

OCULTAÇÕES DOS SATÉLITES DE JÚPITER

JOSÉ AUGUSTO BUARQUE DE NAZARETH

Departamento de Astronomia

Abstract - Observation of lunar occultations are presented for Callisto, Europa and Ganymede. The resulting linear diameters are 4912 km, 3141 km, and 5062 km, respectively. The date of the events was 1977 January 1 (UT).

1. Introdução

No dia primeiro de janeiro de 1977 - todos os instantes referidos no texto serão em tempo universal, a menos que explicitamente indicado - foi visível no Rio de Janeiro a ocultação total de Júpiter e seu sistema de satélites pela Lua. O Observatório do Valongo observou o evento sob dois pontos de vista distintos: visual e fotoelétrico. Este artigo relata as observações do segundo tipo e discute algumas das proposições feitas. O objetivo é a determinação dos diâmetros dos satélites, dado importante no estudo da dinâmica desses corpos.

O sistema fotométrico empregado, projetado primordialmente para estudos atmosféricos (mais especificamente para análises da poluição aérea), envolveu um telescópio coudé refrato-refletor Zeiss 150/2250, um fotômetro de laboratório da Pacific Photometric Instrument (PPI), modelo 110, uma célula fotoelétrica RCA 1P21, um acoplador de telescópio PPI, modelo 401 e um registrador gráfico HP, modelo 680 M.

As observações tiveram como parâmetros básicos os indicados a seguir:

- a) corrente de entrada no fotômetro na escala de 10^{-7} ampères;
- b) diafragma de 0,160 segundos de arco e um filtro V, no sistema de Johnson (Johnson and Morgan, 1953), ambos no acoplador;
- c) velocidade do papel de 20 cm/min, no registrador gráfico;
- d) cronometragem em sinal contínuo (onda quadrada) injetado no registrador em pulsos de 1 segundo;
- e) padrão de tempo atômico Oscillatom B 5000.

As condições acima foram mantidas constantes ao longo de todo o trabalho.

A fim de que alterações não tivessem que ser processadas, optou-se pela não observação de Júpiter (muito luminoso). Por outro lado, a excessiva vizinhança das imagens de Io e Europa no instante

da ocultação de Io não permitiu a obtenção de resultados confiáveis para esse último, uma vez que é baixa a resolução angular do equipamento descrito.

Para os três satélites galileanos restantes, Calisto, Europa e Ganimede, as observações foram processadas e o método utilizado é apresentado a partir do próximo parágrafo.

Segundo Dunham (1976), foram os seguintes os parâmetros das ocultações (valores previstos):

a) instantes das ocultações:

Calisto	2h 51m 32,3s,
Europa	3 20 30,1,
Ganimede	3 42 10,1;

b) velocidade lunar nos instantes das ocultações:

Calisto	-0,2321 "/s,
Europa	-0,1758,
Ganimede	-0,1282;

c) diâmetros (aparentes geocêntricos):

	(angulares)	(lineares)
Calisto	1,560"	4890 km,
Europa	0,978	3066,
Ganimede	1,664	5216.

2. Curvas de luz

Na figura 1 reproduzimos uma secção do registro fotométrico original, relativa à ocultação de Calisto. A trajetória descendente entre os níveis superior (à direita) e inferior (à esquerda) é a curva de luz do fenômeno. O eixo horizontal fornece os instantes, primitivamente em tempo médio e a seguir convertidos em tempo universal; o eixo vertical fornece intensidades luminosas em escala arbitrária. As figuras 2 e 3 são as correspondentes curvas de luz para Europa e Ganimede, respectivamente.

A determinação dos diâmetros envolverá, nestes casos, a construção de ajustantes que permitam fixar os instantes dos primeiros e últimos contatos em cada curva de luz. Se, a seguir, multiplicarmos os intervalos assim obtidos pelos valores da velocidade lunar naqueles instantes, teremos, obviamente, calculado os diâmetros. As dificuldades e fontes de erros associadas a este processo serão examinadas ao longo do texto.

A passagem do traço contínuo a um conjunto discreto de valores das intensidades experimentais, e sobre o qual os ajustamentos foram processados, decorreu de uma partição no eixo do tempo e as correspondentes leituras das intensidades.

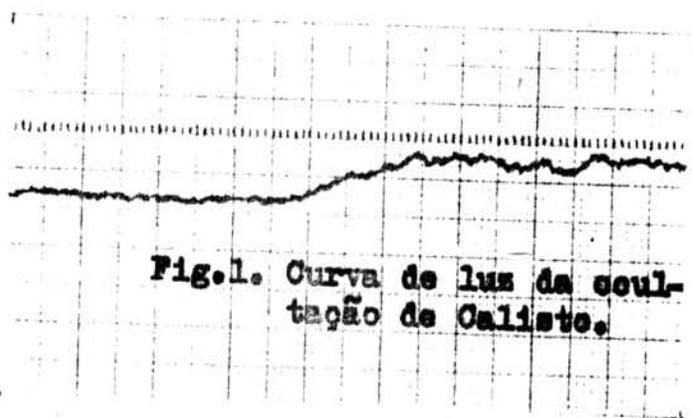


Fig.1. Curva de luz da ocultação de Calisto.

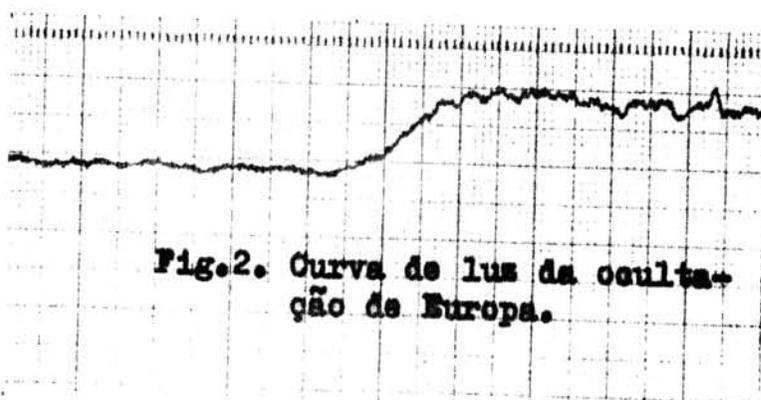


Fig.2. Curva de luz da ocultação de Europa.

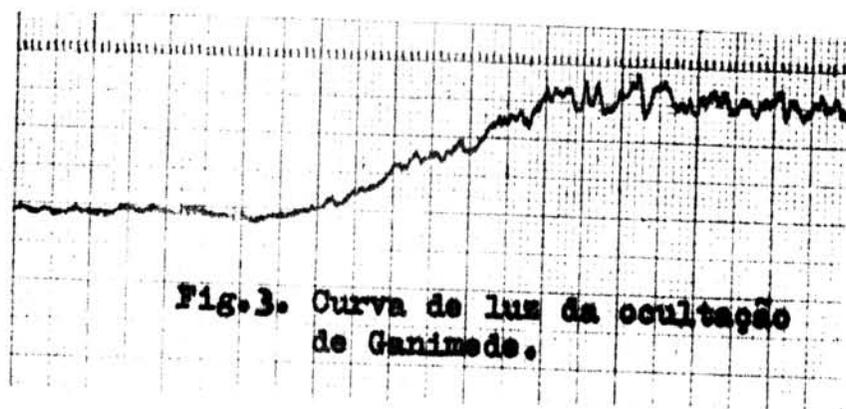


Fig.3. Curva de luz da ocultação de Ganimede.

A menor resolução linear no eixo horizontal foi de 1 mm (fig. 1, 2 e 3), o que corresponde a uma resolução em tempo de cerca de 0,3 s. Um refinamento da partição, com leituras a cada 0,5 mm, permitiu baixar a resolução em tempo para 0,15 s. Esta nova partição, obtida através de uma cuidadosa ampliação das curvas de luz, não conduziu a resultados significativamente distintos dos determinados através da primeira partição. Por esta razão, adotou-se o valor de 0,15 s para a resolução em tempo do sistema.

As tabelas 1, 2 e 3 fornecem as leituras das intensidades, em centímetros, realizadas independentemente por Jorge A. Vieira (coluna L_1), José A. Buarque (coluna L_2) e José A. S. Campos (coluna L_3). Os valores adotados como definitivos (coluna L) resultaram da média aritmética simples entre as três leituras:

$$L = \frac{L_1 + L_2 + L_3}{3}$$

Observamos que as leituras para cada ordem (primeira coluna) foram feitas em um só instante.

TABELA I
LEITURAS DA OCULTAÇÃO DE CALISTO

Ordem	L_1	L_2	L_3	$L = (L_1 + L_2 + L_3) / 3$
1	8,250 cm	8,250 cm	8,250 cm	8,250 cm
2	8,250	8,250	8,250	8,250
3	8,275	8,275	8,275	8,275
4	8,250	8,250	8,250	8,250
5	8,325	8,325	8,325	8,325
6	8,300	8,300	8,275	8,292
7	8,325	8,325	8,325	8,325
8	8,350	8,350	8,300	8,333
9	8,300	8,300	8,300	8,300
10	8,350	8,250	8,300	8,300
11	8,300	8,300	8,275	8,292
12	8,350	8,350	8,350	8,350
13	8,350	8,350	8,350	8,350
14	8,300	8,300	8,300	8,300
15	8,200	8,200	8,225	8,208
16	8,150	8,150	8,150	8,150
17	8,150	8,150	8,150	8,150
18	8,175	8,175	8,175	8,175
19	8,200	8,200	8,200	8,200

Ordem	L_1	L_2	L_3	$L = (L_1 + L_2 + L_3) / 3$
20	8,250 cm	8,250 cm	8,250 cm	8,250 cm
21	8,250	8,250	8,225	8,242
22	8,200	8,200	8,200	8,200
23	8,150	8,150	8,150	8,150
24	8,200	8,200	8,200	8,200
25	8,200	8,200	8,200	8,200
26	8,250	8,250	8,250	8,250
27	8,300	8,300	8,300	8,300
28	8,300	8,300	8,300	8,300
29	8,275	8,275	8,275	8,275
30	8,275	8,275	8,275	8,275
31	8,300	8,300	8,300	8,300
32	8,300	8,300	8,300	8,300
33	8,250	8,250	8,250	8,250
34	8,250	8,250	8,275	8,258
35	8,200	8,200	8,200	8,200
36	8,300	8,300	8,275	8,292
37	8,300	8,300	8,300	8,300
38	8,250	8,250	8,250	8,250
39	8,150	8,150	8,175	8,158
40	8,150	8,150	8,150	8,150
41	8,150	8,150	8,150	8,150
42	8,075	8,075	8,075	8,075
43	8,050	8,050	8,050	8,050
44	8,025	8,025	8,000	8,017
45	8,025	8,025	8,000	8,017
46	8,000	8,000	8,000	8,000
47	7,950	7,950	7,925	7,942
48	7,900	7,900	7,900	7,900
49	7,850	7,850	7,850	7,850
50	7,800	7,800	7,800	7,800
51	7,775	7,775	7,775	7,775
52	7,700	7,700	7,700	7,700
53	7,725	7,725	7,725	7,725
54	7,675	7,675	7,675	7,675
55	7,680	7,650	7,675	7,668
56	7,650	7,650	7,675	7,658
57	7,650	7,650	7,650	7,650
58	7,700	7,700	7,700	7,700
59	7,680	7,650	7,650	7,660
60	7,675	7,675	7,675	7,675
61	7,675	7,675	7,675	7,675
62	7,675	7,675	7,675	7,675

Ordem	L_1	L_2	L_3	$L = (L_1 + L_2 + L_3) / 3$
63	7,650 cm	7,650 cm	7,650 cm	7,650 cm
64	7,675	7,675	7,675	7,675
65	7,650	7,650	7,650	7,650
66	7,625	7,625	7,650	7,633
67	7,610	7,625	7,625	7,620
68	7,625	7,625	7,625	7,625
69	7,650	7,650	7,650	7,650
70	7,650	7,650	7,650	7,650
71	7,650	7,650	7,650	7,650
72	7,650	7,650	7,650	7,650
73	7,650	7,650	7,650	7,650
74	7,650	7,650	7,650	7,650
75	7,625	7,625	7,625	7,625
76	7,675	7,675	7,675	7,675
77	7,675	7,675	7,675	7,675
78	7,675	7,675	7,675	7,675
79	7,650	7,625	7,650	7,642
80	7,650	7,650	7,650	7,650
81	7,650	7,650	7,650	7,650
82	7,700	7,700	7,700	7,700
83	7,700	7,725	7,700	7,708
84	7,700	7,700	7,675	7,692
85	7,700	7,700	7,700	7,700
86	7,700	7,700	7,700	7,700
87	7,700	7,700	7,700	7,700
88	7,700	7,700	7,700	7,700
89	7,700	7,700	7,675	7,692
90	7,650	7,650	7,625	7,642
91	7,650	7,650	7,650	7,650

TABELA II

LEITURAS DA OCULTAÇÃO DE EUROPA

Ordem	L_1	L_2	L_3	L
1	8,875 cm	8,875 cm	8,875 cm	8,875 cm
2	8,800	8,800	8,750	8,783
3	8,825	8,825	8,800	8,817
4	8,750	8,750	8,775	8,758
5	8,750	8,750	8,750	8,750
6	8,775	8,775	8,750	8,767
7	8,900	8,900	8,875	8,892
8	8,950	8,950	8,950	8,950
9	8,850	8,850	8,825	8,842

Ordem	L ₁	L ₂	L ₃	L
10	8,850 cm	8,825 cm	8,850 cm	8,842 cm
11	8,775	8,775	8,775	8,775
12	8,700	8,700	8,765	8,722
13	8,750	8,750	8,725	8,742
14	8,850	8,850	8,850	8,850
15	8,850	8,850	8,850	8,850
16	8,875	8,875	8,875	8,875
17	8,850	8,850	8,850	8,850
18	8,825	8,850	8,850	8,842
19	8,800	8,800	8,825	8,808
20	8,700	8,700	8,700	8,700
21	8,800	8,800	8,775	8,792
22	8,825	8,825	8,800	8,817
23	8,875	8,875	8,850	8,867
24	8,875	8,875	8,850	8,867
25	8,825	8,825	8,825	8,825
26	8,900	8,900	8,900	8,900
27	8,900	8,900	8,900	8,900
28	8,925	8,925	8,925	8,925
29	8,900	8,900	8,900	8,900
30	8,950	8,975	8,950	8,958
31	8,925	8,900	8,950	8,925
32	8,950	8,950	8,925	8,942
33	8,900	8,900	8,900	8,900
34	8,875	8,875	8,875	8,875
35	8,900	8,900	8,900	8,900
36	8,975	8,975	8,975	8,975
37	8,900	8,900	8,925	8,908
38	8,850	8,850	8,850	8,850
39	8,900	8,900	8,900	8,900
40	8,900	8,900	8,900	8,900
41	8,800	8,800	8,800	8,800
42	8,800	8,800	8,800	8,800
43	8,800	8,800	8,800	8,800
44	8,775	8,775	8,775	8,775
45	8,600	8,600	8,600	8,600
46	8,550	8,550	8,550	8,550
47	8,500	8,500	8,475	8,492
48	8,375	8,375	8,375	8,375
49	8,300	8,300	8,300	8,300
50	8,175	8,175	8,175	8,175
51	8,100	8,100	8,075	8,092
52	8,050	8,050	8,050	8,050

Ordem	L ₁	L ₂	L ₃	L
53	8,025 cm	8,025 cm	8,025 cm	8,025 cm
54	7,975	7,975	7,975	7,975
55	7,910	7,925	7,925	7,920
56	7,900	7,900	7,925	7,908
57	7,850	7,850	7,875	7,858
58	7,825	7,825	7,825	7,825
59	7,825	7,825	7,825	7,825
60	7,850	7,850	7,850	7,850
61	7,850	7,850	7,850	7,850
62	7,850	7,850	7,850	7,850
63	7,875	7,875	7,875	7,875
64	7,875	7,875	7,875	7,875
65	7,900	7,900	7,875	7,892
66	7,900	7,900	7,850	7,883
67	7,850	7,850	7,850	7,850
68	7,850	7,850	7,850	7,850
69	7,875	7,875	7,875	7,875
70	7,900	7,900	7,900	7,900
71	7,875	7,875	7,875	7,875
72	7,900	7,900	7,900	7,900
73	7,850	7,850	7,850	7,850
74	7,850	7,850	7,825	7,842
75	7,800	7,800	7,825	7,808
76	7,850	7,850	7,850	7,850
77	7,875	7,875	7,875	7,875
78	7,850	7,850	7,850	7,850
79	7,875	7,875	7,875	7,875
80	7,875	7,875	7,875	7,875
81	7,950	7,925	7,950	7,942
82	7,925	7,925	7,925	7,925
83	7,900	7,900	7,900	7,900
84	7,900	7,900	7,875	7,892
85	7,875	7,875	7,875	7,875
86	7,850	7,850	7,850	7,850
87	7,900	7,900	7,875	7,892
88	7,900	7,925	7,900	7,908
89	7,900	7,900	7,900	7,900
90	7,850	7,850	7,875	7,858
91	7,880	7,900	7,875	7,885
92	7,900	7,900	7,900	7,900
93	7,875	7,875	7,875	7,875

Ordem	L_1	L_2	L_3	L
96	7,850 cm	7,850 cm	7,850 cm	7,850 cm
97	7,875	7,875	7,875	7,875
98	7,900	7,900	7,900	7,900
99	7,920	7,900	7,925	7,915
100	7,925	7,925	7,925	7,925
101	7,925	7,925	7,950	7,933

TABELA III

LEITURAS DA OCULTAÇÃO DE GANIMEDE

Ordem	L_1	L_2	L_3	L
1	9,500 cm	9,500 cm	9,550 cm	9,517 cm
2	9,450	9,450	9,450	9,450
3	9,600	9,550	9,600	9,583
4	9,500	9,500	9,475	9,492
5	9,550	9,600	9,550	9,567
6	9,500	9,500	9,450	9,483
7	9,375	9,375	9,375	9,375
8	9,500	9,525	9,500	9,508
9	9,500	9,500	9,500	9,500
10	9,650	9,650	9,650	9,650
11	9,575	9,575	9,575	9,575
12	9,550	9,550	9,550	9,550
13	9,450	9,500	9,450	9,467
14	9,550	9,550	9,550	9,550
15	9,550	9,550	9,550	9,550
16	9,400	9,400	9,425	9,408
17	9,500	9,500	9,500	9,500
18	9,500	9,500	9,525	9,508
19	9,650	9,700	9,650	9,667
20	9,450	9,450	9,500	9,467
21	9,400	9,400	9,400	9,400
22	9,550	9,550	9,550	9,550
23	9,500	9,500	9,500	9,500
24	9,500	9,500	9,475	9,492
25	9,700	9,700	9,700	9,700
26	9,700	9,700	9,700	9,700
27	9,600	9,650	9,600	9,617
28	9,400	9,400	9,350	9,383
29	9,750	9,750	9,750	9,750
30	9,650	9,650	9,650	9,650
31	9,650	9,650	9,625	9,642

Ordem	L ₁	L ₂	L ₃	L
32	9,450 cm	9,450 cm	9,425 cm	9,442 cm
33	9,400	9,400	9,400	9,400
34	9,650	9,650	9,700	9,667
35	9,500	9,500	9,500	9,500
36	9,600	9,600	9,650	9,617
37	9,400	9,550	9,400	9,450
38	9,650	9,650	9,650	9,650
39	9,600	9,600	9,600	9,600
40	9,600	9,600	9,600	9,600
41	9,600	9,600	9,600	9,600
42	9,400	9,400	9,400	9,400
43	9,200	9,200	9,250	9,217
44	9,250	9,250	9,250	9,250
45	9,250	9,250	9,250	9,250
46	9,200	9,200	9,200	9,200
47	9,200	9,200	9,225	9,208
48	9,150	9,150	9,150	9,150
49	9,000	9,000	9,025	9,008
50	8,850	8,850	8,875	8,858
51	8,800	8,800	8,800	8,800
52	8,900	8,850	8,900	8,883
53	8,850	8,850	8,850	8,850
54	8,800	8,800	8,800	8,800
55	8,750	8,750	8,750	8,750
56	8,750	8,750	8,750	8,750
57	8,700	8,700	8,700	8,700
58	8,750	8,750	8,775	8,758
59	8,750	8,650	8,625	8,675
60	8,600	8,600	8,600	8,600
61	8,600	8,600	8,600	8,600
62	8,425	8,450	8,425	8,433
63	8,350	8,350	8,325	8,342
64	8,300	8,300	8,300	8,300
65	8,300	8,300	8,275	8,292
66	8,250	8,250	8,250	8,250
67	8,150	8,150	8,150	8,150
68	8,100	8,100	8,075	8,092
69	8,150	8,150	8,125	8,142
70	8,050	8,050	8,050	8,050
71	8,000	8,000	8,000	8,000
72	8,000	8,000	8,000	8,000
73	7,975	7,975	7,975	7,975
74	7,950	7,950	7,950	7,950
75	7,900	7,900	7,925	7,908

Ordem	L ₁	L ₂	L ₃	L
76	7,900 cm	7,900 cm	7,900 cm	7,900 cm
77	7,900	7,900	7,900	7,900
78	7,875	7,875	7,875	7,875
79	7,850	7,850	7,850	7,850
80	7,850	7,850	7,850	7,850
81	7,850	7,850	7,850	7,850
82	7,850	7,850	7,850	7,850
83	7,900	7,900	7,875	7,892
84	7,900	7,900	7,900	7,900
85	7,900	7,900	7,900	7,900
86	7,920	7,900	7,925	7,915
87	7,950	7,950	7,950	7,950
88	7,950	7,950	7,950	7,950
89	7,900	7,900	7,900	7,900
90	7,900	7,900	7,925	7,908
91	7,900	7,925	7,925	7,917
92	7,925	7,925	7,950	7,933
93	7,925	7,950	7,950	7,942
94	7,900	7,900	7,925	7,908
95	7,925	7,925	7,925	7,925
96	7,950	7,950	7,950	7,950
97	7,950	7,950	7,950	7,950
98	7,875	7,875	7,875	7,875
99	7,875	7,875	7,875	7,875
100	7,900	7,900	7,875	7,892
101	7,900	7,900	7,900	7,900
102	7,900	7,900	7,900	7,900
103	7,925	7,925	7,925	7,925
104	7,900	7,900	7,900	7,900
105	7,900	7,900	7,875	7,892
106	7,875	7,875	7,875	7,875
107	7,925	7,925	7,925	7,925
108	7,900	7,900	7,875	7,892
109	7,900	7,900	7,900	7,900
110	7,950	7,950	7,950	7,950
111	7,900	7,900	7,900	7,900

Da tabela 1 tiramos que, de 91 valores considerados, em 70 casos (cerca de 77%) as três leituras coincidiram; em 19 casos (~21%) duas leituras coincidiram; e em apenas 2 casos as três leituras diferiram. Para os dados da tabela 2 temos, respectivamente, 101, 64 (~63%), 33 (~33%) e 4. Finalmente, para os dados da tabela 3 temos, respectivamente, 111, 68 (~61%), 41 (~37%) e 2. Para uma melhor

verificação da qualidade das leituras, sumarizamos na tabela 4 alguns dados relevantes.

TABELA IV

Satélite	N*	L**		L***	
		s (cm)	s _m	s (cm)	s _m
Calisto	91	0,1	0,01	0,03	0,005
Europa	101	0,1	0,01	0,03	0,004
Ganymede	111	0,1	0,02	0,03	0,005

*N: número de medidas

**L: medidas na fase anterior à ocultação

***L: medidas na fase posterior à ocultação

s: desvio padrão

s_m: erro padrão da média

As leituras L, para os três satélites, foram transpostas para gráficos, figuras 4, 5 e 6, onde as fases anteriores às ocultações aparecem à esquerda em cada figura, e as fases posteriores, à direita. Os valores utilizados na construção destas figuras foram corrigidos para o fundo de céu médio, e os níveis médios das intensidades nas fases anteriores às ocultações foram normalizados a 100. As curvas em traços cheios são as ajustantes (ver Fig. 3).

3. Ajustamento

Os níveis anteriores e posteriores às ocultações apresenta uma grande oscilação devida à ação da atmosfera da Terra. A fim de eliminar este ruído de fundo, construímos valores médios das intensidades dentro de certos intervalos, uma vez que, como sabemos, para pequenos intervalos de tempo os sinais são constantes. Na delimitação das fronteiras desses intervalos, utilizamos o critério de tomar todos os pontos contidos na faixa definida pelas cotas superiores e inferiores do ruído de fundo, em cada uma das fases vizinhas à descendente da curva de luz.

Figura 4. A curva regular é o resultado do ajustamento dos dados da ocultação por uma polinomial. A ordenada é intensidade em unidades arbitrárias.



Fig. 5. Como na Fig. 4

Fig. 6. Como na Fig. 4

Para Calisto (C), Europa (E) e Ganimede (G), e representando pelo índice "a" as ajustantes lineares anteriores às ocultações e pelo índice "p" as ajustantes lineares posteriores, encontramos:

$$\begin{array}{ll} C_a = 8,252 \text{ cm}, & C_p = 7,670 \text{ cm}, \\ s = 0,060 \text{ cm}, & s = 0,031 \text{ cm}, \\ s_m = 0,009 \text{ cm}, & s_m = 0,005 \text{ cm}, \end{array}$$

entre as ordens 1 e 41 para C_a , e 51 e 91 para C_p (sempre incluindo as fronteiras);

$$\begin{array}{ll} E_a = 8,85, & E_p = 7,877, \\ s = 0,07, & s = 0,030, \\ s_m = 0,01, & s_m = 0,004, \end{array}$$

entre as ordens 1 e 44 para E_a , e 55 e 101 para E_p ;

$$\begin{array}{ll} G_a = 9,54, & G_p = 7,904, \\ s = 0,1, & s = 0,030, \\ s_m = 0,02, & s_m = 0,005, \end{array}$$

entre as ordens 1 e 42 para G_a , e 74 e 111 para G_p .

Finalmente, no ramo descendente, ajustamos os pontos empíricos por polinômios de grau 8. Os correspondentes coeficientes a_i , $i = 0, 1, \dots, 8$, são apresentados na tabela 5.

TABELA V

	Calisto	Europa	Ganimede
a_0	-4,33(1)*	-1,92(1)*	-4,19(1)*
a_1	+4,83(0)	+1,39(0)	+4,37(0)
a_2	-1,46(-1)	-1,25(-2)	-1,25(-1)
a_3	+5,12(-4)	-1,85(-4)	+9,28(-4)
a_4	+4,97(-5)	+3,14(-6)	+1,61(-5)
a_5	-4,50(-7)	-1,30(-7)	-2,11(-7)
a_6	-1,52(-8)	+3,00(-9)	-2,33(-9)
a_7	+3,09(-10)	-1,29(-11)	+4,85(-11)
a_8	-1,64(-12)	-8,59(-14)	-2,10(-13)

*Valores entre parênteses indicam potências de 10.

Contudo, as fronteiras para o ajustamento polinomial foram escolhidas por tentativa e erro, de tal forma que a transição entre as retas horizontais e as polinomiais fosse a mais suave dentre as diferentes possibilidades, bem como que conduzisse a uma melhor representação do primeiro mínimo local nas fases posteriores às ocultações, mínimo este sempre bem definido. A primeira destas condições de ajustamento das polinomiais foi sugerida por Hutchison (1971).

Por este processo, as fronteiras ficaram entre as ordens 35 e 62 para Calisto, entre 38 e 62 para Europa, e entre 35 e 83 para Ganimede. Nestes intervalos, os pontos situados dentro da faixa definida pelo ruído de fundo foram substituídos pelos correspondentes valores médios (retas C, E e G), com exceção dos pontos que definem o mínimo referido anteriormente.

4. Resultados

Após os ajustamentos, medimos os intervalos de tempo das ocultações. Os resultados são apresentados na tabela 6.

TABELA VI

Satélite	I_0^*	I_C^{**}	$I_0 - I_C$
Calisto	6,75s	6,72s	+0,03s
Europa	5,70	5,56	+0,14
Ganimede	12,60	12,98	-0,38

* I_0 : intervalo de tempo observado

** I_C : intervalo previsto

O cálculo dos diâmetros angulares foi feito a partir das velocidades da Lua, suposta constante em cada um dos intervalos acima, o que é uma excelente aproximação dada a rapidez dos eventos. Os resultados são apresentados na tabela 7.

TABELA VII: DIÂMETROS ANGULARES (a)

Satélite	a_0	a_C	$a_0 - a_C$
Calisto	1,561"	1,560"	+0,001"
Europa	1,002	0,978	+0,024
Ganimede	1,615	1,664	-0,049

Finalmente, os diâmetros lineares foram obtidos através das distâncias expressas em quilômetros. Os resultados são apresentados na tabela 8.

TABELA VIII: DIÂMETROS LINEARES (L')

Satélite	L' ₀	L' _C	L' ₀ -L' _C
Calisto	4912 km	4890 km	+ 22km
Europa	3141	3066	+ 75
Ganymede	5062	5216	-154

5. Análise de erros

Da tabela 8, e admitindo os valores de Dunham como referência, obtemos os seguintes erros relativos:

Calisto 0,4%,

Europa 2,4 ,

Ganymede 3,0 .

Observando que tais objetos estão situados a uma distância da Terra superior a 640.000.000 km, consideramos estes erros relativos muito pequenos. De qualquer forma, algumas fontes de erros podem ser identificados.

5.1. Erros devidos à resolução em tempo do sistema

Seja D a distância ao satélite, a seu diâmetro angular em radianos e d a distância do satélite à Terra. Como é geometricamente óbvio:

$$d = 2D \operatorname{tg}(a/2).$$

Se os erros em a e D são, respectivamente, e_a e e_D , o correspondente erro em d será

$$e_d = \pm \left[(e_a/2) D \sec^2(a/2) + 2e_D \operatorname{tg}(a/2) \right].$$

No nosso caso,

$$e_a = (RR)e_t,$$

onde (RR) é a velocidade com que cada satélite foi ocultado e e_t a resolução (erro) em tempo do registro:

$$e_t = \pm 0,15 \text{ s.}$$

Com os valores fornecidos por Dunham para (RR) e D, e os

a obtidos experimentalmente, encontramos:

Calisto	$e_d = \pm 55$	km,
Europa	41	,
Ganimede	30.	.

5.2. Erros em distância

Estes erros, apesar de não terem sido indicados nos dados previstos, são admitidos negligenciáveis. A razão para esta afirmativa está contida no alto grau de sofisticação alcançado pela mecânica celeste na determinação da órbita de Júpiter. Claramente, seus satélites não estão situados a uma mesma distância à Terra do que o planeta, porém as aproximações cometidas no cálculo das distâncias dos satélites são desprezíveis em comparação com a distância Terra-Júpiter. Não foram, portanto, considerados.

5.3. Erros na partição dos intervalos de tempo

Apesar de termos trabalhado com espaços de 1 mm entre instantes sucessivos (cerca de 0,3 s), foram feitas reduções para a ocultação de Calisto utilizando leituras a cada 2 mm e leituras a cada 0,5 mm. Os resultados foram essencialmente os mesmos. Dessa forma, adotou-se uma resolução em tempo de 0,15 s e leituras de intensidade a cada 1 mm.

5.4. Erros nas intensidades medidas

Esses erros, denominados s_m no §3, oscilam entre 0,2 mm, nas fases anteriores às ocultações, e 0,1 mm, nas fases posteriores. O efeito desses erros é o de transladar os pontos de contato entre as ajustantes, bem como os primeiros mínimos locais nas fases posteriores, verticalmente em relação ao eixo do tempo. Assim, não afetam, em princípio, as durações das ocultações e, em consequência, os diâmetros.

Não demonstramos que os erros nas abscissas são independentes dos erros nas ordenadas. Entretanto, o excelente acordo entre os dados observados e os previstos apontam nesta direção. Esta questão será melhor examinada em data futura.

5.5. Sobre a ajustante polinomial

Pode-se questionar a necessidade de ajustar uma polinomial aos dados observados. Isto porque, usualmente, para fontes estendidas, a luz desaparece essencialmente de maneira linear com o tempo, uma vez que os diâmetros angulares são suficientemente grandes em relação aos padrões de Fresnel.

Duas observações podem ser feitas.

Em primeiro lugar, não só os resíduos apresentados nas ta

belas 6, 7 e 8 são inferiores aos produzidos por ajustamentos lineares, como também a qualidade do ajustamento polinomial é superior, no sentido estatístico, àquela alternativa.

Além disso, a proporcionalidade direta entre o total de luz bloqueado pela Lua em cada instante da ocultação e o tempo, pressupõe, obviamente, que os discos dos satélites de Júpiter refletem homogeneamente a luz solar, o que parece não ser o caso (Wyckoff et al., 1974; Williamon, 1976).

5.6. Sobre a velocidade lunar

Os cálculos dos diâmetros dos satélites necessitam envolver o movimento angular projetado do limbo lunar. Se existe uma inclinação em relação ao limbo teórico (circular) no ponto da ocultação, os resultados podem ser afetados.

Essa possibilidade não foi considerada na redução dos dados. Mais uma vez, a qualidade do ajustamento foi considerada satisfatória.

6. Conclusões

A operação de um sistema fotométrico pouco sofisticado, como o que utilizamos, e em condições precárias de céu (os grandes centros urbanos são reconhecidamente locais pouco indicados para a prática astronômica), resultou em determinações de muito boa qualidade. Isto foi obtido através de ajustamentos polinomiais ainda não empregados, ao que tudo indica, em outras circunstâncias semelhantes.

O processo utilizado carece, contudo, de um exame mais detalhado, não só do ponto de vista estatístico, como também de uma incorporação de critérios menos subjetivos para a determinação dos parâmetros do ajustamento. Além disso, e principalmente, necessita ser testado em outras ocultações antes que sua viabilidade possa ser admitida como demonstrada.

Esta primeira experiência foi suficientemente encorajadora.

Bibliografia

- Dunham, D., (1976) (comunicação privada)
- Hutchison, R. B. (1971) Automated Analysis of Astronomical Spectra, *Astronomical Journal*, 76 (8), p. 711-718.
- Johnson, H. L., and W. W. Morgan (1953) Fundamental Stellar Photometry for Standards of Spectral Type on the Revised System of the Yerkes Spectral Atlas, *Astrophysical Journal*, 117 (3), p. 313-352,
- Williamon, R. (1976) Photoelectric Observations of Mutual Eclipses and Occultations of the Galilean Satellites in 1973, *Publications of the Astronomical Society of the Pacific (Pub.A.S.P.)*, 88 (521), p. 73-76.
- Wyckoff, S., A. Frohlich, and P. Wehinger (1974), *Galilean Satellites: Photometry of Mutual Eclipses and Occultations*, *Pub.A.S.P.*, 86 (514), p. 993-997.