

Um critério energético para o desenvolvimento de vida em um exoplaneta

Hermano Velten¹, Douglas Delladea¹ e Arthur Primola²

¹Universidade Federal de Ouro Preto

²Universidade Federal de Minas Gerais

Resumo

Este artigo faz uma revisão da hipótese PET (Proportional Evolutionary Time), recentemente proposta na literatura. Esta proposta sugere uma relação entre a quantidade máxima de energia incidente na superfície de um exoplaneta com o tempo necessário para o desenvolvimento de vida complexa. Como consequência, pode-se sugerir também uma relação entre a classificação espectral da estrela hospedeira e a probabilidade de que um de seus exoplanetas tenha atendido as condições energéticas para o desenvolvimento de vida. Além de apresentar esta hipótese, discutimos algumas possíveis extensões e aplicações. Como exemplo de um de nossos resultados, encontramos que já houve incidência energética suficiente no planeta Vênus capaz de viabilizar o desenvolvimento de vida complexa. O mesmo ainda não teria ocorrido em Marte. Também encontramos um possível contra-exemplo da hipótese PET. O exoplaneta GJ 887 b orbita uma estrela tipo *M* e recebeu energia suficiente para desenvolver vida complexa.

Abstract

In this article we review the Proportional Evolutionary Time hypothesis recently proposed in the literature. This proposal suggests a relation between the maximum incident energy on the surface of a exoplanet and the time required for the evolution of complex life. As a consequence, one can also suggest a relation to the spectral classification of the host star and the probability that one its exoplanets has attended the energetic conditions for the development of life. We also discuss possible extensions and applications. As an instance of one of our results, we find that the incidence of energy on Venus is sufficient to allow the evolution of complex life. The same did not happen to Mars. We also found an counter example of the PET hypothesis. The exoplanet GJ 887 b orbits a *M*-type star and but has received energy enough for the development of complex life.

Palavras-chave: astrobiologia, exoplanetas, desenvolvimento da vida.

Keywords: astrobiology, exoplanets, development of life.

DOI: [10.47456/Cad.Astro.v3n2.38561](https://doi.org/10.47456/Cad.Astro.v3n2.38561)

1 Introdução

O número de exoplanetas já descobertos ultrapassou recentemente a marca de 5000. ¹ É impossível não se questionar se todos estes exoplanetas poderiam abrigar vida. Um primeiro palpite seria dizer que a grande maioria destes planetas não seriam potenciais hospedeiros de qualquer forma de vida, pelo menos as quais temos conhecimento. De fato, da nossa experiência com o sistema solar, até onde sabemos, apenas a Terra abriga vida, o que representa em torno de 10% da amostra de planetas que orbitam o Sol. Este número ficaria ainda menor se levássemos em conta os satélites

destes planetas. Mas qual seria um bom critério para definir se um planeta pode ou não abrigar a vida? Esta não é uma resposta simples e que depende de apenas um ou dois fatores. Ainda, estes critérios devem ser embasados em conceitos provenientes de disciplinas como física, química, geologia e, obviamente, biologia. Mas, ainda assim, seria possível simplificar esta tarefa tão complexa? Um critério simples pode surgir ao buscarmos algum conceito científico comum a todas as disciplinas: o conceito de energia. De fato, o desenvolvimento da vida precisou de energia e a fonte primária de energia de um planeta é sua estrela hospedeira.

No caso da Terra, o único ponto experimental da astrobiologia, é possível estimar a quantidade

¹Verificado em junho de 2022 no site <https://exoplanets.nasa.gov/>

de energia incidente em sua superfície desde a criação do sistema solar, 4,5 bilhões de anos atrás, momento no qual também se considera a formação planetária, até o instante onde as primeiras formas de vida surgiram no nosso planeta. Na ausência de outros critérios, este valor poderia ser utilizado como possível referência para se determinar quais exoplanetas já receberam energia suficiente de sua estrela hospedeira, assim os habilitando como possíveis hospedeiros de formas de vida. Mas, afinal, qual foi o tempo necessário para que a vida na Terra tivesse seu começo? Apesar de ainda ser tema de debate - veja uma discussão na referência [1] - as principais estimativas geológicas indicam o surgimento da vida microbiótica há pelos menos 3,7 bilhões de anos. No entanto, segundo *Bell et al.*, existem cristais de zircão encontrados na Austrália datados em 4,1 bilhões de anos que possuem razão entre os isótopos de carbono $^{13}C/^{12}C$ suficiente para sugerir uma origem biogênica [2]. Portanto, esta evidência sugere que um período de 400 milhões de anos foi necessário até o surgimento da vida na Terra.

Em um momento posterior na história evolutiva da vida terrestre, pode-se ainda falar no início da vida complexa, definida assim como na Ref. [3], referindo-se a organismos comparados a fungos multicelulares, plantas ou animais. Este segundo momento certamente precisou de alguns bilhões de anos para ocorrer.

Do ponto de vista astrofísico, esta linha de raciocínio pode indicar quais seriam os tipos de estrelas que teriam sido capazes de entregar a seus planetas orbitantes uma quantidade de energia suficiente para engatilhar a origem da vida ou até mesmo levá-los ao ponto de desenvolvimento de vida complexa. Assim, a busca por vida fora do sistema solar seria simplificada já que algumas estrelas seriam, a princípio, descartadas por não terem sido capazes de entregar uma quantidade mínima de energia. Sobre “tipos de estrelas” nos referimos à qual seria a sua classificação espectral. Vamos considerar estrelas na sequência principal que obedecem a classificação *OABFGKM*. Estrelas classificadas segundo esta sequência possuem valores decrescentes de massa, luminosidade e temperatura. Estrelas do tipo *O* são mais “potentes”, no sentido de serem mais luminosas, que estrelas tipo *A* e, assim, sucessivamente. Como exemplo, o Sol é uma estrela do tipo *G*. Pode-

mos então pensar que qualquer estrela do tipo *O, A, B, F* já teria sido capaz de entregar uma quantidade de energia suficiente de energia a seus exoplanetas. Por outro lado, e quanto às estrelas do tipo *K* e *M*?

Neste artigo faremos uma revisão da hipótese do tempo evolutivo proporcional cuja abreviação em inglês é PET.² Proposta nas referências [4, 5], a hipótese PET relaciona o tipo espectral da estrela hospedeira a com a probabilidade da existência de vida complexa. Segundo os resultados apresentados nestas referências, o tempo necessário para o desenvolvimento da vida complexa em planetas que orbitam estrelas com massas menores que a do Sol, como estrelas tipo *K* e *M*, deve ser bem maior que a idade do universo. Por outro lado, estrelas tipo *B* e *F* possuem um ciclo de vida muito curto e não “viveriam” o suficiente para entregar toda a energia necessária aos seus planetas próximos. Com isso, estrelas do tipo *G* e *K* ($m \gtrsim 0,7M_{\odot}$) seriam os melhores alvos para se tentar encontrar vida complexa em seus sistemas planetários.

Vamos apresentar os detalhes do cálculo da energia incidente sobre um planeta ao longo de sua história e, conseqüentemente, sua relação com a hipótese PET. Também faremos uma discussão sobre possíveis extensões desta hipótese e aplicaremos os critérios energéticos de referência da Terra para os resto do sistema solar e outros exoplanetas.

2 A hipótese PET (*Prop Evol. Time*)

Nosso objetivo nesta seção é muito simples: calcular a quantidade de energia incidente na Terra emitida pelo Sol ao longo de sua história evolutiva. No início desta seção seguiremos os desenvolvimentos apresentados por *Haqq-Misra* na Ref. [5]. É importante já ressaltar que esta análise poderá ser estendida a qualquer outro sistema planetário.

Iniciamos considerando que a estrela hospedeira emite energia seguindo o espectro de emissão de um corpo negro ideal. Sua radiância espectral é a potência emitida nos vários comprimentos de onda do espectro por unidade de área da superfície do corpo por esferorradiano. Esta quantidade é calculada com auxílio da lei de Planck

²Do inglês, Proportional Evolutionary Time (PET).

$$B(T, \lambda) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{\exp\left(\frac{hc}{\lambda kT}\right) - 1}, \quad (1)$$

onde h é a constante de Planck, c a velocidade da luz no vácuo, λ o comprimento de onda do fóton emitido e T a temperatura da estrela (corpo negro emissor). Esta função possui um comportamento bem característico: para uma dada temperatura T , a função $B(\lambda)$ tende a zero tanto para fótons ultra energéticos (limite $\lambda \rightarrow 0$) quanto para a região de menor energia ($\lambda \rightarrow \infty$). Na prática, o espectro eletromagnético compreende ondas físicas que estão limitadas em um intervalo finito de comprimentos de onda. A parte mais energética do espectro corresponde aos raios gama e, na parte menos energética, as ondas de rádio.

Integrando esta expressão no ângulo sólido subtendido pelo Sol a uma distância equivalente à superfície da Terra encontra-se

$$F(T, \lambda) = \frac{\pi R_{\odot}^2}{D^2} B(T, \lambda), \quad (2)$$

onde R_{\odot} é o raio do Sol e D é a distância orbital terrestre média. A potência total recebida pela superfície da Terra dentro de uma faixa de comprimentos de onda $\lambda_{min} < \lambda < \lambda_{max}$ é obtida ao se integrar a expressão acima dentro deste intervalo de comprimentos de onda e, em seguida, multiplicando este resultado pela área da seção reta da Terra com um plano perpendicular ao plano orbital. Esta quantidade será designada por P_{bio} e é calculada por meio da expressão

$$P_{bio}(T) = \pi R_{\oplus}^2 \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} F(T, \lambda) d\lambda, \quad (3)$$

onde R_{\oplus} é o raio da Terra.

A chamada janela dos comprimentos de onda capazes de gerar energia livre para o desenvolvimento de vida complexa está compreendida entre $\lambda_{min} = 200$ nm e $\lambda_{max} = 1200$ nm. Lembrando que o espectro visível que vai do azul (400 nm) até o vermelho (750 nm) está compreendido dentro dessa faixa. Para se ter uma noção do espectro de emissão de fótons do Sol, de acordo com (1), uma temperatura de 5780 K possui seu máximo em torno de 500 nm. Abaixo do valor mínimo de 200 nm a radiação pode interagir com o tecido biológico causando mutações ou dissociações. O limite máximo de 1200 nm corresponde à mínima energia de um fóton capaz de ionizar elementos

químicos, um fator relevante para a disponibilização de energia livre no planeta.

A energia total que o Sol emitiu em um intervalo de tempo é obtida integrando sua luminosidade L (energia por intervalo de tempo) $E = \int L dt$. De fato, é importante lembrar que o Sol, assim como qualquer estrela, possui um processo evolutivo e, com isso, sua luminosidade mudou desde sua formação até hoje. Em outras palavras, a potência do Sol não é constante com o tempo. Para contornar essa situação, basta incluir na nossa análise um modelo para a evolução temporal da luminosidade solar. Uma expressão conhecida na literatura é [6]

$$L(t) = L_{\odot} \left[1 + \frac{2}{5} \left(1 - \frac{t}{t_{\odot}} \right) \right]^{-1}. \quad (4)$$

Quando $t = t_{\odot}$ temos a luminosidade solar atual. Portanto, t_{\odot} representa a idade do sistema solar e será considerado o valor de $t_{\odot} = 4,5$ bilhões de anos.

O próximo passo será substituir L_{\odot} em (4) pela expressão encontrada para P_{bio} em (3). Com isso, teremos uma indicação da variação temporal da quantidade P_{bio} . A integração desta quantidade no tempo nos fornecerá uma medida da quantidade de energia disponibilizada ao planeta

$$\begin{aligned} E_{bio}(T) &= \int_0^{t_{\odot}} \frac{P_{bio}(T) dt}{\left[1 + \frac{2}{5} \left(1 - \frac{t}{t_{\odot}} \right) \right]} \quad (5) \\ &= \frac{5}{2} \ln \left(\frac{7}{5} \right) t_{\odot} P_{bio}(T). \end{aligned}$$

Ao utilizarmos a temperatura $T = 5780K$ na expressão acima, encontramos que a energia disponibilizada ao planeta Terra pelo Sol ao longo de toda sua história evolutiva foi de $E_{bio} = 1,7 \times 10^{34}$ Joules.

Para verificar se esta estimativa é confiável, podemos substituir a expressão (4) por modelos mais complexos para a evolução da luminosidade estelar. Em *Baraffe et al* [7] são calculadas as propriedades estelares levando em conta códigos numéricos que incluem em sua análise aspectos como as abundâncias moleculares e a convecção da atmosfera estelar para estrelas de diversas massas. Ao usarmos os resultados numéricos de *Baraffe et al* encontramos o mesmo valor para E_{bio} . Portanto, seguindo a hipótese PET, definiremos que a quantidade de energia incidente em um planeta necessária para o surgimento de vida complexa em um exoplaneta é

$$E_{bio}^{Comp} = 1,7 \times 10^{34} \text{ Joules.} \quad (6)$$

Cabem aqui alguns comentários sobre este resultado.

Nesta estimativa não é considerado o albedo do planeta. O albedo é a quantidade de radiação solar refletida de um objeto com relação a quantidade de energia incidente. O cálculo desta quantidade depende de vários fatores sobre a atmosfera e superfície planetária. Por exemplo, o gelo oceânico possui maior albedo do que um deserto. Assim, seguindo a maneira como a hipótese PET é estipulada, a quantidade E_{bio} deve ser considerada como um limite superior a energia livre disponível ao planeta capaz de iniciar processos biológicos. Portanto, o valor encontrado em (6) é a estimativa mais conservadora possível.

É importante lembrar novamente que a quantidade encontrada acima refere-se a quantidade total de energia incidente sobre a Terra ao longo dos seus 4,5 bilhões de anos. Por isso, refere-se a uma estimativa da quantidade de energia incidente necessária para o surgimento de vida complexa. No entanto, podemos novamente tomar a Terra como exemplo e calcular a energia incidente até um momento anterior, quando as primeiras formas de vida surgiram no planeta. Ao substituímos t_{odot} por um novo valor de referência de 400 milhões de anos, encontramos

$$E_{bio}^{min} = 1,23 \times 10^{33} \text{ Joules.} \quad (7)$$

Este valor é cerca de 10 vezes menor que o encontrado em (6) indicando que a luminosidade solar permaneceu aproximadamente constante nos últimos 4 bilhões de anos.

3 Aplicações da proposta PET

Aplicações da hipótese PET nos permitirão uma compreensão mensurável da energia incidente que um planeta ou satélite já recebeu de sua estrela hospedeira. Comparar a energia que o planeta Terra já recebeu para o surgimento de vida E_{bio}^{min} ou de vida complexa na Terra E_{bio}^{Comp} , com outros corpos celestes nos permitirá ponderar quais corpos receberam teriam capacidade de abrigar vida.

3.1 Sistema solar: planetas e seus satélites

Nosso sistema solar é composto por uma estrela principal, o Sol, que fornece energia para os Planetas, seus Satélites Naturais e Proto-Planetas/Planetas-anões. Além disso temos outros componentes como Cometas, Meteoroides e o próprio Meio Interplanetário. Os Planetas são separados em dois principais grupos, os Terrestres/Telúricos e os Gasosos/Jovianos. Os planetas chamados de Terrestres recebem esse nome por terem em sua composição material rochoso como principal constituinte, e englobam Mercúrio, Vênus, Terra e Marte. Já os Gasosos recebem essa nomenclatura por terem como maior constituinte gases, englobam os planetas, Júpiter, Saturno, Urano e Netuno.

Na tabela 1 apresentamos os resultados da aplicação da hipótese PET aos principais objetos do sistema solar. Na primeira coluna listamos os objetos estudados como os planetas e algumas luas. Na segunda coluna temos o raio médio do objeto. Na terceira coluna temos a distância orbital média. Em nossa aproximação, estamos assumindo que a durante toda a existência do sistema solar sua configuração orbital manteve-se inalterada. Apesar de esta não ser uma prática realista, nos permitirá estimar a magnitude da energia incidente em cada objeto. Na quarta coluna apresentamos a quantidade de radiação incidente neste objeto durante todo o tempo de formação do sistema solar E_{bio} . Na quinta coluna fazemos uma comparação com o valor encontrado para E_{bio} e a referência para o surgimento de vida complexa E_{bio}^{comp} . Na última coluna fazemos uma comparação do valor obtido para E_{bio} com o valor E_{bio}^{min} .

O símbolo \boxtimes indica que a energia incidente sobre o objeto é inferior ao valor de referência adotado em cada coluna. O símbolo \checkmark indica que E_{bio} foi maior que o valor de referência.

Todos os planetas do sistema solar anteriores à Saturno já receberam uma energia superior a E_{bio}^{min} . Os demais corpos do sistema solar receberam quantidades de energia inferiores a E_{bio}^{min} e, conseqüentemente, também inferiores a E_{bio}^{comp} .

Vênus e Júpiter são os únicos corpos do sistema solar que já receberam uma quantidade de energia maior que E_{bio}^{comp} . Mesmo Júpiter possuindo uma distância orbital média muito maior, seu raio é produz uma enorme área de incidência. Marte, com um raio de cerca de metade do valor da Terra, não teve uma incidência de energia

suficiente para alcançar o valor E_{bio}^{comp} .

3.2 Exoplanetas próximos

- Proxima Centauri b

Proxima Centauri é uma estrela tipo M, muito mais fria que o Sol e está distante apenas 4,22 anos-luz de nós. Seu sistema planetário é composto por apenas um exoplaneta: Proxima Centauri b, descoberto em 2016. Com uma massa de 1,27 massas terrestres, sua órbita tem período de 11,2 dias e possui distância orbital média de 0,0485 UA. Proxima Centauri b possui Índice de Similaridade com a Terra 0,87, o que o torna um dos exoplanetas mais similares com a Terra [8].

Encontramos para Proxima Centauri b

$$E_{bio}^{PCb} = 5,04 \times 10^{33} \text{ Joules.} \quad (8)$$

Apesar de $E_{bio}^{PCb} < E_{bio}^{comp}$, trata-se de uma quantidade de energia acima do limite mínimo $E_{bio}^{PCb} > E_{bio}^{min}$.

- GJ 887 b

Descoberto recentemente, em 2020, este exoplaneta possui uma massa de 4,2 massas terrestres e um raio planetário estimado em 1,88 vezes o raio da Terra. Trata-se, portanto, de uma Super Terra. Ele possui órbita com período de 9,3 dias a uma distância orbital média de 0,068 UA. Sua estrela hospedeira, GJ 887, possui massa de $0,49M_{\odot}$, temperatura efetiva de 3688 K e raio $0,47R_{\odot}$. GJ 887 b encontra-se fora da zona habitável de seu sistema.

Encontramos

$$E_{bio}^{GJ887b} = 1,05 \times 10^{36} \text{ Joules,} \quad (9)$$

um valor que excede E_{bio}^{comp} em duas ordens de magnitude.

- Ross 128 b

Este exoplaneta é uma super Terra com $1,4M_{\odot}$ e um raio cerca de 10% maior que o terrestre. Encontra-se distante 11 anos-luz do sistema solar e orbita uma estrela tipo M. Suas propriedades foram estudadas em [9] e há fortes indícios que a formação e a composição de deste exoplaneta sejam bem parecidas com a Terra. O valor de E_{bio} encontrado é

$$E_{bio}^{Ross128b} = 1,41 \times 10^{34} \text{ Joules.} \quad (10)$$

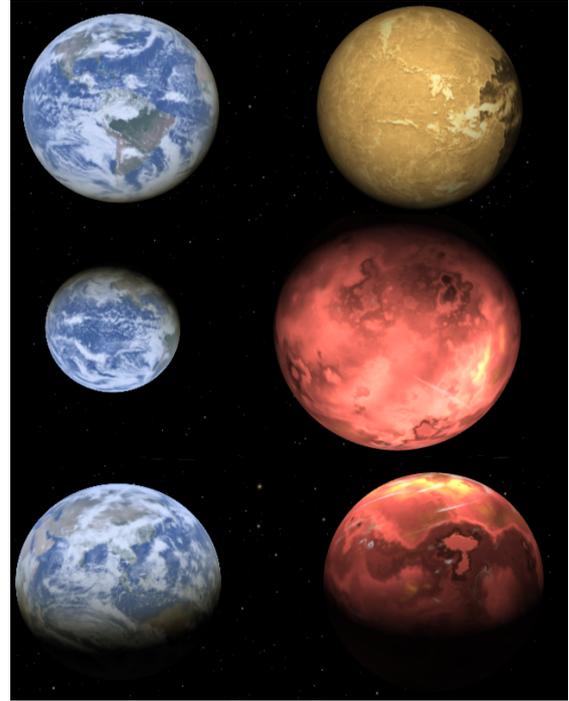


Figura 1: Uma representação hipotética das dimensões comparadas dos exoplanetas Proxima Centauri b (superior), GJ 887 b (meio) e Ross 128 b (inferior) com a Terra. A figura foi composta a partir da visualização obtida no site <https://exoplanets.nasa.gov>.

Assim como no caso de Proxima Centauri b, $E_{bio}^{min} < E_{bio}^{Ross128b} < E_{bio}^{comp}$.

A Figura 1 apresenta uma comparação das dimensões dos planetas Proxima Centauri b, GJ 887 b e Ross 128 b com a Terra que aparece sempre no lado esquerdo desta figura. As representações destes exoplanetas são hipotéticas e forma retiradas de <https://exoplanets.nasa.gov>.

4 Considerações Finais

Fizemos uma rápida revisão da hipótese do tempo evolutivo proporcional proposta recentemente por *Haqq-Misra* [5]. O ponto central aqui é tentar relacionar a quantidade de energia incidente em um planeta com a classificação espectral de sua estrela hospedeira.

Aqui, fizemos a extensão da análise feita em [5] em duas direções. Primeiro, além de calcular a quantidade de energia necessária para o surgimento de vida complexa E_{bio}^{comp} , que leva em conta a incidência de energia na escala de bilhões de anos, também calculamos a quantidade E_{bio}^{min} , o que seria uma medida da quantidade mínima de energia incidente para o surgimento de formas

Tabela 1: Objetos celestes do sistema solar, seu raio, distância orbital média e o valor da energia incidente ao sua superfície.

Objeto	Raio do objeto	$D_{orb}(UA)$	E_{bio} (Joules)	$E > E_{bio}^{comp}$	$E > E_{bio}^{min}$
Mercúrio	0,3829	0,387	$1,6308 \times 10^{34}$	☒	✓
Vênus	0,9499	0,723	$2,8562 \times 10^{34}$	✓	✓
Terra	1	1	$1,66591 \times 10^{34}$	✓	✓
Marte	0,533	1,524	$2,03768 \times 10^{33}$	☒	✓
Júpiter	11,21	5,204	$7,73017 \times 10^{34}$	✓	✓
Saturno	9,45	9,582	$1,62033 \times 10^{34}$	☒	✓
Urano	4,01	19,201	$7,26596 \times 10^{32}$	☒	☒
Netuno	3,88	30,047	$2,77788 \times 10^{32}$	☒	☒
Plutão	0,18	39,44	$3,46995 \times 10^{29}$	☒	☒
Lua	0,27	1	$1,21445 \times 10^{33}$	☒	☒
IO	0,285	5,204	$4,99652 \times 10^{31}$	☒	☒
Europa	0,244	5,204	$3,66233 \times 10^{31}$	☒	☒
Ganimedes	0,413	5,204	$1,04925 \times 10^{32}$	☒	☒
Calisto	0,377	5,204	$8,743 \times 10^{31}$	☒	☒
Titã	0,4	9,582	$2,90309 \times 10^{31}$	☒	☒
Encelados	0,039	9,582	$2,75975 \times 10^{29}$	☒	☒

primitivas de vida. Esse valor assume como referência que a vida na Terra surgiu em uma escala de tempo de 400 milhões de anos. Além de introduzir a quantidade E_{bio}^{min} , também aplicamos o cálculo de E_{bio} para os demais corpos do sistema solar e para dois exoplanetas. Nossos resultados para o sistema solar foram apresentados na tabela 1. Os resultados encontrados para o planeta Vênus são, talvez, os mais interessantes.

Nosso cálculo de E_{bio} para os dois exoplanetas mais próximos da Terra também se revelaram interessantes. E_{bio} calculado para Próxima Centauri b é superior ao limite mínimo E_{bio}^{min} , o mesmo valendo para Ross 128 b. Já o resultado encontrado para o exoplaneta GJ 887 b pode ser um contra-exemplo da hipótese PET defendida em [5] pois, esmo orbitando uma estrela tipo M, seu valor de E_{bio} é cerca de 100 vezes a quantidade de referência para o surgimento de vida complexa.

Finalizamos esse trabalho com algumas ressalvas sobre a interpretação dos nossos resultados. Nosso objetivo aqui foi apresentar como é possível fazer uma introdução ao estudo da astrobiologia com ferramentas teóricas relativamente sim-

ples. Os cálculos apresentados neste artigo deve ser acessíveis a estudantes de graduação. Mesmo com tal simplicidade matemática e computacional, foi possível acompanhar e desenvolver resultados recentes da literatura especializada. A implementação da hipótese PET feita neste trabalho não leva em conta fatores importantes como, por exemplo, a influência do albedo planetário. Aqui, consideramos uma reflexão nula enquanto que o albedo médio terrestre é de 0,3. Ao considerarmos o albedo em nossos cálculos encontraríamos valores para E_{bio} menores. Uma albedo de 0,5 reduziria o valor E_{bio} por um fator 2. Ainda assim teríamos uma boa estimativa da a ordem de magnitude da energia incidente.

Agradecimentos

Gostaríamos de agradecer a Jacob Haqq-Misra, José Antônio de Freitas Pacheco e Beatriz Siffert pelos comentários na fases iniciais desse trabalho. Os autores agradecem a FAPES/CNPq/CAPES e Proppi/UFOP pelo apoio.

Sobre os autores

Hermano Velten (hermano.velten@ufop.edu.br) é docente do departamento de física da UFOP, realiza pesquisas nas áreas de astrofísica, cosmologia e gravitação e bolsista de produtividade em pesquisa do CNPq.

Douglas Delladea Junior (douglas.junior@aluno.ufop.edu.br) é aluno do curso de ciências biológicas da UFOP.

Arthur Primola (arthurprimola@ufmg.br) é aluno do curso de ciências biológicas da UFMG.

Referências

- [1] J. A. de Freitas Pacheco, *Vida no Universo* (EDUSP, São Paulo, 2020).
- [2] E. A. Bell et al., *Potentially biogenic carbon preserved in a 4.1 billion-year-old zircon*, *Proceedings of the National Academy of Sciences* **112**(47), 14518 (2015).
- [3] P. Ward e D. Brownlee, *Rare Earth: Why Complex Life Is Uncommon in the Universe* (Copernicus books, New York, 2003).
- [4] J. Haqq-Misra, R. K. Kopparapu e E. T. Wolf, *Why do we find ourselves around a yellow star instead of a red star?*, *International Journal of Astrobiology* **17**(1), 77–86 (2018).
- [5] J. Haqq-Misra, *Does the evolution of complex life depend on the stellar spectral energy distribution?*, *Astrobiology* **19**(10), 1292 (2019).
- [6] D. O. Gough, *Solar Interior Structure and Luminosity Variations*, *Solar Physics* **74**(1), 21 (1981).
- [7] I. Baraffe et al., *New evolutionary models for pre-main sequence and main sequence low-mass stars down to the hydrogen-burning limit*, *Astronomy & Astrophysics* **577**, A42 (2015).
- [8] D. Schulze-Makuch et al., *A two-tiered approach to assessing the habitability of exoplanets*, *Astrobiology* **11**(10), 1041 (2011).
- [9] D. Souto et al., *Stellar and planetary characterization of the ross 128 exoplanetary system from APOGEE spectra*, *The Astrophysical Journal* **860**(1), L15 (2018).