



ARTICLES/ARTIGOS/ARTÍCULOS/ARTICLES

A história do CO₂ nos processos de mudanças climáticas globais

Mestrando Mário Augusto Guerzoni Figueiredo

Programa de Pós-Graduação em Ciências da Engenharia Ambiental Universidade de São Paulo
Caixa Postal 292 São Carlos, SP CEP: 13.560-970. **E-mail:** fcachoeira@sc.usp.br

Doutorando Elis Dener Lima Alves

Programa de Pós-Graduação em Ciências da Engenharia Ambiental Universidade de São Paulo
Caixa Postal 292 São Carlos, SP CEP: 13.560-970. **E-mail:** elisdener@usp.br

Doutor Francisco Arthur Vecchia

Professor do Programa de Pós-Graduação em Ciências da Engenharia Ambiental Universidade de São Paulo. Caixa Postal 292 São Carlos, SP CEP: 13.560-970. **E-mail:** fvecchia@sc.usp.br

ARTICLE HISTORY

Received: 17 June 2012

Accepted: 18 December 2012

PALAVRAS-CHAVE:

CO₂
Efeito estufa
Aquecimento global

KEY-WORDS:

CO₂
Greenhouse effect
Global warming

RESUMO

A presente investigação traz algumas considerações a respeito dos impactos causados pela presença do CO₂ na atmosfera e as possíveis consequências do aumento de sua concentração para o clima global. Fica evidente que a maior lacuna existente nesta temática é a omissão em muitos estudos dos processos físicos e químicos que ocorrem na atmosfera, portanto, procura-se trazer algumas informações a respeito destas interações. Conclui-se, portanto, que não existem evidências científicas conclusivas da ligação do CO₂ como agente causador de aquecimento global.

ABSTRACT – THE HISTORY OF CO₂ NOS PROCESSES OF GLOBAL CLIMATE CHANGE. This research offers some considerations about the impact that the presence of CO₂ caused in the atmosphere and possible consequences of the increase of its concentration to the global climate. It is evident that the largest gap in this issue is the omission

in many studies of physical and chemical processes that occur in the atmosphere, consequently, it seeks to bring some information about these interactions. So there isn't conclusive scientific evidence necessary of CO₂ as a relevant agent of global warming.

RESUMEN:

CO₂

Efecto estufa

Calentamiento global

RESUMEN – LA HISTORIA DEL CO₂ EN LOS PROCESOS DE CAMBIOS CLIMÁTICOS GLOBALES. Esta investigación ofrece algunas consideraciones acerca de los impactos causados por la presencia del CO₂ en la atmósfera y las posibles consecuencias del aumento de su concentración para el clima global. Es evidente que el mayor vacío existente en esta temática es la omisión en muchos estudios de los procesos físicos y químicos que ocurren en la atmósfera, por lo tanto, se busca traer algunas informaciones acerca de estas interacciones. Se concluye, por lo tanto, que no hay evidencias científicas conclusivas de la conexión del CO₂ como agente causante del calentamiento global.

Introdução

As questões relacionadas ao “efeito estufa” remontam de tempos longínquos, em 1824 o pesquisador Jean Baptiste Joseph Fourier realizou uma pesquisa relacionando a influência da composição química da atmosfera nas alterações da temperatura do ar. Este estudo é considerado um dos primeiros a tratar das questões relacionadas ao que conhecemos hoje como “efeito estufa”. Daí em diante muito se têm estudado na busca de entender quais são as verdadeiras contribuições dos gases de “efeito estufa” sobre as alterações da temperatura no globo terrestre. Atualmente muitos pesquisadores vêm se digladiando, uns a favor do aquecimento antropogênico e outros contra. Os argumentos mostrados pelos dois grupos tornam esta discussão interessante do ponto de vista científico, isso pode ser percebido pelo grande número de estudos desenvolvidos por diversos centros de pesquisas ao redor do planeta.

“Efeito estufa”

Os primeiros estudos realizados sobre “efeito estufa” datam dos anos de 1824, pelo pesquisador Jean Baptiste Joseph Fourier. Para Fourier o calor da Terra derivada de três fontes. 1º A Terra é aquecida de forma desigual pela radiação solar e, por isso, temos as distribuições dos climas. 2º Ela recebe a temperatura comum do espaço planetário, estando exposta a irradiação de inúmeras estrelas que circundam todo o sistema Solar. 3º A Terra mantém em seu interior o calor primitivo da época que os planetas foram formados (FOURIER, 1824).

Segundo Fourier (1824), é a presença de ar e água que tem o efeito geral de fazer a distribuição do calor de maneira mais uniforme pelo globo. E fazendo uma

alusão ao “efeito estufa” Fourier diz que a presença da atmosfera produz um efeito semelhante, mas dado o estado atual da teoria e da falta de observações comparativas, não pode ser definido com precisão (FOURIER, 1824).

Em 1861 John Tyndall publicou um artigo mostrando que os gases atmosféricos absorvem o calor e, portanto, a alteração na composição química da atmosfera afetaria o clima.

É muito provável que a absorção dos raios solares pela atmosfera, como estabelecido por M. Pouillet é principalmente devido ao vapor d'água contida no ar (TYNDALL, 1861). Se as variações nas concentrações do vapor de água são capazes de produzir mudanças no clima, observações similares seriam aplicadas ao “ácido carbônico”¹ difundido através do ar, portanto, a mistura de vapores de hidrocarbonetos iria produzir grandes efeitos sobre os raios terrestres e produzirem mudanças correspondentes de clima (TYNDALL, 1861).

No ano de 1884 Samuel Pierpont Langley publicou um artigo sobre o efeito climático da absorção de calor por gases atmosféricos. Segundo ele, na visão de muitos pesquisadores uma função extremamente importante do “ácido carbônico” atmosférico seria a sua ação sobre o calor radiante, porém com os experimentos realizados em laboratório isso não se comprovou (LANGLEY, 1884).

O autor, citando algumas observações de Gay-Lussac, defendendo a ideia que a concentração do “ácido carbônico” no ar é constante, isto é, varia entre limites muito estreitos. Esta tendência poderia estar relacionada aos movimentos atmosféricos que seriam responsáveis pela mistura dos gases por toda camada da atmosfera (LANGLEY, 1884).

Svante August Arrhenius publicou em 1896 um artigo fazendo ligação da concentração de CO₂ com as mudanças no clima. Segundo Arrhenius (1896), um cálculo simples mostrava que as temperaturas na região ártica subiria de 8 a 9°C, se o “ácido carbônico” aumentasse sua concentração em 2,5 ou 3 vezes.

Arrhenius, porém, faz a seguinte reflexão: É possível que essas grandes variações na quantidade de “ácido carbônico” como a teoria exigia, ocorrer em tempos geológicos relativamente curtos? (ARRHENIUS, 1896).

O processo do “efeito estufa” foi estudado em 1909 pelo professor Robert Williams Wood, que constatou que este efeito concebido como uma camada que aprisiona a energia refletida pelo planeta (ondas longas) não era possível.

Wood montou duas pequenas estufas, sendo uma coberta por vidro e outra por “rock salt” que é uma forma mineral do cloreto de sódio NaCl totalmente transparente, tanto para radiação de ondas curtas como para radiação de ondas longas, portanto não aprisiona a radiação de ondas longas emitidas pelo solo. Ele constatou que as duas estufas atingiram praticamente as mesmas temperaturas, mostrando que a temperatura dentro das estufas não era efeito da absorção da radiação de ondas longas pelo vidro, mas sim porque o vidro impede que o calor irradiado pelo solo escape, não existindo trocas com o ar externo (WOOD, 1909).

Portanto, as interações do Sol com os gases presentes na atmosfera e sua capacidade de alterar o clima vêm sendo estudadas há quase 200 anos. Mesmo assim, ainda não existe consenso sobre a capacidade que estes gases possuem em

¹ O termo ácido carbônico era utilizado na época dos experimentos para designar o CO₂.

modificar o clima. Muitos cientistas acreditam que a concentração destes gases são os principais responsáveis pelas características do clima, porém, existem muitos outros cientistas que afirmam que as características climáticas do planeta são definidas pela existência da atmosfera que envolve o planeta.

Segundo Fleagle e Businger(1980), o que é conhecido como “efeito estufa” é na verdade o resultado da energia solar (ondas curtas) que passa através da atmosfera e é absorvido na superfície da Terra, e parte da energia (ondas longas) reemitida pela superfície da Terra é absorvida pela atmosfera, principalmente pelo vapor d’água.

O vapor de água não é somente o principal gás presente na atmosfera, ao liberar calor latente quando se condensa, também desempenha um papel ativo nos processos dinâmicos que moldam a circulação global do clima (SCHINDLER et al., 1996; SHERWOOD et al., 2010).

Porém para Marengo et al.(2007), o “efeito estufa” é um fenômeno natural onde parte do calor da energia solar que atinge o planeta é aqui retida por gases que se acumulam na atmosfera, porém a concentração na atmosfera de alguns desses gases, principalmente o gás carbônico que vem aumentando no século 20, principalmente pela queima de combustíveis fósseis por ação antrópica (MARENGO et al., 2007).

Como pode perceber, existe uma diferença conceitual, Wood não considera o “efeito estufa” como uma camada, fazendo referência a cobertura de vidro de uma estufa, mas é o fato da existência da atmosfera que mantém as características climáticas do planeta. Marengo, por outro lado, define o “efeito estufa” como uma camada (os gases emitidos por ação antrópica se distribuem basicamente na troposfera), pois, ele considera que a alteração da concentração dos gases constituintes da atmosfera pelo efeito antrópico pode alterar as condições climáticas (MARENGO et al., 2007).

Cabe fazer uma referência ao gradiente de temperatura da troposfera de aproximadamente $-6\text{ }^{\circ}\text{C.km}^{-1}$ até aproximadamente 11 km de altitude, a partir daí teremos a tropopausa e a temperatura se mantém constante por alguns quilômetros e volta a subir devido à foto dissociação do ozônio (Figura 1).

E neste cenário é importante o entendimento de camada limite, pois é entre a superfície do planeta e a camada limite que ocorre a maior concentração dos processos de trocas de massa e energia na atmosfera.

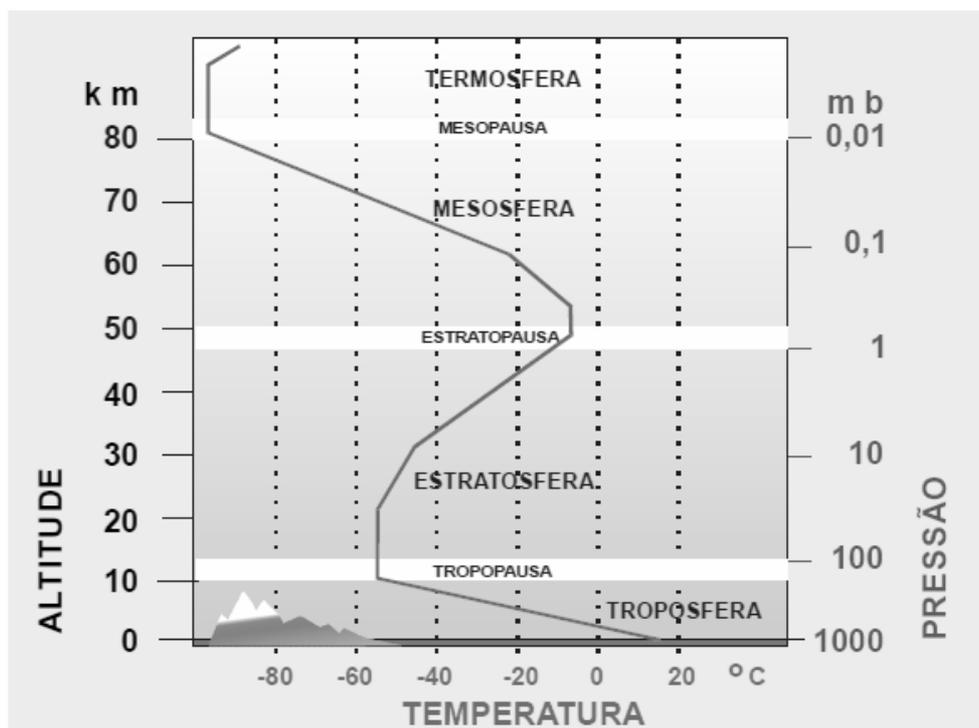


Figura 1 – Perfil vertical da atmosfera.
Fonte (SILVA, 2006)

Camada limite planetária

A camada limite planetária (CLP) ou camada de Ekman é a parte inferior da troposfera onde predomina o escoamento turbulento. Esta camada não tem uma altura definida, ou seja, a profundidade da camada limite varia com o tempo e espaço. Quando o Sol aquece a superfície da Terra, isso cria um gradiente de temperatura que possibilita a transferência de calor por correntes convectivas das camadas mais baixas para as camadas mais altas da troposfera. Esta movimentação cria condições para que os gases das camadas mais baixas sejam misturados com os gases das camadas mais altas e isso permite que a profundidade da camada limite se estenda de 1 a 2 km de altura (ARYA, 2001; OKE, 1987; PETROSYAN et al., 2011).

Esta altura pode ser maior que 2 km, ou seja, a camada limite pode ser ainda definida com a altura da primeira inversão térmica que ocorre na base das nuvens Cumulus.

Acima da camada limite planetária tem-se a atmosfera livre, onde se admite que o escoamento não seja influenciado diretamente pela superfície, porém, em condições de ventos fortes são criadas ondas que podem chegar a alturas de 6000 a 14000 metros, e estas ondas criam regiões turbulentas possibilitando a mistura dos gases atmosféricos.

Portanto, o entendimento da camada limite tem-se mostrando de fundamental importância para a realização das previsões atmosféricas. Os modelos de alta resolução das interações entre os sistemas atmosfera, hidrosfera e biosfera

dependem fortemente da descrição precisa dos processos físicos na camada limite planetária (CLP) (BAKLANOV; GRISIGONO, 2007) (Figura 1).

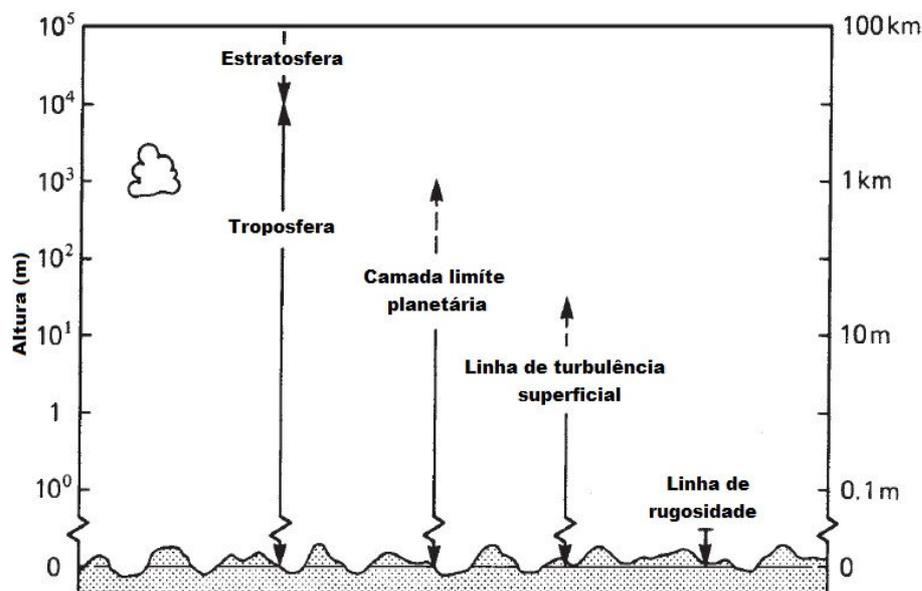


Figura 2 – Estrutura vertical da troposfera.
Fonte: Adaptado de (OKE, 1987)

CO₂ como gás de “efeito estufa”

As emissões antropogênicas de CO₂ na atmosfera são da ordem de 95% proveniente dos combustíveis fósseis e 4% são provenientes da produção de cimento (MÖLLER, 2010).

Quando se compara as emissões antropogênicas com as naturais têm-se os seguintes valores aproximados, 6 Gt por fontes antropogênicas e 220 Gt por fontes naturais por ano (EPA, 2012). Os fluxos naturais e antropogênicos do carbono são demonstrados na (Figura 3)

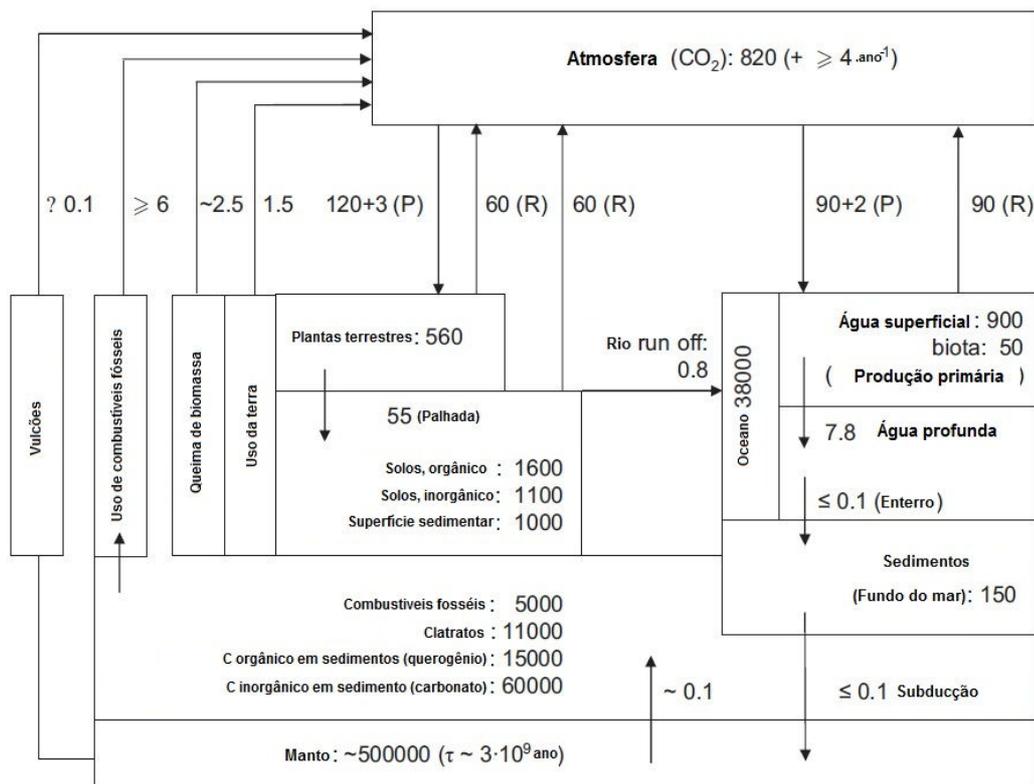


Figura 3 – Esquema dos reservatórios e do ciclo do carbono(giga tonelada C.ano⁻¹) R respiração, P fotossíntese, R escoamento *runoff*.
 Fonte: Adaptado de (MÖLLER, 2010)

Segundo Liou (1980) o CO₂ representa 0.036 % do volume total na composição dos gases atmosféricos, valor já conhecido em 1896 por Arrhenius, e mesmo ocupando pequena parcela do ar atmosférico o CO₂ tem papel fundamental para manutenção da vida no planeta. Atualmente a concentração do CO₂ na atmosfera está segundo dados do NOAA (2012) em torno de 393,87 ppm.

A molécula de CO₂ tem configuração linear simétrica, com o átomo de carbono no meio e um átomo de oxigênio de cada lado, o comprimento da ligação C-O na sua vibração fundamental é 1,1632 angstrom e tem rotação constante (LIOU, 1980).

Os isótopos naturais do átomo de carbono são ¹²C e ¹³C com abundância relativa de 98,892 e 1,108%, respectivamente. Para o átomo de oxigênio, os isótopos são ¹⁶O(99,758%), ¹⁷O (0,0373%), e ¹⁸O (0,2039%). Assim, vários isótopos de CO₂ estão presentes na atmosfera. Os mais importantes deles para as questões relacionadas com a radiação são ¹²C¹⁶O¹⁶O, ¹³C¹⁶O¹⁶O, e ¹²C¹⁶O¹⁸O (LIOU, 1980).

Para moléculas tri-atômicas com uma configuração simétrica linear como é o caso do (CO₂, N₂O), existem 3 modos vibracionais: V₁ para estiramento simétrico, V₂ para o movimento de flexão e V₃ para trechos antissimétricos(LIOU, 1980).

Na (Figura 4) é mostrado o espectro de absorção no infra-vermelho para os gases CO, CH₄, N₂O, O₃, CO₂ e H₂O, a última linha da figura “ALL” representa a absorção combinada de todos os gases.

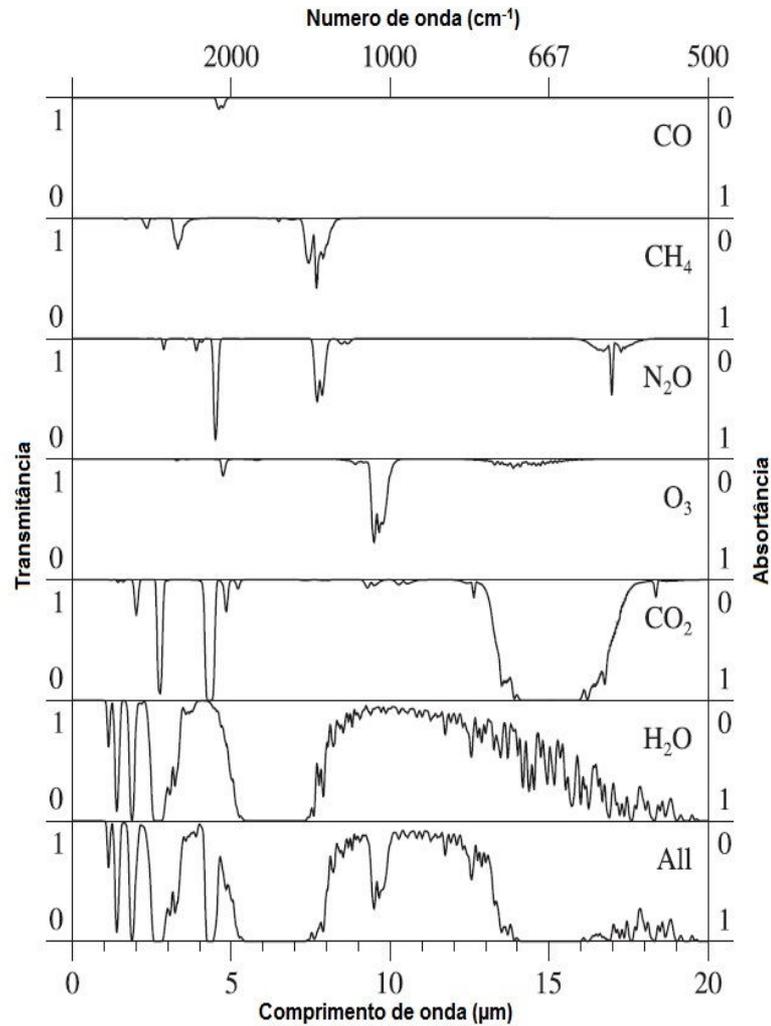


Figura 4 - Espectros infra-vermelho de absorção para seis gases fortemente absorventes e para os seis gases combinados, para feixe vertical que passam através da atmosfera, na ausência de nuvens (ANDREWS, 2010)

O dióxido de carbono CO₂ é um forte absorvedor de ondas longas na faixa de 15 μm, que está associado ao estado vibracional V₂ “modo flexão”, e de uma banda mais estreita perto 4,3 μm, associados com “o modo de alongamento assimétrico” V₃. A banda perto de 2,7 μm tem uma origem mais complexa. (ANDREWS, 2010).

A (Figura 5) mostra o processo de absorção do espectro solar no topo da atmosfera e ao nível do mar comparado com o espectro de irradiância de um corpo negro.

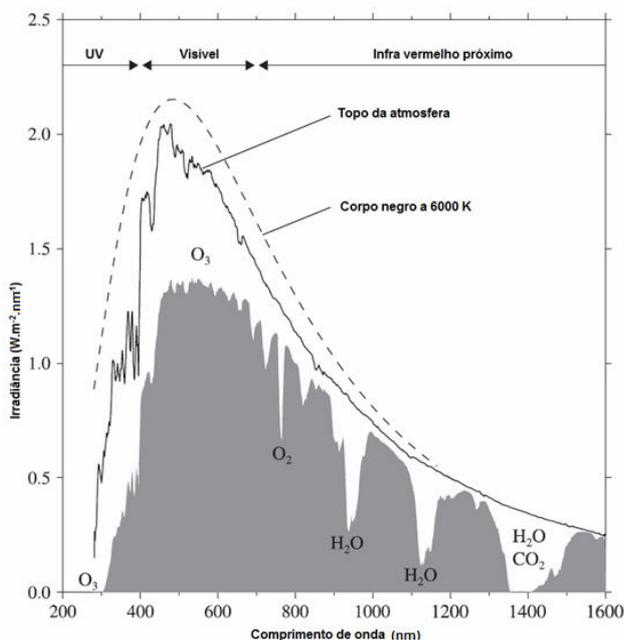


Figura 5 - O espectro de irradiância da radiação solar no topo da atmosfera (linha sólida) e ao nível do mar (sombreado), em comparação com o espectro de irradiância de um corpo negro (linha tracejada).

Fonte: Adaptado de (ANDREWS, 2010).

Para Liou (1980), à medida que a distância torna-se menor, os átomos começam a repelir um ao outro, de modo que aumenta a energia potencial. Quando um fóton de alta energia é absorvido, a configuração dos elétrons é alterada para uma de maior energia potencial quando o núcleo está em equilíbrio de distância.

Portanto as transições entre os níveis de energia resultam na absorção e emissão de fótons seguindo a relação de Planck, Liou (1980). Isso significa que os gases não são absorvedores nem irradiadores de ondas longas, mas sim absorvedores e irradiadores de fótons, isto é, os fótons têm uma frequência que corresponde ao perfil de absorção do gás.

O gás irradia fótons em varias direções, uma parcela vem na direção da Terra e o restante se distribui para o espaço, estes são absorvidos ao atingirem a superfície líquida ou sólida, em consequência disso os fótons são convertidos em energia térmica ao mesmo nível da substância que o recebeu. Assim, enquanto a Terra absorve a energia de um fóton ela é aquecida microscopicamente, portanto ela também deve aumentar a sua taxa de radiação para manter o equilíbrio termodinâmico (BEER; MCCRACKEN; STEIGER, 2012; FINLAYSON-PITTS; JAMES N. PITTS, 2000; LIU, 1980; MÖLLER, 2010; SALBY, 1996).

De acordo com Chilingar; Khilyuk e Sorokhtin(2007) a transferência de calor na troposfera tem a seguinte distribuição: 67% devido à convecção, 25% pela

condensação do vapor d'água e 8% pela radiação. Portanto, a convecção é a grande responsável pelas trocas de calor na troposfera.

Esta distribuição de temperatura na troposfera pode ser considerada como adiabática, pois, a massa de ar ao subir verticalmente pela troposfera se expande e se resfria e ao descer ela aquece e se comprime (CHILINGAR et al., 2007).

Para entender o comportamento da absorção da radiação pelos gases de “efeito estufa”, não basta avaliar cada gás individualmente e depois somar a contribuição de cada um para obter a absorção total de ondas longas. Os gases de efeito estufa absorvem fortemente em certas faixas do espectro e quando ondas de dois gases diferentes se sobrepõem, o total da absorção é inferior à soma das absorções individuais (AMBAUM, 2010). Por esta razão é impossível definir a contribuição individual de cada gás de “efeito estufa” na absorção da radiação de ondas longas. No entanto o vapor d'água tem a capacidade de absorver cerca de quatro vezes mais radiação do que o CO_2 (AMBAUM, 2010).

Conclusões

Fundamentado no que foi discutido nesta investigação, dizer que o CO_2 tem a capacidade de aquecer o planeta é ao menos inusitado. As trocas de massa e energia na atmosfera têm seu maior potencial dentro da camada limite e esta ideia de “efeito estufa” como sendo resultado da concentração dos gases não pode ser verificada, pois as movimentações verticais e horizontais das massas de ar no planeta estão continuamente realizando a transferência de calor de uma região para a outra.

Os gases de “efeito estufa” tem a capacidade de absorver a radiação infravermelha, em sua zona mais fria do espectro (menor energia). Outro detalhe importante, estes gases não são capazes de bloquear as movimentações na atmosfera nem cessar as correntes oceânicas. O que ocorre é o superávit de energia na Terra, mas esse superávit não se traduz necessariamente em energia térmica capaz de aquecer o planeta.

Se o aumento na concentração dos gases de “efeito estufa” realmente tivesse a capacidade de aumentar as temperaturas globais, este efeito mudaria também o gradiente vertical da temperatura na troposfera e isso não é observado.

Para entender os ciclos de aquecimento e resfriamento do planeta, primeiramente temos que ter consciência dos grandes fatores geradores do clima. Portanto, compreender os ciclos solares, entender os processos de aquecimentos e esfriamento dos oceanos, ainda pouco conhecido e compreendido. O planeta Terra está inserido no universo que é infinitamente grande, juntamente com astros de proporções colossais, portanto, existem interações ocorrendo entre eles que também podem afetar o clima.

Em um sistema totalmente caótico como o que ocorre no universo (micro e macro escalas), afirmar que o CO_2 é o grande responsável pelas alterações climáticas parece ser precipitado, visto que as incertezas científicas dos fatores geradores do clima ainda são muito grandes.

Referencias

AMBAUM, M. H. P. *Thermal Physics of the Atmosphere*. Oxford: Wiley-Blackwell, 2010.

- ANDREWS, D. G. **An Introduction to atmospheric physics**. 2. New York: Cambridge University Press, 2010. 237 ISBN 978-0-511-72966-9.
- ARRHENIUS, S. On the Influence of Carbonic Acid in the Air upon the Temperature of the Ground. **Philosophical Magazine and Journal of Science**, v. 41, p. 237-276, 1896.
- ARYA, S. P. **Introduction to Micrometeorology**. 2. California.: Academic Press, 2001.
- BAKLANOV, A.; GRISIGONO, B. **Atmospheric Boundary Layers Nature, Theory and Applications to Environmental Modelling and Security**. New York: Springer, 2007.
- BEER, J.; MCCracken, K.; STEIGER, R. V. **Cosmogenic Radionuclides: Theory and Applications in the Terrestrial and Space Environments**. Berlin: Springer, 2012.
- CHILINGAR, G. V.; KHILYUK, L. F.; SOROKHTIN, O. G. Cooling of Atmosphere Due to CO₂ Emission. **Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects**, v. 30, n. 1, p. 1-9, 2007/11/28 2007.
- EPA. Greenhouse Gas Emissions. 2012. Disponível em: < <http://www.epa.gov/climatechange/ghgemissions/gases/co2.html> >. Acesso em: 08/06/2012.
- FINLAYSON-PITTS, B. J.; JAMES N. PITTS, J. **Chemistry of the Upper and Lower Atmosphere**. California: Academic Press, 2000.
- FLEAGLE, R. G.; BUSINGER, J. A. **An introduction to atmospheric physics**. 2. Seattle, Washington: Academic Press, 1980. 432 ISBN 0-12-260355-9.
- FOURIER, J. B. J. Remarques Générales sur les Températures du globe terrestre et des espaces planétaires. **ANNALES DE CHIMIE ET DE PHYSIQUE**, v. 24, p. 136-167, 1824.
- LANGLEY, S. P. **Reseaches on solar heat and its absorption by the earth's atmosphere: A report of the mount Whitney Expedition**. Washungton: Authority of the Secretary of War, 1884.
- LIOU, K. N. **An Introduction to atmospheric Radiation**. 2. Elsevier Science, 1980.
- MARENGO, J. A. et al. **Mudanças Climáticas Globais e Efeitos sobre a Biodiversidade**. 2007
- MÖLLER, D. **Chemistry of the Climate System**. De Gruyter, 2010. ISBN 9783110197914. Disponível em: < http://books.google.com.br/books?id=-UCxQFC_ftkC >.
- NOAA. Trends in Atmospheric Carbon Dioxide. 2012. Disponível em: < <http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/global.html> >. Acesso em: 31/05/2012.
- OKE, T. R. **Boundary Layer Climates**. 2. Taylor & Francis e-Library, 1987.
- PETROSYAN, A. et al. The Martian Atmospheric Boundary Layer. **Reviews of Geophysics**, v. 49, Sep 17 2011.
- SALBY, M. L. **Fundamentals of Atmospheric Physics**. California: ACADEMIC PRESS, 1996.
- SCHINDLER, D. W. et al. The effects of climatic warming on the properties of boreal lakes and streams at the Experimental Lakes Area, northwestern Ontario. **Limnology and Oceanography**, v. 41, n. 5, p. 1004-1017, Jul 1996.
- SHERWOOD, S. C. et al. Tropospheric water vapor, convection, and climate. **Reviews of Geophysics**, v. 48, 13 Apr. 2011 2010.
- SILVA, M. A. V. **Meteorologia e Climatologia**. 2. Recife: Edição digital, 2006. 449 Disponível em: < http://www.agritempo.gov.br/publish/publicacoes/livros/METEOROLOGIA_E_CLIMATOLOGIA_VD2_Mar_2006.pdf >. Acesso em: 15 mar. 2011.
- TYNDALL, J. On the Absorption and Radiation of Heat by Gases and Vapours, and on the Physical Connexion of Radiation, Absorption, and Oonduction. **PHILOSOPHICAL TRANSACTIONS**, 1861.
- WOOD, R. W. Note on the Theory of the Greenhouse. **The London, Edinburgh and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science**, v. 17, n. 6, p. 319-320, 1909.