

A vida média do CO₂ na atmosfera terrestre e o aumento de temperatura no horizonte 2050

José Antônio de Freitas Pacheco

Observatoire de la Côte d’Azur

Resumo

Neste trabalho é apresentado um modelo simples da evolução do nível de CO₂ na atmosfera terrestre. Usando dados disponíveis das emissões de CO₂ devidas a atividade humana e considerando uma estocagem do carbono por mecanismos agindo na biosfera, o tempo médio de residência do CO₂ na atmosfera foi estimado em 120 anos. Supondo que a tendência observada nas emissões do CO₂ sejam mantidas, a extrapolação dos resultados do modelo indicam no horizonte de 2050 uma concentração de CO₂ da ordem de 513 ppm e um aumento de +2,6°C na temperatura global, acima do limite estabelecido pelo acordo de Paris.

Abstract

In this work a toy model is presented describing the evolution of the CO₂ level in the Earth’s atmosphere. Using present data on the CO₂ emission resulting from the human activity and carbon stockage by mechanisms acting in the biosphere, the average lifetime of CO₂ in the atmosphere was estimated to be 120 years. If the emission rate behavior observed in the last decades is maintained, our model predicts around 2050 a CO₂ concentration of 513 ppm and a temperature increase of +2,6°C above the limit fixed by the Paris agreement.

Palavras-chave: Ciclo do carbono, aquecimento global, dióxido de carbono

Keywords: carbon cycle, global warming, carbon dioxide

DOI: [10.47456/Cad.Astro.v6n1.47716](https://doi.org/10.47456/Cad.Astro.v6n1.47716)

1 Introdução

A concentração do dióxido de carbono (CO₂) na atmosfera terrestre é um dos fatores determinantes na definição das condições climáticas do nosso planeta. Juntamente com o metano (CH₄) e o vapor de água (H₂O), eles constituem os principais gases responsáveis pelo efeito estufa, mecanismo sem o qual seria impossível manter a água no estado líquido na superfície da Terra [1].

Os eventos meteorológicos extremos ocorridos recentemente, inundações no sul do Brasil, sul da Espanha ou no norte da França, bem como episódios de seca prolongada na Amazônia e incêndios florestais incontroláveis na Grécia, na Califórnia ou no Pantanal, são evidências da evolução do clima terrestre em escala global. Tais mudanças representam um risco importante para a sobrevivência da espécie humana. Na conferência sobre mudanças climáticas organizada pela ONU em Paris em 2015, houve um acordo entre 196 países, visando uma redução nas emis-

sões de CO₂, o principal agente do efeito estufa, para limitar o aumento da temperatura média global em, no máximo, +1,5°C no horizonte de 2050. Tal meta dificilmente será atingida e, provavelmente será ultrapassada, pois se a emissão de CO₂ em escala mundial sofreu uma ligeira queda durante a pandemia do Covid-19 em 2019-2020, houve uma retomada econômica nos países motores da produção e do comércio mundial, caso da China e Estados Unidos, com um consequente aumento das emissões de CO₂. Por outro lado, o recém-empossado governo dos EUA retirou-se (pela segunda vez) do acordo de Paris, o que representa um obstáculo adicional para que a meta de +1,5°C não seja ultrapassada, sobretudo porque outros líderes populistas europeus pensam agora em renegociar o *green deal* estabelecido pela União Europeia. O ceticismo climático da nova administração dos EUA está afetando agora diretamente a NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration), um dos principais institutos de pesquisas climáticas do

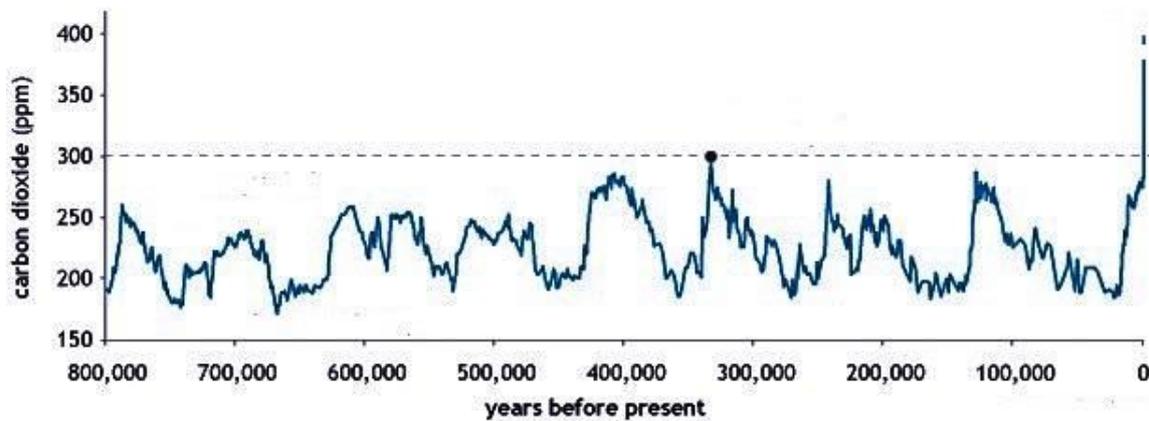


Figura 1: Variação do nível do CO₂ atmosférico nos últimos 800.000 anos medida na camada de gelo na Antártica. Figura produzida pela NOAA.

mundo, o que poderá prejudicar inúmeros projetos de observação da Terra e as colaborações internacionais.

Neste artigo, através de um modelo simples, será examinado o ciclo do carbono (CO₂), visando entender sua evolução, em particular após o início do século 20, quando fontes resultantes da ação humana passaram a contribuir de forma significativa em relação as fontes naturais. O tempo de residência do CO₂ na atmosfera pode ser estimado, bem como a concentração esperada deste gás em 2050 se as tendências atuais forem mantidas. O nível de CO₂ previsto pelo modelo implica em um aumento de +2,6°C da temperatura global, caso de um cenário catastrófico, segundo o GEIC.

2 O ciclo do carbono

Em escalas geológicas, a concentração do CO₂ atmosférico é controlada pelo ciclo geoquímico conhecido como silicato-carbonato, descrito pelas reações de Urey [2]. Na presença de água e de rochas contendo silicatos, o CO₂ através do intemperismo reage com os silicatos formando carbonatos, processo que reduz o nível de CO₂ na atmosfera. A eficiência de tal processo depende, entre outros fatores, da temperatura da superfície. Os carbonatos assim formados são reciclados no manto terrestre, via mecanismos de subducção entre placas tectônicas. Uma vez reciclado, parte do CO₂ retorna a atmosfera através do vulca-

nismo e da desgaseificação de rochas magmáticas. A taxa atual estimada de emissão do CO₂ por estes processos é da ordem de 0,33 Gt/ano (Gt = giga tonelada), compensando praticamente o sequestro do CO₂ pelo intemperismo e mantendo um estado quase estacionário [3].

Durante a era pré-industrial, a concentração do CO₂ atmosférico manteve-se em um nível da ordem de 280 ppm (ppm = partes por milhão). A Figura 1 mostra a evolução da concentração do CO₂ atmosférico nos últimos 800.000 anos, obtida através da análise de bolhas de ar presentes na camada de gelo antártico.

Através de uma simples inspeção da Figura 1 verifica-se que a concentração do CO₂ oscila entre 180-280 ppm, provavelmente devido a variações seja no intemperismo, seja na atividade vulcânica, mas jamais ultrapassando o limite de 300 ppm, alcançado uma única vez cerca de 320.000 anos atrás. Deve-se notar, igualmente, o aumento brusco do nível do CO₂ na era atual devido a ação humana.

Atualmente, a emissão de CO₂ devido as atividades humanas é da ordem de 49 Gt/ano, ou seja, cerca de 150 vezes a emissão natural devido ao vulcanismo e desgaseificação de rochas. O intemperismo, como mecanismo de sequestro do CO₂, implica em escalas de tempo da ordem de 10⁴ – 10⁵ anos, por demais longas para controlar as taxas de emissão atuais.

Um mecanismo de destruição do CO₂ atmosférico frequentemente mencionado é a fotodissociação

ção pela radiação UV solar. No entanto, a radiação UV é fortemente absorvida pela camada de ozônio, o que reduz consideravelmente a eficiência de tal mecanismo. Desta forma, a fotodissociação por si implica em escalas de sobrevida para o CO₂ da ordem de alguns séculos, muito maior do que a sobrevida resultante dos mecanismos de sequestro presentes na biosfera, que discutiremos em seguida.

Um dos principais mecanismos de captura e de armazenamento do CO₂ na biosfera é a fotossíntese realizada pelos vegetais. Nesse processo, o CO₂ interage com a água sob a ação da radiação solar, produzindo orgânicos como a glucose e liberando oxigênio. Durante a noite, na ausência de luz, o processo inverso (respiração) ocorre, quando moléculas orgânicas complexas se dissociam, liberando CO₂ e energia, utilizada geralmente para formar moléculas de ATP (trifosfato de adenosina). Em geral, no balanço entre fotossíntese e respiração, estima-se uma taxa de sequestro de CO₂ da ordem de 11 Gt/ano [4]. Além das florestas, os oceanos absorvem o CO₂, onde as algas e o plâncton realizam processos de fotossíntese e de respiração, correspondendo a um sequestro adicional do CO₂ da ordem de 9-11 Gt/ano [5]. Desta forma, o sequestro de CO₂ pela biosfera corresponde a uma taxa total da ordem de 20-22 Gt/ano. É evidente que a deflorestação e a acidificação dos oceanos diminui a capacidade de sequestro e, portanto, de controle do nível de CO₂ na atmosfera, contribuindo para o reaquecimento do clima. Notar que a taxa atual de emissão (49 Gt/ano) é mais que o dobro da taxa de sequestro pela biosfera, o que explica o aumento contínuo da concentração do CO₂.

3 Modelo considerado

A evolução do nível atmosférico do CO₂ pode ser estimada através de um modelo simples, caracterizado pela equação diferencial abaixo:

$$\frac{dM_C}{dt} = P - \frac{M_C}{T} \quad (1)$$

Em outras palavras, a taxa de variação da massa total do CO₂ atmosférico M_C é igual a taxa de emissão pelos mecanismos devidos à ação humana, deduzida da taxa de sequestro pela biosfera, caracterizada pelo tempo de vida T .

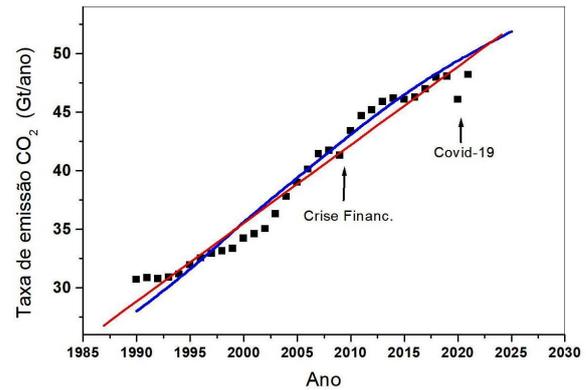


Figura 2: Taxa de emissão anual de CO₂ em giga toneladas por ano segundo o WRI (World Resources Institute). As curvas em azul e em vermelho indicam as representações usadas para extrapolar os dados até 2050.

Introduzindo-se a concentração do CO₂ como a razão entre o número destas moléculas e aquele definindo as moléculas da atmosfera, isto é:

$$X_C = \frac{M_C/\mu_C}{M_a/\mu_a} \quad (2)$$

onde $\mu_a = 28,97$ e $\mu_c = 46$ são respectivamente as massas moleculares das componentes atmosféricas (essencialmente nitrogênio e oxigênio) e do CO₂, enquanto $M_a = 5,14 \times 10^{18}$ kg é a massa da atmosfera. Substituindo (2) na (1) obtemos:

$$\frac{dX_C}{dt} = \frac{P\mu_a}{M_a\mu_C} - \frac{X_C}{T} \quad (3)$$

A solução numérica de (3) requer o conhecimento da taxa de emissão P do CO₂. Na Figura 2 mostra-se os dados anuais de emissão do CO₂ em Gt/ano entre 1990 e 2024, obtidos do World Resources Institute. Estão indicados na figura dois eventos importantes nos quais houve uma queda na atividade humana em escala mundial e uma conseqüente redução na taxa de emissão do CO₂. Tais eventos são respectivamente a crise financeira de 2008 e a pandemia do Covid-19 em 2019-2020. Além destes eventos excepcionais, nota-se que a evolução da taxa de emissão não aumenta no mesmo ritmo, mostrando frequentes inflexões ligadas a variações na atividade industrial e agropecuária.

Para poder extrapolar a solução numérica da (3) até 2050, dois métodos foram utilizados para representar a taxa de emissão além de 2024. No primeiro, uma simples extrapolação linear foi con-

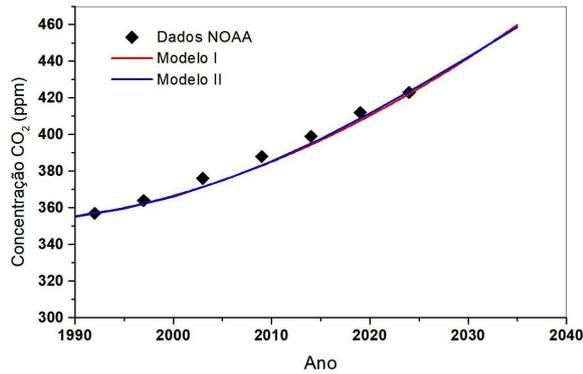


Figura 3: Variação da concentração do CO₂ em ppm (partes por milhão) obtidas a partir do site da NOAA, baseadas em observações obtidas no Observatório de Mauna-Kea (Havai). As curvas contínuas correspondem as duas representações matemáticas discutidas no texto. No período 1990-2024 coincidem, começando a diferir a partir de 2040.

siderada (curva em vermelho na Figura 2), enquanto no segundo (curva em azul), foi utilizado um método mais elaborado, que leva em conta as diferentes inflexões na curva de emissão. Na solução numérica da equação (3), entre os anos 1990 e 2024 os dados de emissão foram utilizados diretamente e interpolados. O valor de T foi modificado até que o melhor ajuste com as observações do nível de CO₂ atmosférico (ver Figura 3) fosse obtido. Nestas condições, o valor obtido foi $T = 120$ anos, ou seja, um pouco mais de um século.

A massa atual de CO₂ atmosférico é aproximadamente 3120 Gt e utilizando-se a vida média obtida, pode-se estimar a taxa atual de sequestro pela biosfera, que corresponde a 26 Gt/ano. Este valor é perfeitamente compatível com a taxa de captura inferida por outros métodos que, como vimos anteriormente, é da ordem de 20-22 Gt/ano.

Na Figura 3 é igualmente mostrada a variação do nível do CO₂ no período 1990-2024 usando-se as representações matemáticas da taxa de emissão mencionadas anteriormente. As soluções não se distinguem nesse intervalo, coincidindo com a solução obtida diretamente da interpolação dos dados existentes.

No horizonte de 2050, a solução obtida com $T = 120$ anos e uma extrapolação linear da taxa de emissão, indica que a concentração esperada de CO₂ seria da ordem de 521 ppm, enquanto a segunda solução indica um valor da ordem de 504

ppm, ou seja, diferindo de apenas 3,3% da solução linear. Usando tais resultados sobre o nível esperado do CO₂ atmosférico em 2050, o aumento esperado da temperatura pode ser estimado através da relação (ver, por exemplo, Ref. [6]):

$$\Delta T = \lambda \ln \left(\frac{X_C}{X_0} \right) \quad (4)$$

onde X_C é a concentração do CO₂ na época considerada e X_0 é um valor de referência, geralmente tomado na época pré-industrial, isto é, 280 ppm. O parâmetro λ pode ser interpretado da seguinte maneira – supondo-se que a concentração de CO₂ na atmosfera varie de forma exponencial, pode-se determinar através das observações a variação de temperatura ΔT_d quando a concentração de CO₂ dobra em relação ao valor de referência. Neste caso $\lambda = \Delta T_d / \ln 2$. Diferentes estimativas indicam $\Delta T_d \sim +2C$ a $+4C$. Adotando um valor intermediário, isto é, $\Delta T_d = +3C$, obtemos $\lambda = +4,3C$. Nestas condições, se em 2050 a concentração de CO₂ atingir o valor de 513 ppm, como sugere o presente modelo, então pela (4), devemos esperar um aumento de temperatura de $+2,6C$.

4 Conclusões

O modelo simples para a evolução do nível de CO₂ na atmosfera apresentado neste trabalho permite uma discussão sobre vários aspectos do aquecimento climático. Primeiramente, uma estimativa do tempo de vida do CO₂ na atmosfera, um dos principais contribuidores do efeito estufa. Os dados atuais indicam uma vida da ordem de 120 anos, que depende essencialmente dos mecanismos de sequestro presentes na biosfera. Um aumento contínuo da deflorestação e da acidez dos oceanos produzirá uma maior permanência do CO₂ na atmosfera e um conseqüente aumento da temperatura. Um tempo de vida de 120 anos implica em uma taxa atual de captura do CO₂ da ordem de 26 Gt/ano, comparável aos valores obtidos de forma independente através de outros procedimentos.

Mantido o aumento das emissões de CO₂ constatado nos últimos anos, bem como a taxa de sequestro pela biosfera, o modelo prevê uma concentração da ordem de 513 ppm no horizonte de

2050 e um aumento médio da temperatura global de +2,6 °C, acima da meta fixada pelo acordo de Paris.

Se a temperatura global aumentar de +2,6 °C, o Brasil deverá passar por inúmeros desafios, em particular na região amazônica. As secas prolongadas e as temperaturas elevadas são fatores que favorecem os incêndios florestais. Tal processo de deflorestação contribui para um aumento da concentração do CO₂, da temperatura e o mais grave, o balanceamento do ciclo biológico da vegetação pode ser alterado, com a emissão de CO₂ pela respiração ultrapassando a absorção pela fotossíntese. A perda de 30-40% da floresta amazônica representa um ponto crítico além do qual a região se transformará em uma savana, alterando o ciclo de chuvas regional.

As ondas de calor se tornarão mais frequentes, principalmente no nordeste e as temperaturas em cidades como Fortaleza ou Recife poderão alcançar valores limites para a vida humana (temperaturas de bulbo húmido superiores a 35°C). As secas serão prolongadas, causando fortes movimentos migratórios. No sul e sudeste, grandes capitais como São Paulo, Rio de Janeiro, Curitiba sofrerão com fortes tempestades e inundações, como recentemente ocorrido em Porto Alegre. Por outro lado, um aumento de +2,6 °C na temperatura global no horizonte de 2050 pode representar um aumento da ordem de 30-40 cm no nível do mar, podendo causar problemas para algumas cidades costeiras como Recife e Salvador.

A alteração do regime de chuvas causará sérios problemas para a economia nacional uma vez que cerca de 60% da energia produzida no país é de origem hidroelétrica e o agronegócio representa uma parte importante da riqueza brasileira. Não se pode excluir a necessidade de um racionamento de água em grandes centros urbanos como a crise no abastecimento ocorrida em São Paulo em 2014–2015.

Em outras palavras, com tal aumento de temperatura no horizonte de 2050, o Brasil poderá ser afetado por uma combinação de crises ligadas ao ambiente, a economia e de origem migratória. O país necessita desenvolver urgentemente uma política de adaptação climática, incluindo a proteção da Amazônia, investimentos em energias renováveis, planificação do uso e proteção das reservas de água potável, bem como na preparação

do processo migratório.

5 Nota aos leitores

Os parágrafos sobre consequências para o Brasil se a temperatura aumentar de +2,6 °C em 2050 teve assistência de IA. Após introduzir informações quanto a variação de temperatura, concentração do CO₂ atmosférico na data em questão e cenários alternativos face a tais parâmetros desenvolvidos pelo IPCC 2000, a IA, especificamente para o Brasil, indicou os principais problemas mencionados acima.

Sobre o autor

José Antônio de Freitas Pacheco (pacheco@oca.eu) é Professor Emérito do Observatoire de la Côte d'Azur (OCA), na França. Formado na Universidade de São Paulo (USP), foi diretor do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da USP, do Observatório Nacional, e do próprio OCA. Membro da Academia Brasileira de Ciências, foi agraciado com a medalha do Mérito Científico do Governo Brasileiro. Possui mais de 200 artigos científicos publicados, tendo sido orientador de mais de 20 doutorandos, tanto no Brasil quanto na Europa. Autor do livro *Vida no Universo*, publicado pela EDUSP.

Referências

- [1] T. R. Anderson, E. Hawkins e P. D. Jones, *CO₂, the greenhouse effect and global warming: from the pioneering work of Arrhenius and Callendar to today's Earth System Models*, *Endeavour* **40**(3), 178 (2016).
- [2] J. C. G. Walker, P. B. Hays e J. F. Kasting, *A negative feedback mechanism for the long-term stabilization of Earth's surface temperature*, *Journal of Geophysical Research: Oceans* **86**(C10), 9776 (1981).
- [3] N. E. Batalha et al., *Climate cycling on early Mars caused by the carbonate–silicate cycle*, *Earth and Planetary Science Letters* **455**, 7 (2016).

- [4] P. Friedlingstein et al., *Global Carbon Budget 2022*, *Earth System Science Data* **14**(11), 4811 (2022).
- [5] IPCC, *Sixth Assessment Report* (2021-2023). Disponível em <https://www.ipcc.ch/assessment-report/ar6/>, acesso em mar. 2025.
- [6] V. Ramanathan, *Trace-Gas Greenhouse Effect and Global Warming: Underlying Principles and Outstanding Issues* *Volvo Environmental Prize Lecture-1997*, *Ambio* **27**(3), 187 (1998). Disponível em <http://www.jstor.org/stable/4314715>, acesso em mar. 2025.