

Por que a Terra está esquentando?

.....

Diogo Amaral de Magalhães[#]

Instituto Federal Catarinense, Campus São Francisco do Sul, São Francisco do Sul, SC, Brasil.

RESUMO

O objetivo deste trabalho é apresentar uma abordagem acessível sobre as bases científicas do aquecimento global, visando sua intervenção em sala de aula. Para isso, são discutidas as irradiâncias do Sol e da Terra e o aquecimento do planeta em virtude do agravamento do efeito estufa; também é abordada a coleta de dados empíricos pelo programa SORCE. Por fim, é analisado o papel do homem nesse contexto.

Palavras-chave: efeito estufa; aquecimento global; física do clima; corpo negro; programa SORCE

.....

1. Introdução

Nas últimas décadas, cientistas, políticos, empresários e ambientalistas têm discutido a influência do homem sobre as mudanças climáticas do nosso planeta. Um dos aspectos centrais desse debate é o aumento da concentração de gás carbônico na atmosfera terrestre, que absorve radiação infravermelha e, conseqüentemente, agrava o efeito estufa, implicando no aumento da temperatura global.

Esse quadro configura um exemplo do que é chamado, na literatura, de controvérsia científica. O entendimento desse conceito não é consensual, de fato. No entanto, embora não sejam aprofundadas as sutis variações das definições de autor para autor, consideramos, neste trabalho, que um tema controverso acerca da ciência é aquele que promove discussões controversas sobre ela, mesmo que não haja, dentro da própria ciência, divergências contundentes quanto ao entendimento daquele assunto. Com essa posição, o leitor deve entender que existe consenso científico acerca do aquecimento global, mas as discussões que extrapolam a esfera da academia e dos fatos científicos colocam dúvidas sobre a confiabilidade da ciência, dos cientistas e, em particular, dos modelos climáticos, cujos argumentos são baseados nas complexidades do clima da Terra.

A proposta deste artigo é apresentar uma base conceitual para que esse conteúdo seja abordado em sala de aula dos pontos de vista qualitativo e quanti-

tativo. Devido à abrangência e à complexidade do assunto, delimitamos nossa abordagem. Neste artigo, discute-se a física subjacente à ciência do clima, começando pelo conceito de corpo negro e a interpretação dos gráficos de radiação espectral, enfatizando-se aspectos das diferentes faixas do espectro eletromagnético. Em seguida, analisa-se o gráfico da emissão de radiação solar, cujos dados são obtidos pelo satélite SORCE. A energia irradiada pela Terra na forma de calor também é analisada, assim como são enfatizadas as lacunas do seu espectro em virtude da sua absorção pelos gases do efeito estufa. Por fim, explora-se a relação entre o efeito estufa e o aquecimento global, enfatizando-se a discussão controversa acerca da culpabilidade do homem nas mudanças climáticas.

2. Características do espectro eletromagnético

Tudo aquilo que o ser humano é capaz de enxergar é uma fonte primária ou secundária de luz; respectivamente, refiro-me a corpos que emitem luz naturalmente, como as estrelas e as lâmpadas, ou aqueles que somente a refletem, tal como os planetas e nossos corpos. A luz, ou radiação visível, está associada somente a uma pequena faixa

daquilo que é chamado de espectro eletromagnético. Existem outras faixas, como os raios X; os raios gama; a radiação ultravioleta, que pode causar câncer de pele; e a infravermelha, também conhecida como a radiação de calor ou radia-

Nas últimas décadas, temos discutido a influência do homem sobre as mudanças climáticas do nosso planeta. Um dos aspectos centrais desse debate é o aumento da concentração de gás carbônico na atmosfera terrestre, que absorve radiação infravermelha e agrava o efeito estufa, implicando no aumento da temperatura global

[#]Autor de correspondência. E-mail: diogo.magalhaes@ifc.edu.br.

ção térmica.

Os diferentes tipos de radiação eletromagnética têm características e efeitos distintos sobre a Terra e as formas de vida nela presentes. Cada faixa de radiação é caracterizada por um intervalo de frequências Δf ou comprimentos de onda $\Delta \lambda$, que podemos interpretar como suas “impressões digitais”. Essas grandezas relacionam-se segundo a conhecida equação:

$$c = \lambda f,$$

onde c é a velocidade da luz. Ressaltamos que a classificação das ondas não tem fronteiras muito bem definidas, uma vez que diferentes fontes podem produzir ondas em intervalos de frequência que se sobrepõem. A Fig. 1 apresenta o espectro eletromagnético e os respectivos valores peculiares de energia. Tendo em vista a questão que nos propusemos a responder, precisamos entender um pouco sobre a energia característica de cada faixa do espectro. Em particular, estamos interessados na radiação visível e na infravermelha.

Consideremos uma pessoa em um quarto totalmente escuro onde há, em uma das paredes, um pequeno orifício circular pelo qual passa uma barra de ferro a temperatura ambiente, de tal forma que parte da barra fica dentro do quarto e o restante, fora. Considere que nenhum feixe de luz possa passar por esse orifício. Logo, a pessoa não será capaz de enxergar a barra. Suponhamos que a barra, por sua vez, comece a ser aquecida na extremidade que se en-

contra fora do quarto. Com o passar do tempo, a pessoa passará a sentir, pelo tato, o calor irradiado pela barra, mesmo ainda não conseguindo enxergá-la. Se a barra continuar sendo aquecida, após algum tempo será possível enxergar uma coloração avermelhada. Em certas situações, como em siderúrgicas, dependendo de quão grande for sua temperatura, a barra pode apresentar cor azulada.

Esse experimento nos permite fazer uma simples associação entre a energia interna de um corpo, a temperatura de sua superfície e sua visibilidade. Lembremos que a temperatura do corpo, grandeza macroscópica, está associada com a energia interna do corpo, a qual depende do grau de agitação térmica de suas moléculas. À temperatura ambiente (menor temperatura), não é possível enxergar ou sentir a barra pelo tato sem tocá-la. Quanto mais calor é fornecido a esse objeto, sua energia interna aumenta e sua temperatura fica maior. Dependendo da temperatura que a barra atinge, ela é passível de ser percebida pelo tato, por meio de sua irradiação térmica, que corresponde à radiação infravermelha. Por fim, quando ela chega a uma temperatura ainda maior, pode também ser vista. Logo, podemos concluir que a radiação visível

Os diferentes tipos de radiação eletromagnética têm características e efeitos distintos sobre a Terra e as formas de vida nela presentes. Cada faixa de radiação é caracterizada por um intervalo de frequências ou comprimentos de onda, que podemos interpretar como suas “impressões digitais”

carrega mais energia que a radiação térmica. Assim, dizemos que a energia E da onda eletromagnética é maior quanto maior for a frequência f a ela associada.

3. O conceito de corpo negro

Em 1900, Max Planck lançou uma ideia revolucionária para a física, que até então era dominada pelo determinismo clássico. Ao estudar o espectro de radiação de um corpo negro, que é aquele que, grosso modo, é capaz de emitir e absorver radiação em todas as faixas do espectro, ele propôs que a energia E no mundo microscópico é medida de forma discretizada, sendo proporcional à frequência f , de acordo com

$$E = hf = \frac{hc}{\lambda},$$

onde $h = 6,62 \times 10^{-34}$ J.s é a famosa constante de Planck.

Essa relação nos permite visualizar que as ondas maiores, ou seja, aquelas que possuem comprimento de onda grande e, consequentemente, frequências menores, são menos energéticas, ao passo que ondas menores carregam mais energia. Explicitamente, entendemos por que a radiação infravermelha é menos energética que a visível e esta, menos do que a ultravioleta, por exemplo.

Por sua vez, a relação quantitativa entre o fluxo de energia por unidade de área do corpo negro, que também chamamos de radiação R , e a temperatura T da superfície do corpo negro é dada pela lei de Stefan-Boltzmann:

$$R = \sigma T^4 \Rightarrow T = \sqrt[4]{\frac{R}{\sigma}},$$

onde $\sigma = 5,6705 \times 10^{-8}$ W.m⁻² K⁻⁴ é a constante de Stefan-Boltzmann. Conforme será abordado na sequência, o valor de R é obtido experimentalmente, por meio de satélites que ficam acima da atmosfera.

Os exemplos da Fig. 2 ilustram a potência emitida por unidade de área pela superfície de corpos negros a temperaturas de 3700 K e 5800 K. Notamos que o pico do gráfico se desloca para a esquerda à medida que T cresce. Se T diminui, o pico do gráfico fica mais baixo

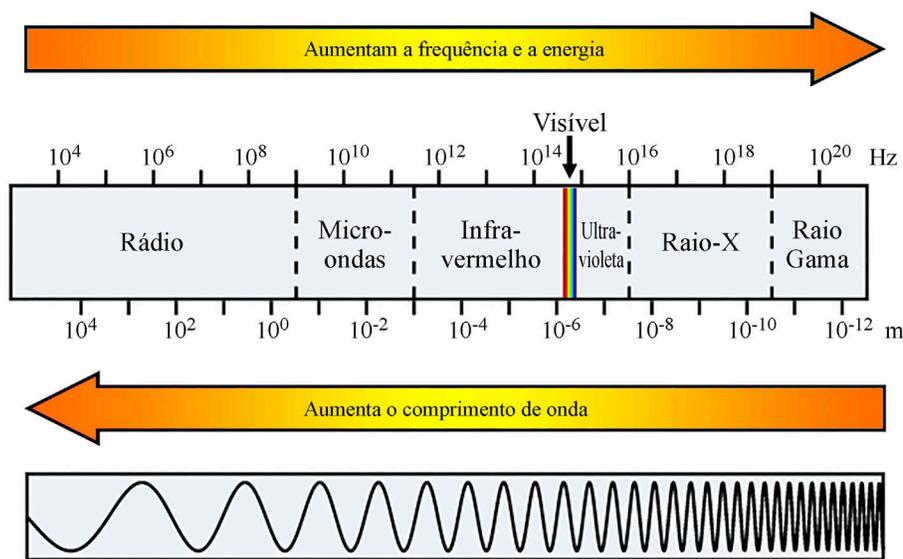


Figura 1 - Representação do espectro eletromagnético. Fonte: adaptada do site PhET, simulação “Moléculas e Luz”.

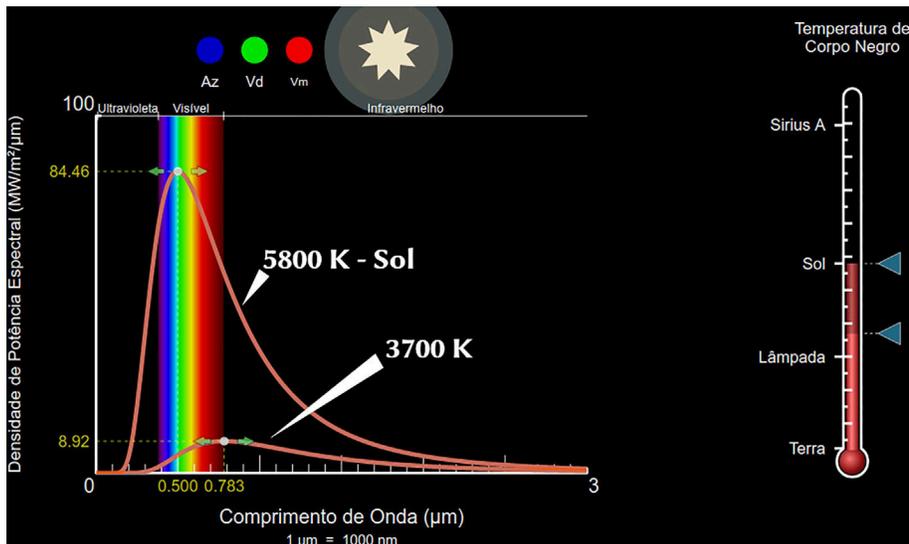


Figura 2 - Gráfico da energia emitida por unidade de comprimento e área por dois corpos a temperaturas de 3.700 K e 5.800 K. Fonte: adaptada do site PhET, simulação “Espectro de corpo negro”.

e se desloca para a direita, indicando uma menor emissão de energia. Observemos também que a emissão de radiação eletromagnética cobre todo o espectro, mas é predominante em uma faixa determinada, de modo que o gráfico fica mais “achatado” quanto maior for sua temperatura.

Observando com atenção o gráfico da radiação do corpo, cuja superfície encontra-se a 5800 K, concluímos que o Sol, em particular, emite radiação de tal forma que a concentração maior da emissão está na região do visível. (Seria, então, uma coincidência enxergarmos somente as cores do violeta ao vermelho?) Embora a luz seja a principal fonte de energia solar, a emissão de radiação térmica é muito significativa, assim como a ultravioleta, que sabemos ter grande impacto nas nossas vidas. Lembremos que o efeito estufa é um processo natural e tem papel crucial na manutenção da vida na Terra. Esse último comentário vai ficar mais claro adiante.

Antes de apresentar os cálculos referentes à absorção e emissão de energia pela Terra, é fundamental que abordemos a questão da coleta de dados, pois eles têm papel crucial nos modelos climáticos que são desenvolvidos pelos cientistas.

4. Como os dados são coletados?

A ciência progride de maneiras peculiares. O processo de construção do conhecimento científico é altamente complexo e depende de diversos fatores, desde a área de especialidade até as crenças pessoais dos cientistas. Mesmo

que discordem entre si – o que é algo comum na ciência –, para avançar, eles se baseiam em certos critérios e metodologias rigorosíssimas, que constituem o método científico. Dessa forma, mesmo que não sejam especialistas em determinado assunto, existe a confiança de que seus pares acadêmicos, então especialistas, avaliaram positivamente alguma hipótese ou modelo segundo um conjunto rigoroso de critérios. O ponto central no desenvolvimento e julgamento da qualidade de uma teoria é, portanto, o confrontamento dessas conclusões ou previsões teóricas com o mundo real.

No que diz respeito ao estudo do clima e suas variações, a complexidade da coleta de dados empíricos é enorme. Embora a proposta do artigo não seja o aprofundamento das modelagens climáticas, é informativo que seja mencionado o programa SORCE (The Solar Radiation and Climate Experiment, ou Experimento de Radiação e Clima Solar), fruto de parceria entre a NASA (National Aeronautics and Space Administration, ou Administração Nacional da Aeronáutica e Espaço) e o Laboratório para Física Atmosférica e Espacial (LASP), da Universidade do Colorado.¹ Trata-se de um pequeno satélite de voo livre projetado para medir a ra-

dição solar incidente no topo da atmosfera da Terra. Veja a Fig. 3 e observe seu tamanho em relação a uma pessoa adulta.

O objetivo principal da missão SORCE é medir, com precisão, a irradiação espectral solar nas faixas do ultravioleta, luz visível e infravermelho. O satélite SORCE orbita a Terra, acumulando dados que são utilizados para modelar a saída de radiação eletromagnética do Sol e para explicar e prever o efeito dessa radiação sobre a atmosfera da Terra e seu clima. Assim, com um conhecimento sólido desse fator natural e seu impacto no clima, os cientistas são capazes de conjecturar acerca do impacto das ações do homem.

A missão consiste em quatro canais ópticos separados: três espectrômetros e um fotômetro. Os instrumentos carregados pelo satélite SORCE são: o monitor de radiação espectral (SIM), o experimento de comparação de irradiação estelar solar (SOLSTICE), o monitor de irradiação total (TIM) e o sistema fotométrico XUV (XPS). Em particular, o TIM mede a irradiação solar total (TSI), usualmente expressa em W/m^2 , grandeza que é crucial para compreendermos o balanço energético Sol-Terra. A título de curiosidade, o TIM faz quatro medidas diárias da TSI, sendo uma a cada seis horas, e sua massa é 7,9 kg. A Fig. 4 contém uma imagem desse instrumento óptico.

Frisemos também que a NASA/GISS (Goddard Institute for Space Studies) não é a única instituição do mundo que faz pesquisas sobre o clima. Outros são o NOAA/NCDC (National Climatic Data Center) e o UEA/CRU (Climatic Research Unit). Já o IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) é o principal organismo mundial de avaliação das mu-



Figura 3 - Satélite SORCE. Fonte: NASA.

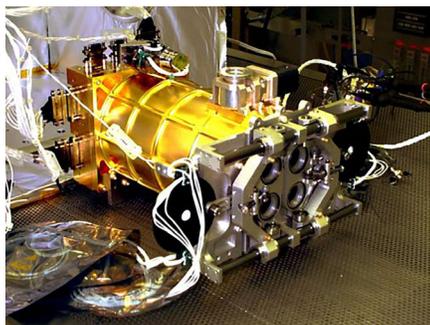


Figura 4 - Monitor de irradiação total (TIM) do programa SORCE, instrumento responsável pela medida da irradiação solar total (TSI). Fonte: LASP-NASA.

danças climáticas, com o objetivo de transmitir informações claras e cientificamente corretas para a sociedade.

5. Dados sobre a irradiância solar

Como é bem conhecido, o Sol é a principal fonte de energia natural que temos a nossa disposição. A potência irradiada por unidade de área pela superfície do Sol, ou simplesmente constante solar, é hoje em dia $R = 1360,61 \text{ W.m}^{-2}$, conforme nos mostra o gráfico da TSI da Fig. 5. No entanto, deve-se considerar esse valor distribuído por toda a superfície da Terra, de forma que $R = 342 \text{ W.m}^{-2}$ é o valor tomado para fins práticos de balanço de energia Terra-Sol [1]. Esse valor será importante mais adiante.

Também é instrutivo analisar gráficos referentes à evolução histórica da irradiação solar total com os alunos, pois trata-se de um fator natural no estudo das mudanças climáticas ao longo

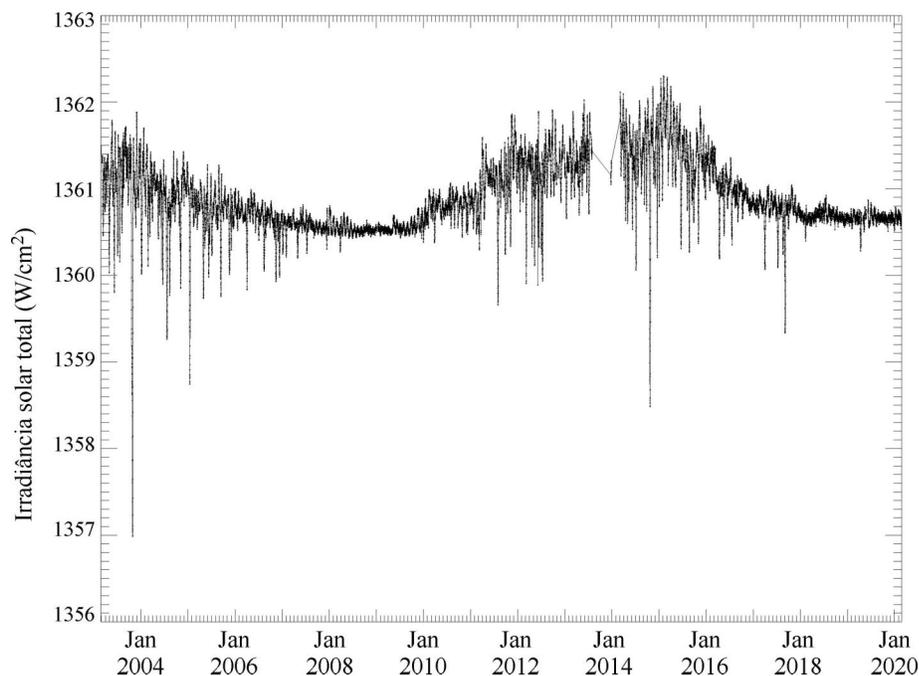


Figura 5 - Irradiância solar total entre janeiro de 2004 e janeiro de 2020, medida pelo TIM a bordo do SORCE. Fonte: adaptada de LASP-NASA.

do tempo. Como mostra a Fig. 6, a TSI sofre variações ao longo do tempo entre $R = 1360 \text{ W.m}^{-2}$ e $R = 1362 \text{ W.m}^{-2}$. Assim, quanto menos energia chega à Terra por unidade de tempo e área, menor é a variação de temperatura global.

Com o valor de R em mãos (TSI), somos capazes de calcular T por meio da Eq. (3), mas são necessárias considerações acerca da área da superfície do Sol e da área de uma esfera relativa à distância entre o Sol e a Terra. Acredito que, embora possível de ser ensinada no Ensino Médio, essa análise possa ser um pouco confusa para esse público

em particular.² A seguir, é apresentada outra maneira de se calcular a temperatura da superfície do Sol. A lei de Wien, por sua vez, oferece a relação entre a temperatura da superfície do corpo negro e o comprimento de onda λ_{max} no qual a radiação emitida é máxima:

$$\lambda_{\text{max}}T = 0,0029.$$

No caso do Sol, o gráfico da Fig. 2 nos mostra que $\lambda_{\text{max}} = 0,5 \mu\text{m} = 5 \times 10^{-7} \text{ m}$. Já o gráfico da Fig. 7 nos fornece o mesmo valor aproximado, porém obtido por satélites. Do ponto de vista didático,

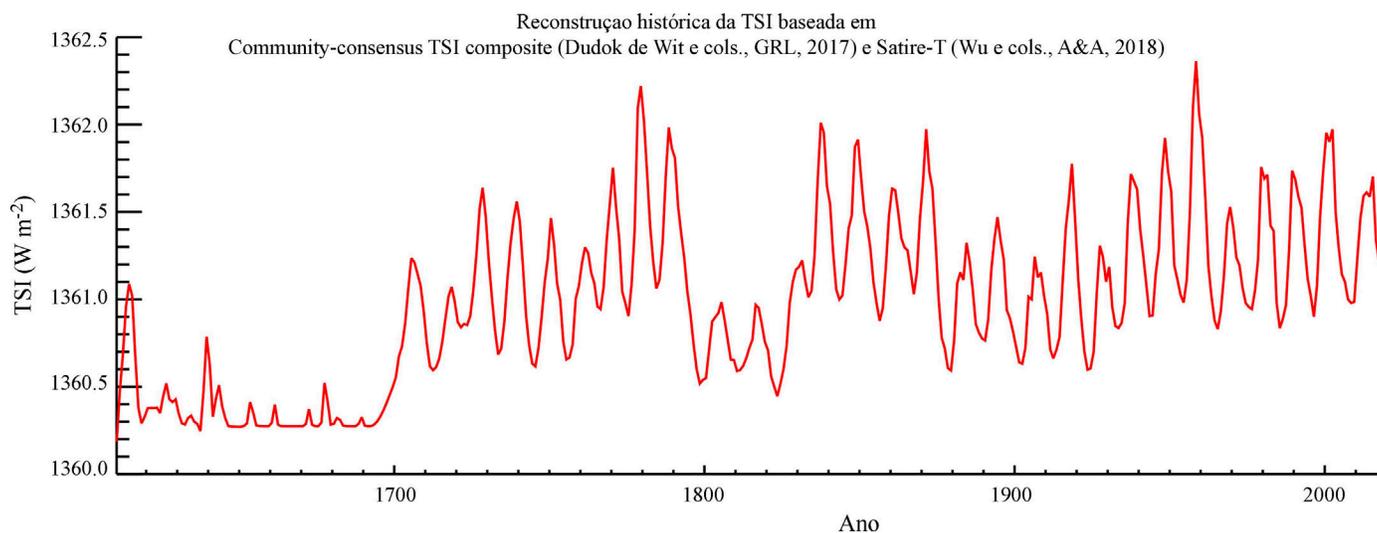


Figura 6 - Reconstrução histórica da irradiação solar total, um fator natural nas mudanças climáticas. Fonte: adaptada de LASP-NASA.

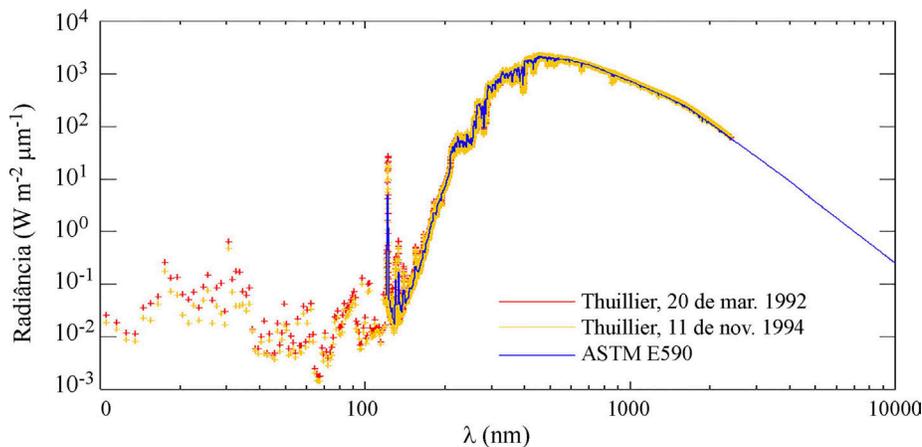


Figura 7 - Irradiação solar em escala logarítmica. Fonte: adaptada de NASA.

é pertinente que ambos sejam mostrados aos alunos, se possível. Logo, a Eq. (4) nos permite concluir que $T_{\text{Sol}} = 5800 \text{ K}$.

Esse comprimento de onda corresponde à cor verde, comprimento de onda no qual a irradiação é máxima. Mas, de fato, não temos um Sol verde porque a luz irradiada pelo Sol é distribuída de maneira mais ou menos uniforme nessa região, o que produz a sensação de luz branca aos nossos olhos.

Analisemos, agora, o gráfico da Fig. 8, que tem um forte apelo didático. A linha preta e irregular indica a energia que é irradiada pela superfície do Sol por unidade de tempo e área. Esses dados são coletados por satélites que ficam acima da atmosfera, de forma que consigam observar a radiação direta proveniente do Sol. Assim, os cientistas conseguem estudar uma informação “limpa”, que vem diretamente da nossa estrela. Já a linha vermelha representa a curva teórica desse espectro, como se o Sol tivesse um comportamento térmico idealizado, como o de um corpo cuja temperatura de superfície é de 5800 K, aproximadamente. Observemos a excelente aproximação entre as evidências e o modelo teórico idealizado de um corpo negro.

6. A Terra e sua radiação térmica

Foi mencionado que a irradiação solar que chega à Terra é $R_{\text{Sol} \rightarrow \text{Terra}} = 342 \text{ W.m}^{-2}$. A aplicação imediata da Eq. (3) indicaria que a temperatura da Terra deveria ser de, aproximadamente, 278 K, se fosse considerada somente a TSI incidente sobre nosso planeta nesse balanço, o que seria um absurdo. Obviamente, sabemos que a Terra é muito mais complexa do que isso. De fato, como aponta o relatório do IPCC [1], a radiação infravermelha emi-

tida pela Terra, e que é medida acima da atmosfera, é aproximadamente, $R_{\text{medida}} = 239 \text{ W.m}^{-2}$, o que implicaria em uma temperatura aproximada de 254 K; nesse caso, estamos considerando o albedo.³ No entanto, esse valor também representa o valor correto da temperatura superficial do planeta. Vejamos.

A própria Terra tem seus processos naturais combinados entre superfície do planeta e atmosfera, que influenciam na quantidade de energia térmica que é irradiada para o espaço; há também a eventual contribuição do homem. Para fins didáticos, é pertinente que omitamos esses detalhes (neste artigo) e assumamos que o valor da temperatura da superfície da

Terra considerado atualmente é $T_{\text{Terra}} = 288 \text{ K} = 15 \text{ °C}$ – ou temperatura global, simplesmente. Portanto, considerando a diferença $\Delta T = 288 - 254 = 34 \text{ K} = 34 \text{ °C}$, é preciso compreender por que a Terra possui uma temperatura maior do que deveria ter, em princípio. Analisemos tudo isso, sugerindo a leitura da Ref. [3] como texto complementar sobre o assunto.

Primeiramente, o gráfico didático da emissão de radiação infravermelha pela Terra (Fig. 9), diferentemente do Sol, que irradia principalmente na faixa do visível, mostra-nos que a radiação da Terra encontra-se exclusivamente na região do infravermelho, que é a radiação do calor. Em outras palavras, a Terra recebe ondas em várias faixas de frequência, especialmente com comprimentos de ondas mais curtos (visível e ultravioleta), mas irradia exclusiva-

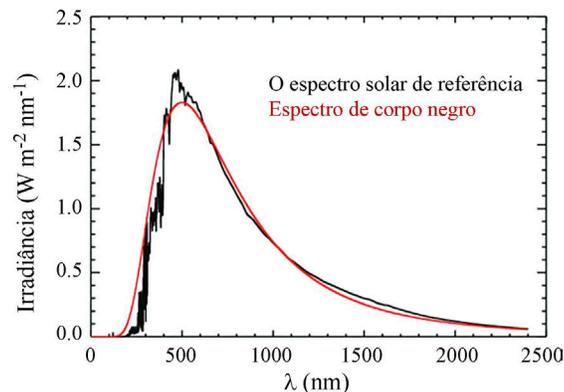


Figura 8 - Espectro de radiação solar medida por satélite (linha preta irregular) e espectro de corpo negro a 5800 K (linha vermelha contínua). Fonte: adaptada da Ref. [2].

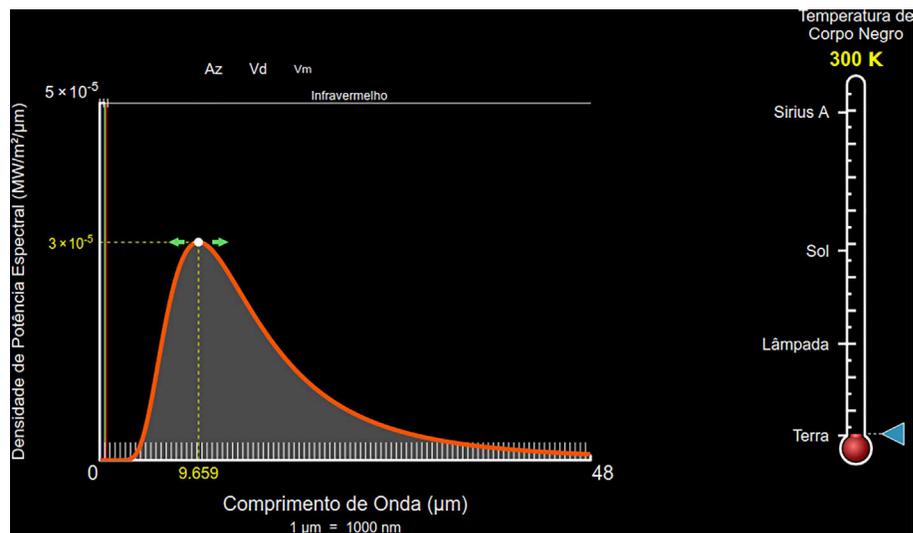


Figura 9 - Idealização da radiação espectral da Terra como um corpo negro a 300 K. Fonte: adaptada do site PhET – simulação “Espectro de corpo negro”.

mente ondas maiores, situadas na faixa infravermelha do espectro eletromagnético.

Didaticamente, é interessante que se aborde a questão da interação entre cada tipo de radiação incidente sobre a Terra com os gases do efeito estufa. Como o trabalho com gráficos ao longo deste artigo vem sendo exaustivo, além dos próprios benefícios pedagógicos proporcionados pelos simuladores de experimentos virtuais, em particular do PhET, o simulador “Moléculas e luz” permite que se trabalhe a espectroscopia dos gases do efeito estufa em uma outra perspectiva, muito mais investigativa, inclusive. No exemplo ilustrado na Fig. 10, uma molécula de ozônio é quebrada ao interagir com radiação ultravioleta. De fato, essa ilustração pode potencializar o entendimento do efeito estufa como um processo natural e necessário para a manutenção da vida na Terra.

Por fim, quando analisamos a irradiância total da Terra [4], observamos que existem algumas lacunas, o que não acontecia com o Sol (Fig. 11). Essas lacunas correspondem à absorção de radiação térmica por parte dos gases do efeito estufa, em diferentes regiões (comprimentos de onda) e intensidades. Em outras palavras, a explicação científica nada mais é que “um roubo” cometido por esses gases, um “roubo” de energia térmica. E quanto mais calor for retido na atmosfera terrestre, maior será sua temperatura. Desse modo, se não houvesse nenhuma absorção de radiação de calor pelos gases do efeito estufa, os satélites deveriam medir algo parecido com a linha vermelha contínua desse gráfico, levando-se em conta somente os fatores naturais do efeito estufa, como a variação da própria TSI e a vaporização da água, por exemplo.

Se a linha suave vermelha do gráfico da Fig. 11 representa a energia que deveria ser medida pelo satélite e a linha rabiscada preta indica os dados reais, concluímos que alguém está absorvendo essa outra quantidade de energia, representada pelas lacunas do gráfico. Cada uma delas corresponde à defasagem de energia devida à absorção de um determinado gás do efeito estufa. Trata-se de uma simples aplicação do princípio de conservação da energia. Notamos que a defasagem central diz respeito à absorção de radiação infravermelha pelo gás carbônico. As laterais correspondem à absorção de energia térmica pelo vapor de água. E temos também os roubos devidos ao

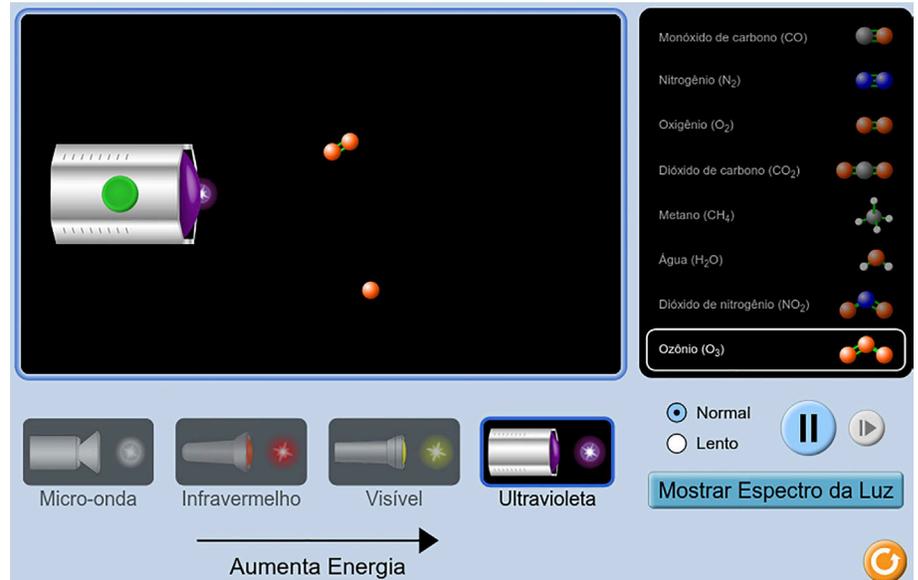


Figura 10 - Simulador de interação entre radiação e matéria didaticamente utilizado para ilustrar a absorção dos diferentes tipos de energia eletromagnética por cada gás do efeito estufa. Fonte: adaptada do Phet, simulação “Moléculas e luz”.

metano e ao ozônio. Essas afirmações podem ser verificadas com o simulador “Moléculas e luz”, do PhET.

7. Efeito estufa, aquecimento global e o papel do homem

O conceito de efeito estufa, conforme foi discutido, nada mais é que uma abordagem para explicar a diferença

entre a temperatura observada e a estimada pelos modelos climáticos. E toda a questão controversa em torno do efeito estufa e do aquecimento global começa aqui: com o aumento da concentração de gás carbônico na atmosfera, até que ponto somos responsáveis pelos efeitos do aumento da temperatura média global e suas consequências sobre o

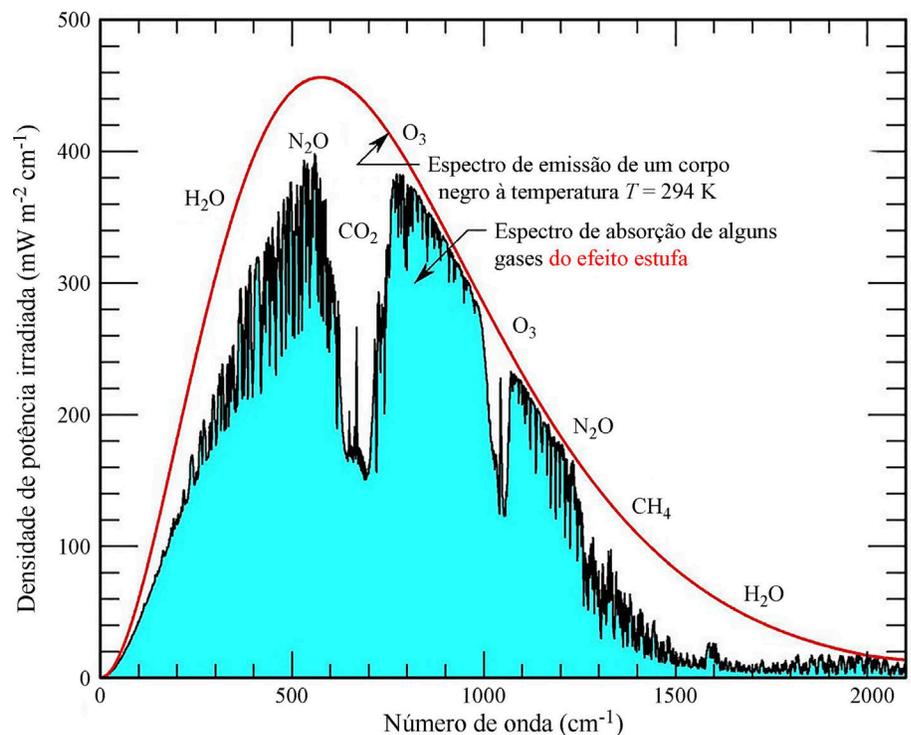


Figura 11 - Radiância espectral da parte superior da atmosfera da Terra. Parte da radiação infravermelha é absorvida pelos gases do efeito estufa. Fonte: adaptada da Ref. [4].

ambiente?

O gráfico da Fig. 12 mostra a evolução da concentração de dióxido de carbono na atmosfera ao longo de 50 anos, até 2010. Trata-se de um crescimento praticamente linear. Uma maneira de constatar o efeito desse aumento é analisar os gráficos de anomalias de temperatura da Terra (Fig. 13). Se compararmos o período de 1960 até 2010, é notória a semelhança de tendência do aumento da concentração de CO₂ com o aumento de temperatura observado (linha preta) – ou anomalia de temperatura – e com o aumento descrito por modelos que levam em conta os fatores antropogênicos e os naturais de forma conjunta (faixa rosa). Por outro lado, os modelos que somente consideram os fatores naturais não são capazes de descrever os dados climáticos observados.

O ex-vice-presidente dos EUA Al Gore, em 2006, protagonizou um documentário que ficou mundialmente conhecido sobre o aquecimento global, intitulado *Uma verdade inconveniente*.⁴ A principal mensagem que buscou passar foi a da necessidade de conscientização da humanidade para os perigos reais e imediatos do aquecimento do planeta, que está diretamente relacionado com o aumento da emissão de dióxido de carbono na atmosfera. Nesse sentido, é fundamental a compreensão de que existe consentimento científico acerca desse aquecimento. Naomi Oreskes, por exemplo, afirma que “sem divergências substanciais, os cientistas avaliam que as atividades humanas estão aquecendo a superfície da Terra” [6]. Para finalizar este artigo introdutório à temática do aquecimento global, do efeito estufa e das mudanças climáticas, destaco a importância de o professor interessado nesse assunto conhecer um pouco das nuances epistêmicas desse debate, passando pela natureza da construção do conhecimento científico e das complexidades da ciência dos modelos climáticos. A interpretação de gráficos será

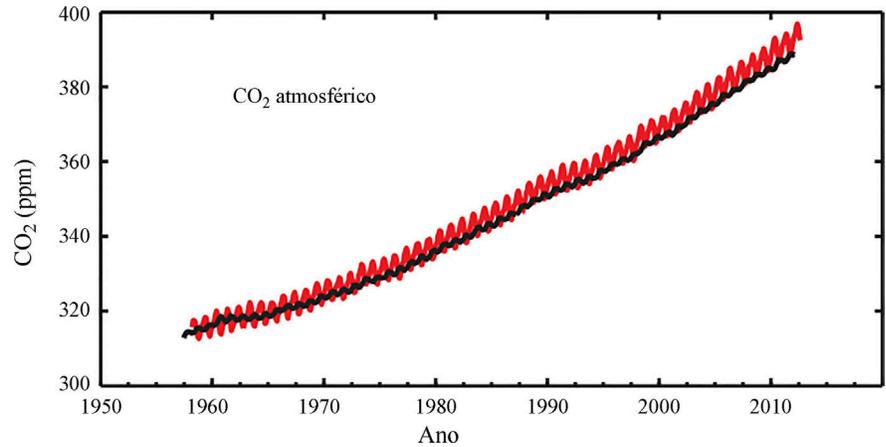


Figura 12 - Evolução da concentração de gás carbônico na atmosfera entre 1960 e 2010, aproximadamente. Fonte: IPCC [5].

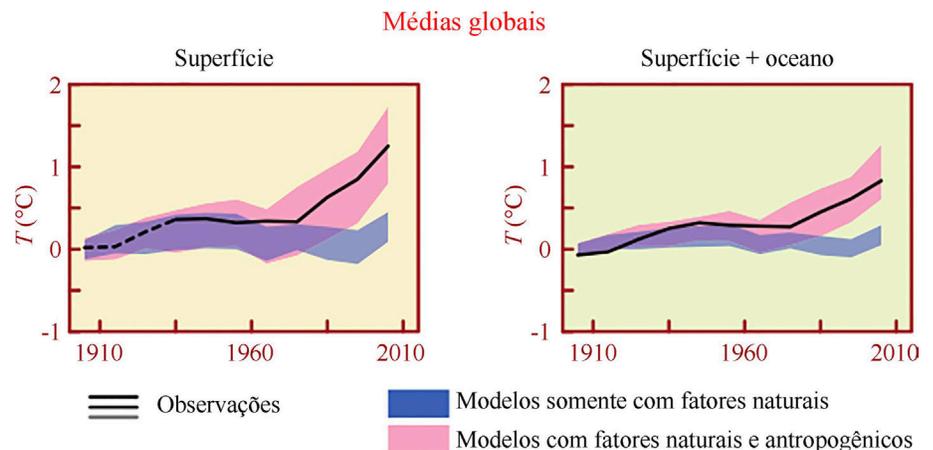


Figura 13 - Anomalias de temperatura da Terra e da Terra em conjunto com o oceano. Fonte: IPCC [5].

bastante exigida por parte dos alunos, devendo ser motivada pelo professor, em especial no entendimento conjunto de todos eles, ou seja, na análise das correlações entre eles. Também destaco o uso dos simuladores virtuais do PhET, uma poderosa ferramenta pedagógica, em especial durante as atividades remotas, que potencializam o papel ativo dos estudantes e o desenvolvimento de “faro” científico. Por último, e não me-

nos importante, enfatizo a necessidade de se ter um conhecimento um pouco mais profundo sobre temas dessa especificidade, algo que vai muito além do livro didático e dos currículos atuais. É um esforço pela física e para seu ensino que vale a pena!

Recebido em: 20 de Outubro de 2020

Aceito em: 28 de Outubro de 2020

Referências

- [1] D.L. Hartmann, A.M.G. Klein Tank, M. Rusticucci, L.V. Alexander, S. Brönnimann, Y. Charabi, F.J. Dentener, E.J. Dlugokencky, D.R. Easterling, A. Kaplan, B.J. Soden, P.W. Thorne, M. Wild and P.M. Zhai, in *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, editado por T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley. (Cambridge University Press, Cambridge, 2013).
- [2] J.M.R. Gómez, F. Carlesso, L.E. Vieira, L. Silva, *Rev. Bras. Ens. Fís.* **40**, 3 (2018).
- [3] D.A. Magalhães, *Rev. Bras. Ens. Fís.* **36**, 4 (2014).
- [4] G. Schmidt, *Taking the Measure of the Greenhouse Effect*. Disponível em https://www.giss.nasa.gov/research/briefs/schmidt_05. 2010.
- [5] IPCC, in: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, edited by T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P. M. Midgley (Cambridge University Press, Cambridge, 2013).
- [6] N. Oreskes, *Sci.* **306**, 5702 (2004).

Notas

¹Link do programa: <https://lasp.colorado.edu/home/sorce/>.

²A distância entre o Sol e a Terra é chamada de unidade astronômica (UA) e tem o valor aproximado de $1,5 \times 10^{11}$ m. Assim, na Eq. (3), deve-se considerar a fração R_{Sol}^2/UA^2 , entre o raio do Sol e a distância astronômica, o que nos leva ao valor aproximado de T . Também se pode obter R ao considerar T conhecida.

³No caso da Terra, o albedo é 0,3 ou 30% e representa a fração da radiação solar que é refletida pela superfície do planeta [5].

⁴Vínculo do documentário no YouTube: <https://www.youtube.com/watch?v=MwxMrnDkbPU>. O segundo documentário, “Uma verdade mais inconveniente”, pode ser acessado em <https://www.youtube.com/watch?v=pjzlwsc3aZI>.