

Por que a variação da distância Terra-Sol não explica as estações do ano?

(Why the varying Earth-Sun distance can not explain the seasons?)

Wilton S. Dias¹ e Luis Paulo Piassi²

¹*Instituto de Ciências Exatas, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, MG, Brasil*

²*Faculdade de Educação, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil*

Recebido em 12/12/2005; Revisado em 6/10/2006; Aceito em 11/7/2007

Em aulas de ciências e astronomia básica é muito comum que os estudantes pensem que as estações do ano ocorrem por causa da variação da distância Terra-Sol. O argumento mais usado pelos professores contra essa concepção é o fato de as estações do ano serem invertidas nos hemisférios sul e norte. No entanto, dificilmente mostra-se aos professores e alunos a contra prova, ou seja, que se calcularmos os efeitos da variação da distância Terra-Sol na temperatura da Terra, as estações do ano, ou a diferença de temperatura média observada entre inverno e verão não podem ser explicadas. Nesse trabalho, mostramos a relação entre a temperatura na Terra e a distância de nosso planeta até o Sol. Alguns outros fatores importantes como albedo da Terra e a influência do raio e da temperatura do Sol também são discutidos. Além disso, abordamos alguns aspectos ligados a essa questão que normalmente são deixados de lado nas aulas de astronomia.

Palavras-chave: ensino de astronomia, sistema solar, estações do ano, clima da Terra, radiação solar.

It is very common in basic Science and Astronomy classes students imagine that seasons occur due the varying Earth-Sun distance along a year. The most common teacher's explanation against this conception is the fact that the seasons are opposite in south and north hemispheres. However, the inverse proof is rarely shown to both teachers and students, namely that the influence of the Earth-Sun distance variation in our planet temperature is much lower than actually observed. In this work, we present the relationship between Earth temperature and the distance from our planet to the Sun. Some other factors like Earth's albedo and Sun radius and temperature were also discussed. Besides, we discuss some other aspects about this problem normally not presented in astronomy classes.

Keywords: astronomy teaching, solar system, seasons of the year, earth climate, sun radiation.

1. Introdução

O estudo das estações do ano é um dos principais tópicos para a introdução da astronomia no ensino básico. Todas as principais civilizações que desenvolveram alguma forma de calendário e a observação mais sistemática do céu fizeram-no a partir da observação da variação climática anual. Em uma sociedade agrária, onde os ritmos de plantio e colheita são determinados pelas estações do ano, os ciclos anuais de insolação determinaram diversos aspectos da vida social, cujos resquícios hoje ainda se verificam em festas religiosas de solstícios como o Natal e São João e de equinócio como a Páscoa.

Entretanto, embora o estudo das estações do ano

seja um dos temas mais abordados no ensino de ciências, ainda hoje verificamos entre professores [1, 2] e até em alguns livros didáticos uma excessiva superficialidade no tratamento do assunto [3], quando não erros conceituais. Uma questão interessante, por exemplo, é o fato amplamente divulgado de que a órbita da Terra não é uma circunferência, o que implica em uma variação na distância de nosso planeta até o Sol, muitas vezes exagerada nos desenhos dos livros didáticos (uma interessante discussão seguida de uma clara abordagem sobre o problema do ensino da órbita da Terra é apresentada na Ref. [2]). Mesmo após aceitar que este fato não explica a variação climática anual, já que esta é causada pela inclinação do eixo imaginário de rotação da Terra² tanto professores quanto alunos questionam

¹E-mail: wilton@unifei.edu.br.

²Os ângulos de inclinação dos eixos imaginários dos planetas são medidos em relação à direção perpendicular ao seu plano orbital. Uma inclinação nula, portanto, significa que o eixo imaginário de rotação é perpendicular ao plano orbital do planeta.

sobre se a variação da distância Terra-Sol também não causa efeitos consideráveis sobre o clima.

Quando se preconiza no ensino de ciências levar os alunos a questionar e estabelecer relações entre fenômenos, ao invés apenas de memorizar fatos, essa questão se torna de suma relevância. No entanto, os livros didáticos não dão subsídios a esta questão nem a outras que advém dela. Por que razão a variação da distância Terra-Sol não determina as estações do ano? Em que época do ano essa distância é máxima ou mínima? Não há mesmo uma pequena influência dessa variação sobre a temperatura? E nos outros planetas do Sistema Solar, os fenômenos são similares aos da Terra? Se a inclinação do eixo imaginário da Terra fosse diferente ou a órbita da Terra fosse mais excêntrica, o que poderia acontecer? Esse é o tipo de questionamento que podemos observar em sala de aula por parte de estudantes quando, ao serem confrontados com a questão das estações do ano, são estimulados a refletir sobre o assunto, conforme a Ref. [4].

Neste artigo, pretendemos dar subsídio para a abordagem de algumas destas questões. Na seção 2 mostraremos, a partir de cálculos relativamente simples, que a influência da variação da distância orbital no clima é pequena frente ao fator da inclinação do eixo imaginário de rotação. Na seção 3, discutimos as diferenças de temperatura esperadas entre afélio e periélio. São fornecidos alguns dados e análises qualitativas que permitirão subsidiar o professor em questões relativas às estações do ano. Na seção 4 nos dedicamos a responder algumas questões interessantes que surgem naturalmente devido à discussão do assunto. Finalmente, na seção dedicada aos comentários finais, destacamos alguns pontos importantes discutidos no texto.

2. Um modelo para o cálculo da temperatura

Através de um modelo simples é possível deduzir uma expressão que forneça a temperatura da Terra em função de sua distância ao Sol. Como todo modelo, esse faz uso de algumas aproximações que do ponto de vista dos objetivos didáticos deste trabalho podem ser consideradas razoáveis. A expressão a que chegamos nos permitirá visualizar as grandezas que determinam a temperatura da Terra, além de evidenciar sua dependência em função da distância Terra-Sol.

Neste modelo, a idéia básica é considerar tanto o planeta quanto o Sol como corpos negros (CN) e encontrar a temperatura na qual um pequeno CN (o planeta) deve irradiar para balancear a energia proveniente do Sol. Trata-se fundamentalmente de aplicar o princípio da conservação da energia. Um planeta, por exemplo, absorve continuamente uma parcela aproximadamente fixa da radiação emitida pelo Sol. Ao mesmo tempo, como CN, ele emite radiação. Na situação de balanço energético, a temperatura tenderá a se estabelecer em

um patamar constante. O fluxo energético F de um CN, ou seja, a quantidade de energia por ele emitida em uma unidade de tempo para cada unidade de área é dada pela lei de Stefan-Boltzmann

$$F = \sigma T^4,$$

onde σ é a constante de Stefan-Boltzmann ($5,67 \times 10^{-8} \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-4}$).

Em uma situação de balanço energético, o planeta irradia uma quantidade de energia de valor igual à absorvida a partir da radiação solar. Considerando o Sol como um CN esférico, a área de sua superfície será igual a $4\pi R_s^2$, onde R_s é o valor do raio solar. Assim, a potência total irradiada pelo Sol (também denominada luminosidade solar) será dada por

$$P = 4\pi R_s^2 \sigma T_s^4,$$

onde T_s é a temperatura efetiva do Sol.

O valor dessa potência é determinado experimentalmente ($3,86 \times 10^{26} \text{ W}$, segundo a Ref. [5]). Conforme a distância aumenta, essa energia - emitida esfericamente a partir do Sol - se distribuirá por uma área cada vez maior. Ao atingir a distância Sol-Terra (d_{ST}), ela estará distribuída por uma grande esfera de raio d_{ST} e de área superficial $4\pi d_{ST}^2$. Assim, a radiação solar incidente na Terra terá um fluxo energético F_{ST} determinado pela razão entre a potência total irradiada pelo Sol e a área desta grande esfera

$$F_{ST} = \frac{4\pi R_s^2 \sigma T_s^4}{4\pi d_{ST}^2} = \frac{\sigma T_s^4 R_s^2}{d_{ST}^2}.$$

Na situação de balanço energético a Terra considerada como CN, recebendo essa energia, irá reemitir em igual valor. Aplicando a relação de Stefan-Boltzmann, podemos portanto obter uma expressão para a temperatura terrestre T_T

$$T_T = \left(\frac{R_s}{d_{ST}}\right)^{\frac{1}{2}} T_s.$$

Essa temperatura, essencialmente, é a temperatura de equilíbrio, ou a temperatura média teoricamente esperada para o planeta. Ao considerar os valores $T_s = 5778 \text{ K}$, $R_s = 6,96 \times 10^8 \text{ m}$ e $d_{ST} = 1,496 \times 10^{11} \text{ m}$ [6], teríamos como resultado a temperatura $T_T = 394 \text{ K}$ ($121 \text{ }^\circ\text{C}$). Esse valor é muito acima do observado. O que está errado? Uma coisa que não foi considerada é o albedo, ou seja a parcela da energia solar que é diretamente refletida pela atmosfera de volta ao espaço, sem contribuir para a temperatura do nosso planeta. Se considerarmos o albedo como a fração A da radiação solar incidente que é refletida teremos que apenas $1 - A$ é absorvida. Isso nos leva à expressão

$$T_T = (1 - A)^{\frac{1}{4}} \left(\frac{R_s}{d_{ST}}\right)^{\frac{1}{2}} T_s.$$

O albedo da Terra é, em média, 0,367 [7]. Usando este valor na fórmula teremos $T_T = 352$ K (79 °C), que ainda é muito alto com relação ao observado.

No entanto, faltam algumas considerações importantes, pois essas expressões se aplicam ao cálculo da temperatura superficial dos planetas que giram muito lentamente. Para planetas com atmosfera ou com rápida rotação, como é o caso da Terra, a equação não vale, pois, neste caso, a energia absorvida distribui-se de forma relativamente rápida por toda a superfície do planeta. Para resolver isso vamos considerar que a área efetiva de absorção é a seção reta πR_T^2 e que sua área efetiva de emissão (irradiação) é a área da superfície total $4\pi R_T^2$.

Assim, a energia absorvida por segundo será

$$(1 - A)\pi R_T^2 F_{ST} = \frac{(1 - A)\pi R_T^2 \sigma T_s^4 R_s^2}{d_{ST}^2}.$$

Mas o planeta vai emitir $4\pi R_T^2 \sigma T_T^4$. Novamente usando a idéia de balanço energético, consideramos a taxa de absorção de energia igual à de emissão, o que, fixa uma temperatura. Note que de outra forma a temperatura seria maior ou menor. Igualando as duas expressões, teremos

$$4\pi R_T^2 \sigma T_T^4 = \frac{(1 - A)\pi R_T^2 \sigma T_s^4 R_s^2}{d_{ST}^2}.$$

Isso nos fornece o valor esperado para a temperatura da Terra

$$T_T = (1 - A)^{\frac{1}{4}} \left(\frac{R_s}{2d_{ST}} \right)^{\frac{1}{2}} T_s. \quad (1)$$

Substituindo novamente os valores, obtemos como resultado $T_T = 249$ K (24 °C). Este modelo que considera a rotação e a atmosfera mostra-se melhor uma vez que é o que mais se aproxima dos $T_T = 288$ K (15 °C) observados [8]. O valor da temperatura T_T obtido pela Eq. (1) é apenas 14% menor. Essa diferença encontrada é devido ao fato da energia não se espalhar tão igualmente e rapidamente pelo planeta, pois se assim fosse a noite e o dia teriam a mesma temperatura. Porém, ainda mais importante é o fato de que a energia reemitida pela Terra nesta temperatura T_T situa-se na faixa do infravermelho. Essa radiação é parcialmente bloqueada pela atmosfera proporcionando o efeito estufa. Finalmente, a radiação proveniente da energia geotérmica, emitida do interior do planeta, também não foi levada em conta. No modelo, se esses fatores fossem considerados o valor da temperatura da Terra obtido seria bem mais próximo do observado. Mesmo com essa limitação usaremos esta expressão, porque a pequena diferença encontrada pouco influirá nos cálculos relacionados às estações do ano, uma vez que eles se basearão em comparações relativas e não em valores absolutos.

3. Diferenças de temperatura esperadas entre afélio e periélio

Vemos a partir da Eq. (1) que a relação entre a temperatura terrestre (T_T) e distância Terra-Sol (d_{ST}) obedece a uma proporção do tipo $T_T \propto (d_{ST})^{-\frac{1}{2}}$. Com essa expressão, podemos deduzir a diferença de temperatura esperada pela variação da distância Terra-Sol entre periélio e afélio de 0,98 e 1,02 unidades astronômicas, respectivamente, (1 unidade astronômica = distância média Terra-Sol = $1,496 \times 10^{11}$ m) [9]. Dessa forma temos

$$\frac{T_a}{T_p} = 0,98,$$

onde T_p e T_a representam, respectivamente, as temperaturas calculadas para a distância Terra-Sol no periélio e no afélio.

Note que estamos considerando que o albedo da Terra não varia significativamente ao longo do ano. No entanto, há indícios de que o albedo apresenta variações sazonais e de longo período que dependem das mudanças globais e da quantidade e espessura das nuvens e da superfície refletiva da Terra [10].

Uma outra simplificação do nosso tratamento, como dissemos, é que os vínculos inseridos não consideram a circulação atmosférica planetária e a retenção do calor pelo chamado efeito estufa, que são efeitos de importância considerável.

Finalmente, vale a pena lembrar que os cálculos foram feitos considerando R_s e T_s constantes na Eq. (1). No entanto, há uma grande polêmica a respeito da variação do diâmetro solar [11]. Através da segunda equação apresentada nesse trabalho é visível que a potência total irradiada pelo Sol depende diretamente de R_s e T_s . A partir da Eq. (1) pode-se notar que variações no diâmetro solar poderiam implicar em efeitos na temperatura do planeta.

Com essas considerações podemos realizar um cálculo simples. Como a temperatura média da Terra é aproximadamente 288 K, se usarmos a relação T_p/T_a , teremos entre a temperatura maior e menor uma diferença de cerca de 2% ou, em termos absolutos, 5,8 K ou 5,8 °C (Fig. 1). Ou seja, se desconsiderássemos as variações no albedo e a variação de temperatura na Terra fosse devida apenas à mudança da distância Terra-Sol pelo fato da órbita ser elíptica, teríamos uma amplitude térmica de no máximo 5,8 °C e, em geral menor do que isso, pois a circulação atmosférica e oceânica só tendem a atenuar os efeitos das diferenças de temperatura.

Apenas para efeito ilustrativo, mostramos a Tabela 1 com as temperaturas máxima e mínima ao longo do ano em algumas capitais brasileiras [12]. Como era de se esperar, mesmo com toda a atenuação atmosférica e oceânica, a diferença entre verão e inverno é sempre muito maior do que o valor de 5,8 °C que obtivemos pelos cálculos devido à variação de distância Terra-Sol.

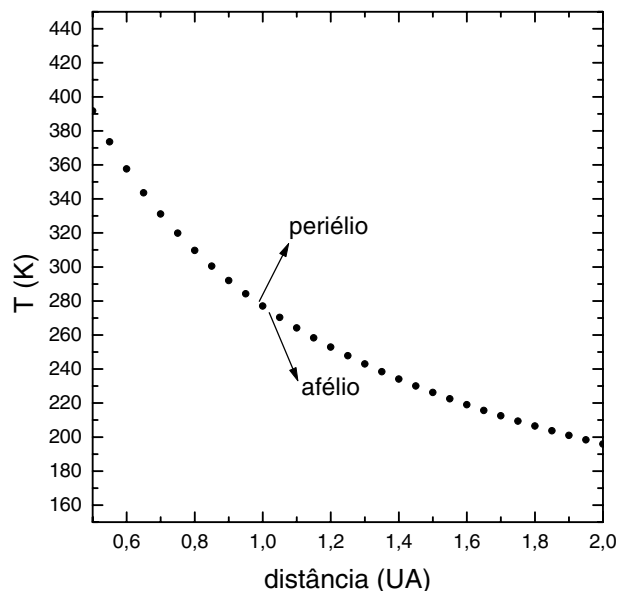


Figura 1 - Variação da temperatura na Terra em função da distância Terra-Sol, de acordo com a Eq. (1). São marcados os pontos onde a Terra encontra-se no afélio e periélio, o que proporciona uma diferença de temperatura de cerca de $5,8^{\circ}\text{C}$.

Tabela 1 - Temperaturas máximas, mínimas e respectivas diferenças para algumas capitais do Brasil entre os anos 1989 e 1993, conforme a Ref. [12].

Capitais	Máxima ($^{\circ}\text{C}$)	Mínima ($^{\circ}\text{C}$)	Diferença ($^{\circ}\text{C}$)
Manaus	36,3	18,3	18,0
Belém	33,8	20,8	13,0
Teresina	38,1	17,8	20,3
Salvador	32,8	19,6	13,2
Belo Horizonte	32,3	10,0	22,3
São Paulo	33,9	4,4	29,5
Curitiba	31,6	-0,7	32,3
Porto Alegre	37,2	-0,2	37,4
Campo Grande	35,3	4,1	31,2
Brasília	31,6	7,0	24,6

4. Respondendo a algumas questões

Essa análise nos permite abordar algumas questões e acrescentar informações curiosas sobre as estações do ano.

1. Por que razão a variação da distância Terra-Sol não determina as estações do ano?

Isso ocorre porque a órbita terrestre é quase circular. Nosso cálculo mostrou que a variação de temperatura causada pela diferença de distância ao Sol é bem menor do que a ocasionada pela variação da insolação devido à inclinação do eixo imaginário terrestre. No entanto, lembramos que se a inclinação do eixo imaginário fosse zero, notaríamos entre periélio e afélio uma diferença de cerca de $5,8^{\circ}\text{C}$.

Tomando-se dados por longos períodos verificaria-se

a diferença na temperatura o que não deixaria de ser uma espécie de ciclo de estações.

2. Em que época do ano essa distância é máxima ou mínima?

A Terra atinge o periélio em Janeiro (mais precisamente para 2006 no dia 4 de janeiro às 15 horas [6]), o que faz com que o verão no hemisfério sul conte com uma insolação levemente maior do que o do hemisfério norte.

3. Não há sequer uma pequena influência dessa variação sobre o clima?

A diferença de insolação produzida pela variação da distância Terra-Sol é bem menor que a diferença de insolação produzida devido à inclinação do eixo imaginário de rotação da Terra. Além disso, a complexidade da circulação atmosférica e oceânica complica uma análise do efeito isolado dessa variação de insolação. É possível que esse efeito seja perceptível, mas não há estudos confirmando ou refutando isso. Enfatizamos que uma análise detalhada está além dos objetivos didáticos desse texto.

4. E nos outros planetas do Sistema Solar, os fenômenos são similares aos da Terra?

Podemos fazer uma comparação com Marte, que possui uma inclinação do eixo imaginário de rotação de 25° , próxima, portanto, ao valor da inclinação terrestre. Enquanto a distância Terra-Sol varia apenas 4% ao longo do ano, para Marte essa variação é de aproximadamente 20%. Assim, no planeta vermelho, a influência da variação da distância é bem mais acentuada que em nosso planeta. As variações no Sistema Solar são imensas e podemos imaginar todo o tipo de situação, desde uma inclinação do eixo imaginário de rotação extremamente acentuada, como a de 98° em Urano até uma variação de distância como a de Plutão,³ que chega a 66%. Um planeta como Júpiter que tem inclinação do eixo de rotação de apenas 3° e uma variação na distância de 10% terá, a princípio, mais influência devido à distância do que em relação à inclinação.

5. Se a Terra tivesse uma inclinação do eixo imaginário de rotação diferente ou uma órbita mais excêntrica, o que poderia acontecer?

Usando o modelo simples descrito na seção 2 é possível mostrar que se a Terra tivesse uma inclinação do eixo imaginário de rotação em torno de 16° os efeitos devido à inclinação e à variação da distância orbital seriam da mesma ordem. Nesse caso, as variações climáticas em nosso planeta seriam muito mais tênues do que as que temos. Por outro lado, se a diferença entre afélio e periélio fosse da ordem de 20% teríamos também influências parecidas dos dois fatores, mas nesse caso o sul do planeta teria invernos muito frios e verões muito quentes, ao passo que no norte as variações seriam muito mais amenas do que são na realidade. Isso porque no verão austral a Terra estaria

³Durante a redação desse artigo a União Astronômica Internacional em sua Assembléia Geral de 24 de agosto de 2006 aprovou resolução que implicou em não classificação de Plutão como planeta. Para detalhes consultar: http://www.astro.iag.usp.br/_dinamica/iau-planeta.html

muito mais próxima do Sol do que no verão boreal, já que essa aproximação máxima se dá em janeiro. Além desses efeitos, quando a Terra estivesse no periélio, poderiam ocorrer também marés solares muito maiores, maior evaporação das águas com conseqüente aumento do efeito estufa, e também se notaria que o diâmetro angular aparente do Sol ficaria maior.

Uma outra abordagem para essa questão é verificar a diferença de insolação existente entre inverno e verão devido à inclinação do eixo imaginário de rotação da Terra. Assim, através de cálculos simples pode-se mostrar que a inclinação do eixo imaginário, responsável pela diferença de insolação, explica as estações do ano como observado. No solstício de verão, em um ponto do trópico de Capricórnio, por exemplo, os raios incidem quase perpendicularmente à superfície ao meio dia. No solstício de inverno esses mesmos raios incidirão com um ângulo de aproximadamente 47° de inclinação o que produz uma insolação aproximadamente 32% menor. Pela relação de Stefan-Boltzmann e usando as considerações de balanço energético, isso daria uma diferença de temperatura em torno de 10%, ou seja, algo em torno de 30°C , como observado na prática.

5. Considerações finais

A elaboração desse trabalho foi motivada pelas concepções espontâneas que se baseiam na variação da distância Terra-Sol para explicar o fenômeno das estações do ano. A proposta principal do texto foi mostrar a contra prova desse argumento, ou seja, calcular os efeitos da variação da distância Terra-Sol na temperatura da Terra para verificar que a diferença de temperatura entre inverno e verão não pode ser explicada por esse argumento.

Dessa forma, utilizamos um modelo simples (com objetivo didático) baseado no princípio da conservação da energia para obter uma expressão da temperatura da Terra em função de sua distância ao Sol (Eq. (1)). Apesar de encontrarmos uma amplitude térmica de no máximo $5,8^\circ\text{C}$, mostramos através de uma análise qualitativa que a variação da temperatura na Terra não pode ser explicada apenas pela mudança na distância Terra-Sol, causada pelo fato da órbita da Terra ser elíptica.

A explicação das estações do ano é um dos melhores exemplos de como, no ensino de ciências, ainda observamos uma abordagem dogmática do conhecimento científico em nossas escolas. Para se concretizar um ensino crítico é fundamental colocar o aluno no papel de sujeito e levar em conta seu conhecimento prévio ou espontâneo. Assim, acreditamos que os fenômenos

não podem ser apresentados com explicações prontas e acríticas.

No caso específico das estações do ano, o rigor diz que a princípio tanto a inclinação do eixo imaginário de rotação quanto a variação da distância Terra-Sol devem desempenhar um papel na temperatura do planeta. A idéia dos alunos, induzida muitas vezes por desenhos distorcidos nos livros didáticos não pode ser simplesmente substituída por uma simples explicação pronta e inquestionável. Há que se apresentar as informações e as razões porque um fator é mais importante que outro, e estimulá-los a pensar no que ocorreria se fosse de outra maneira. Esse é o modo de raciocínio que desenvolve habilidades relacionadas ao raciocínio hipotético dedutivo, tão fundamental em um ensino de ciências que pretende promover a alfabetização científica.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao árbitro pelos importantes comentários que tornaram o texto mais claro e mais preciso.

Referências

- [1] N. Camino, *Enseñanza de las Ciencias* **13**, 81 (1995).
- [2] J.B.G. Canalle, *A Física na Escola* **4**, 12 (2003).
- [3] J.B.G. Canalle, R.H. Trevisan e C.J.B. Lattari, *Caderno Catarinense de Ensino de Física* **14**, 7 (1997).
- [4] Grupo de Reelaboração do Ensino de Física (GREF), *Leituras de Física - Mecânica. Apostila do Aluno* (1998), disponível eletronicamente em <http://axpfep1.if.usp.br/gref/pagina01.html>.
- [5] C.W. Allen, *Astrophysical Quantities* (Athlone Press, London, 1964) 2nd ed.
- [6] E. Chaisson and S. McMillan, *Astronomy Today*. (Prentice Hall, Upper Saddle River, 1996) 2nd ed.
- [7] Imke de Pater and Jack J. Lissauer, *Planetary Sciences* (Cambridge University Press, Cambridge, 2001).
- [8] Kenneth R. Lang, *Astrophysical Data: Planets and Stars* (Spring Verlag, Nova Iorque, 1991).
- [9] U.S. Government Printing Office (Usgpo), *The Astronomical Almanac for the year 2005* (Government Printing Office, Washington, 2003).
- [10] M. Rodrigues, *Astrophysical Journal* **629**, 1175 (2005).
- [11] G. Thuillier, S. Sofia and M. Haberreiter, *Advances in Space Research* **35**, 329 (2005).
- [12] FIBGE, disponível em <http://www.brcactaceae.org/clima.html>.