atmosfera do planeta é possível utilizar filtros que regulam a passagem de luz em determinados comprimentos de forma a minimizar os efeitos da luz difusa do planeta na imagem.



Figura 2.5: Albedo de Júpiter, Saturno e Urano para comprimentos de onda de 550 a 1000 nm comparados a curva de absorção do metano (Karkoschka 1998)

A camada exterior da atmosfera de Júpiter é composta principalmente por amônia e metano (Karkoschka 1994). O metano lá presente faz com que a atmosfera tenha um perfil de absorção bem característico (Karkoschka 1998), fazendo com que o albedo de Júpiter fique abaixo de 0.1 para comprimentos de onda entre 880 e 900 nm (Fig. 2.5). Assim para estes eventos foi usado um filtro de banda estreita, centrado em 890 nm com 20 nm de largura que nos foi gentilmente cedido pelo Dr. W. Beisker do IOTA-ES (International Occultation Timing Association - European Section). A Fig. 2.6 mostra o perfil de transferência de radiação do filtro em função do comprimento de onda, onde as Figs. 2.3 e 2.4 mostram em destaque a eficiência quântica dos CCD's para a banda em questão. Multiplicando esta eficiência quântica à transmissividade do filtro temos a banda de passagem efetiva das observações (Figs. 2.7 e 2.8).



Figura 2.6: Banda de transmissividade do filtro de metano em função do comprimento de onda



Figura 2.7: Eficiência quântica do CCD301 combinada com a banda de transmissividade do filtro de metano em função do comprimento de onda

Analisando as Figs. 2.5 e 2.6 em conjunto com a Fig. 2.4 vemos que o filtro permite a passagem de luz justamente na faixa de frequências onde se encontra o menor albedo



Figura 2.8: Eficiência quântica do CCD301 combinada com a banda de transmissividade do filtro de metano em função do comprimento de onda

para Júpiter. Como seus satélites principais não possuem atmosfera ou possuem uma muito fina, seu perfil de emissão é muito semelhante ao do Sol que eles refletem quase totalmente. Desta forma, na banda de passagem do filtro, e em sua vizinhança, os satélites não apresentam nenhum perfil de absorção (Mcfadden *et al.* 1980) e seu albedo mantém um valor razoável para se obter uma boa razão do sinal sobre o ruído sem que a imagem fique contaminada pela luz difusa de Júpiter (Fig. 2.1, 2.2 e 2.9). A eficiência do filtro para estes eventos foi tal que tornou desnecessária o uso da coronografia digital (seção 3.2.1) que é um recurso utilizado para remover a contribuição da luz do planeta na imagem e que consome muito tempo de computação.



Figura 2.9: Imagem de Júpiter, Calisto e Io momentos antes do evento (Calisto ecl Io - 20/06/2009) Feita no telescópio Perkin-Elmer 1,60m com o CCDS800 (escala de placa 0,177 "/pixel) e equipado com o filtro de metano (890 nm). Calisto próximo (a) e escondendo-se atrás de Júpiter (b). Resolução obtida graças ao corte feito na luz difusa de Júpiter pelo filtro de 890 nm

Capítulo 3

Tratamento das Imagens

Após a observação, as imagens geradas no telescópio precisam ser tratadas para que possam fornecer as informações que se quer obter sobre os objetos astronômicos observados. Este tratamento consiste em calibração a partir das características do CCD, remoção de efeitos indesejados na imagem (quando possível) e redução fotométrica.

Uma descrição detalhada dos procedimentos envolvidos no tratamento de imagens de fenômenos mútuos é feita na dissertação de Braga-Ribas (2009). Neste capítulo serão retomados alguns dos conceitos e idéias alí apresentados, focando nos pertinentes ao caso de Júpiter que tem algumas características bem diversas, entre as quais se destaca a boa razão sinal ruído das imagens e influência desprezível, como será mostrado a seguir, da luz de Júpiter anulada pelo fitro de banda estreita usado nas observações.

3.1 Calibração

Como descrito em Braga-Ribas (2009) as imagens obtidas a partir de sensores CCD trazem consigo informações indesejadas resultantes de efeitos eletrônicos do próprio sensor que podem ser facilmente removidas com procedimentos computacionais simples. Neste capítulo são descritos em detalhes quais destes efeitos foram significativos nas imagens obtidas para os fenômenos mútuos de Júpiter deste trabalho e quais os procedimentos usados para remover tais efeitos.

Sabe-se que as imagens geradas em CCD são obtidas a partir do acúmulo de elétrons gerados em cada pixel do detector, através de efeito fotoelétrico, por fótons que incidem no CCD. Estes elétrons acumulados em cada pixel são convertidos em contagens através de um conversor A/D (analógico para digital) usando a razão elétrons/ADU (analogicto-digital unit), que é chamada de ganho, fornecida pelo fabricante (tabelas 2.4 e 2.5). Porém, estas cargas não são produzidas apenas por fótons oriundos dos alvos, o que aumenta o ruído das imagens acarretando em mais incertezas nas medidas. Entre os fatores que contribuem para o aumento das contagens no CCD estão o fundo de céu, que depende principalmente das condições do céu bem como a presença e proximidade da Lua ou de outro objeto brilhante, e raios cósmicos que ao incidirem no detector produzem uma contagem alta, em função de sua energia elevada, tornando fácil sua identificação.

A própria eletrônica do detector também pode produzir cargas adicionais como corrente de escuro (*dark current*), que é um efeito multiplicativo decorrentes da elevação da temperatura do CCD e que depende do tempo de integração, e *"bias"* que são cargas inerentes ao sensor, que independem do tempo de integração, adicionadas a contagem para impedir contagens negativas. Chamamos de "Ruído de Leitura" pequenas flutuações em torno do valor médio da contagem de *bias*.

Além disso, cada pixel do sensor responde com sensibilidade diferente aos estímulos dos fótons. Tal efeito é chamado *flat-field*.

Em função da qualidade dos CCDs usados neste trabalho e do curto tempo de exposição das imagens, os efeitos de *dark current* não foram suficientes para causar ruídos consideráveis nas imagens. Para as correções de *bias* e *flat-field* foram tomadas cerca de 50 imagens após cada evento.

As imagens de *bias* são exposições de 0 segundos feitas com o obturador fechado para detectar apenas contagens de origem eletrônica. Utilizando o programa IRAF (*"Image Reduction and Analysis Facility"*) (Butcher & Stevens 1981) as imagens foram combinadas, através da tarefa *imcombine*, e sua média era obtida em um arquivo "master" (Fig. 3.1). Como o *bias* é uma contribuição que aumenta a contagem de todos os pixels, subtrai-se o *master bias* das imagens de *flat-field* e do evento usando a tarefa *imarith*. Vale lembrar que todas estas correções, embora necessárias, acarretam ruídos à imagen.



Figura 3.1: Imagem de *master bias* obtida a partir da combinação de 50 imagens tomadas com o obturador fechado e 0 segundos de expoisção para o (a) CCD301 e (b) CCDS800

As imagens de *flat-field* foram obtidas com a cúpula fechada e o telescópio equipado com o filtro de metano (890nm), apontado para uma tela branca iluminada uniformemente. O tempo de exposição variava de acordo com as contagens obtidas nos sensores, que eram mantidas entre 15.000 e 25.000 ADU's, sempre na faixa de linearidade dos CCDs. Usando novamente a tarefa *imcombine* estas imagens foram combinadas gerando um arquivo master de *flat-field* que é normalizado através da tarefa *normalize* do IRAF (Fig. 3.2). Para corrigir a diferença da sensibilidade de cada pixel basta dividir as imagens do evento pela *master flat* homogenizando-as.



Figura 3.2: Imagem de *master flat-field* obtida a partir da combinação de 50 imagens tomadas com o telescópio apontado para uma tela branca, uniformemente iluminada com (a) 02 segundos de exposição para o CCD301 e (b) 03 segundos de exposição para o CCDS800

3.2 Coronografia

Como foi mencionado anteriormente (seção 2.2.3) a presença de um objeto muito brilhante no campo traz consigo uma contribuição luminosa espalhada por toda a imagem prejudicando a análise fotométrica e/ou astrométrica de objetos próximos à esta fonte. Principalmente em se tratando de objetos fracos. Esta contaminação luminosa gera um gradiente de luz na imagem que pode gerar, entre outros efeitos, uma falsa variação no fluxo do satélite ao longo do tempo em função de seu movimento orbital pelo gradiente. Para diminuir estes efeitos a primeira opção é utilizar um filtro que bloqueie comprimentos de onda no qual a fonte contaminadora é mais brilhante. Para os eventos de Júpiter, o filtro em questão foi o filtro de banda estreita, 20 nm, centrado em 890 nm que se mostrou extremamente eficaz para o propósito em função da atmosfera de Júpiter e seus satélites (seção 2.2.3). Um outro artefato que pode ser utilizado para minimizar este problema é o coronógrafo que é um dispositivo que, acoplado ao telescópio, consegue bloquear apenas a passagem da luz do objeto brilhante (veja Guyon *et al.* (2006) para mais detalhes sobre coronógrafos). Mas, mesmo com o coronógrafo, a luz difusa do planeta deixa a imagem com o gradiente no fundo de céu.

Uma terceira opção para eliminar completamente este perfil da luz difusa, é um processo computacional chamado *coronografia digital* desenvolvido por Assafin *et al.* (2008) que faz parte do pacote PRAIA (Assafin 2006). A coronografia digital consiste em cal-
cular, na imagem a contribuição da luz do planeta em cada pixel da área de trabalho determinando com isso o perfil da luz do planeta espalhada por toda imagem (Fig 3.4). Em seguida este perfil é removido da imagem original (Fig. 3.3) resultando em uma imagem digitalmente coronografada com fundo de céu plano com contagem próxima de zero (Fig 3.5). Este procedimento bem como os principais efeitos da contaminação luminosa causada na imagem pelo planeta são discutidos amplamente em Braga-Ribas (2009) e Assafin *et al.* (2009).



Figura 3.3: Imagem original do evento (Io ecl Europa - 16/09/2009) observado no telescópio Zeiss equipado com o CCD301 (escala de placa 0,600 "/pixel) e com o filtro de banda estreita centrado em 890 nm.



Figura 3.4: Perfil da luz de Júpiter obtido no teste de coronografia (I
o ecl Europa - 16/09/2009)



Figura 3.5: Imagem do evento (Io ecl Europa - 16/09/2009) coronografada digitalmente (Fig. 3.3 menos o perfil obtido na Fig. 3.4)

O filtro usado para as observações já havia eliminado de forma eficiente a luz difusa de Júpiter nas imagens obtidas para este trabalho. Ainda assim foi feito um teste para verificar se a coronografia digital acarretaria em um aumento significativo na qualidade das imagens e dos resultados obtidos (curvas de luz). Em função da distância entre os satélites e planeta, e do campo do CCD, são poucos os eventos em que Júpiter está presente nas imagens e não é o calibrador fotométrico. Deste eventos, foi selecionado um que possui a configuração que representa 90 % dos eventos com Júpiter no campo.

O evento é um eclipse de Europa por Io que ocorreu em 16 de setembro de 2009 e foi escolhido em função da alta qualidade da curva de luz (pouca dispersão em relação a queda de fluxo e pouca variação de céu). A princípio nota-se que não há mudança aparente no comportamendo da curva de luz (Fig. 3.6 e 3.7). Além disso, tomando o desvio padrão da diferença entre as duas soluções (Fig. 3.8) é possível verificar que não há diferenças sistemáticas entre elas e portanto pode-se concluir que a coronografia não acarretou melhora na fotometria.



Figura 3.6: Curva de luz obtida para o evento (Io ecl Europa - 16/09/2009) com imagens sem coronografia digital. Janela superior: Diferença em magnitude (Alvo - Calibrador) em função do tempo relativo ao instante central previsto. Janelas inferiores: Fluxo de contagens ADU's obtido para o calibrador e para o alvo.



Figura 3.7: Curva de luz obtida para o evento (Io ecl Europa - 16/09/2009) com imagens coronografadas digitalmente. Janela superior: Diferença em magnitude (Alvo - Calibrador) em função do tempo relativo ao instante central previsto. Janelas inferiores: Fluxo de contagens ADU's obtido para o calibrador e para o alvo.



Figura 3.8: Esta curva representa o comportamento da diferença entre as curvas obtidas com evento coronografado (Fig. 3.7) e não coronografado (Fig. 3.6). O desvio padrão desta diferença, apesar do espalhamento em torno de 6 minutos após o instante central previsto, foi de $\sigma = 0,00216$ o que implica que a coronografia não acarretou mudança significativa no resultado da fotometria.

A partir deste teste concluiu-se que, graças ao filtro de banda estreita utilizado, não seria necessário o processo de coronografia digital para as imagens obtidas neste trabalho.

3.3 Fotometria

O estudo de fenômenos mútuos se dá através da fotometria diferencial onde se compara o fluxo de luz do alvo ao de um objeto sempre presente no campo denominado calibrador. Esta técnica de fotometria permite que efeitos de variação do céu como extinção atmosférica, variações de massa de ar e transparência, sejam contornados já que eles afetam a todos os objetos no campo da mesma forma. Além disso, permite a medida de pequenas variações de magnitude. Por estes motivos, optou-se por usar a fotometria diferencial neste trabalho para medir a variação do fluxo dos satélites em evento.

A comparação entre os satélites em um evento mútuo é feita através da diferença de magnitude entre o alvo e o calibrador (Eq. 3.1).

$$\Delta m = m_{alvo} - m_{calibrador} \tag{3.1}$$

Onde a magnitude instrumental m_{alvo} é calculada a partir do ponto zero de magnitude do instrumento m_0 , do fluxo do alvo F_{alvo} e do fluxo do céu F_{ceu} a partir da Eq. 3.2. (Kjeldsen & Frandsen 1992)

$$m_{alvo} = m_0 - 2,5 \log(F_{alvo} - Fceu) \tag{3.2}$$

Bons resultados com a fotometria requerem uma boa razão S/R. Para tal é preciso determinar a abertura de uma área na imagem onde será contabilizado o fluxo de cada objeto de forma a otimizar a razão S/R. A fim de determinar esta abertura foram feitos testes de fotometria variando os valores de abertura. Os resultados eram dispostos em curvas de luz e comparados em relação a dispersão dos pontos. Assim determinou-se a melhor abertura para cada evento. Vale ressaltar que, em alguns casos, existe uma forte relação entre a abertura da área de fotometria e o *seeing* da noite de observação (Assafin *et al.* (2009) e Braga-Ribas (2009). Porém, como mostra a tabela 3.1, este não foi o caso para os eventos desta campanha.

E importante também, principalmente para objetos fracos, determinar cuidadosamente a contribuição do céu na área de fotometria pois seu fluxo será retirado do fluxo do alvo. Felizmente este não é o caso para os satélites de Júpiter, que mesmo com o filtro utilizado, possuíam brilho suficiente para produzir uma boa razão S/R. A leitura do fundo de céu era feita escolhendo um anel com 5 pixels de espessura e raio interno 5 pixels maior que a área de abertura usada para fotometria. Como é possível notar na Tabela 3.1, em alguns eventos Júpiter, ou até mesmo uma parte dele com brilho constante, tiveram de ser usados como calibradores. Em função disso foi realizado um teste para verificar a eficiência do planeta como tal. O teste foi feito no evento (Io ecl Europa - 16/09/2009), que teve Io como calibrador, e consistiu em refazer a fotometria usando Júpiter como calibrador, e comparar o valor do σ da razão de fluxo com o valor obtido usando o satélite. O σ obtido usando Júpiter como calibrador foi de 0,00289 ficando razoavelmente próximo do valor obtido usando o satélite (Tabela 3.1). O mesmo teste foi realizado usando apenas uma fração de Júpiter, para eventos em que apenas uma parte do planeta está presente na imagem e não há satélite calibrador. O teste foi feito com o mesmo evento e o σ obtido foi de 0,00304, também razoavelmente próximo do valor obtido com o satélite. Estes valores indicam que embora o uso de Júpiter, inteiro ou em parte, como calibrador fotométrico adicione ruído à curva de luz, ele se faz útil para contornar problemas de variações bruscas de fundo de céu quando necessário.

Em eventos onde não há calibrador disponível no campo, a análise dos dados através da curva de luz só é possível se houver pouca variação no fundo de céu e, neste caso, a dispersão dos pontos for desprezível se comparada à queda de fluxo do satélite envolvido no evento. A pouca variação do fundo de céu é verificada através da dispersão dos pontos da curva fora do evento. Isso é válido apenas porque, no curto período de duração do evento o movimento de rotação dos satélites é muito pequeno, com isso seu albedo sofre pouca

 $^{^1 \}rm N \tilde{a} o$ houve calibrador presente no campo para este evento

Data	Evento	Objeto (s)	Seeing	Abertura	σ da razão
		calibrador(es)		$(\times seeing)$	de fluxo
09/05/2009	Europa occ Io	Calisto	1.697"	3,2	0,00404
21/05/2009	Io occ Europa	Ganymede	1.860"	8,1	0,01246
28/05/2009	Io occ Europa	Ganymede	1.896"	4,7	0,00206
10/06/2009	Ganymede ecl Calisto	Ganymede	1,983"	2,4	0,00411
16/06/2009	Ganymede ecl Io	Ganymede e	1.806"	5,8	0,00318
		Europa			
19/06/2009	Calisto ecl Europa	Calisto	2.135"	2,8	0,00308
19/06/2009	Calisto ecl Io	Calisto e	1.629"	3,7	0,00250
		Europa			
20/06/2009	Calisto ecl Io	Júpiter	1.230"	6,6	0,00309
		(parte)			
20/06/2009	Calisto ecl Io	Calisto	1.747"	3,4	0,00765
22/06/2009	Io occ Europa	Júpiter	1.230"	2,9	0,00111
29/06/2009	Io occ Europa	Júpiter	2.253"	6,7	0,00101
04/07/2009	Io ecl Ganymede	Júpiter	2.242"	5,4	0,00185
06/07/2009	Io ecl Europa	Io	1.886"	3,2	0,00225
06/07/2009	Io occ Europa	Júpiter	1.926"	10,32	0,00109
08/07/2009	Ganymede ecl Io	Ganymede e	1.806"	5,3	0,00239
		Europa			
13/07/2009	Io ecl Europa	Europa	1.886"	3,2	0,00258
07/08/2009	Io ecl Europa	Júpiter	1.995"	7,5	0,00124
		(parte)			
07/08/2009	Io occ Europa	1	2.012"	8,9	1
12/08/2009	Ganymede occ Europa	1	2.483"	6,04	1
14/08/2009	Io ecl e occ Europa	Ganymede	2.178"	2,5	0,00150
22/08/2009	Io occ Europa	Júpiter	2.412"	1,9	0,00092
16/09/2009	Io occ Europa	Júpiter	2.536"	7,9	0,00094
16/09/2009	Io ecl Europa	Io	2.044"	4,4	0,00255
24/10/2009	Ganymede occ Europa	Io	3.850"	2,07	0,00174
25/10/2009	Io occ Europa	Júpiter	3.850"	3,4	0,00300

Tabela 3.1: Aqui estão os objetos usados como calibradores na fotometria diferencial, seeing a abertura da área de fotometria em função do seeing e o desvio médio da razão de fluxos "Alvo/Calibrador".

ou quase nenhuma variação e portanto, seu fluxo de luz deve permanecer relativametne constante. Os valores da dispersão dos pontos fora do evento para os 2 fenômenos onde não foi possível manter um satélite calibrador no campo (Tabela 3.1) estão dispostos na Tabela 3.2 e mostram que, embora não haja calibrador nestes eventos, as condições de céu foram favoráveis, havendo pouca variação do fundo de céu. Este fator, combinado com a magnitude da queda do fluxo para os eventos, foi suficiente para tornar a curva de luz confiável.

Para realizar fotometria das imagens foi utilizado o programa photometry do pacote

Data	Evento	σ do fluxo	σ (% da queda de fluxo)
		fora do evento	
07/08/2009	Io occ Europa	0,0510	15,03
12/08/2009	Ganymede occ Europa	0,0045	4,72

Tabela 3.2: Tabela contendo os valores do desvio médio padrão dos pontos fora do evento e a relação entre este valor e a queda de fluxo do evento para os 2 eventos que não possuem calibrador.

PRAIA que consegue, a partir das posições dos satélites na primeira imagem fornecidas pelo usuário, identificar e acompanhar os alvos em todas as outras imagens do evento. Nele é possível definir o tamanho do disco sobre os objetos para fotometria e diâmetro do anel usado para determinar o fluxo do fundo de céu. Como saída o programa fornece o instante de cada imagem em data juliana, o fluxo, a razão S/R e o *seeing* de cada objeto. A partir destes dados as diferenças de magnitudes (alvo - calibrador(es)) são dispostas em uma série temporal denominada *curva de luz* que pode apresentar como unidades, além da diferença de magnitudes, a razão de fluxos entre os objetos envolvidos no evento.

Em eventos mútuos, as curvas de luz são construídas a partir da fotometria de várias imagens obtidas em um curto intervalo de tempo. A taxa de imagens obtidas por segundo é denominada *resolução temporal*. Curvas de luz construídas utilizando a fotometria diferencial permitem que se chegue a grande precisão na redução dos eventos porque, como já foi dito, com esta técnica de fotometria se elimina os efeitos de variações do céu (Fig. 3.9 a 3.12). Estas curvas são construídas usando o programa *lightcurve* do pacote PRAIA que recebe como entrada os arquivos com os dado fotométricos fornecidos pelo *photometry* e uma data, obtida a partir das previsões do evento, que será usada como referência do ponto zero da escala de tempo. O *lightcurve* gera como saída a data juliana, a diferença de tempo para o instante de referência, *seeing* do alvo e do calibrador, a diferença de magnitudes e seu erro, a razão de fluxos e seu erro, fluxo do alvo e fluxo do calibrador (ou média dos fluxos quando mais de um calibrador é utilizado). Com estas informações são construídos gráficos que permitem a análise das curvas de luz.



Figura 3.9: Curva de luz obtida a partir da fotometria do evento (Europa occ Io -09/05/2009). Janela superior: Diferença em magnitude (Alvo - Calibrador) em função do tempo relativo ao instante central previsto. Janelas inferiores: Fluxo de contagens ADU's obtido para o calibrador e para o alvo.



Figura 3.10: Curva de luz, análoga à Fig. 3.9, obtida a partir da fotometria do evento (Ganymede ecl Calisto - 10/06/2009).



Figura 3.11: Curva de luz, análoga à Fig. 3.9, obtida a partir da fotometria do evento (Ganymede ecl Io - 08/07/2009).



Figura 3.12: Curva de luz, análoga à Fig. 3.9, obtida a partir da fotometria do evento (Ganymede ecl Io - 16/06/2009).

Capítulo 4

Modelagem Teórica

4.1 Fenômenos Mútuos

Através das curvas de luz obtidas com as observações de fenômenos mútuos é possível determinar grandezas físicas e dinâmicas dos satélites envolvidos com extrema precisão (veja, por exemplo, Kass *et al.* (1999); Arlot *et al.* (2005); Assafin *et al.* (2009)). A obtenção dessas informações para cada evento é feita a partir de um ajuste da curva de luz observada segundo um modelo teórico. Desde o primeiro modelo rigoroso de ajuste sugerido por Aksnes & Franklin (1976) vários outros foram publicados sugerindo melhoramentos que incluíam variações locais de albedo, variações de escurecimento de limbo e ângulo de fase solares (Aksnes *et al.* 1986). Como foi visto no capítulo anterior, a astrometria fotométrica, feita a partir dos fenômenos mútuos, permite um ganho de precisão de pelo menos uma ordem de grandeza em relação aos métodos de astrometria tradicionais. Isso torna os eventos mútuos uma importante fonte de dados para ajustes de teorias dinâmicas das órbitas desses corpos (Lainey *et al.* 2009).

Os parâmetros físicos e dinâmicos que determinam a forma da curva de luz são o ângulo de fase solar, velocidade relativa entre os satélites, razão de albedos, raios, a distância aparente entre eles no momento de maior aproximação e o instante em que isso ocorre. Alguns destes parâmetros já são previamente bem determinados a partir de efemérides, informações de sondas e fotometria diferencial, feita logo antes e depois do fenômeno, como: a fase solar, os raios e a razão de albedos. A redução de eventos mútuos consiste em combinar estas informações em um modelo analítico e/ou numérico para obter, a partir das curvas de luz, os parâmetros restantes. Para isso é preciso definir claramente cada um destes parâmetros e entender como cada um deles afeta a forma da curva de luz. (Para uma descrição mais detalhada de tais parâmetros veja Braga-Ribas (2009).)

O modelo a ser usado na redução dos eventos neste trabalho é um modelo numérico que faz uma simulação dos eventos a partir da construção de figuras bidimensionais que representam a projeção da parte visível dos satélites no plano de observação, que é definido como sendo um plano perpendicular a linha de visada do observador. Os parâmetros envolvidos na redução bem como os cálculos necessários para a construção do modelo e sua descrição detalhada serão tratados a seguir. Vale citar que, como a duração dos eventos, que é da ordem de minutos, é pequena se comparada ao período orbital dos satélites, que está na ordem de dias, o modelo assume a velocidade relativa entre eles constante em direção, módulo e sentido.

4.2 Fase Solar

O ângulo de fase solar ϕ é o ângulo entre a direção da luz solar incidente no objeto e a direção da luz refletida que chega ao observador (Fig. 4.1). Para Júpiter, que está a aproximadamente 5,2 unidades astronômicas (UA) da Terra, este ângulo pode chegar a 12 graus (Stone 1999) e afeta a forma dos discos aparentes dos satélites vistos a partir de um observador na Terra (Fig. 4.2).



Figura 4.1: a) Ângulo de fase solar para um satélite de Júpiter - b) Ampliação da figura do satélite explicitando a região iluminada visível para um observador na Terra.

É possível construir então uma figura que representa a região visível do satélite para um observador na Terra (região localizada entre os pontos A e B da Fig. 4.1b) projetando a parte iluminada no plano de observação. Assumindo uma superfície esférica para o satélite é fácil notar que a distância entre a extremidade A e o centro do satélite não sofre nenhum tipo de modificação na projeção gerando um contorno na forma de um círculo com raio igual ao do satélite. Já a distância entre a extremidade B e o centro da geométrico da figura é resultado de uma projeção do disco iluminado no plano, o que gera um contorno na forma de uma elipse com semi-eixo maior igual ao raio do satélite e os focos localizados em uma reta que passa por este centro geométrico (Fig. 4.2a). Para coincidir com o centro do satélite, definimos centro geométrico como o centro do disco circular com raio igual ao raio do satélite. É fácil notar que este ponto não coincide com o fotocêntro da figura iluminada visível para um observador na Terra quando há ângulo de fase.



Figura 4.2: a) Figura iluminada do satélite vista por um observador na Terra - b) Figura iluminada do satélite vista por um observador na Terra com uma inclinação ϖ entre a direção do ângulo de fase e a vertical definida em relação a velocidade relativa entre os satélites.

O ângulo de fase solar bem como as deformações geométricas que ele causa dependem apenas da posição do Sol, do satélite e do observador no espaço. Porém é possível definir uma direção para a fase de acordo com a posição e movimento relativo dos satélites projetados no plano de observação. Isso vem a ser muito útil porque o modelo de redução utilizado, durante a simulação dos eventos, estabelece como direção horizontal a direção da velocidade relativa entre os satélites projetada no plano de observação. Então ele constrói e posiciona as figuras que os representam a partir deste critério. Assim, torna-se importante determinar o ângulo ϖ entre a direção da deformação causada pela fase, que definimos como à direção da reta contendo os focos da semi-elipse, e a reta perpendicular a direção da velocidade relativa entre os satélites (Fig. 4.2b). Esta inclinação, assim como o ângulo de fase, diferem menos de 0.01% entre os corpos.

Deformações deste tipo também ocorrem no caso do eclipse onde o cone de sombra é projetado no plano de observação (Fig. 4.3).



Figura 4.3: Projeção da sombra do eclipse no plano de observação

Neste caso a deformação vem da intersecção do cone com o plano de observação que tem como resultado uma cônica. Em função da grande extenção do cone de sombra em relação a inclinação ϕ do plano, o cone pode ser aproximado por um cilindro, que também produz uma cônica ao ser projetado no plano. Só que no caso do cilindro, a cônica que resulta da projeção é uma elipse, bem definida, com semi-eixo menor igual ao raio do cilindro que equivale ao raio do cone de sombra (Fig. 4.4a).

Do mesmo modo que na ocultação, o modelo estabelece uma direção preferencial baseada na velocidade relativa entre os satélites. Logo, será preciso também determinar a inclinação do eixo principal desta elipse em relação ao plano orbital dos satélites para o observador na Terra (Fig. 4.4b).



Figura 4.4: a) Forma elíptica da umbra e penumbra em função do ângulo de fase solar b) Inclinação do semi-eixo maior das elipses de sombra em relação a direção da velocidade relativa dos satélites.

O ângulo de fase solar pode ser bem calculado a partir das efemérides e pequenas variações no seu valor causam pouca mudança na curva de luz. Portanto, ele é mantido fixo durante a redução. Seu cálculo bem como as deformações geométricas que ele produz serão detalhados na seção 4.8.

4.3 Parâmetro de Impacto

Definimos parâmetro de impacto como sendo a menor distância aparente entre os centros dos satélites envolvidos em uma ocultação. Quando se trata do eclipse o parâmetro de impacto vem a ser a menor distância aparente entre o centro do satélite eclipsado e o centro da sombra projetada sobre ele, que pode não coincidir com o mínimo da curva de luz em função da forma elíptica que a sombra assume graças à fase. Esta distância depende das posições relativas de cada satélite projetadas no plano de observação.

O parâmetro de impacto tem influência sobre a profundidade da curva de luz e, junto com a velocidade, sobre a duração do evento. Assim, uma diminuição em seu valor produz um aumento tanto na duração do evento quanto na profundidade da curva e vice-versa. É um dos mais importantes parâmetros a serem determinados e seu valor varia entre zero e a soma dos raios dos satélites ou a soma entre o raio do satélite e o semi-eixo maior da elipse de sombra no eclipse.

4.4 Instante Central

O instante central, na ocultação, é o instante da maior aproximação entre os centros geométricos dos discos aparentes dos satélites. No eclipse, é o instante de maior aproximação entre o centro geométrico do disco aparente do satélite eclipsado e o centro geométrico da umbra projetada no plano de observação.

4.5 Velocidade Relativa

Velocidade relativa, definida no plano de observação, vem a ser a velocidade entre os centros geométricos dos discos aparentes dos satélites ou entre o satélite eclipsado e a umbra (no caso de eclipses). A sombra move-se com a mesma velocidade que o satélite eclipsante para um observador no Sol, porém isso não ocorre quando fazemos sua projeção no plano de observação para um observador na Terra.

Como a duração do evento é insignificante comparada ao período orbital dos satélites, a velocidade relativa é considerada constante, em módulo e direção, durante todo o evento em nosso modelo de ajuste das curvas de luz. Ela influencia diretamente na duração do evento, sendo tanto maior quanto menor a velocidade. Em função da qualidade das efemérides das luas galileanas alguns trabalhos assumem a velocidade relativa como parâmetro fixo no ajuste das curvas de luz (Kaas *et al.* 1999). Porém, neste trabalho, a velocidade relativa será um parâmetro a ser ajustado à curva observada.

4.6 Razão de Albedos

A razão de albedos é um parâmetro físico que está relacionado com a reflexibilidade dos satélites, sendo o albedo definido como a razão entre quantidade de luz relfetida e recebida pelo corpo, considerando um elemento de área da superfície em questão. Portanto o corpo será mais ou menos brilhante dependendo do seu albedo. Durante uma ocultação a quantidade total de luz recebida depende da área visível de cada corpo e da luz solar refletida por cada uma das áreas. Assim, a razão de albedos, que fornece a contribuição de cada um dos satélites para o fluxo de luz, influencia diretamente na profundidade da curva de luz. Porém, ao contrário do parâmetro de impacto, ela não tem influência na duração do evento.

Em princípio, no caso de um eclipse não há influência da razão de albedos pois temos apenas um corpo sendo coberto pela sombra do outro. Na prática, entretanto, quando os dois corpos não são resolvidos nas imagens, o fluxo dos dois é medido indistintamente na fotometria. Nesses casos, é necessário levar em consideração a razão de albedos ou então subtrair o fluxo do eclipsante do fluxo total. O fluxo do eclipsante que pode ser facilmente obtido a partir de imagens feitas minutos antes ou depois do evento quando os dois satélite estiverem separados o suficiente. No presente trabalho, tal veio a acontecer apenas em dois dos eclipses.

Mapas de albedos fornecidos pelas sondas Voyager e Galileo, com resoluções de quilômetros, fornecem variações de brilho na superfície dos satélites e podem ser usados na análise de eventos mútuos entre os satélites de Júpiter (Vasundhara *et al.* 2003). Entretanto, mesmo sem mapas como estes é possível determinar a razão de albedos a partir de imagens tomadas horas antes e depois dos eventos usando o mesmo filtro das observações. Isso se mostra bastante eficaz porque os mapas de albedos não são gerados com a mesma banda de passagem (filtros, detectores) e ângulo de fase, e além disso estão sujeitos a possíveis efeitos de fotoclinometria (sombras projetadas em relevos no momento da medida das sondas) que não são considerados nas observações de solo. Assim, com estas imagens obtidas próximas ao evento, garante-se maior compatibilidade com a faixa espectral e ângulo de fase já que os satélites possuem períodos orbitais de alguns dias. Usando a notação 1 para satélite ocultado/eclipsado e 2 para satélite ocultante/eclipsante, podemos escrever a razão de albedos A_1/A_2 entre os dois corpos a partir da razão entre seus fluxos fotométricos com a expressão a seguir:

$$\frac{A_1}{A_2} = \frac{F_1}{F_2} \frac{S_2}{S_1} \tag{4.1}$$

Onde S_1 e S_2 são as áreas da parte visível dos satélites, respectivamente, para um observador na Terra e F_1 e F_2 são os fluxos de luz para os mesmos. Em função das deformações mencionadas no item 4.2, temos que a área do disco aparente visível do satélite é dada pela soma da área de um semi-círculo com raio igual ao raio do satélite e a área de uma semi-elipse com semi-eixos calculados usando raio de cada satélite e o ângulo de fase solar para cada um. Vale lembrar que esta modelagem é baseada no modelo simples onde os satélites são considerados esferas homogêneas que refletem a luz solar pela lei da Lambert, pruduzindo discos cinzas homogêneos.

$$S_1 = \frac{\pi^2 R_1^2 (1 - \sqrt{1 - e_1^2})}{2} \tag{4.2}$$

$$S_2 = \frac{\pi^2 R_2^2 (1 - \sqrt{1 - e_2^2})}{2} \tag{4.3}$$

Onde e_1 e e_2 são as excentricidades das semi-elipses geradas para cada satélite em função dos respectivos ângulos de fase. Em função da pequena variação do ângulo de fase entre os satélites (seção 4.2) estes valores foram considerados iguais. Substituindo as expressões para as áreas em (4.1) temos a expressão que nos fornece a razão de albedos em função da razão dos fluxos fotométricos dos satélites.

$$\frac{A_1}{A_2} = \frac{F_1}{F_2} \left(\frac{R_2^2}{R_1^2}\right) \left(\frac{1 - \sqrt{1 - e_2^2}}{1 - \sqrt{1 - e_1^2}}\right)$$
(4.4)

Imagens feitas nas proximidades dos eventos foram utilizadas para a obtenção da razão dos fluxos e um software foi desenvolvido para o cálculo, usando a Eq. 4.4, da razão de albedos. Em função da alta correlação entre a razão de albedos e o parâmetro de impacto e do fato de que a razão de albedos é bem definida usando o procedimento descrito, ela será mantida fixa durante a redução.

4.7 Raios

Os raios aparentes dos satélites são parâmetros geométricos de grande influência na duração do evento e profundidade da curva de luz. Para os satélites galileanos de Júpiter, estes valores são determinados a partir de informações obtidas pela sonda Galileo. Os valores obtidos para os raios possuem precisão maior do que a obtida com os fenômenos mútuos; isso associado ao fato de que eles têm uma forte correlação com a velocidade relativa e o parâmetros de impacto faz com que estes parâmetros sejam mantidos constantes durante a redução. Para este trabalho foram usados os valores médios retirados do relatório de 2009 do Grupo de Trabalho em Coordenadas Cartográficas e Elementos Rotacionais de corpos do Sistema Solar da UAI (Archinal *et al.* 2010). A tabela 4.1 lista os valores médios para os eixos principais de inércia de cada satélite em km.

Raios dos satélites Galileanos de Júpiter				
	Io	Europa	Ganymede	Calisto
Raio equatorial subplanetário (km)	1829.4	1562.6	2631.2	2410.3
Raio equatorial orbital (km)	1819.4	1560.3	2631.2	2410.3
Raio Polar (km)	1815.7	1559.5	2631.2	2410.3
Raio Médio (km)	1821.49	1560.8	2631.2	2410.3
$Erro (km) \pm$	0.05	0.3	1.7	1.5

Tabela 4.1: Raios dos eixos principais de inércia dos satélites galileanos de Júpiter acompanhados do valor médio e erro do valor médio retirados do relatório do grupo de trabalho da UAI 2009.

4.8 Modelagem Geométrica

Como foi mencionado na seção 4.2 o ângulo de fase solar causa algumas deformações na forma dos discos aparentes dos satélites, que precisam ser calculadas de forma detalhada para o modelo de redução que será utilizado. Além disso, no caso dos eclipses é preciso considerar a queda de luz gradativa que ocorre ao longo da penumbra. Estes cálculos são necessários para a construção do modelo numérico que foi utilizado no trabalho.

A escolha e o detalhamento deste modelo numérico serão tratados na seção 4.9.

A seguir serão descritos todos os cálculos envolvidos para a modelagem geométrica dos eventos dividos em duas partes: Ocultações e Eclipses.

4.8.1 Ocultações

Para a ocultação o modelo de redução faz uma simulação do evento construindo uma figura bidimensional que representa os discos aparentes dos satélites envolvidos no evento. Portanto, é preciso determinar o valor do ângulo de fase solar e os parâmetros geométricos derivados dele que terão influência na forma que os satélites envolvidos assumem para um observador na Terra. Para tal serão usados vetores-estado contendo a posição e velocidade topocêntrica dos satélites e do Sol (Fig.4.5) gerados utilizando a DE418 (teoria que fornece a efeméride de Júpiter) combinada ao arquivo NOE-5-2010-GAL.a.bsp através do sistema de informação SPICE (Acton 1996). Este arquivo, disponivel na rede¹, oferece as efemérides do IMCCE dos quatro satélites Galieanos (Lainey *et al.* 2009).

Os vetores de estado são:

 $\overrightarrow{V_1}$: Vetor de posição topocêntrica do satélite 1 (Ocultado)

 $\overrightarrow{V_2}$: Vetor de posição topocêntrica do satélite 2 (Ocultante)

 V_{ST} : Vetor de posição topocêntrica do Sol

 V_{S1} : Vetor de posição Heliocêntrica do satélite 1 (Ocultado)

 V_{S2} : Vetor de posição Heliocêntrica do satélite 2 (Ocultante)

 $^{^{1}\}mathrm{ftp:}//\mathrm{ftp.imcce.fr/pub/ephem/satel/galilean/L2}/$



Figura 4.5: Vetores de posição topocêntricos e heliocêntricos envolvidos na modelagem geométrica dos eventos mútuos

Vale ressaltar que, como a geometria do problema tem lugar em um espaço atemporal, estes vetores são gerados para cada instante t_0 das imagens observadas corrigidos de um tempo de luz que é calculado de forma a representar corretamente as posições dos corpos no instante desejado. Assim, no caso de uma ocultação temos que a posição observada de um satélite é a posição por ele ocupada no instante t_S em que a luz o deixou. Desta forma, sendo c a velocidade da luz e d_{os} a distância do observador ao satélite, temos que os vetores correspondentes aos satélites serão gerados para um instante t_S tal que:

$$t_S = t_0 - \frac{d_{OS}}{c} \tag{4.5}$$

e o vetor topocêntrico do Sol é gerado usando o tempo t_S do satélite ocultado menos o tempo que o fóton leva para viajar do Sol até ele. Logo,

$$t_{Sol} = t_S - \frac{d_1}{c} \tag{4.6}$$

onde d_1 é a distância entre o satélite ocultado e o Sol.

Os vetores $\overrightarrow{V_{S1}}$ e $\overrightarrow{V_{S2}}$ são facilmente obtidos a partir dos 3 vetores inicialmente fornecidos.

$$\overrightarrow{V_{S1}} = \overrightarrow{V_1} - \overrightarrow{V_{ST}} \tag{4.7}$$

$$\overrightarrow{V_{S2}} = \overrightarrow{V_2} - \overrightarrow{V_{ST}} \tag{4.8}$$

A partir das Figs. 4.1a e 4.5 é fácil notar que o ângulo de fase solar para cada satélite será dado pelo ângulo entre seus vetores de posição heliocêntrica e topocêntrica. Assim:

$$sen\phi_1 = \frac{|\overrightarrow{V_1} \times \overrightarrow{V_{S1}}|}{|\overrightarrow{V_1}| \cdot |\overrightarrow{V_{S1}}|}$$
(4.9)

$$sen\phi_2 = \frac{|\overrightarrow{V_2} \times \overrightarrow{V_{S2}}|}{|\overrightarrow{V_2}| \cdot |\overrightarrow{V_{S2}}|}$$
(4.10)

Uma vez determinada a fase é preciso obter a inclinação da direção da fase em relação à direção vertical à velocidade relativa dos satélites. Para isso é preciso primeiro determinar um vetor que represente a velocidade relativa entre eles (Fig. 4.6).



Figura 4.6: a) Vetores velocidade para cada satélite - b) Direção da velocidade relativa entre os satélites considerando o referencial no satélite 1 (ocultado)

Assumindo o satélite 1 (ocultado) como referencial podemos escrever a velocidade relativa como sendo:

$$\overrightarrow{Vel}_R = \overrightarrow{Vel}_2 - \overrightarrow{Vel}_1 \tag{4.11}$$

onde:

 \overrightarrow{Vel}_R : Vetor velocidade relativa de aproximação do satélite 2 (ocultante) assumindo o referencial fixo no satélite 1.

 Vel_2 : Vetor velocidade topocêntrica do satélite 2

 \overrightarrow{Vel}_1 : Vetor velocidade topocêntrica do satélite 1

Definindo os planos $\lambda 1$ e $\lambda 2$ como sendo os planos contendo os vetores de posição topocêntrica e heliocêntrica dos satélite 1 e 2 respectivamente temos que os vetores $\overrightarrow{\eta_{\lambda 1}}$ e $\overrightarrow{\eta_{\lambda 2}}$, dados por:

$$\overrightarrow{\eta_{\lambda 1}} = \overrightarrow{V_{S1}} \times \overrightarrow{V_1} \tag{4.12}$$

$$\overrightarrow{\eta_{\lambda 2}} = \overrightarrow{V_{S2}} \times \overrightarrow{V_2} \tag{4.13}$$

são normais a estes planos.

De modo análogo definimos o plano v que contém o vetor velociadde relativa calculado em (4.10) e o vetor de posição topocêntrica do satélite 2. Logo o vetor $\overrightarrow{\eta_v}$, normal ao plano v será:

$$\overrightarrow{\eta_v} = V \overrightarrow{el}_R \times \overrightarrow{V_2} \tag{4.14}$$

Assim o ângulo ϖ entre a direção da fase e a velocidade relativa será dado por:

$$sen\varpi_1 = \frac{|\overrightarrow{\eta_{\lambda 1}} \times \overrightarrow{\eta_{\upsilon}}|}{|\overrightarrow{\eta_{\lambda 1}}| \cdot |\overrightarrow{\eta_{\upsilon}}|}$$
(4.15)

A semi-elipse que compõe metade da figura assumida pelos satélites para um observador na Terra terá semi-eixo maior igual ao raio do satélite e semi-eixo menor igual a $R \cdot sen\phi$; e a linha que divide as duas figuras e contém os focos da semi-elipse terá uma inclinação ϖ em relação a direção perpendicular a velocidade relativa entre os satélites e passará pelo centro geométrico do satélte.

4.8.2 Eclipses

Assim como na ocultação, para eclipses, o modelo de redução precisará construir figuras bidimensionais que representem o disco aparente do satélite eclipsado e a sombra. Para isso, além da deformação na forma do disco aparente do satélite eclipsado é preciso determinar os raios da umbra e da penumbra bem como a deformação de seus discos em função da fase. Além disso, é preciso determinar a forma analítica da queda gradativa da luz que ocorre ao longo da penumbra.

Mais uma vez serão usados os vetores topocêntricos descritos na seção 4.8.1 porém a correção temporal em relação ao instante das imagens, para o satélite eclipsante e para o Sol são um pouco mais sutis do que a que deve ser feita no caso da ocultação. A sombra representa o último fóton que passa pelo satélite eclipsante, vai até o eclipsado e retorna ao observador. Assim o instante a ser considerado para a posição deste satélite, t_2 , é o instante da observação corrigido do tempo que o fóton demora para viajar até o eclipsado e retornar ao observador na Terra. Sendo t_0 o instante da observação, Δ_{12} a distância entre os satélites, d_{O1} a distância do observador ao satélite eclipsado e c a velocidade da luz, temos:

$$t_2 = t_0 - \frac{\Delta_{12}}{c} - \frac{d_{O1}}{c} \tag{4.16}$$

Para a posição do Sol temos de considerar, além disso, o tempo que o fóton leva para viajar até o satélite eclipsante. Desta forma, sendo d_2 a distância entre o satélite eclipsante e o Sol, temos que:

$$t_S = t_0 - \frac{\Delta_{12}}{c} - \frac{d_{O1}}{c} - \frac{d_2}{c}$$
(4.17)

A posição do satélite eclipsado é gerada usando a mesma correção temporal da ocultação.

Os raios da penumbra e umbra são determinados usando geometria plana simples aplicada à Figura 4.7



Figura 4.7: Diagramação geométrica usada para determinar o raio da penumbra e umbra Sendo d_2 e d_1 as distâncias O_SO_2 e O_SE , respetivamente; definimos d_U como sendo a

distância entre O_S e D e d_P como sendo a distância entre O_S e P. Usando a semelhança entre os triângulos A O_S D e B O_2 D temos que:

$$d_U = \frac{R_S}{R_S - R_2} \cdot d_2 \tag{4.18}$$

E da semelhança entre $FO_SP \in GO_2P$:

$$d_P = \frac{R_S}{R_S + R_2} \cdot d_2 \tag{4.19}$$

O raio da umbra, EC, será obtido usando a semelhança entre os triângulos A O_S D e ECD:

$$R_U = R_S \cdot \frac{d_U - d_1}{\sqrt{d_U^2 - R_S^2}}$$
(4.20)

De forma análoga temos que o raio da penumbra, EO_1 , é obtido a partir da semelhança entre AO_SP e PEO_1 .

$$R_P = R_S \cdot \frac{d_1 - d_P}{\sqrt{d_P^2 - R_S^2}}$$
(4.21)

O valores de d_2 e d_1 são facilmente obtidos a partir dos vetores topocêntricos (Fig.4.5) e dos vetores heliocêntricos obtidos em (4.7) e (4.8):

$$d_2 = |\overrightarrow{V_{S2}}| \tag{4.22}$$

$$d_1 = \frac{\overrightarrow{V_{S1}} \cdot \overrightarrow{V_{S2}}}{|\overrightarrow{V_{S2}}|} \tag{4.23}$$

Antes de calcular a deformação sofrida pela sombra em função da fase, que seria o próximo passo lógico, é conveniente modelar a queda gradativa da luz ao longo da penumbra. Isso porque esta queda depende diretamente da distância ao centro da sombra e, como será mostrado, torna-se mais simples fazer esta modelagem antes de considerar a fase a fazer suas correções.

O fluxo de luz do satélite eclipsado em um pequeno elemento de área qualquer da

penumbra será seu próprio albedo multiplicado de um fator γ , que representa o fluxo de luz do Sol correspondente a fração do disco solar não ocultado pelo satélite eclipsante, visto daquele elemento de área da sombra. Para isto considere a figura a seguir:



Figura 4.8: Diagrama para modelagem da queda de luz ao longo da penumbra

O círculo de sombra do satélite eclipsante projetado no plano do Sol para um observador localizado no ponto H da penumbra (distância AH_PBH_p) sofre uma pequena variação ao longo do segmento FG. Porém, considerando que a distância do satélite ao Sol, d_2 , é muito grande em relação ao raio do Sol e que o raio da penumbra (FG) é muito pequeno comparado com estas grandezas notamos que, para os fenômenos de Júpiter, esta variação no tamanho do disco é inferior a 0.15 %² e, portanto, podemos considera-lo, com boa aproximação, o mesmo em todo o segmento FG. Por questões de praticidade, o cáculo do raio de sombra será feito então para um observador localizado no ponto E.

Definamos então a seguinte seguinte notação:

 $EH = R_{CP}$: Distância do ponto em questão ao centro da umbra

 $O_S A_P = R_{SS}$: Raio da sombra do satélite (depende apenas das distâncias dos satélites ao Sol)

 $O_S H_S = d_{CS}$: Distância do centro da sombra do satélite ao centro do Sol

A partir da semelhança dos triângulos $O_S A_P E$ e $O_2 CE$ temos que

 $^{^2{\}rm O}$ cálculo detalhado da variação no diâmetro da sombra ao longo do segmento FG bem como os valores obtidos desta variação para cada evento estão descritos no Apêndice A

$$R_{SS} = \frac{R_2 \cdot d_1}{d_1 - d_2} \tag{4.24}$$

e dos triângulos $H_S O_S O_2$ e $O_2 HE$

$$d_{CS} = \frac{R_{CP} \cdot d_2}{d_1 - d_2} \tag{4.25}$$

Para determinar a fração do Sol que é coberta pelo disco de sombra usamos a modelagem descrita em Assafin *et al.* (2009) que calcula analiticamente a área comum a dois discos que estão se ocultando. Para tal considere a figura abaixo:



Figura 4.9: Geometria de uma ocultação parcial onde os discos S_2 e S_1 com raios $R_2 < R_1$ se interceptam na área comum A.

A área comum A é dada por

 $A = S(O_1BC) - \Delta(O_1BC) + S(O_2BC) - \Delta(O_2BC)$

onde $S(O_1BC)$ e $S(O_2BC)$ são as áreas dos setores circulares dos discos S_1 e S_1 , respectivamente e $\Delta(O_1BC)$ e $\Delta(O_2BC)$ as áreas dos triângulos. Substituindo os valores das áreas temos que:

$$A = R_1^2 \alpha_1 - \frac{R_1^2 \cdot sen2\alpha_1}{2} + R_2^2 \alpha_2 - \frac{R_2^2 \cdot sen2\alpha_2}{2}$$
(4.26)

com os ângulos α_i obtidos a partir da lei dos cossenos.

$$\cos\alpha_{i} = \frac{R_{i}^{2} - R_{j}^{2} + d^{2}}{2R_{i}d}$$
(4.27)

onde i = 1 ou 2 e j = 2 ou 1 respectivamente.

Analisando novamente a figura é possível notar que $R_1 \text{sen}\alpha_1 = R_2 \text{sen}\alpha_2 = \text{BA} = \text{AC}$ e que $R_1 \cos \alpha_1 = O_1 \text{A}$ e $R_2 \cos \alpha_2 = \text{A}O_2$. Definindo y = BC temos

$$\frac{R_1^2 sen 2\alpha_1}{2} + \frac{R_2^2 sen 2\alpha_2}{2} = \frac{d \cdot y}{2} = dR_1 sen\alpha_1 = dR_2 sen\alpha_2 \tag{4.28}$$

Substituíndo em (4.26) temos uma expressão simplificada para a área ocultada A.

$$A = R_1^2 \alpha_1 + R_2^2 \alpha_2 - d \cdot R_1 sen\alpha_1 = R_1^2 \alpha_1 + R_2^2 \alpha_2 - d \cdot R_2 sen\alpha_2$$
(4.29)

Assim, para determinar a fração de área do Sol que está visível $(FSOl_{OCSS1})$ basta dividir a expressão acima pela área do Sol substituindo nela os parâmetros encontrados nas equações (4.24) e (4.25).

$$FSOl_{OCSS1} = \frac{R_{SS}^2 \alpha_{SS} + R_S^2 \alpha_S - d_{CS} \cdot R_{SS} sen \alpha_{SS}}{\pi R_S^2}$$
(4.30)

onde

$$\cos\alpha_{SS} = \frac{R_{SS}^2 - R_S^2 + d_{CS}^2}{2R_{SS}d_{CS}} \quad e \quad \cos\alpha_S = \frac{R_S^2 - R_{SS}^2 + d_{CS}^2}{2R_Sd_{CS}} \tag{4.31}$$

para $0 \leq \alpha_{SS} \in \pi \geq \alpha_S$.

O fator γ que representa a fração de área do Sol vista do ponto H é dado então por 1 - $FSOl_{OCSS1}$. Assim é possível modelar o fluxo de luz recebido por um satélite localizado em qualquer ponto da penumbra. Vale lembrar que nesta modelagem não é levado em consideração o escurecimento de bordo do sol.

Voltemos agora ao problema da deformação que a sombra sofre em função do ângulo de fase solar. A modelagem descrita acima permite calcular o fluxo de luz para um satélite em um ponto H da penumbra em função da fração de área visível do Sol para um observador localizado neste ponto. Porém estes valores dependem diretamente da distância deste ponto ao centro da umbra. Como estamos analisando o problema do ponto de vista de um observador localizado na Terra lidamos sempre com a projeção da sombra no plano de observação (Figs. 4.3 e 4.4) e, portanto, com coordenadas neste plano. Assim a distância de um ponto ao centro da umbra usada no modelo de redução, que está localizada no plano de observação, deve ser projetada no plano perpendicular à direção do Sol para somente então ser aplicada à Eq. 4.25. Esta projeção acarreta uma pequena correção que irá depender do ângulo de fase solar e da direção da fase em relação a velocidade relativa. Desta forma, sendo R_{CPO} a distância de um ponto qualquer na penumbra ao centro da

umbra no plano de observação e R_{CP} sua projeção do plano perpendicular a direção do Sol temos que se

$$R_{CPO} = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2} \tag{4.32}$$

então

$$R_{CP} = \sqrt{\Delta x^2 (\cos^2 \varpi \cdot \cos^2 \phi + \sin^2 \varpi) + \Delta y^2 (\sin^2 \varpi \cdot \cos^2 \phi + \cos^2 \varpi)}$$
(4.33)

onde Δx e Δy são as diferenças entre as coordenadas do ponto em questão e as coordenadas do centro da umbra no plano de observação. A descrição dos cálculos das projeções que resultam nas equações 4.32 e 4.33 está detalhada no Apêndice B.

4.9 Modelo Numérico

Como foi dito no item 1 deste capítulo vários modelos foram publicados para a redução de eventos mútuos. Para os eventos deste trabalho, entretanto, foi construído um modelo numérico/analítico que permite calcular de forma minuciosa a influência de parâmetros como a fase solar e o escurecimento gradativo da penumbra. O modelo é aplicado através de um software desenvolvido em linguagem de programação FORTRAN77 e incorporado ao pacote de redução astrométrica/fotométrica de imagens PRAIA (Plataforma de Redução Automática de Imagens Astronômicas; Assafin (2006)). A partir de parâmetros iniciais calculados a partir da curva observada, constrói-se uma figura bidimensional que representa a imagem projetada dos satélites no plano de observação em uma matriz numérica para cada instante das observações, e contabiliza o valor do fluxo normalizado dos dois satélites para estes instantes, simulando então o evento em questão. Isso gera uma curva de luz simulada que é comparada a curva observada através de um método de mínimos quadrados não linear que calcula uma correção a ser adicionada aos parâmetros do modelo que estão sendo ajustados. Depois de corrigidos refaz-se a simulação e o processo é repetido até que seja obtida convergência entre as curvas. Vale lembrar que toda a simulação é feita no plano de observação e portanto diretamente ajustável às imagens obtidas para o evento.

Para construir a figura bidimensional que será usada na simulação o software divide o processo em duas situações; ocultação e eclipse. No caso da ocultação ele desenha os dois satélites envolvidos no evento utilizando as expressões obtidas na seção anterior para realizar as correções na forma dos satélites em função da fase solar (Fig 4.2). A partir de então assume um valor de albedo para cada ponto da matriz de simulação que está localizado dentro dos satélites levando sempre em consideração a razão de albedos previamente calculada e fornecida pelo usuário. No caso do eclipse o software desenha uma figura que representa o satélite eclipsado e através de uma combinação das expressões que modelam a forma geométrica da sombra (Fig 4.4) e o comportamento do fluxo de luz em seus diversos pontos, ele dimensiona variações no fluxo de cada ponto da figura que representam o efeito da passagem da sombra pelo satélite.

O número de pontos que cada matriz de simulação e, consequentemente cada satélite, terá, depende diretamente da relação de precisão km/pixel que será usada no processo de redução. Esta relação é calculada a partir da combinação da resolução temporal que se obtém para as imagens e da velocidade relativa entre os satélites envolvidos no evento. A partir daí o software faz uma conversão das distâncias geométricas de quilômetros para pixel e determina o tamanho da matriz da seguinte forma:

Para ocultações

$$n = 2 \cdot D_{12} + R_{P2} \tag{4.34}$$

Para eclipses

$$n = 2 \cdot R_{P1} + 8 \tag{4.35}$$

Onde n é o número de linhas e colunas da matriz de simulação, D_{12} é a distância, em pixels, entre os centros dos discos aparentes dos satélites e R_{P1} e R_{P2} são os raios dos discos aparentes dos satélites em pixels, respectivamente. O número 8, somado ao diâmetro do satélite eclipsado na Eq. 4.35, representa uma margem de segurança de 4 pixels tomada em cada borda da imagem a ser produzida pelo software para evitar simulações fora da matriz. O valor 8 foi escolhido empiricamente, de forma a otimizar a simulação matendo a matriz com a menor dimensão segura para a simulação possível. O valor de n depende diretamente da precisão km/pixel utilizada na redução podendo variar entre algumas dezenas até milhares.

Uma das grandes vantagens deste modelo numérico é que esta construção quantizada dos discos aparentes dos satélites e das sombras abre um leque de possibilidades no estudo de fenômenos mútuos, permitindo avanços antes inviáveis do ponto de vista analítico. Além disso é possível realizar estudos envolvendo variações de escurecimento do limbo solar, leis alternativas de reflexão de luz dos discos dos satélites e até a implementação de mapas de albedos para casos onde seja necessário. Implementações a respeito do escurecimento do limbo solar e leis mais complexas de reflexão serão feitas em um futuro próximo.

Capítulo 5

Resultados

Após o tratamento das imagens e construção das curvas de luz foi utilizado o modelo descrito no capítulo anterior para obter, a partir das curvas, os parâmetros envolvidos nos fenômenos. Neste ajuste foram mantidos fixos os raios dos satélites e as razões de albedos que foram calculadas como descritas na seção 4.6 a partir de imagens obtidas antes e depois dos eventos.

Para a redução dos eventos, o modelo utilizado constrói uma curva de luz, que é resultado de uma simulação numérica do evento (seção 4.9) e, a partir da comparação desta curva com a observada por mínimos quadrados não linear, corrige-se os parâmetros iniciais usados para a simulação até obter convergência entre as curvas. Estes parâmetros iniciais são calculados a partir da própria curva de luz tornando o modelo completamente independente da existência ou não de efemérides para o evento ajustado. O modelo também constrói uma segunda curva de luz simulada, com parâmetros obtidos a partir dos vetores topocêntricos fornecidos, permitindo assim uma análise da teoria, que na atualidade melhor descreve o sistema, usada para gerar os vetores, que neste trabalho foi descrita em Lainey *et al.* (2009).

Além disso, o software usado para aplicar o modelo gera, baseado nas efemérides, uma figura que representa o satélite ocultado/eclipsado cortado por traços que representam o caminho descrito pelo satélite ocultante ou pela sombra. No caso de ocultação a figura exibe um disco cortado por 3 traços paralelos que representam o caminho descrito pelo centro do satélite ocultador e suas bordas. Já para o caso do eclipse o disco é cortado por 5 linhas paralelas sendo 3 internas que representam o caminho percorrido pelo centro e bordas da umbra e 2 externas tracejadas que representam as bordas da penumbra. Exemplos dessas figuras geradas para alguns dos eventos de Júpiter estão dispostos no Apêncie C. Também encontram-se neste apêndice, os gráficos das curvas de luz observadas e geradas pelo modelo a partir da efeméride.

Neste capítulo serão apresentados os resultados da observação, redução e ajuste de 24 fenômenos mútuos observados na campanha de observação de 2009. São 12 ocultação e 12 eclipses, todos observados no telescópio Zeiss, exceto os eventos de 20 de Junho observado no telescópio Perkin-Elmer. Todos os quatro satélites galileanos de Júpiter estiveram envolvidos em eclipses e apenas Calisto não foi observado em nenhuma ocultação. O satélite Io foi o que mais esteve envolvido nos eventos, participando de 21 dos 24 eventos tratados neste trabalho. Todos estes 24 eventos, com exceção dos 2 eclipses de Io por Calisto que ocorreram em 20 de Junho onde foi usado o CCD S800, foram observados com o CCD301.

A seguir são apresentadas a curva de luz ajustada de cada evento, seguida de uma tabela contendo informações do ajuste e comparando os valores obtidos no ajuste com os valores obtidos a partir da efeméride. Na janela superior das curvas apresentadas estão a razão de fluxo (Alvo/Calibrador) dos satélites em evento, normalizada (pontos em vermelho) e a curva simulada (linha contínua) ajustada. Na janela inferior está a diferença entre as duas curvas (Observada - Ajustada) exibindo a concordância entre o ajuste e a curva observada. A escala de tempo está em minutos com o zero coincidindo com o instante central, previsto em Arlot (2008), em UTC (Tempo Universal Coordenado). Este valor difere um pouco do valor calculado para o instante central a partir da efeméride porque esta versão da efeméride (Lainey *et al.* 2009) difere ligeiramente da versão usada em Arlot (2008).

As tabelas de cada evento contêm, os parâmetros obtidos pelo modelo baseado nas efemérides (coluna 2) e obtidos com o ajuste (coluna 3), estes acompanhados dos respectivos erros. O valor de σ (O-C) representa o desvio padrão da diferença entre a curva observada e a ajustada.

Foram obtidas precisões entre 1,71 km (0,53 mas) e 17,90 km (5,01 mas) para o parâmetro de impacto, 4 m/s (0,001 mas/s) e 357 m/s (0,105 mas/s) para a velocidade relativa e entre 0,072 s e 1,185 s para o instante central.

5.1 Europa oculta Io - 09 de Maio de 2009

Os satélites envolvidos nesta ocultação parcial possuem raios próximos, 1821,6 km para Io e 1560,8 km para Europa. O *seeing* da noite ficou em 1,7" e mesmo com grande variação nas condições de céu, graças ao calibrador Ganymede e a fotometria diferencial, foi possível obter uma boa curva de luz para o evento (Fig. 5.1) com 1401 imagens feitas ao longo de 35 minutos. A razão de albedos (Io/Europa) usada na redução foi de 0,880 e foi calculada de forma direta (seção 4.6) com imagens tomadas uma hora após o evento, quando os satélites já possuiam uma boa separação.



Figura 5.1: Ocultação de Io por Europa em 09/05/2009.

Informações sobre os valores dos parâmetros obtidos com o ajuste estão dispostas na Tabela 5.1 acompanhadas dos valores calculados a partir da efeméride.

	Efeméride	Campanha
	Lainey et al. (2009)	LNA
Instante Central	7h21m56,366s	$7h21m51,569s \pm 0,582 s$
Duração	199,3 s	$161,1 \text{ s} \pm 1,164$
Queda de Fluxo	0,138	$0,129 \pm 0,011$
Parâm. de	$1995,\!88~(\mathrm{km})$	$2059,2 \pm 11,22 \text{ (km)}$
Impacto	$541,7 \;(mas)$	$558,9 \pm 3,04 \text{ (mas)}$
Velocidade	$27,\!30~({\rm km/s})$	$29,06\pm0,389\rm (km/s)$
relativa	$7,410 \;({ m mas/s})$	$7{,}891 \pm 0{,}110 \;(\rm{mas/s})$
$\sigma (\text{O-C})$	-	0,011
Fase Solar	$11,412^{o}$	

Tabela 5.1: Parâmetros reduzidos do evento Europa oculta I
o - 09/05/2009

A precisão obtida para o parâmetro de impacto foi de 11,22 km e nota-se uma diferença de 39 segundos na duração do evento entre o ajuste e a efeméride.

5.2 Europa oculta Io - 21 de Maio de 2009

Esta ocultação total de Europa por Io ocorreu em uma noite com pouca variação das condições de céu onde o *seeing* se manteve em 1,9" praticamente durante toda a obser-

vação. Foram feitas 1302 imagens ao longo de 32 minutos em torno do instante central mantendo no campo o satélite Ganymede, mais uma vez usado como calibrador para fotometria (Fig 5.2). Uma hora e meia após o evento os satélites já possuiam separação suficiente para imagens de albedo com as quais foi calculada a razão de 1,040 usada na redução.



Figura 5.2: Ocultação de Europa por Io em 21/05/2009.

	Efeméride	Campanha
	Lainey et al. (2009)	LNA
Instante Central	5h29m46,330s	5h29m39,488s \pm 0,284 s
Duração	229,1 s	$269,3 \pm 0,568 \text{ s}$
Queda de Fluxo	0,433	$0,434 \pm 0,015$
Parâm. de	$45,4({\rm km})$	$201,9 \pm 17,90 \ (\mathrm{km})$
Impacto	12.8 (mas)	$56.8 \pm 5.01 \text{ (mas)}$
Velocidade	$22,6 \; ({\rm km/s})$	$22{,}56\pm0{,}102~\rm{(km/s)}$
relativa	$6,353 \; (\mathrm{mas/s})$	$6,357 \pm 0,029 \; ({ m mas/s})$
σ (O-C)	-	0,015
Fase Solar	11,480°	

Tabela 5.2: Parâmetros reduzidos do evento Io oculta Europa - 21/05/2009.

Note que o ajuste e a efeméride concordam bem no que diz respeito a duração, instante central e queda de fluxo (Tabela 5.2). A discordância maior entre eles está no parâmetro de impacto, principalmente porque em uma ocultação total, caracterizada por um pequeno *plateau* na curva próximo ao instante central, ocorre um aumento na incerteza da determinação do parâmetro de impacto.

5.3 Europa oculta Io - 28 de Maio de 2009

Na noite deste fenômeno ocorreram poucas variações de fundo de céu e o *seeing* ficou em 1,9". Em função da posição orbital dos satélites durante este período, Ganymede foi novamente o calibrador fotométrico presente no campo. De forma análoga ao evento anterior, foram tomadas 802 imagens ao longo de 20 minutos em torno do instante central previsto, fato este que se deve ao aumento no tempo de exposição necessário para se obter uma boa razão S/R (Fig. 5.3). A razão de albedos calculada para o evento foi de 1,035 utilizando-se de 450 imagens tomadas uma hora após o evento.



Figura 5.3: Ocultação de Europa por Io em 21/08/2009.

	Efeméride	Campanha
	Lainey et al. (2009)	LNA
Instante Central	7h44m19,640s	$7h44m12,802s \pm 0,163 s$
Duração	$305,7 \mathrm{~s}$	$282.8 \pm 0.326 \text{ s}$
Queda de Fluxo	0,377	$0,387 \pm 0,007$
Parâm. de	$617,3({ m km})$	$560,82 \pm 6,36 \ (\mathrm{km})$
Impacto	177,9 (mas)	$161,7 \pm 1,83 \text{ (mas)}$
Velocidade	21,6 $({\rm km/s})$	$21{,}97\pm0{,}050~\rm{(km/s)}$
relativa	$6{,}239~(\mathrm{mas/s})$	$6{,}336\pm0{,}015~{\rm (mas/s)}$
σ (O-C)	-	0,007
Fase Solar	11,333°	

Tabela 5.3: Parâmetros reduzidos do evento Io oculta Europa - 28/05/2009

O instante central do ajuste e efeméride diferem do valor previsto em torno de 10 segundos (Tablea 5.3). Os valores ajustados concordam com os valores obtidos a partir da efeméride apenas na velocidade relativa, onde a precisão do ajuste foi de 50 m/s. O valor do σ (O -C) mostra a alta convergência entre o ajuste e a curva observada para este evento.

5.4 Ganymede eclipsa Calisto - 10 de Junho de 2009

O seeing da noite manteve-se alto, em torno de 1,9" com muitas variações de fundo de céu durante todo o evento. Os raios dos satélites envolvidos neste eclipse anular são bem próximos, Ganymede 2631,2 km e Calisto 2410,3 km e em função da separação dos satélites no campo, o próprio Ganymede foi o calibrador do evento onde 1301 imagens foram tiradas ao longo de 36 minutos em torno do instante central (Fig. 5.4). Como trata-se de um eclipse com os satélite bem separados no campo, não foi necessário cálculo da razão de albedos (seção 4.6).



Figura 5.4: Eclipse de Calisto por Ganymede em 10/06/2009.

As condições de fundo de céu pioraram no fim do evento produzindo um aumento na dispersão dos pontos. É possível notar também que, próximo ao instante central, há uma diminuição na disperção da razão de fluxo. Este efeito foi observado explicitamente apenas em eclipses com considerável queda de fluxo, observados com o CCD301. Observouse que este comportamento é consequência de uma menor dispersão no fluxo bruto do alvo (satélite eclipsado) próximo ao instante central, o que implica que não é um efeito resultante da fotometria e sim do sensor CCD301 que, em regime de fluxo intenso, exibiu um aumento no ruído introduzido à imagem, implicando em uma maior dispersão da razão de fluxos. Portanto, em eclipses onde o fluxo cai drasticamente o ruído introduzido pelo CCD fica menor, diminuíndo a dispersão da razão de fluxo causando um estreitamento na curva (O-C). Tal fato não é tão evidente em ocultações porque, embora o fluxo do satélite ocultado diminua, o satélite ocultante presente na mesma região, mantém a contagem de fluxo alta.

	Efeméride	Campanha
	Lainey et al. (2009)	LNA
Instante Central	7h29m25,347s	$7h29m50,317s \pm 0,208 s$
Duração	$305,7~{\rm s}$	$784.2 \pm 0.416 \text{ s}$
Queda de Fluxo	$0,\!635$	$0,641 \pm 0,010$
Parâm. de	$1065,7 \; (km)$	$1011.5 \pm 6.67 \ (\mathrm{km})$
Impacto	$319,9 \;({\rm mas})$	$303,7 \pm 2,00 \text{ (mas)}$
Velocidade	$14.4 \; ({\rm km/s})$	$14{,}93\pm0{,}019~\rm{(km/s)}$
relativa	$4,332 \;({\rm mas/s})$	$4,483 \pm 0,007 \; ({\rm mas/s})$
σ (O-C)	_	0,010
Fase Solar	11,333°	

Tabela 5.4: Parâmetros reduzidos do evento Calisto eclipsa Ganymede - 10/06/2009

Mais uma vez o ajuste e efeméride se aproximam da previsão no instante central (Tabela 5.4). Porém, a duração obtida com o ajuste fica em torno do dobro do valor obtido com as efemérides.

5.5 Ganymede eclipsa Io - 16 de Junho de 2009

Mesmo com o *seeing* mantedo-se em torno de 1,8" a noite foi caracterizada por muita passagem de nuvens e nevoeiro produzindo grande variação de fundo de céu. Ainda assim, com o uso de dois calibradores fotométricos presentes no campo, Ganymede e Calisto, foi possível contornar as variações de céu e obter uma boa curva de luz (Fig. 3.15). Em função das condições de céu, foi necessária uma maior exposição para se conseguir a melhor razão S/R, assim foram tomadas imagens com 1 segundo de exposição ao longo de 50 minutos em torno do instante central (Fig. 5.5).



Figura 5.5: Eclipse de Io por Ganymede em 16/06/2009.

	Efeméride	Campanha
	Lainey et al. (2009)	LNA
Instante Central	8h45m45,797s	8h44m54,881s \pm 0,726 s
Duração	$1440,2 {\rm ~s}$	$1096.4 \pm 1.452 \text{ s}$
Queda de Fluxo	0,221	$0,191 \pm 0,008$
Parâm. de	$3314.6 \ (\mathrm{km})$	$3424.7 \pm 1.79 \ (\mathrm{km})$
Impacto	$1016,8 \;({\rm mas})$	$1050,7 \pm 0,55 \text{ (mas)}$
Velocidade	$5{,}42~(\rm km/s)$	$5,557 \pm 0,016 ({ m km/s})$
relativa	$1,\!662~(\mathrm{mas/s})$	$1,704 \pm 0,005 \; ({ m mas/s})$
$\sigma (\text{O-C})$	_	0,008
Fase Solar	10, 189°	

Tabela 5.5: Parâmetros reduzidos do evento Ganymede eclipsa Io - 16/06/2009

Apesar da grande variação no céu, graças a fotometria diferencial, o valor do σ (O-C) de 0,008 mostra a grande convergência do ajuste deste evento que teve duração maior do que a calculada a partir da efeméride.

5.6 Calisto eclipsa Europa - 19 de Junho de 2009

Este evento, com duração prevista de apenas 25 segundos (Arlot 2008), ocorreu em uma noite com boas condições de céu , mas com alto *seeing* de 2,135". Calisto foi o
calibrador fotométrico presente no campo e 1201 imagens foram feitas cobrindo 20 minutos em torno do instante central (Fig. 5.6).



Figura 5.6: Eclipse de Europa por Calisto em 19/06/2009.

A dispersão dos pontos foi pequena, como se pode notar na figura, e o efeito de "afinamento" da curva O-C próximo ao instante central novamente é observado. Ainda assim o σ (O-C) de 0,007 exibe a alta convergência entre a curva observada e a ajustada (Tabela 5.6).

	Efeméride	Campanha
	Lainey et al. (2009)	LNA
Instante Central	5h11m31,555s	$5h11m41,365s \pm 0,139 s$
Duração	644,0 s	$514.2 \pm 0.278 \text{ s}$
Queda de Fluxo	0,527	$0,545 \pm 0,008$
Parâm. de	1806,7 (km)	$1731,0 \pm 2,77 \text{ (km)}$
Impacto	558,3 (mas)	$534.9 \pm 0.86 \text{ (mas)}$
Velocidade	$18,5~(\rm km/s)$	$19,50\pm0,026({ m km/s})$
relativa	$5{,}729~(\rm mas/s)$	$6,027 \pm 0,008 \; ({ m mas/s})$
σ (O-C)	_	0,008
Fase Solar	$09,905^{o}$	

Tabela 5.6: Parâmetros reduzidos do evento Calisto eclipsa Europa - 19/06/2009

Nota-se claramente a grande diferença entre a previsão da duração do evento (Tabela 2.2) e os valores obtidos a partir do modelo tanto para o ajuste como para a efeméride.

Ainda assim, é possível perceber que tanto o ajuste quanto a efeméride se aproximama da previsão no valor obtido para o instante central (Tabelas 2.2 e 5.6).

5.7 Calisto eclipsa Io - 19 de Junho de 2009

Na mesma noite que o evento anteior, aproximadamente 3 horas mais tarde, ocorreu este evento, felizmente, sujeito a melhores codições de céu com uma diminuição do *seeing* para 1,6". O eclipse foi muito rasante e só foi medido graças as condições de céu favoráreis e a fotometria diferencial realizada com dois calibradores, Europa e Calisto. A Fig. 5.7 contém a curva ajustada deste evento, que foi obtida com 1201 imagens tomadas ao longo de 26 minutos.



Figura 5.7: Eclipse de lo por Calisto em 19/06/2009.

As boas condições de céu combinadas a fotometria diferencial produziram uma excelente curva com baixa dispersão. Por ser um eclipse parcial muito rasante com uma queda na razão de fluxo bem sutil, não é tão expressiva a característica diminuição no erro da razão de fluxo na curva (O-C).

	Efeméride	Campanha
	Lainey et al. (2009)	LNA
Instante Central	8h32m44,271s	$8h32m54,919s \pm 0,342 s$
Duração	$513,9 { m s}$	$406.8 \pm 0.684 \text{ s}$
Queda de Fluxo	0,172	$0,166 \pm 0,005$
Parâm. de	$3394,9~({\rm km})$	$3419,89 \pm 3,11 \ (km)$
Impacto	1046,9 (mas)	$1057,71 \pm 0.86 \text{ (mas)}$
Velocidade	$19,4 \; ({\rm km/s})$	$19,35\pm0,072({ m km/s})$
relativa	$5,983 \; ({ m mas/s})$	$5,985 \pm 0,002 \; ({ m mas/s})$
σ (O-C)	-	0,005
Fase Solar	$09,905^{o}$	

Tabela 5.7: Parâmetros reduzidos do evento Calisto eclipsa I
o - 19/06/2009

A pouca dispersão dos pontos permitiu um ajuste de grande qualidade com a precisão da velocidade relativa de 7,2 m/s e no parâmetro de impacto de 3,11 km.

5.8 Calisto eclipsa Io - 20 de Junho de 2009

As condições de céu foram favoráveis na noite deste evento, observado no Perkin-Elmer de 1,60 m, com pouquíssimas variações no fundo de céu e o menor *seeing* de toda a campanha, 1,2". O calibrador fotométrico do evento foi Júpiter que, ainda que funcione como calibrador (seção 3.3) na ausência de um satélite no campo, pode oferecer variações no fluxo que produzem um aumento na dispersão dos pontos. Infelizmente, o único objeto presente no campo para calibração fotométrica, além do planeta, era Ganymede que se esconde atrás de Júpiter nos momentos próximos ao instante central. Foram feitas 2500 imagens com o CCD S800 ao longo de 40 minutos em torno do evento.



Figura 5.8: Eclipse de lo por Calisto em 20/06/2009.

Como foi dito antes, as condições de céu foram excelentes e a dispersão observada na curva (O-C) é resultado da calibração fotométrica usando Júpiter.

	Efeméride	Campanha
	Lainey et al. (2009)	LNA
Instante Central	5h10m10,074s	$5h09m34,281s \pm 0,383 s$
Duração	2347,3 s	$1799.2 \pm 0.766 \text{ s}$
Queda de Fluxo	0,544	$0,554 \pm 0,009$
Parâm. de	$1927,9 \ (\mathrm{km})$	$1895,61 \pm 1,71 \ (\mathrm{km})$
Impacto	598,4 (mas)	$588.4 \pm 0.53 \text{ (mas)}$
Velocidade	$4,53~\rm (km/s)$	$4,\!98\pm0,\!005({\rm km/s})$
relativa	$1,\!405~(\mathrm{mas/s})$	$1,541 \pm 0,001 \; ({\rm mas/s})$
$\sigma (\text{O-C})$	-	0,009
Fase Solar	$09,905^{o}$	

Tabela 5.8: Parâmetros reduzidos do evento Calisto eclipsa Io - 20/06/2009

Mesmo com Júpiter aumentando um pouco a dispersão dos pontos o ajuste à curva observada obteve precisão de 5 m/s na velocidade relativa e de 1,71 km no parâmetro de impacto (Tabela 5.8). O ajuste coincide bem com a efeméride em todos os aspectos exceto na duração.

5.9 Calisto eclipsa Io - 20 de Junho de 2009

Pouco mais de quatro horas depois, Calisto eclipsou Io novamente, repetindo o mesmo evento duas vezes em uma noite, sendo observado também no Perkin-Elmer 1,60 m com o CCD S800. As condições de céu eram basicamente as mesmas com um aumento do *seeing* para 1,7". Foram feitas 2273 imagens novamente ao longo de 45 minutos no entorno do evento. A posição orbital dos satélites tornou-se favorável trazendo Calisto para o campo e permitindo o seu uso como calibrador fotométrico. A proximidade da manhã aumentou a contribuição do fundo de céu introduzindo ruidos à imagem aumentando a dispersão dos pontos (Fig. 5.9). Porém o ruído seria bem maior se Júpiter ainda fosse o calibrador.



Figura 5.9: Eclipse de lo por Calisto em 20/06/2009.

	Efeméride	Campanha
	Lainey et al. (2009)	LNA
Instante Central	9h36m58,868s	9h37m40,469s \pm 0,503 s
Duração	$1935,\!3~{ m s}$	1798,9 \pm 1,006 s
Queda de Fluxo	$0,\!635$	$0,649 \pm 0,013$
Parâm. de	$1532,9 \ (\mathrm{km})$	$1476,5 \pm 3,53 \ (\mathrm{km})$
Impacto	475,9 (mas)	$458.4 \pm 1.09 \text{ (mas)}$
Velocidade	$5{,}07~\rm{(km/s)}$	$5,\!14{\pm}\;0,\!007{ m (km/s)}$
relativa	$1,573 \; ({ m mas/s})$	$1,598 \pm 0,002 \; (\rm{mas/s})$
σ (O-C)	-	0,013
Fase Solar	$09,785^{o}$	

Tabela 5.9: Parâmetros reduzidos do evento Calisto eclipsa Io - 20/06/2009

O instante central ajustado aproximou-se mais do previsto (Tabela 5.9) e, mesmo com o aumento da contagem de fundo de céu e da dispersão da curva, a precisão da velocidade relativa foi de 7 m/s. O parâmetro de impacto também obteve alta precisão (3,53 km) e novamente a duração do evento obtida tanto no ajuste quanto na efeméride superam, em muito, o valor previsto (Tabela 2.2). Destaque para o ângulo de fase que variou $0, 1^o$ em apenas 4 horas.

5.10 Io oculta Europa - 22 de Junho de 2009

A noite contou com algumas variações das condições de fundo de céu, inclusve durante o evento. Ainda assim foi atingido novamente o *seeing* de 1,2". Em função do pequeno campo do CCD301 e da posição orbital dos satélites o único objeto presente no campo para calibração fotométrica era Júpiter que acabou introduzindo ruidos na curva de luz, principalmente antes do evento (Fig. 5.10). Foram feitas 2500 imagens cobrindo um intervalo de tempo de 36 minutos em torno do evento. Para determinar a razão de albedos usada na redução deste evento, que foi de 0,983, foram tomadas 1900 imagens uma hora após o evento.



Figura 5.10: Ocultação de Europa por Io em 22/06/2009.

O pequeno "desnível" observada entre 6 e 3 minutos antes do instante central na curva, é resultado da variação de fluxo de Júpiter. Ainda assim, uma precisão de 8,98 km foi obtida no parâmetro de impacto com o ajuste e σ (O-C) de 0,013 mostra a concordância do ajuste com a curva observada (Tabela5.10). A duração do evento obtida pelo ajuste, difere razoavelmente da efeméride. Na velocidade relativa e parâmetro de impacto, as diferenças entre o ajuste e a efeméride são muito pequenas, chegando a 3,4 km no parâmetro de impacto, menor do que o erro obtido com o ajuste.

	Efeméride	Campanha
	Lainey et al. (2009)	LNA
Instante Central	3h27m54,965s	$3h27m50,475s \pm 0,598 s$
Duração	313,4 s	$268,8 \pm 1,196 \text{ s}$
Queda de Fluxo	0,175	$0,175 \pm 0,013$
Parâm. de	1792,4 (km)	$1795.8 \pm 8.98 \ (\mathrm{km})$
Impacto	558,8 (mas)	$559.8 \pm 2.80 \text{ (mas)}$
Velocidade	$18,3 \; ({\rm km/s})$	$19,\!43\pm0,\!172({\rm km/s})$
relativa	$5,\!696~{ m (mas/s)}$	$6,056 \pm 0,054 \;({\rm mas/s})$
σ (O-C)	-	0,013
Fase Solar	$09,785^{o}$	

Tabela 5.10: Parâmetros reduzidos do evento I
o oculta Europa - 22/06/2009

5.11 Io oculta Europa - 29 de Junho de 2009

Este evento ocorreu sem muitas variações das condições de fundo de céu e, Júpiter foi o calibrador fotométrico disponível no campo. Apesar do *seeing* 2,3" a dispersão dos pontos foi mínima mesmo com Júpiter como calibrador. A curva de luz do evento (Fig. 5.11) foi obtida com 1000 imagens tiradas ao longo de 16 minutos em torno do instante central previsto. Para o cálculo da razão de albedos foram feitas 200 imagens uma hora após o evento e o valor obtido foi de 0,973 (Europa/Io).



Figura 5.11: Ocultação de Europa por Io em 29/06/2009.

Nota-se, pela curva, que foi muito pouca a dispersão dos pontos e a qualidade do ajuste pode ser observada tanto na curva O - C como no valor do σ (O-C) que foi de 0,004 (Tabela 5.11). O ajuste permitiu obter uma precisão na velocidade de 51 m/s e no parâmetro de impacto de 2,85 km.

	Efeméride	Campanha
	Lainey et al. (2009)	LNA
Instante Central	5h38m30,878s	$5h38m24,258s \pm 0,216 s$
Duração	$323,7 \mathrm{\ s}$	299.8 ± 0.432 s
Queda de Fluxo	0,159	$0,165 \pm 0,004$
Parâm. de	$1895,2 \ (\mathrm{km})$	$1860,2 \pm 2,85 \; (\mathrm{km})$
Impacto	602,9 (mas)	$591,8 \pm 0,91 \text{ (mas)}$
Velocidade	$17,3~\rm (km/s)$	$17,\!60\pm0,\!051({\rm km/s})$
relativa	$5,489 \; ({ m mas/s})$	$5,600 \pm 0,016 \; ({ m mas/s})$
σ (O-C)	_	0,004
Fase Solar	08,731°	

Tabela 5.11: Parâmetros reduzidos d	lo evento Io oculta Europ	a - 29/06	/2009
-------------------------------------	---------------------------	-----------	-------

5.12 Io eclipsa Ganymede - 04 de Julho de 2009

Noite de observação com boas condições de céu e *seeing* de 2,2". A calibração fotométrica, embora feita com Júpiter, foi bem sucedida produzindo uma ótima curva de luz (Fig. 5.12). Este eclipse anular foi medido através de 1800 imagens tomadas ao longo 30 minutos. Novamente foi observado o estreitamento, ainda que sutil graças a baixa dispersão, da curva (O - C) em função da diminuição do sinal do alvo no eclipse.



Figura 5.12: Eclipse de Ganymede por Io em 04/07/2009.

Graças a baixa dispersão dos pontos o ajuste mostrou grande convergência com a curva

	Efeméride	Campanha
	Lainey et al. (2009)	LNA
Instante Central	$6h25m12,\!923s$	$6h25m19,362s \pm 0,187 s$
Duração	$323,7 \ { m s}$	299.8 ± 0.374 s
Queda de Fluxo	0,364	$0,373 \pm 0,007$
Parâm. de	$1502,3 \ (\mathrm{km})$	$1428,5 \pm 6,81 \ (\mathrm{km})$
Impacto	$484,1 \;(mas)$	$460,3 \pm 2,19 \text{ (mas)}$
Velocidade	$26,\! 6 \ \rm (km/s)$	$27,\!05{\pm}\;0,\!070({\rm km/s})$
relativa	$8,\!569~(\mathrm{mas/s})$	$8,716 \pm 0,003 \; (\rm{mas/s})$
σ (O-C)	-	0,007
Fase Solar	$08,731^{o}$	

observada (σ (O-C) = 0,007). Com isso as precisões obtidas no parâmetro de impacto e velocidade relativa foram 2,19 km e 70 m/s respectivamente (Tabela 5.12).

Tabela 5.12: Parâmetros reduzidos do evento I
o eclipsa Ganymede - 04/07/2009

5.13 Io eclipsa Europa - 06 de Julho de 2009

Este evento parcial ocorreu em noite com boas condições de céu e *seeing* de 1,8". Em função da separação dos satélites no campo, Io foi o calibrador fotométrico do evento que contou com 2000 imagens feitas ao longo de 32 minutos. A curva de luz (Fig. 5.13) mostra que o evento foi rasante e com pouquíssima dispersão da razão de fluxo, permitindo alcançar uma precisão de 3,52 km para o parâmetro de impacto (Tabela 5.13).



Figura 5.13: Eclipse de Europa por Io em 06/07/2009.

	Efeméride	Campanha
	Lainey et al. (2009)	LNA
Instante Central	6h17m16,781s	$6h17m19,750s \pm 0,387 s$
Duração	346,8 s	$260.9 \pm 0.774 \text{ s}$
Queda de Fluxo	0,161	$0,168 \pm 0,006$
Parâm. de	$2655,6 \ (km)$	$2504.6 \pm 3.52 \ (\mathrm{km})$
Impacto	860,7 (mas)	$811,8 \pm 1,14 \text{ (mas)}$
Velocidade	$17,7 \; ({\rm km/s})$	$19,\!17{\pm}~0,\!123({ m km/s})$
relativa	$5{,}727~{\rm (mas/s)}$	$6,215\pm0,040~{ m (mas/s)}$
$\sigma (\text{O-C})$	-	0,006
Fase Solar	07,727°	

Tabela 5.13: Parâmetros reduzidos do evento Io eclipsa Europa - 06/07/2009

5.14 Io oculta Europa - 06 de Julho de 2009

Pouco mais de uma hora após o eclipse (subsecção 5.13), lo ocultou Europa. O evento partilhou das mesmas condições de céu com um *seeing* levemente maior de 1,9". Em função de sua posição orbital e do pequeno campo do CCD 301 a ocultação teve lugar apenas com Júpiter presente no campo para calibração fotométrica. O evento foi medido ao longo de 20 minutos em torno do instante central com 1200 imagens tomadas. A razão de albedo foi calculada usando as imagens obtidas para o eclipse devido a sua proximidade

do evento e separação razoável entre os satélites. O valor calculado foi de 1,003 e mantido fixo no ajuste como em todo o trabalho.

A curva de luz ajustada (Fig. 5.14) possui baixa dispersão na razão de fluxo e apresenta um pequeno desnível após o evento, causado por uma variação do fluxo de Júpiter. Mesmo assim, a precisão obtida para o parâmetro de impacto foi 3,93 km e para a velocidade relativa 63 m/s (Tabela 5.14).



Figura 5.14: Ocultação de Europa por Io em 06/07/2009.

	Efeméride	Campanha
	Lainey et al. (2009)	LNA
Instante Central	7h48m33,492s	$7h48m30,726s \pm 0,333 s$
Duração	334,1 s	$334.7 \pm 0.666 \mathrm{s}$
Queda de Fluxo	0,161	$0,168 \pm 0,006$
Parâm. de	1899,6 (km)	$1854,6 \pm 3,93 \ (\mathrm{km})$
Impacto	615,7 (mas)	$601,2 \pm 1,12 \text{ (mas)}$
Velocidade	$16,2~(\mathrm{km/s})$	$15,\!69{\pm}\;0,\!063{ m (km/s)}$
relativa	$5{,}253~\rm{(mas/s)}$	$5{,}088 \pm 0{,}020 \; {\rm (mas/s)}$
σ (O-C)	-	0,006
Fase Solar	$07,717^{o}$	

Tabela 5.14: Parâmetros reduzidos do evento Io oculta Europa - 06/07/2009

5.15 Ganymede eclipsa Io - 08 de Julho de 2009

Este evento ocorreu em uma noite que começou com boas condições de céu, com *seeing* de 1,8", e apenas algumas pequenas variações no fundo de céu no fim do evento. Estas variações não representaram problema, já que os dois calibradores usados para a fotometria diferencial, Ganymede e Europa, foram suficientes para produzir uma excelente curva de luz (Fig. 3.14 e 5.15). Para cobrir o evento foram feitas 1800 imagens ao longo de 30 minutos.

Em função da considerável queda de fluxo (Tabela 5.15), é possível perceber de forma mais explícita a diminuição do erro na razão de fluxo, causada pela queda no sinal do alvo, representada como um estreitamento da curva O - C. Felizmente este efeito não produz nenhum efeito no ajuste que obteve, graças a qualidade da curva, precisões de 0,072 s e 18 m/s para o instante central e velocidade relativa, respectivamente.



Figura 5.15: Eclipse de lo por Ganymede em 08/07/2009.

	Efeméride	Campanha
	Lainey et al. (2009)	LNA
Instante Central	8h31m05,943s	8h31m18,282s \pm 0,072 s
Duração	512,8 s	$437.4 \pm 0.144 \text{ s}$
Queda de Fluxo	0,902	$0,923 \pm 0,007$
Parâm. de	836,2 (km)	$699.2 \pm 4.57 \ (\mathrm{km})$
Impacto	272,5 (mas)	$227,89 \pm 1,49 \text{ (mas)}$
Velocidade	$21{,}95~\rm (km/s)$	$22{,}43\pm0{,}018{\rm (km/s)}$
relativa	$7,\!155~(\mathrm{mas/s})$	$7{,}311\pm0{,}006~{\rm (mas/s)}$
σ (O-C)	-	0,007
Fase Solar	07,404°	

Tabela 5.15: Parâmetros reduzidos do evento Ganymede eclipsa Io - 08/07/2009

5.16 Io eclipsa Europa - 13 de Julho de 2009

Com seeing de 1,9" e condições de céu variando, este eclipse de Europa por Io foi observado sem maiores problemas. Uma pequena variação no fundo de céu próximo ao instante central foi removida pela fotometria diferencial utilizando Io como calibrador. Para este evento foram feitas 2000 imagens cobrindo um intervalo de 30 minutos em torno do evento. A dispersão dos pontos foi constante ao longo do evento (Fig. 5.16), mantendo a curva O - C constante entre -0,02 e 0,02 com um σ (O-C) de 0,011 (Tabela 5.16).



Figura 5.16: Eclipse de Europa por Io em 13/07/2009.

	Efeméride	Campanha
	Lainey et al. (2009)	LNA
Instante Central	8h38m46,013s	$8h38m49,561s \pm 0,424 s$
Duração	400,9 s	$297.8 \pm 0.848 \text{ s}$
Queda de Fluxo	0,245	$0,236 \pm 0,011$
Parâm. de	$2290,9 \; (\mathrm{km})$	$2318,1 \pm 4,00 \text{ (km)}$
Impacto	754.8 (mas)	$736,81 \pm 1,32 \text{ (mas)}$
Velocidade	$16,49~({\rm km/s})$	$17,19\pm0,104({\rm km/s})$
relativa	$5{,}435~(\mathrm{mas/s})$	$5,663 \pm 0,034 \; ({ m mas/s})$
σ (O-C)	_	0,011
Fase Solar	$08,657^{o}$	

Tabela 5.16: Parâmetros reduzidos do evento Io eclipsa Europa - 13/07/2009

5.17 Io eclipsa Europa - 07 de Agosto de 2009

Este evento foi interessante porque, além das condições de céu que variaram um pouco durante a noite, não foi possível manter no campo um objeto calibrador durante todo o evento. Júpiter, que seria o único candiato, não permanece completamente no campo do CCD ao longo do evento. Desta forma, a solução encontrada foi selecionar uma pequena região de Júpiter que se mantinha no campo da imagem durante todo o tempo e usá-la como calibrador fotométrico. Isso permitiu contornar um problema de queda de fluxo devido a passagem de nuvens, porém introduziu ruidos à curva de luz (Fig. 5.17). O *seeing* da noite foi de 2,0" e as 1800 imagens usadas para construir a curva de luz foram feitas ao longo de 30 minutos.

Apesar do ruido na imagem, o ajuste conseguiu uma precisão de 76 m/s para a velocidade relativa e de 4,62 km no parâmetro de impacto. Destaque para a duração do evento e queda de fluxo que diferem bastante entre os obtidos com o ajuste e com a efeméride.



Figura 5.17: Eclipse de Europa por Io em 07/08/2009.

	Efeméride	Campanha	
	Lainey et al. (2009)	LNA	
Instante Central	5h14m52,721s	$5h14m56,951s \pm 0,576 s$	
Duração	$628,\!3~{ m s}$	$479,5 \pm 1,152 \text{ s}$	
Queda de Fluxo	0,533	$0,467\ \pm 0,023$	
Parâm. de	1477,9 (km) 1651,15 \pm 5,18 (km		
Impacto	504,3 (mas) 563,44 \pm 1,77 (
Velocidade	11,43 (km/s) 11,33 \pm 0,052(km)		
relativa	$3,902 \text{ (mas/s)}$ $3,865 \pm 0,018 \text{ (mas)}$		
$\sigma (\text{O-C})$	- 0,023		
Fase Solar	0	$1,647^{o}$	

Tabela 5.17: Parâmetros reduzidos do evento Io eclipsa Europa - 07/08/2009

5.18 Io oculta Europa - 07 de Agosto de 2009

Apenas 40 minutos depois do eclipse, uma ocultação ocorreu entre Io e Europa. O *seeing* foi para 2,0" mas as condições de céu melhoraram havendo pouca variação no fundo de céu. Júpiter, que já havia se afastado razoavelmente dos satélites durante o evento anterior (motivo pelo qual apenas uma fração do planeta foi usada como calibrador) estava agora completamente fora do campo do CCD. Desta forma, não havia calibrador fotométrico presente no campo para o evento. Porém, este evento enquadra-se na situação

mencionada na seção 3.3, com variação do fundo de céu quase inexistente e queda razoável de fluxo (Tabela 3.2), fazendo com que a curva de luz obtida seja confiável e possa ser ajustada.

A razão de albedos utilizada para o ajuste de 0,926 foi obtida a partir de imagens tomadas uma hora e meia antes do evento e a curva de luz (Fig. 5.18), construída com 1700 imagens ao longo de 28 minutos, foi bem ajustada pelo modelo (considerando que se trata de um evento sem calibrador fotométrico). A precisão na velocidade foi de 23 m/s e no parâmetro de impacto 4,51 km. O ajuste da curva, representado pelo σ (O-C) de 0,008 (Tabela 5.18), combinado com a concordância dos valores obtidos com o ajuste com os da efeméride reforçam ainda mais a confiabilidade na curva de luz obtida.



Figura 5.18: Ocultação de Europa por Io em 07/08/2009.

	Efeméride	Campanha
	Lainey et al. (2009)	LNA
Instante Central	5h37m52,833s	$5h37m46,804s \pm 0,305 s$
Duração	628,3 s 584,1 \pm 0,610	
Queda de Fluxo	0,312	$0,329 \pm 0,008$
Parâm. de	905,8 (km) 797,7 \pm 4,51 (k	
Impacto	309,1(mas)	$272,22 \pm 1,54 \text{ (mas)}$
Velocidade	$10,97~({ m km/s})$ $10,51\pm0,023({ m km/s})$	
relativa	$3,745 \text{ (mas/s)}$ $3,586 \pm 0,007 \text{ (ms/s)}$	
σ (O-C)	- 0,008	
Fase Solar	0	$1,644^{o}$

Tabela 5.18: Parâmetros reduzidos do evento Io oculta Europa - 07/08/2009

5.19 Ganymede oculta Europa - 12 de Agosto de 2009

Assim como o evento anterior, este evento também não contou com um calibrador fotométrico presente no campo. Graças às condições de céu que permaneceram constantes durante todo o evento, produzindo pontos com uma dispersão mínima, que foi possível, mesmo sem calibrador, detectar e ajustar este evento rasante. O *seeing* da noite ficou em 2,5" e as 1400 imagens usadas para construir a curva de luz (Fig. 5.19) foram obtidas ao longo de 30 minutos. Infelizmente, as condições de céu não permaneceram favorávei durante a noite toda e não foi possível obter, na noite do evento, imagens com a separação necessária entre os satélites para determinar a razão de albedos. Assim, as 300 imagens utilizadas para calcular a razão de albedos, de 1,684, usada na redução deste foram obtidas em 24 de outubro a partir de 01h20m00s UTC.

Este foi um dos eventos com o melhor ajuste, com um σ (O-C) de 0,004 e a precisão da velocidade relativa e parâmetro de impacto de 4 m/s e 2,48 km (Tabela 5.19). Novamente, a concordância com os dados obtidos a partir da efeméride, para este caso em que não houve calibrador, fornece ainda mais confiabilidade ao ajuste.



Figura 5.19: Ocultação de Europa por Ganymede em 12/08/2009.

	Efeméride	Campanha		
	Lainey et al. (2009)			
Instante Central	$2h10m48,818s \qquad 2h11m02,987s \pm 0$			
Duração	$623,3 \mathrm{s}$	$639.8 \pm 1.240 \text{ s}$		
Queda de Fluxo	0,091	$0,093 \pm 0,004$		
Parâm. de	3160,2 (km) 3138,7 \pm 2,48 (km)			
Impacto	1081,5 (mas)	$1074,12 \pm 0,85 \text{ (mas)}$		
Velocidade	$7,82 \ \rm (km/s) \qquad 7,96 \pm 0,004 \ \rm (km/s)$			
relativa	$2{,}675~{\rm (mas/s)}$	$2{,}723\pm0{,}001~{\rm (mas/s)}$		
σ (O-C)	-	0,004		
Fase Solar	00	0,633°		

Tabela 5.19: Parâmetros reduzidos do evento Ganymede oculta Europa - 12/07/2009

5.20 Io oculta Europa - 22 de Agosto de 2009

Mais uma ocultação envolvendo Io e Europa. O *seeing* da noite ficou em 2,4" e o calibrador fotométrico foi Júpiter. Em função das condições meteorológicas da noite foi possível fazer apenas 1600 imagens ao longo de 40 minutos em torno do instante central previsto, não havendo assim imagens para razão de albedos. A razão utilizada então para a redução foi a do evento de 07 de agosto que era o evento mais próximo envolvendo estes mesmo satélites.

A maior discordância entre os valores obtidos com o ajuste e a efeméride está na duração do evento (100 s) (Tabela 5.20). A precisão obtida para a velocidade relativa foi de 12 m/s e para o parâmetro de impacto foi de 2,06 km, mesmo com a introdução de ruidos à imagem por Júpiter.



Figura 5.20: Ocultação de Europa por Io em 22/08/2009.

	Efeméride	Campanha		
	Lainey et al. (2009)	LNA		
Instante Central	4h07m49,136s 4h07m54,123s \pm 9			
Duração	$1045,7 {\rm \ s}$	$945.6 \pm 1.042 \text{ s}$		
Queda de Fluxo	0,145	$0,148 \pm 0,005$		
Parâm. de	1958,4 (km) 1937,8 \pm 2,06 (km)			
Impacto	$668,6 \text{ (mas)} \qquad 661,55 \pm 0,70 \text{ (max)}$			
Velocidade	5,27 (km/s) 5,49 \pm 0,012(km/s)			
relativa	1,798 (mas/s) 1,877 \pm 0,004 (mas/			
σ (O-C)	-	0,005		
Fase Solar	0	$1,629^{o}$		

Tabela 5.20: Parâmetros reduzidos do evento Io oculta Europa - 22/08/2009

5.21 Io oculta Europa - 16 de Setembro de 2009

Com o valor alto do *seeing* de 2,5", algumas variações nas condições meteorológicas e o fato de que Júpiter foi o calibrador fotométrico, a curva deste evento ficou sujeita a muito

ruido (Fig. 5.21). Foram feitas 1400 imagens ao longo de 25 minutos para a construção da curva de luz deste evento. A razão de albedos foi obtida com as 1100 imagens tiradas uma hora e meia após o evento feitas para registrar o eclipse entre os mesmos dois satélites previsto para 2h15m36,816s UTC. O valor calculado para a razão foi de 1,0143.

O instante central do ajuste difere apenas 0,98 segundos do valor obtido com a efeméride (Tabela 5.21). O pequeno aumento no erro do parâmetro de impacto e velocidade relativa está relacionado aos ruídos na curva causados por Júpiter e pelas variações de fundo de céu.



Figura 5.21: Ocultação de Europa por Io em 16/09/2009.

	Efeméride	Campanha		
	Lainey et al. (2009)	LNA		
Instante Central	00h46m08,114s	$00h46m09,099s \pm 0,642 s$		
Duração	$514,2 {\rm ~s}$	$470,7 \pm 1,284 \text{ s}$		
Queda de Fluxo	0,185	$0,197 \pm 0,011$		
Parâm. de	1753,8 (km) 1673,4 \pm 5,97 (km			
Impacto	578,8 (mas)	$552,29 \pm 1,97 \text{ (mas)}$		
Velocidade	11,24 (km/s) $11,15 \pm 0,059$ (km/s)			
relativa	$3,709~{ m (mas/s)}$ $3,680\pm0,019~{ m (mas)}$			
σ (O-C)	- 0,011			
Fase Solar	0	$16,564^{o}$		

Tabela 5.21: Parâmetros reduzidos do evento Io oculta Europa - 16/09/2009

5.22 Io eclipsa Europa - 16 de Setembro de 2009

Pouco mais de uma hora e meia após a ocultação, lo eclipsou Europa. Em função do movimento orbital dos satélites, no momento do evento, eles já possuiam separação suficiente para que lo fosse o calibrador fotométrico. Embora a curva de luz obtida tivesse boa qualidade (Fig. 5.22) e baixa dispersão dos pontos, um teste de coronografia digital foi feito para eliminar alguma eventual contribuição de Júpiter, presente na imagem, que não teria sido bloqueada pelo filtro de 890 nm. Não houve melhora significativa no resultado da fotometria (seção 3.2). O *seeing* da noite foi de 2,0" e 1100 imagens foram obtidas para o evento ao longo de 25 minutos.

Este foi o último eclipse observado na campanha e também apresenta, como esperado em função da queda acentuada de fluxo, um estreitamento na curva (O-C) graças a diminuição do erro na razão de fluxos. A precisão obtida com o ajuste foi de 66 m/s para a velocidade relativa e 14,94 km para o parâmetro de impacto.



Figura 5.22: Eclipse de Europa por Io em 16/09/2009.

	Efeméride	Campanha
	Lainey et al. (2009)	
Instante Central	$02h15m10,621s 02h15m06,495s \pm 0$	
Duração	$599,1~\mathrm{s}$	$467,5 \pm 1,086 \text{ s}$
Queda de Fluxo	0,848	$0,881 \pm 0,044$
Parâm. de	643,8 (km) 535,97 \pm 14,94 (k	
Impacto	$212,5 \;({\rm mas})$	$176,88 \pm 4,93 \text{ (mas)}$
Velocidade	12,98 (km/s) 13,43 \pm 0,066(km/	
relativa	4,282 (mas/s) 4,433 \pm 0,022 (ma	
σ (O-C)	- 0,044	
Fase Solar	C	$06,574^{o}$

Tabela 5.22: Parâmetros reduzidos do evento Io eclipsa Europa - 16/09/2009

5.23 Ganymede oculta Europa - 24 de Outubro de 2009

Este evento ocorreu em uma noite com *seeing* alto de 3,9" mas pouca variação das condições de céu. A princípio o satélite Io, presente na imagem, foi escolhido como calibrador fotométrico para o evento. Porém, por um motivo ainda desconhecido, o fluxo de Io diminui na segunda metade do evento produzindo uma inclinação artificial na curva da razão de fluxos. Por este motivo Júpiter, também presente no campo, foi selecionado como calibrador e, embora o mesmo introduzisse um pouco de ruido à curva, foi uma escolha eficiente que resultou em uma boa curva de luz (Fig. 5.23). As imagens para este evento foram obtidas ao longo de 35 minutos totalizando 2600 poses com mais 300 imagens para cálculo da razão de albedos obtidas uma hora depois.

O ajuste foi feito com uma razão de albedos (Europa/Ganymede) foi de 1,685 e obteve precisão de 4,60 km e 49 m/s para parâmetro de impacto e velocidade relativa, respectivamente.



Figura 5.23: Ocultação de Europa por Ganymede em 24/10/2009.

		Camananlaa		
	Elemenide	Campanna		
	Lainey et al. (2009)	LNA		
Instante Central	$00h35m28,\!654s$	$00h35m41,216s \pm 0,421 s$		
Duração	$500,2 {\rm ~s}$	470.2 ± 0.842 s		
Queda de Fluxo	0,209	$0,221 \pm 0,008$		
Parâm. de	2318,1 (km) 2241,33 \pm 4,60 (
Impacto	687,8 (mas)	$665,02 \pm 1,36 \text{ (mas)}$		
Velocidade	13,93 (km/s)	$17,\!81\pm0,\!049({ m km/s})$		
relativa	4,133 (mas/s) 4,097 \pm 0,015 (n			
σ (O-C)	- 0,008			
Fase Solar	1	$0,945^{o}$		

Tabela 5.23: Parâmetros reduzidos do evento Ganymede oculta Europa - 24/10/2009

5.24 Io oculta Europa - 25 de Outubro de 2009

A contrário da noite anterior, este evento ocorreu em uma noite com muitos problemas climáticos. Passagens de nuvens e presença quase constante de nevoeiro dificultavam a obtenção de uma boa razão S/R. O *seeing* da noite ficou em 3,9", alto como na noite anterior. Em função das condições meteorológicas o tempo de exposição foi de 3 segundos para se conseguir obter uma boa razão S/R e portanto foram feitas apenas 500 imagens ao longo de 18 minutos em torno do evento. Quarenta minutos após o instante central previsto as condições meteorológicas melhoraram rapidamente e, como os satélites já possuíam separação razoável no campo, foram feitas 100 imagens para o calculo da razão de albedos que foi de 1,014. A curva de luz do evento foi obtida usando Júpiter como calibrador fotométrico e com a passagem de nuvens, que resultou em poucos pontos na curva com alta dispersão, o erro no instante central foi o maior de todos os eventos (1,185 segundos). O σ (O-C) foi de 0,014 e a precisão na velocidade relativa e parâmetro de impacto foram de 357 m/s e 17,42 km respectivamente.



Figura 5.24: Ocultação de Europa por Io em 25/10/2009.

	Efeméride	Campanha		
	Lainey et al. (2009) LNA			
Instante Central	$01h21m29,566s \qquad 01h21m39,883s \pm 1,$			
Duração	$306,0~{ m s}$	$243,0 \pm 2,370 \text{ s}$		
Queda de Fluxo	$0,154 0,166 \pm 0,014$			
Parâm. de	1947,7 (km) 1873,03 \pm 17,42 (km			
Impacto	575,8 (mas) 553,68 \pm 5,15 (mas			
Velocidade	17,99 (km/s) 19,69 \pm 0,357(km/s)			
relativa	$5,318 \text{ (mas/s)}$ $5,821 \pm 0,105 \text{ (mas)}$			
σ (O-C)	- 0,014			
Fase Solar	1	.0,986°		

Tabela 5.24: Parâmetros reduzidos do evento Io oculta Europa - 25/10/2009

5.25 Sumário dos Resultados

Uma comparação geral entre os parâmetros obtidos para o ajuste e para a efeméride pode ser feita através das Tabela 5.25. Nela, estão dispostas as diferenças entre os valores calculados para cada parâmetro obtido no modelo a partir do ajuste e da efeméride no sentido (Ajuste - Efeméride). Para a diferença no instante central, há também sua correspondência em quilômetros, que é obtida multiplicando a diferença pela velocidade relativa.

A maior discordância observada foi na duração dos eventos, mais expressivamente nos eclipses. Isto se deve, principalmente, ao fato de que, como a penumbra representa uma queda contínua de luz, não há precisão fotométrica suficiente para determinar de forma rigorosa o início exato do evento.

Diferença entre os parâmetros obtidos (Ajuste - Efeméride)						
Instante	Duração	Queda	Param. de	Velocidade	σ	Evento
Central		Fluxo	Impacto	Relativa	(O - C)	
(seg.)	(seg.)	_	(km)	$(\rm km/s)$	-	-
(km)	(erro)	(erro)	(mas)	(mas/s)	-	-
- 4,797 (0,582)	- 38,2	- 0,009	63,32 (11,22)	1,76(0,389)	0,011	2occ1
- 139,00 (16,9)	1,164	0,011	17,2(3,04)	0,481 (0,110)	-	09/05/2009
- 6,842 (0,284)	40,2	0,001	156,5(17,90)	- 0,04 (0,102)	0,015	1occ2
- 154,35 (6,41)	0,568	0,015	44,0 (5,01)	- 0,004 (0,029)	_	21/05/2009
- 6,838 (0,163)	- 22,9	0,001	- 56,8 (6,63)	$0,37\ (0,050)$	0,007	1occ2
-150,23 (3,58)	0,362	0,007	- 16,28 (1,83)	$0,127\ (0,015)$	-	28/05/2009
24,97(0,208)	478,5	0,006	- 54,2 (6,67)	$0,53\ (0,019)$	0,010	3ecl4
372,81 (3,11)	0,416	0,010	- 16,20 (2,00)	$0,151 \ (0,007)$	-	10/06/2009
9,084 (0,726)	- 343,8	- 0,03	110,1(1,79)	$0,137\ (0,016)$	0,008	3ecl1
50,48 (4,03)	1,452	0,008	$33,9 \ (0,55)$	$0,042 \ (0,005)$	-	16/06/2009
9,81 (0,139)	- 129,8	0,018	- 75,7 (2,77)	1,00 (0,026)	0,008	4ecl2
$\fbox{191,30}\ (2,72)$	0,278	0,008	- 23,4 (0,86)	$0,298\ (0,008)$	-	19/06/2009
10,65 (0,342)	- 107,1	- 0,006	24,99 (3,11)	- 0,05 (0,072)	0,005	4ecl1
206,07(6,62)	0,684	0.005	$10,81 \ (0,86)$	- 0,002 (0,002)	-	19/06/2009
35,79(0,383)	- 548,1	0,01	- 32,29 (1,71)	0,45 (0,005)	0,009	4ecl1
178,24(1,79)	0,766	0,009	- 10,00 (0,53)	$0,136\ (0,001)$	-	20/06/2009
- 41,60 (0,503)	- 136,4	0,014	- 56,4 (3,53)	0,07 (0,007)	0,013	4ecl1
- 213,84 (2,58)	1,006	0,013	- 17,5 (1,09)	$0,025\ (0,002)$	-	20/06/2009
- 4,49 (0,598)	- 44,6	0,00	3,4 (8,98)	1,13 (0,172)	0,013	1occ2
- 87,24 (11,62)	1,196	0,013	1,00(2,80)	$0,36\ (0,054)$	-	22/06/2009
- 6,62 (0,216)	- 23,9	0,006	- 35,00 (2,85)	$0,30\ (0,051)$	0,013	1occ2
- 116,51 (3,80)	0,432	0,013	- 11,10 (0,91)	0,111 (0,016)	-	29/06/2009
6,439(0,187)	- 23,9	0,009	- 73,80 (6,81)	0,45 (0,070)	0,007	1ecl3
174,17(5,43)	0,374	0,007	- 23,80 (2,19)	$0,147\ (0,003)$		04/07/2009
2,969(0,387)	- 85,9	0,007	- 151,0 (3,52)	1,47 (0,123)	0,006	1ecl2
56,92 (7,42)	0,774	0,006	- 48,9 (1,14)	0,488 (0,040)	-	06/07/2009

Instante	Duração	Queda	Param. de	Velocidade	σ	Evento
Central		Fluxo	Impacto	Relativa	(O - C)	
(seg.)	(seg.)	-	(km)	$(\rm km/s)$	-	-
(km)	(erro)	(erro)	(mas)	(mas/s)	-	-
- 2,766 (0,333)	0,6	0,007	- 45,0 (3,93)	- 0,51 (0,063)	0,006	locc2
- 43,40 (5,23)	0,666	0,006	- 14,5 (1,12)	- 0,165 (0,020)	-	06/07/2009
$\fbox{12,339(0,072)}$	- 75,4	0,021	- 137,0 (4,57)	0,48 (0,018)	0,007	3ecl1
276,76(1,62)	0,144	0,007	- 44,61 (1,49)	$0,156\ (0,006)$	-	08/07/2009
3,548(0,424)	- 103,1	- 0,009	27,2 (4,00)	0,7 (0,104)	0,011	1ecl2
60,99 $(7,29)$	0,848	0,011	17,99(1,32)	$0,198\ (0,034)$	-	13/07/2009
4,23 (0,576)	- 148,8	- 0,066	173,25(5,18)	- 0,10 (0,052)	0,023	1ecl2
53,59(6,53)	1,152	0,023	59,4(1,77)	- 0,037 (0,018)	-	07/08/2009
- 6,029 (0,305)	- 44,2	0,017	- 108,1 (4,51)	- 0,46 (0,023)	0,008	locc2
63,36 (3,21)	0,610	0,008	- 36,88 (1,54)	- 0,159 (0,007)	-	07/08/2009
18,17 (0,620)	16,5	0,02	- 21,5 (2,48)	0,14 (0,004)	0,004	3occ2
144,62(4,94)	1,240	0,004	- 7,38 (0,85)	0,048 (0,001)	-	12/08/2009
4,99 (0,521)	- 100,1	0,003	- 20,6 (2,06)	$0,22 \ (0,012)$	0,005	locc2
22,45(2,86)	1,042	0,005	- 7,05 (0,70)	0,079 (0,004)	-	22/08/2009
0,99 (0,642)	- 43,5	0,012	- 80,4 (5,97)	- 0,09 (0,059)	0,011	locc2
11,31 (7,16)	1,284	0,011	- 26,51 (1,97)	- 0,029 (0,019)	-	16/09/2009
- 4,13 (0,543)	- 131,6	0,033	- 107,8 (14,9)	0,45 (0,066)	0,044	1ecl2
- 55,45 (7,29)	1,086	0,044	- 35,62 (4,93)	$0,151 \ (0,022)$	-	16/09/2009
12,56 (0,421)	- 30,0	0,012	- 76,77 (4,60)	3,88 (0,049)	0,008	3occ2
223,69(7,50)	0,842	0,008	- 22,78 (1,36)	$0,036\ (0,015)$	-	24/10/2009
10,32(1,185)	- 63,0	0,012	- 74,67 (17,4)	1,70(0,357)	0,014	locc2
203,2(23,3)	2,370	0,014	- 22,12 (5,15)	$0,503 \ (0,105)$	-	25/10/2009

Tabela 5.25: Aqui estão dispostos os valores da diferença entre efeméride e ajuste acompanhados dos erros dos parâmetros. Coluna 1 - instante central em segundos (linha superior) e em quilômetros (linha inferior) acompanhados dos respectivos erros entre parênteses. Coluna 2 - duração do evento (linha superior) em segundos acompanhada do erro (linha inferior). Coluna 3 - Queda de fluxo (linha superior) seguida pelo erro (linha inferior). Coluna 4 - parâmetro de impacto em km (linha superior) e em mas (linha inferior) com os respectivos erros entre parênteses. Coluna 5 - velocidade relativa em km/s (linha superior) e em mas/s (linha inferior) com os respectivos erros em parêntrese. Coluna 6 - σ (O-C). Os eventos estão dispostos na coluna 7 onde occ significa ocultação e ecl significa eclipse. Os satélites envolvidos em cada evento estão representador por números onde (1 = Io, 2 = Europa, 3 = Ganymede e 4 = Calisto)

Capítulo 6

Conclusão

Este trabalho apresentou resultados obtidos a partir da observação, redução e análise de 24 eventos observados durante a campanha brasileira de observação dos fenômenos mútuos entre os satélites galileanos em 2009. Como mencionado anteriormente, tais resultados possuem precisões que permitem o aprimoramento de modelos orbitais, contribuindo para a compreensão da origem e evolução dinâmica do Sistema Solar. Também foram apresentadas a modelagem teórica, a construção e a aplicação de um modelo numérico utilizado para a redução destes eventos.

Os resultados alcançados são fruto de uma combinação entre: a qualidade das imagens alcançada com o uso do filtro de banda estreita, as curvas de luz construídas a partir do tratamento das imagens e aplicação da fotometria diferencial e o modelo numérico implementado para lidar com problemas como ângulo de fase solar e queda gradativa de luz ao longo da penumbra. Com isso foi possível o alcance de precisões médias de 0,432 s (6,37 km) para o instante central, 6,25 km para o parâmetro de impacto e 79,5 m/s para a velocidade relativa. Estes valores para parâmetro de impacto, por exemplo, estão melhores que precisão mínima necessária (30 km) para representar uma contribuição significativa à modelos de dinâmica orbital que procuram quantificar perturbações orbitais fracas como efeitos de maré (Arlot 2009).

Uma comparação entre os resultados obtidos neste trabalho com a efeméride utilizada (Lainey *et al.* 2009) exibiu uma grande concordância para os 3 principais parâmetros reduzidos (instante central, parâmetro de impacto e velocidade relativa) apresentando discordância considerável apenas na duração dos eventos e ainda assim, apenas em eclipses, sendo mais evidente em eventos de longa duração. Este fato é o resultado combinado da falta de precisão na fotometria para determinar com rigor o início real do evento, tendo em vista que a penumbra varia continuamente, e do pequeno erro na velocidade, propagado pelo longo intervalo de tempo de duração do evento.

A experiência adquirida em procedimentos e técnicas de tratamento e redução fotométrica de imagens na campanha realizada em 2007 para os satélites de Urano (Braga-Ribas 2009), permitiu que o foco deste trabalho fosse voltado para o desenvolvimento e aprimoramento do modelo numérico de redução e foi, portanto, de suma importância para a sua realização. Graças a isso, foi possível construir um modelo que permite, de forma simples, implementações futuras que, em princípio, acarretariam grandes dificuldades em uma modelagem analítica. Estas implementações são o escurecimento de bordo do Sol para eclipses, o perfil de reflexibilidade dos satélites e a não esfericidade dos mesmos. Estas implementações serão feitas em um futuro próximo adaptando e aprimorando o modelo para uma análise ainda mais detalhada dos resultados obtidos nesta campanha e em projetos futuros.

Referências Bibliográficas

ACTON, C. H. Ancillary Data Services of NASA's Navigation and Ancillary Information Facility **Planetary and Space Science**, v. 44, p. 65-70, 1996.

AKSNES, K.; FRANKLIN, F. A. Mutual phenomena of the galilean satellites in 1973. III. Final results from 91 light curves **The Astronomical Journal**, v. 81, p. 464-481, 1976.

AKSNES, K.; FRENKLIN, F.; MAGNUSSON, P. The longitude discrepancy for mutual satellite phenomena resolved **The Astronomical Journal**, v. 92, p. 1436-1444, 1986.

AKSNES, K.; FRANKLIN, F. A. Secular Acceleration of Io Derived from Mutual Satellites events **The Astronomical Journal**, v. 122, p. 2734-2739, 2001.

ARCHINAL, B. A.; A'HEARN, M. F.; BOWELL, E.; CONRAD, A.; CONSOLMAGNO, G. J.; COURTIN, R.; FUKUSHIMA, T.; HESTROFFER, D.; HILTON, J. L.; KRA-SINSKY, G. A.; NEUMANN, G.; OBESRT, J.; SEIDELMANN, P. K.; STOOKE, P.; THOLEN, D. J.; THOMAS, P. C.; WILLIAMS, I. P. Report of the IAU Working Group on cartographic coordinates and rotational elements: 2009 Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy, Special Report, 2010.

ARLOT, J. E.; BARRORO JR., J.; JABLONSKI, F. J.; QUAST, G. R.; THUILLOT, W. An analysis of observations of mutual events of the Galileano satellites 1985 in Brazil Astronomy and Astrophysics Supplement Series, v. 82, n. 3, p. 503-518, 1990.

ARLOT, J. -E.; CHIS, G. -D.; FARKAS, L.; MOLDOVAN, D.; NEDELCU, A.; PO-PESCU, P.; SORESCU, S.; STAVINSCHI, M.; SERBANESCU, L.; TUDOSE, V.; TURCU, V. PHEMU 2003 campaign: observations of the mutual phenomena of the galilean satellites in Romania **Astronomy and Astrophysics**, v. 439, p. 785-789, 2005.

ARLOT, J. E.; STAVINSCHI, M. Past and future mutual events of the natural planetary satellites: need of a network of observation **ASP Conference Series**, v. 370, p. 58-67, 2007.

ARLOT, J. -E. Predictions of the mutual events of the Galilean satellites of Jupiter occurring in 2009-2010 Astronomy and Astrophysics, v. 478, p. 285-298, 2008.

ARLOT, J. E. Astrometry through photometry: mutual events. [online] Disponível na Internet via WWW. URL: http://www.imcce.fr/astrom-beijing08. Arquivo: arlotphenomena-sat-V3.pdf. Arquivo capturado em 08 de fevereiro de 2009.b ARLOT, J.-E. in Private communication - 2009

ASSAFIN, M. PRAIA: Plataforma para redução automática de imagens astronômicas **Boletim da Sociendade Astronômica Brasileira**, v. 26, p. 189, 2006.

ASSAFIN, M.; CAMPOS, R. P.; VIEIRA MARTINS, R.; DA SILVA NETO, D. N.; CAMARGO, J. I. B.; ANDREI, A. H. Instrumental and digital coronagraphy for the observation of the Uranus satellites' upcoming mutual events **Planetary and Space Science**, v. 56, p. 1882-1887, 2008.

ASSAFIN, M.; VIEIRA-MARTINS, R.; BRAGA-RIBAS, F.; CAMARGO, J. I. B.; DA SILVA NETO, D. N.; ANDREI, A. H. Observations and analysis of mutual events between Uranus main satellites **The Astronomical Journal**, v. 137, p. 4046-4053, 2009.

ABRAHAM, Z. Mutual phenomena of Jupiter's satellites Icarus, v. 237, p. 264-271, 1979.

BARROSO JR., J.; JABLONSKI, F. J.; QUAST, G. R. 1985 mutual phenomena of Jupiter's satellites observed in Brazil **Annales de Physique**, v. 12, p. 109, 1987.

BUTCHER, H.; STEVENS, R. Image Reduction and Analysis Facility Development **Newsletter Kitt Peak National Observatory**, n. 16, p. 6, 1981.

BRAGA-RIBAS, F. Fenômenos mútuos entre os satélites de Urano. 2009. 98f. Dissertação (Mestrado em Astronomia) - Observatório do Valongo, Centro de Ciências Matemáticas e da Natureza, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 2009

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, 2009.

GUYON, O.; PLUZHNIK, E. A.; KUCHNER, M. J.; COLLINS, B.; RIDGWAY, S. T. Theoretical limits on extrasolar terrestrial planet detection with coronagraphs **The** Astronomical Journal Supplement Series, v. 167, p. 81-99, 2006.

JABLONSKI, F. J.;BARROSO JR., J. The APRIL22 occultation of HYD-20DEG51699 by Uranus and its rings Astronomy and Astrophysics, v. 144, p. 249, 1985.

KASS, A. A.; AKSNES, K.; FRENKLIN, F. A.; LIESKE, J. Astrometry from mutual phenomena of the Galilean satellites in 1990-1992 **The Astronomical Journal**, v. 117, p. 1933-1941, 1999.

KARKOSCHKA, E. Spectrophotometry of the jovian planets and Titan at 300 to 1000η m Wavelength: the metane spectrum **Icarus**, v. 111, p. 174-192, 1994.

KARKOSCHKA, E. Methane, Ammonia, and temperature measurements of the jovian planets and Titan from CCD-spectrophotometry **Icarus**, v. 133, p. 134-146, 1998.

KISELEVA, T. P.; KISELEV, A. A.; KALINICHENKO, O. A.; VASILYEVA, N. A.; KHOVRICHEVA, 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, 2008.

KJELDSEN, H.; FRANDSEN, S. High-precision time-resolved CCD photometry Publications of the Astronomical Society of the Pacific, v. 104, p. 413-434, 1992.

LAINEY, V.; ARLOT, J.E.; KARATEKIN, O.; VAN HOOLST, T. Strong tidal dissipation in Io and Jupiter from astrometric observations **Nature**, v. 459, p. 957-959, 2009.

LANDOLT, A. U. UBVRI Photoeletric satandard stars around the celestial equator **The** Astronomical Journal, v. 88, p. 439-460, 1983.

MCFADDEN, L. A.; BELL, J. F.; MCCORD, T. B. Visible spectral reflectance measurements /0.33-1.1 microns/ of the Galilean satellites at many orbital phase angles **Icarus**, v. 44, p. 410-430, 1980.

NEWBERRY, M. V. Signal-to-noise considerations for sky-subtracted CCD data Publications of the Astronomical Society of the Pacific, v. 103, p. 122-130, 1991.

NOYELLES, B.; VIENNE, A. Chaos induced by De Haerdtl inequality in the Galilean system **Icarus**, v. 190, p. 597-607, 2007.

STONE, R. C. Digital centering algorithms for the sun, moon, and planets **The Astro-nomical Journal**, v. 99, p. 424-420, 1990.

VASUNDHARA, R.; ARLOT, J. E.; LAINEY, V.; THUILLOT, W. Astrometry from mutual events of jovian satellites in 1997 **Astronomy and Astrophysics**, v. 410, p. 337-341, 2003.

Apêndice A Diâmetro da Sombra

Para determinar analiticamente o valor da queda do fluxo de luz para um determinado ponto da penumbra, a modelagem teórica usada consiste em calcular a fração da área do Sol visível para um observador localizado neste ponto e voltado para o Sol. Para isso é preciso determinar o diâmetro que a sombra do satélite eclipsante possui ao ser projetada no plano que passa pelo centro do Sol. Este valor sofre pequenas variações para um observador ao longo do segmento FG (ver Fig. A.1). Aqui será feito o cálculo geométrico da maior variação que este valor pode sofrer ao longo do segmento para todos os eclipses tratados neste trabalho.

O modelo numérico usado determina o diâmetro da sombra $(AH_P \ a \ BH_P)$ geometricamente considerando um observador no ponto E (Fig. A.1). Ao mover o observador ao longo do segmento FG teremos uma variação neste valor que será máxima quando o observador estiver localizado no ponto G (Fig. A.2).



Figura A.1: Diagrama usado na seção 4.8.2 para determinar o diâmetro da sombra projetado no plano que passa pelo centro do Sol



Figura A.2: Diagrama para determinar o diâmetro da sombra projetado no plano que passa pelo centro do Sol para um observador localizado no ponto G (caso extremo)

Definindo: R_S = Raio do Sol

 O_2 K = R_2 : Raio do satélite eclipsante

 $O_SO_2 = d_2$: Distância do satélite eclipsante ao Sol, Eq. 4.22

 $O_S \mathbf{E} = d_1$: Distância do Sol a projeção do centro do satélite eclipsado na linha que liga o centro do Sol ao centro do satélite eclipsante, Eq. 4.23

 $EG = R_P$: Raio da penumbra calculado na seção 4.8.1 Eq. 4.21

 $O_S H_S = d_{SS}$: Distância entre o centro do Sol e o centro da sombra para o caso extremo.

 $H_SAH_P = R_{SOM1}$: Raio lateral 1 da sombra no plano do Sol

 $H_SBH_P = R_{SOM2}$: Raio lateral 2 da sombra no plano do Sol

 ψ_1 = Ângulo entre o segmento $O_2 {\rm E}$ e o segmento $O_2 {\rm G}$

 $\psi_2 = \hat{A}$ ngulo entre o segmento $O_2 K$ e o segmento $O_2 G$

Temos que da semelhança entre os triângulos ${\cal O}_2 {\rm EG}$
e ${\cal O}_2 {\cal O}_S {\cal H}_S$:

$$d_{SS} = \frac{d_2 \cdot R_P}{d_1 - d_2} \tag{A.1}$$

Com
o $d_2 \gg R_S$ temos, com grande aproximação, qu
e $O_S A H_P = R_S.$ Assim o raio lateral 1 da sombra será:

$$R_{SOM1} = d_{SS} - R_S \tag{A.2}$$

Para determinar agora o raio lateral 2 é preciso primeiro calcular $A_1 = O_2 H_S$ e $A_2 = O_2 G$. Para tal basta aplicar o teorema de Pitágoras nos triângulos $GO_2 E$ e $O_2 O_S H_S$.

$$A_1 = \sqrt{d_{SS}^2 + d_2^2} \tag{A.3}$$

$$A_2 = \sqrt{R_P^2 + (d_1 - d_2)^2} \tag{A.4}$$

Definindo l $=O_2 {\rm M}$ temos, partir da semelhança entre os triângulos G $O_2 {\rm M}$ e G $H_S B H_P,$ que:

$$R_{SOM2} = \frac{(A_1 + A_2) \cdot l}{A_2} \tag{A.5}$$

Onde

$$l = \frac{R_2}{\cos(90 - \psi_1 + \psi_2)} \tag{A.6}$$

Os ângulos ψ_1 e ψ_2 são facilmente obtidos usando as relações de triângulo retângulo nos triângulos O_2 EG e O_2 KG.

$$tg\psi_1 = \frac{R_P}{(d_1 - d_2)}$$
 (A.7)

е
$$\cos\psi_2 = \frac{R_2}{A_2} \tag{A.8}$$

O diâmetro da sombra pode variar entre o valor calculado para o modelo (observador localizado no ponto E) e a soma dos raios laterais R_{SOM1} e R_{SOM1} para o caso do observador localizado no ponto G. Usando a expressão A.9 pode-se calcular a variação máxima em relação ao diâmetro usado no modelo (Eq. 4.24) para cada eclipse (tabela A.1).

$$V_{AR} = \frac{\left[(R_{SOM1} + R_{SOM2}) - 2 \cdot R_{SS} \right] \cdot 100}{2 \cdot R_{SS}}$$
(A.9)

Variação do diâmetro da sombra		
Data	Evento	$V_{AR} em (\%)$
10/06/2009	Ganymede ecl Calisto	0,15
16/06/2009	Ganymede ecl Io	0,04
19/06/2009	Calisto ecl Europa	0,15
19/06/2009	Calisto ecl Io	0,14
20/06/2009	Calisto ecl Io	0,10
20/06/2009	Calisto ecl Io	0,11
04/07/2009	Io ecl Ganymede	0,09
06/07/2009	Io ecl Europa	0,05
08/07/2009	Ganymede ecl Io	0,09
13/07/2009	Io ecl Europa	0,04
07/08/2009	Io ecl Europa	0,03
12/08/2009	Ganymede ecl Europa	0,04
16/09/2009	Io ecl Europa	0,04

Tabela A.1: Variação máxima do diâmetro da sombra projetada no Sol em relação ao diâmetro usado no modelo numérico

Apêndice B Projeções no plano do Sol

O modelo numérico usado para reduzir as curvas de luz obtidas para os fenômenos mútuos de Júpiter de 2009, calcula o fluxo de luz para cada ponto da superífice do satélite eclipsado localizado dentro de penumbra. Para tal é utilizada uma expressão analítica que é função da distância do ponto ao centro da umbra. Porém, a distância usada na expressão está localizada no plano do Sol (plano que passa pelo Sol e é perpendicular a linha que liga o satélite eclipsado ao centro do Sol), enquanto que o modelo trabalha totalmente no plano de observação (plano que passa pelo centro do satélite perpendicular a linha de visada que liga o satélite eclipsado a um observador na Terra). Assim, a distância entre cada ponto da figura bidimensional, construída pelo modelo em uma matriz numérica, ao centro da umbra, deve ser projetada no plano do Sol para então ser aplicada a equação 4.25 reescrita abaixo.

$$d_{CS} = \frac{R_{CP} \cdot d_2}{d_1 - d_2} \tag{B.1}$$

Para tal considere um sistema cartesiano (x, y) localizado no plano de observação com a origem coincidindo com o centro da umbra (Fig. B.1) e ordenada y perpendicular ao plano contendo o ângulo de fase solar do satélite eclipsado $\lambda 2$ (equação 4.13). A distância de um ponto qualquer (x_0, y_0) à origem do sistema (x_U, y_U) , definida como R_{CPO} é dada por:

$$R_{CPO} = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2} \tag{B.2}$$

onde $\Delta x = x_0 - x_U \in \Delta y = y_0 - y_U$.

Definimos agora o sistema cartesiano (a, b), também localizado no plano de observação, com o eixo ordenado *b* perpendicular ao plano ν (equação 4.14) e consequentemente à direção da velocidade relativa entre os satélites (Fig. B.1). Pela definição, temos que



Figura B.1: Sistemas cartesianos (x, y) e (a, b) definidos no plano de observação



Figura B.2: Projeção das distâncias Δx
e Δy no sistema cartesiano (a,b)

o sistema (a, b) possui uma inclinação de ϖ com o sistema (x, y) e portanto, é possível projetar as distâncias $\Delta x \in \Delta y$ diretamente (Fig. B.2).



Figura B.3: Sistemas cartesianos (x', y')
e(a', b') definidos no plano do Sol

$$\Delta x_a = \Delta x \cdot \cos \varpi \tag{B.3}$$

$$\Delta x_b = \Delta x \cdot sen\varpi \tag{B.4}$$

$$\Delta y_a = \Delta y \cdot sen\varpi \tag{B.5}$$

$$\Delta y_b = \Delta y \cdot \cos \varpi \tag{B.6}$$

onde

$$\Delta x^2 = \Delta x_a^2 + \Delta x_b^2 \tag{B.7}$$

е

$$\Delta y^2 = \Delta y_a^2 + \Delta y_b^2 \tag{B.8}$$

Voltemos agora para o plano do Sol. De forma análoga ao plano de observação, definimos dois sistemas cartesianos $(x', y') \in (a', b')$, ambos com a origem coincidindo com o centro da umbra e a ordenada y' perpendicular ao plano $\lambda 2$ que contém o ângulo de fase solar e, e a ordenada b' perpendicular à direção da velocidade relativa entre os satélites (Fig. B.3), definida pelo plano ν . É fácil notar que o ângulo entre estes dois sistemas cartesianos também será ϖ e assim como no plano de observação, as distâncias $\Delta x' = x'_0$ - $x'_U \in \Delta y' = y'_0 - y'_U$ podem ser projetadas diretamente no sistema (a', b'):

$$\Delta x'_a = \Delta x' \cdot \cos \varpi \tag{B.9}$$

$$\Delta x_b' = \Delta x' \cdot sen\varpi \tag{B.10}$$

$$\Delta y'_a = \Delta y' \cdot sen\varpi \tag{B.11}$$

$$\Delta y_b' = \Delta y' \cdot \cos \varpi \tag{B.12}$$

Onde

$$\Delta x^{\prime 2} = \Delta x_a^{\prime 2} + \Delta x_b^{\prime 2} \tag{B.13}$$

е

$$\Delta y'^2 = \Delta y_a'^2 + \Delta y_b'^2 \tag{B.14}$$

Os eixos ordenados b e b' são, ambos perpendiculares ao plano ν e, portanto, paralelos entre si fazendo com que, consequentemente, os eixos a e a' formem um ângulo ϕ entre si. Deste modo, temos que:

$$\Delta x'_a = \Delta x_a \cdot \cos\phi = \Delta x \cdot \cos\varpi \cdot \cos\phi \tag{B.15}$$

$$\Delta x_b' = \Delta x_b = \Delta x \cdot sen\varpi \tag{B.16}$$

е

$$\Delta y'_a = \Delta y_a \cdot \cos\phi = \Delta y \cdot \sin\omega \cdot \cos\phi \tag{B.17}$$

$$\Delta y_b' = \Delta y_b = \Delta y \cdot \cos \varpi \tag{B.18}$$

Tesmo que distância de um ponto qualquer ao centro da umbra, no plano do Sol, R_{CP} é data por:

$$R_{CP} = \sqrt{\Delta x^{\prime 2} + \Delta y^{\prime 2}} \tag{B.19}$$

Podemos então combinar as equações B.3 a B.6 em B.7 e B.8, e B.9 a B.12 em B.13 e B.14, substituíndo em B.19, resultando em:

$$R_{CP} = \sqrt{\Delta x^2 (\cos^2 \varpi \cdot \cos^2 \phi + \sin^2 \varpi) + \Delta y^2 (\sin^2 \varpi \cdot \cos^2 \phi + \cos^2 \varpi)}$$
(B.20)

Apêndice C

Análise da Efeméride

Para uma análise mais qualitativa dos resultados em comparação com a efeméride utilizada, o software desenvolvido para a aplicação do modelo de redução possui dois diferenciais. O primeiro é uma curva de luz gerada com parâmetros calculados pelo modelo a partir da efeméride. O segundo é uma figura, também construída a partir da efeméride, que representa o "caminho" descrito pelo satélites ou sombra durante o evento. Esta figura é composta por um disco que representa o satélite ocultado/eclipsado, sendo cortado por 3 linhas no caso de uma ocultação e 5 linhas no caso de um eclipse. Para uma ocultação, a linha central representa o caminho descrito pelo centro do satélite ocultante e as linhas laterais paralelas, representam o caminho descrito por suas bordas. Em um eclipse, as 3 linhas internas, cheias, representam o caminho descrito pelo centro e bordas da umbra. As duas linhas mais externas, tracejadas, representam o caminho descrito pelas bordas da penumbra. As Figs.C.1 a C.5 são exemplos de alguns dos diagramas gerados pelo modelo para descrever o caminho descrito pelo satélite em evento. As Figs. C.6 a C.29 são as curvas de luz observadas (pontos em vermelho) acompanhados da curva de luz gerada a partir da efeméride (linha cheia azul) para cada um dos eventos tratados neste trabalho.



Figura C.1: Figura em escala representando o caminho descrito pelo satélite ocultate sobre o satélite ocultado (representado pelo disco) ao longo do evento (Fig. C.7). O caminho é representado por 3 linhas cheias onde a linha central descreve o caminho do centro do satélite ocultante e as linhas laterais os caminhos de suas bordas.



Figura C.2: Figura em escala representando o caminho descrito pela sombra, sobre o satélite eclipsado (representado pelo disco) ao longo do evento (Fig. C.9). O caminho é representado por 5 linhas sendo 3 cheias e 2 tracejadas. As 3 linhas cheias representam o caminho descrito pelo centro da umbra e suas bordas e as duas linhas externas tracejadas representam o caminho das bordas da penumbra.



Figura C.3: Figura em escala representando o caminho descrito pela sombra sobre o satélite eclipsado. Evento (Fig. C.27).



Figura C.4: Figura em escala representando o caminho descrito pela sombra sobre o satélite eclipsado. Evento (Fig. C.11).



Figura C.5: Figura em escala representando o caminho descrito pelo satélite ocultante sobre o satélite ocultado. Evento (Fig. C.22).



Figura C.6: Curva de luz gerada a partir da efeméride (linha cheia azul) comparada à curva observada (pontos em vermelho)



Figura C.7: Análogo a curva C.6



Figura C.8: Análogo a curva C.6



Figura C.9: Análogo a curva C.6



Figura C.10: Análogo a curva C.6



Figura C.21: Análogo a curva C.6



Figura C.11: Análogo a curva C.6



Figura C.12: Análogo a curva C.6



Figura C.13: Análogo a curva C.6



Figura C.14: Análogo a curva C.6



Figura C.15: Análogo a curva C.6



Figura C.16: Análogo a curva C.6



Figura C.17: Análogo a curva C.6



Figura C.18: Análogo a curva C.6



Figura C.19: Análogo a curva C.6



Figura C.20: Análogo a curva C.6



Figura C.22: Análogo a curva C.6



Figura C.23: Análogo a curva C.6



Figura C.24: Análogo a curva C.6



Figura C.25: Análogo a curva C.6



Figura C.26: Análogo a curva C.6



Figura C.27: Análogo a curva C.6



Figura C.28: Análogo a curva C.6



Figura C.29: Análogo a curva C.6