



EN-2416 Energia e meio ambiente e sociedade

Efeito estufa e destruição da camada de ozônio

Prof. Dr. João Manoel Losada Moreira
Universidade Federal do ABC

Baseado nos livros:

- Global warming, J. Houghton, Cambridge Univ. Press, 2009
- Energia e meio ambiente, R. A. Hinrichs e M. Kleinbach, Ed. Thomson, 2004



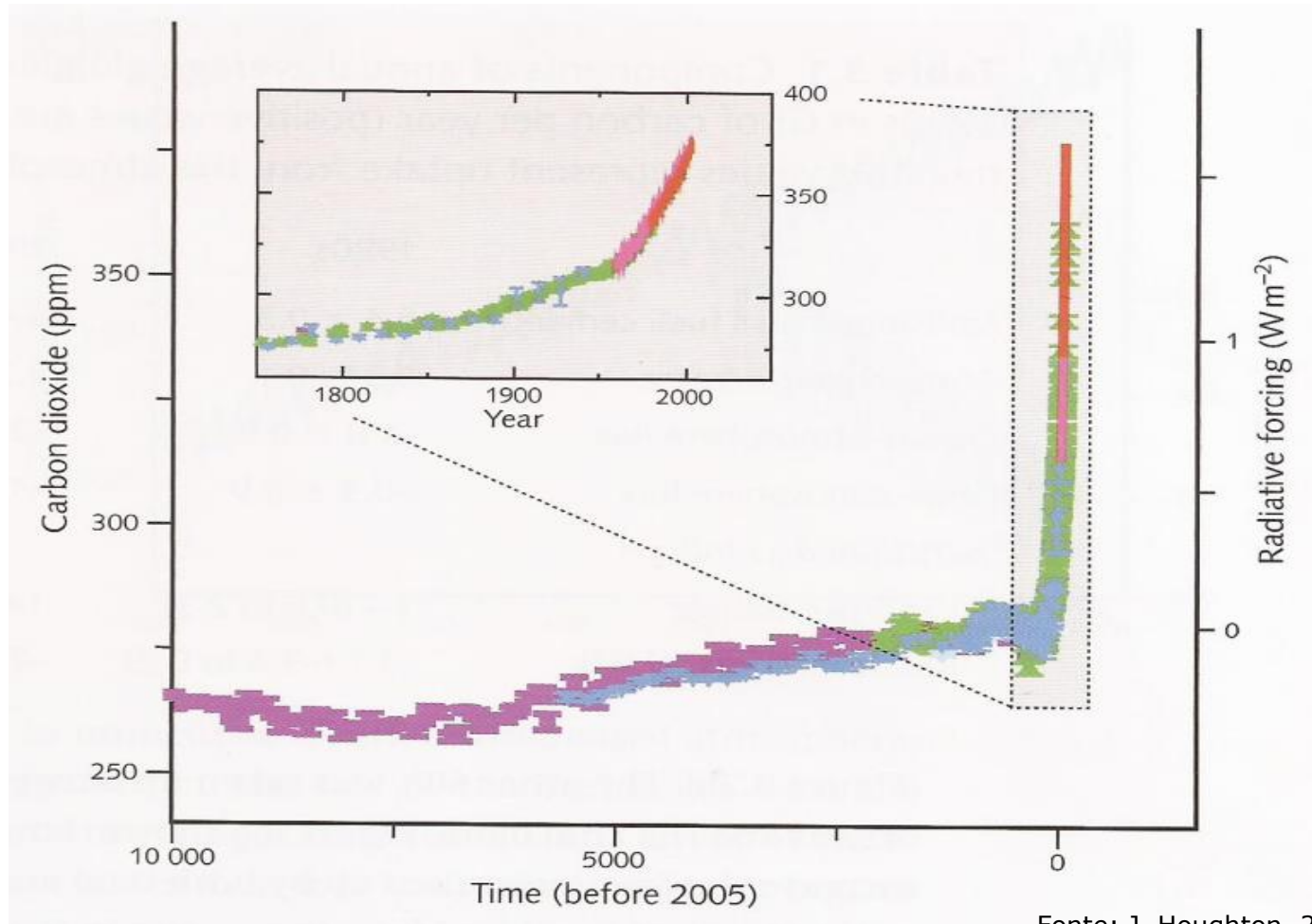
Planeta laboratório

- O planeta Terra pode ser considerado um grande laboratório onde ocorrem fenômenos que alteram o clima.
- As perturbações que ocorrem podem ser irreversíveis.
- Evidências indicam que as emissões de CO₂ dos combustíveis fósseis podem alterar o clima do planeta.
 - Áreas agrícolas podem virar desertos.
 - Regiões costeiras podem ser inundadas
 - Florida e Bangladesh podem ser inundadas e provocar migrações de milhões de pessoas.

IPCC - ONU

- IPCC (International Panel on Climate Change) registra que há nítida influência humana sobre o clima na atualidade por meio dos gases do efeito estufa.
- **IPCC** foi criado em 1988 pela Organização Meteorológica Mundial e pelo Programa da ONU para o Meio Ambiente.
 - É formado por cientistas de várias áreas de conhecimento de todo o mundo.
- Protocolo de Kioto.

Emissões de CO₂ ao longo do tempo



Fonte: J. Houghton, 2009

Efeito estufa

- A radiação emitida pela Terra na faixa do infravermelho é absorvida pelo CO₂, vapor d'água e outros compostos presentes na atmosfera.
- Estas substâncias absorvem a radiação nestes comprimentos de onda:

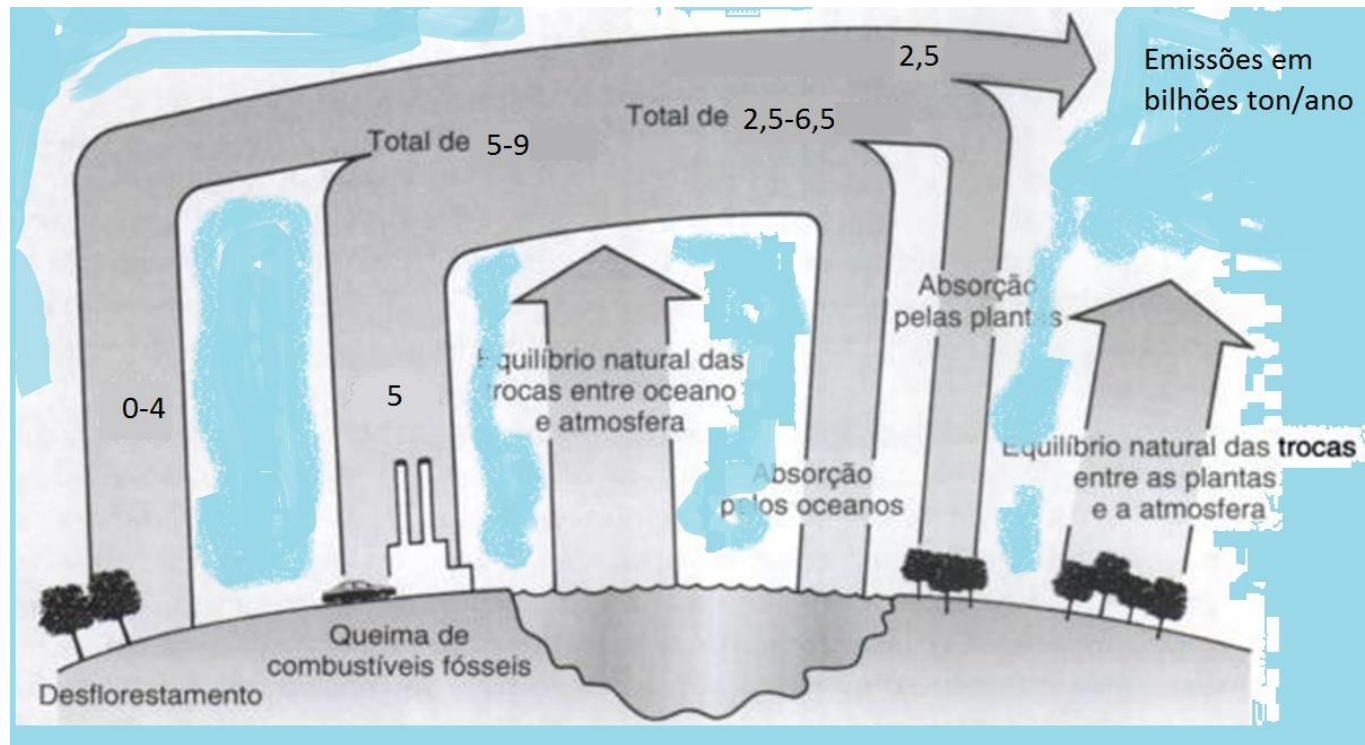
$$7 \mu\text{m} < \lambda < 12 \mu\text{m}$$

- A temperatura da Terra permanece constante devido a irradiação da Terra para o espaço.
- O aumento da concentração de CO₂ na atmosfera absorve parte desta irradiação, que se transforma em calor, e promove o aquecimento do planeta.

Gases do efeito estufa

- Poder de aquecimento global – PAG
 - Os gases contribuem de forma diferente para o aquecimento global.
 - Define-se como PAG a razão entre a absorção que um dado faz da radiação solar e aquela feita pelo CO_2 .
- Gases do efeito estufa e o PAG
 - CO_2 – PAG = 1
 - CH_4 – PAG = 21-23
 - N_2O - 310
 - Clorofluorcarbonos, CFC – PAG = 1300-12000

Ciclo do carbono na Terra



Emissões: plantas, combustíveis fósseis, etc
Remoção: absorção pelas plantas e oceanos

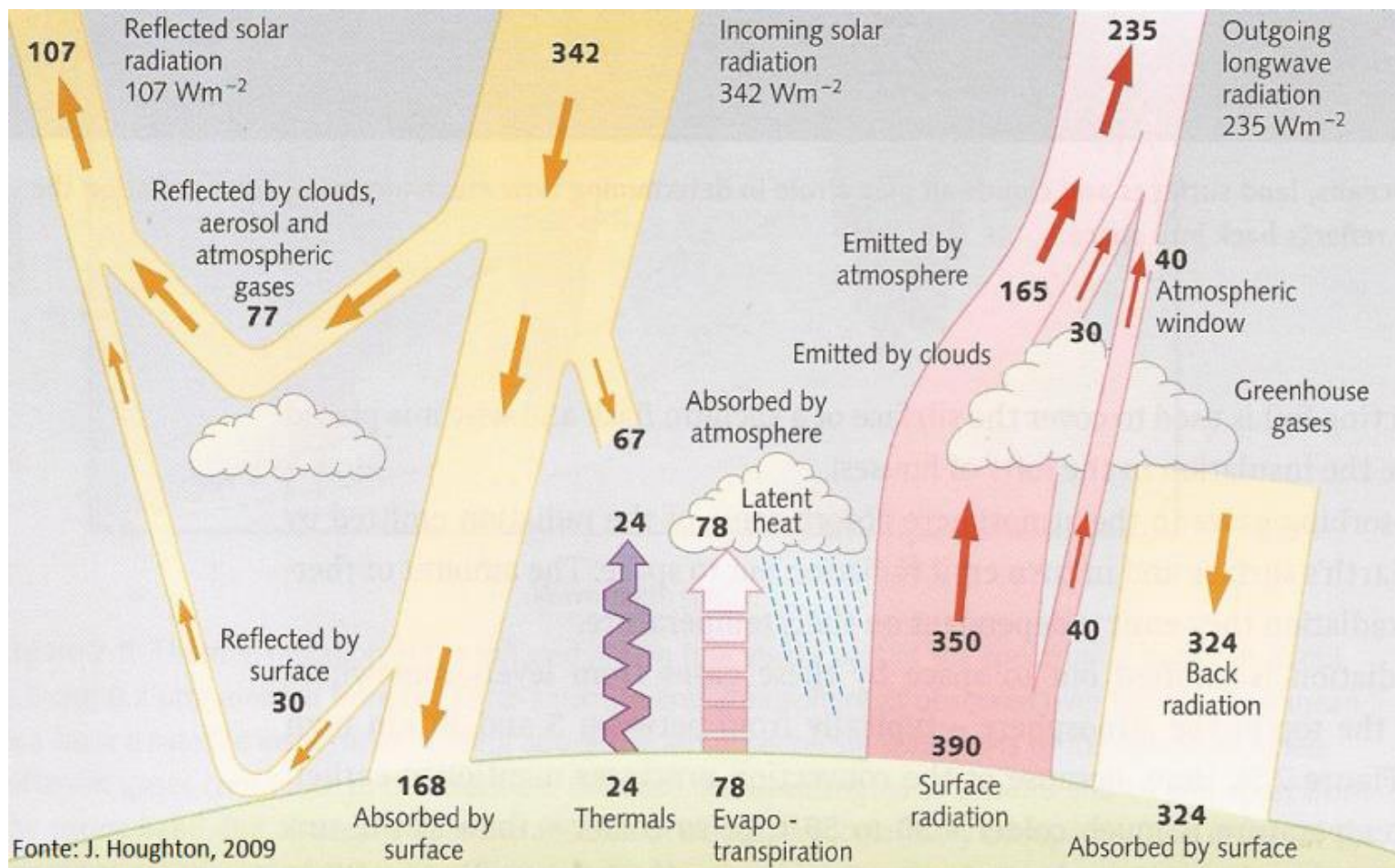
Balanço de carbono na Terra, atmosfera e oceanos

- Massa de ar na atmosfera $\sim 2,17 \times 10^{18}$ kg
- Estoque de carbono na atmosfera $\sim 7,6 \times 10^{14}$ kg
- Concentração de C na atmosfera =

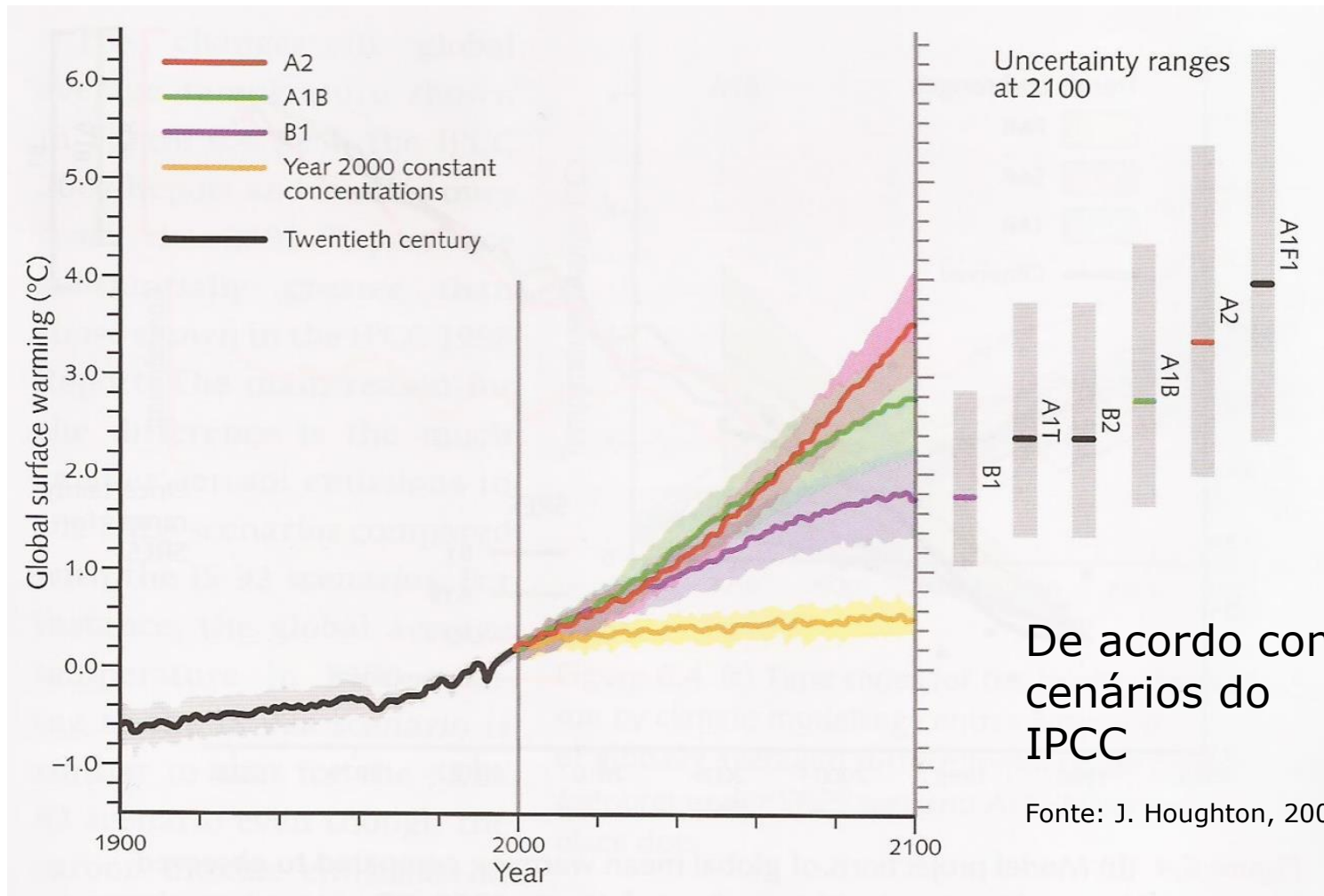
$$= \frac{7,6 \times 10^{14} \text{ kg}}{2,17 \times 10^{18} \text{ kg}} = 350 \times 10^{-6} \text{ ou } 350 \text{ ppm}$$

- Emissão de combustíveis fósseis e produção de cimento: $\sim (6,3 + 0,6) \times 10^{12}$ kg/ano
- Troca de carbono entre Terra e atmosfera (fotossíntese, respiração, incêndios): $\sim 6 \times 10^{13}$ kg/ano
- Troca de carbono entre oceanos e atmosfera (fotossíntese e respiração): $\sim 9 \times 10^{13}$ kg/ano

Fluxos de calor (energia) entre o espaço, atmosfera e superfície da Terra



Aquecimento global da superfície terrestre





Evidências do aquecimento global

- Diminuição das geleiras fora das áreas polares
- Diminuição das áreas cobertas de neve na Europa
- Ocorrência de primaveras e invernos tardios nas áreas de latitude elevada no hemisfério norte
- Migração de pássaros

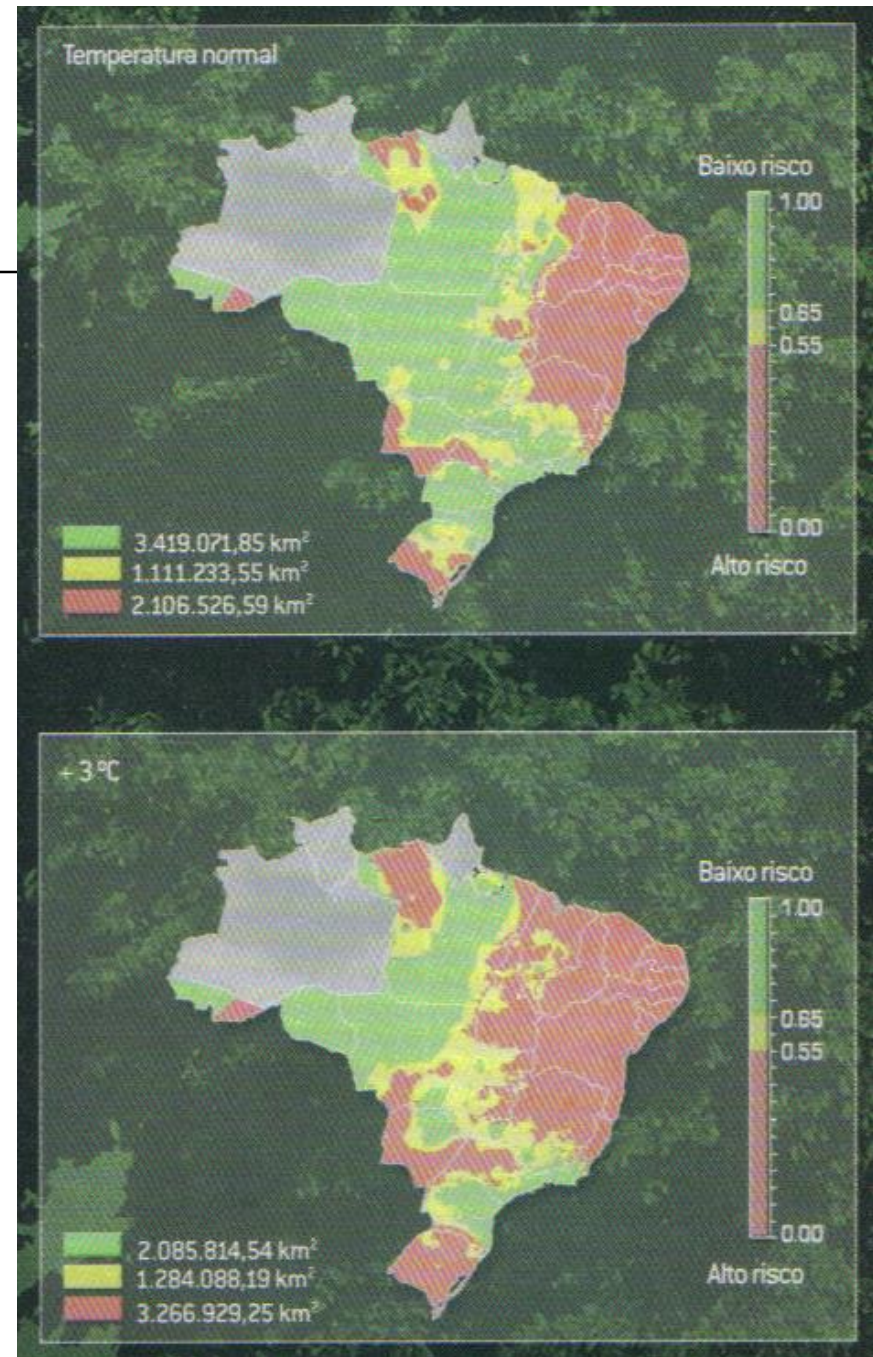


Consequências do aquecimento global

- Aumento das temperaturas globais – diminuição em alguns locais devido a efeitos de realimentação
 - Derretimento das geleiras e dilatação da água dos oceanos fará com que o nível do mar se eleve de 0,3 a 7 m.
 - Pode cobrir de água vários portos do mundo.
 - Esfriamento da região européia.
- Mudanças nos regimes de precipitação sobre o planeta.
 - Afeta a agricultura mundial
- Aquecimento do continente africano
 - Afeta sua agricultura (fortemente dependente das estações chuvosas – sem irrigação, correção do solo, etc.)
 - Maiores dificuldades para as populações que vivem em estado de baixo desenvolvimento humano
 - Favorece a degradação ambiental.

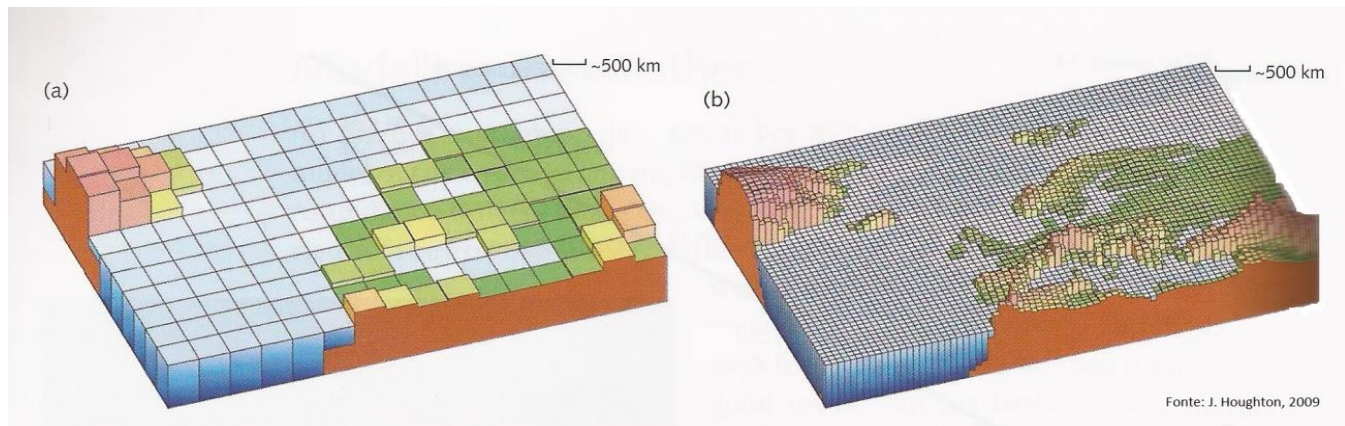
Impacto ambiental

Consequências no Brasil
sobre o plantio de
soja devido ao
aquecimento
de 3 °C



Evolução dos modelos climáticos e meteorológicos

- Os modelos exigem a solução de equações de conservação de massa (evaporação), energia e momento (vento)
- Variações espaciais e temporais
 - exigem grande capacidade computacional



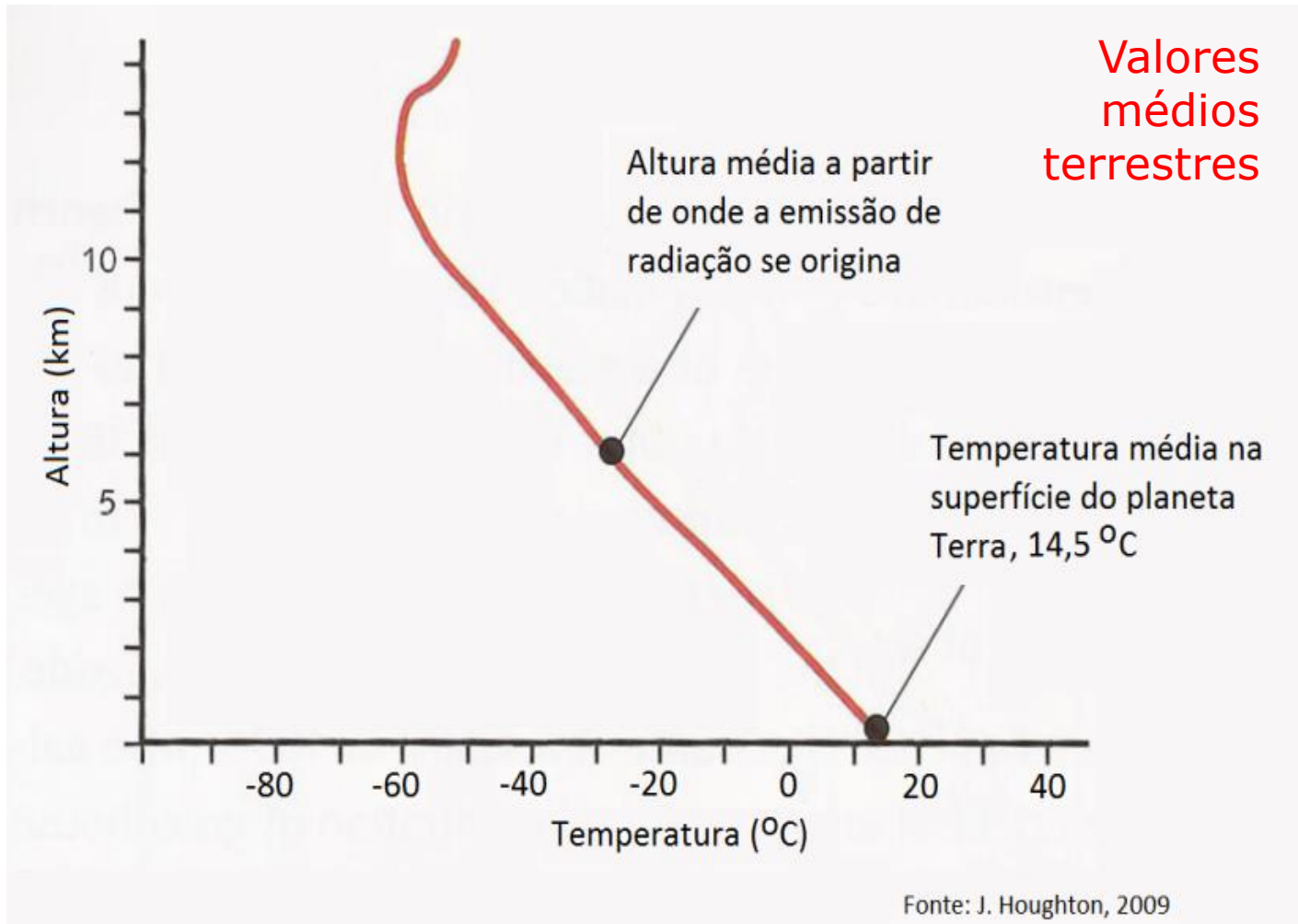
Pouco detalhado
espacialmente

Mais detalhado espacialmente devido
avanco dos computadores

Modelo simplificado de mudanças climáticas

- O modelo tem vários elementos:
 - Troca de energia e massa entre atmosfera, superfície da Terra e espaço
 - Balanço de fluxo de calor na atmosfera e na superfície da Terra
 - Estimativa da evolução da concentração de CO_2 na atmosfera
 - Relação entre concentração de CO_2 e aumento no fluxo de calor emitido para a superfície da Terra

Temperatura na atmosfera em função da altura



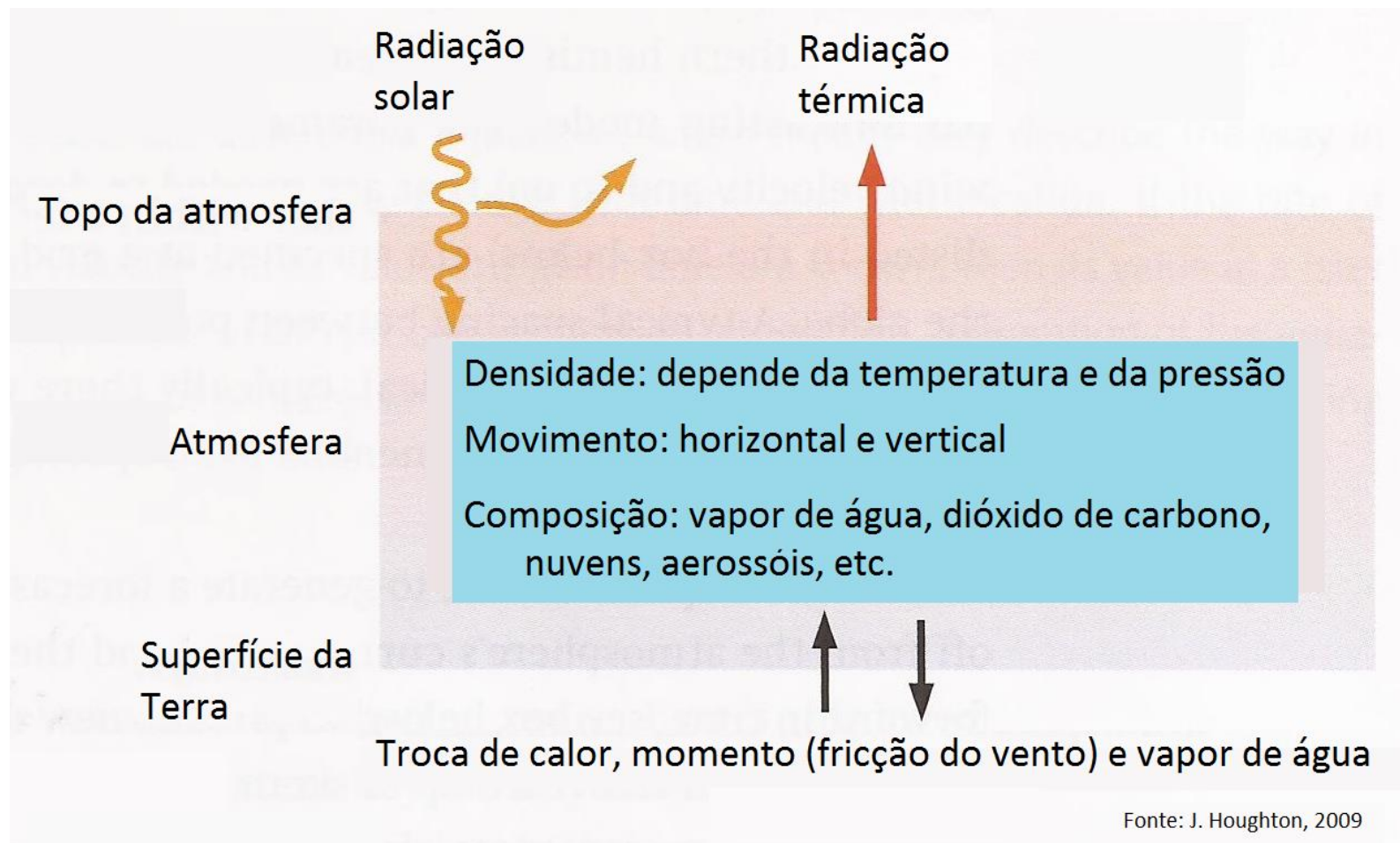
Emissão de terrestre ou solar aproximada por um corpo negro

- Emissões estimadas por meio do modelo do corpo negro
- $q = \sigma T^4$ em Wm^{-2}
- onde $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} Wm^{-2}K^{-4}$ (constante de Stefan-Boltzmann) e T é a temperatura em K
- Temperaturas do Sol e da Terra e respectivas emissões
- Sol: $T = 5800 K$, $q_{Sol} = 6,42 \times 10^7 Wm^{-2}$
- Terra: $T = (14,5 + 273,2) = 287,7 K$, $q_{Terra} = 384 Wm^{-2}$
- Fluxo solar na parte externa da atmosfera:

$$q = q_{sol} \frac{4\pi r^2}{4\pi d^2} = 6,42 \times 10^7 \frac{4\pi 6,9 \times 10^8}{4\pi 1,5 \times 10^{11}} = 1379 Wm^{-2}$$

Onde r é o raio do sol e d é a distância Sol - Terra em m

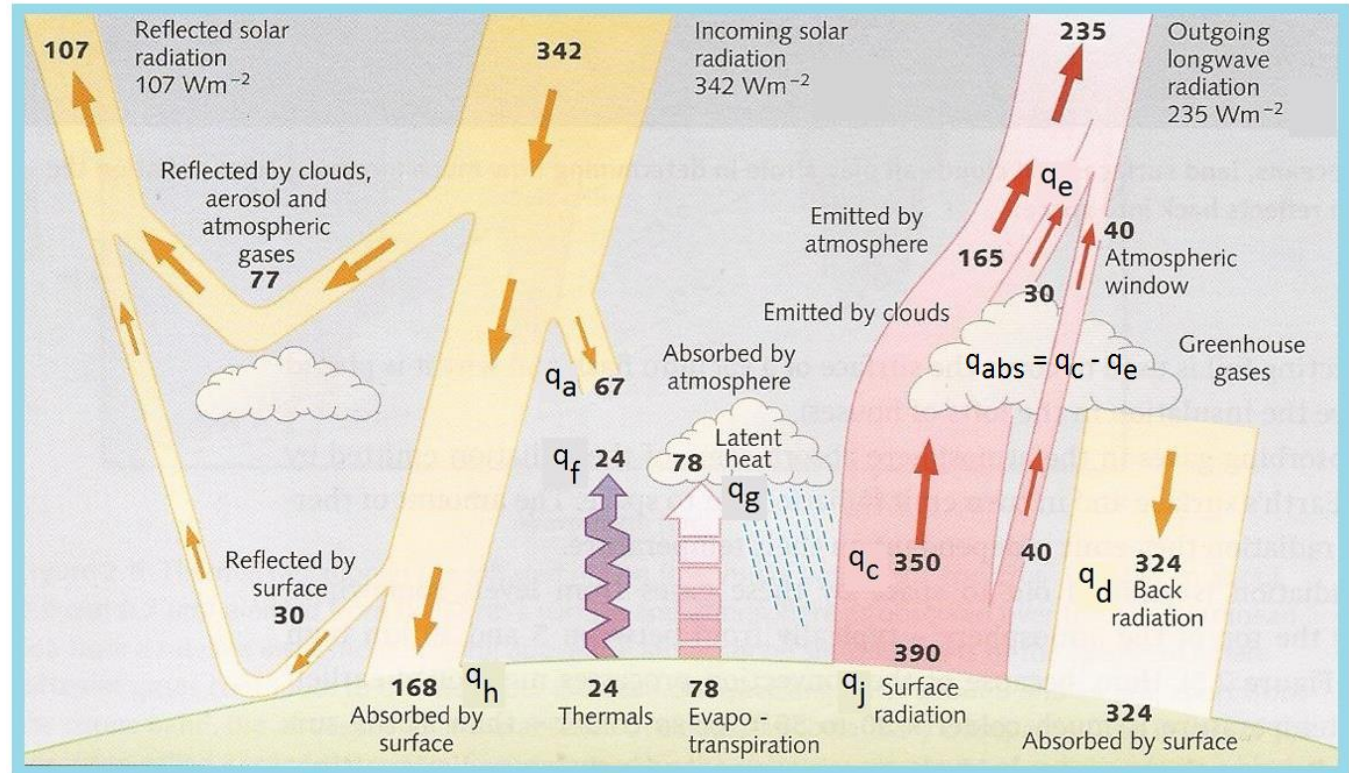
Trocas de energia e massa na atmosfera com o espaço e a superfície da Terra



Balanço de fluxo de calor na atmosfera e na superfície da Terra

Regime permanente

q_{abs} = radiação emitida pela Terra absorvida na atmosfera



$$\text{Atmosfera: } q_a + q_f + q_g + q_c = q_e + q_d$$

$$\text{Superfície da Terra: } q_h + q_d = q_f + q_g + q_j$$



Efeito da adição de CO₂ na atmosfera

- O aumento da concentração de CO₂ na atmosfera aumenta a absorção de radiação emitida pela Terra na atmosfera
- A atmosfera é aquecida e emite mais radiação de volta à Terra
- Eventualmente alcança-se novo equilíbrio com mais emissão da atmosfera para a Terra e da Terra para a atmosfera
- Consequentemente, as temperaturas ficam mais elevadas

Modelo simples de acumulação de CO₂ na atmosfera

- Seja $C(t)$ a concentração de CO₂ na atmosfera no instante t
- λ probabilidade por unidade de tempo de absorção de CO₂ da atmosfera pelos mares, florestas, solo, etc.
- Assuma que o comportamento de $C(t)$ possa ser aproximado por

$$\frac{dC(t)}{dt} = R(t) - \lambda C(t)$$

onde $R(t)$ é a taxa de liberação de CO₂ na atmosfera expressa em [ppm/dia].

Dados do modelo de acumulação de CO_2 na atmosfera

- $\lambda = 0,01 \text{ ano}^{-1}$,
- Isto é, demora cerca de 70 anos para que a concentração de CO_2 decaia pela metade na atmosfera
- $C(2000) = 350 \text{ ppm}$
- $R(t) = 4,5 \text{ ppm/dia}$

Relação entre CO₂ e absorção de radiação emitida pela Terra na atmosfera

- O aumento da concentração de CO₂ na atmosfera aumenta a absorção de radiação emitida pela Terra na atmosfera

$$q_{abs} = \alpha C$$

$$\text{onde } \alpha = 0,413 \text{ Wm}^{-2} \text{ ppm}^{-1}$$

A emissão absorvida pela atmosfera é correlacionada com a concentração de CO₂. O coeficiente α é determinado a partir das condições de emissão na atmosfera e a concentração de CO₂.

Exemplo de estimativa de aquecimento global

- Dois estados – perturbação
 - Estado 0 – concentração $C_0 = 375$ ppm, $T_0 = 287,7$ K, $q_{abs0} = 155$ Wm⁻² e $q_{j0} = 390$ Wm⁻²
 - Estado 1 – Concentração $C_1 = 400$ ppm e $q_{abs1} = 165$ Wm⁻²
- Considera-se que somente aumenta a absorção de radiação na atmosfera e as outras absorções fiquem inalteradas. Então na atmosfera temos:

$$\text{Estado 0: } q_{a0} + q_{f0} + q_{g0} + q_{abs0} = q_{d0}$$

$$\text{Estado 1: } q_{a0} + q_{f0} + q_{g0} + q_{abs1} = q_{d1}$$

- Fazendo a diferença das duas equações temos

$$q_{abs1} - q_{abs0} = q_{d1} - q_{d0} \quad \text{ou} \quad \Delta q_d = \Delta q_{abs} = 10 \text{ Wm}^{-2}$$


Estimativa do aquecimento da Terra

- O fluxo de radiação da atmosfera para a Terra é considerado totalmente absorvido pela Terra.
- Dois estados na superfície da Terra. Considera-se que somente q_d é alterado.
 - Estado 0: $q_{h0} + q_{d0} = q_{f0} + q_{g0} + q_{j0}$
 - Estado 1: $q_{h0} + q_{d1} = q_{f0} + q_{g0} + q_{j1}$
- Fazendo a diferença das duas equações obtemos:

$$q_{j1} - q_{j0} = q_{d1} - q_{d0} \quad \text{ou} \quad \Delta q_j = \Delta q_d = \Delta q_{\text{abs}}$$

$$q_{j1} = q_{j0} + \Delta q_{\text{abs}} \quad \text{ou} \quad q_{j1} = 400 \text{ Wm}^{-2}$$

Então $T_1^4 = \frac{q_{j1}}{\sigma}$ ou $T_1 = 289,8 \text{ K}$ ou $\Delta T = 2,1 \text{ K}$

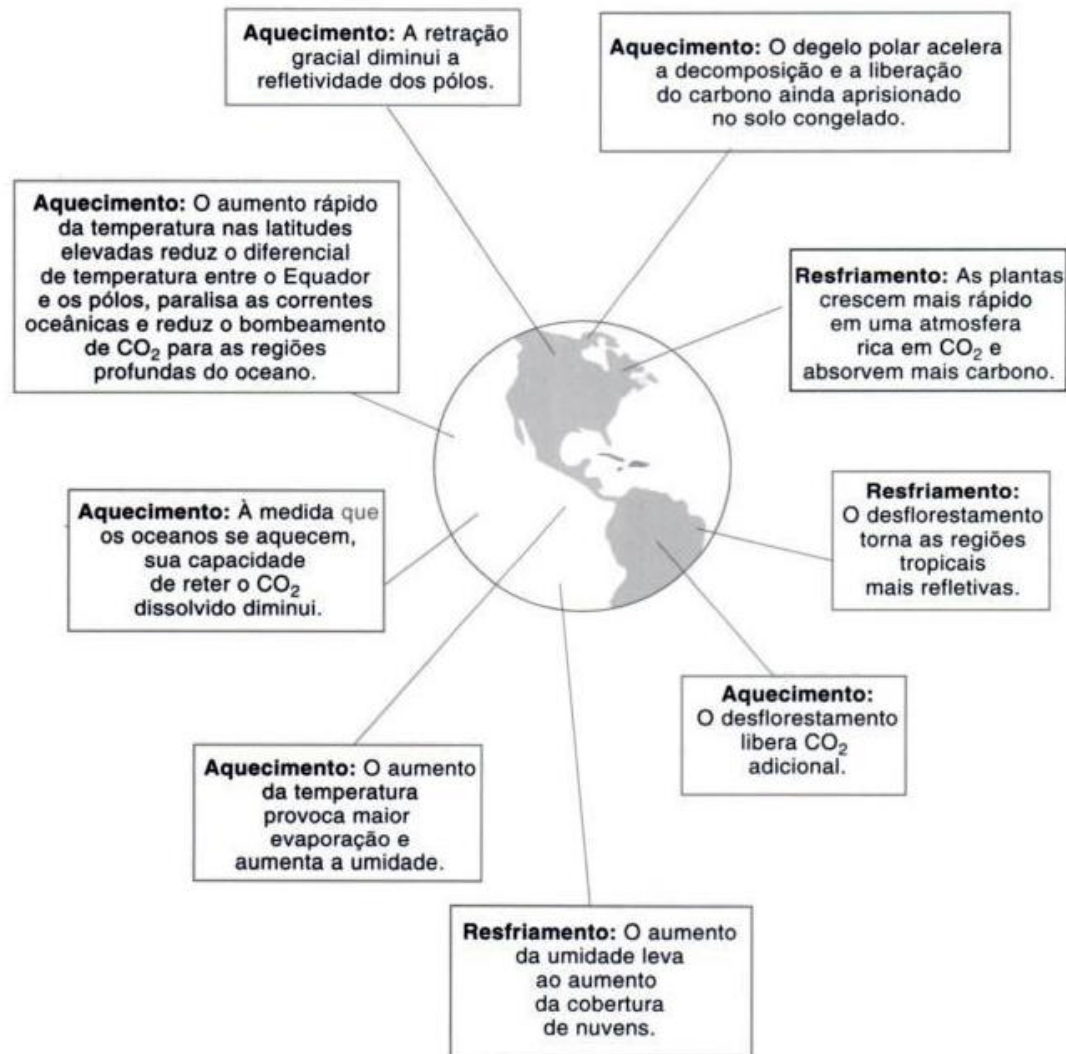


Incertezas nas estimativas de aquecimento global

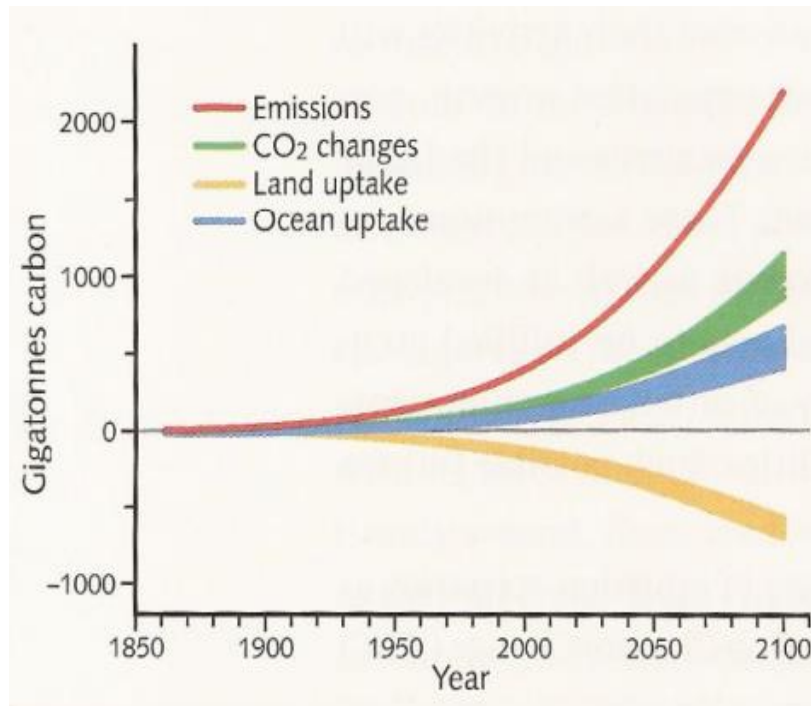
- Modelos matemáticos
 - Simplificações para representar processos muito complexos de várias variáveis
- Interação entre oceano, terra, ar, radiação solar, etc
- Realimentação (feedback) dos fenômenos ainda não entendidas
- Dilema causado pela incerteza (debate internacional)
 - Não fazer nada já que o aquecimento pode não ocorrer!
 - Fazer algo já que o aquecimento pode ocorrer!

Mecanismos de realimentação (feedback)

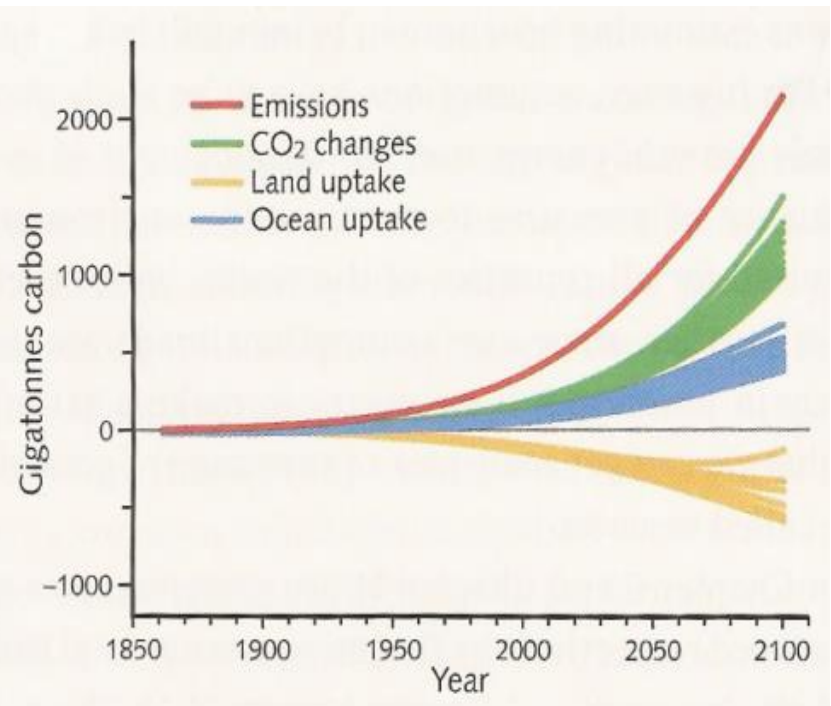
Causam incertezas sobre os impactos no clima



Emissões de carbono considerando efeitos de feedback



Sem feedback



Com feedback
aumenta a variação dos
resultados




Mitigação da emissão de carbono

- Impostos sobre a emissão de C
 - Taxação proporcional a intensidade de emissão
- Redução do uso de energias fósseis
- Maior uso de fontes alternativas (solar, eólica, biomassa etc)
- Maior conservação de energia
- Substituição de usinas a carvão por outras menos emissoras
 - Gás natural que emite menos
- Maior uso de energia nuclear



Sequestro de carbono

- Capturar o carbono na fonte emissora e direcioná-los para drenos não atmosféricos.
 - Absorção do CO₂ diretamente da corrente de gases pelo contato com um solvente.
 - Injeção dos gases em velhos poços de petróleo.
 - Bombeamento do CO₂ diretamente no oceano para que este seja absorvido por sedimentos em suspensão.
 - Direcionamento mais eficientes para ecossistemas terrestres como florestas, etc.
 - Injeção de carbono em reservas de sal no fundo do mar.
- Há muitas propostas e pesquisa nesta área.



Destruição da camada de ozônio

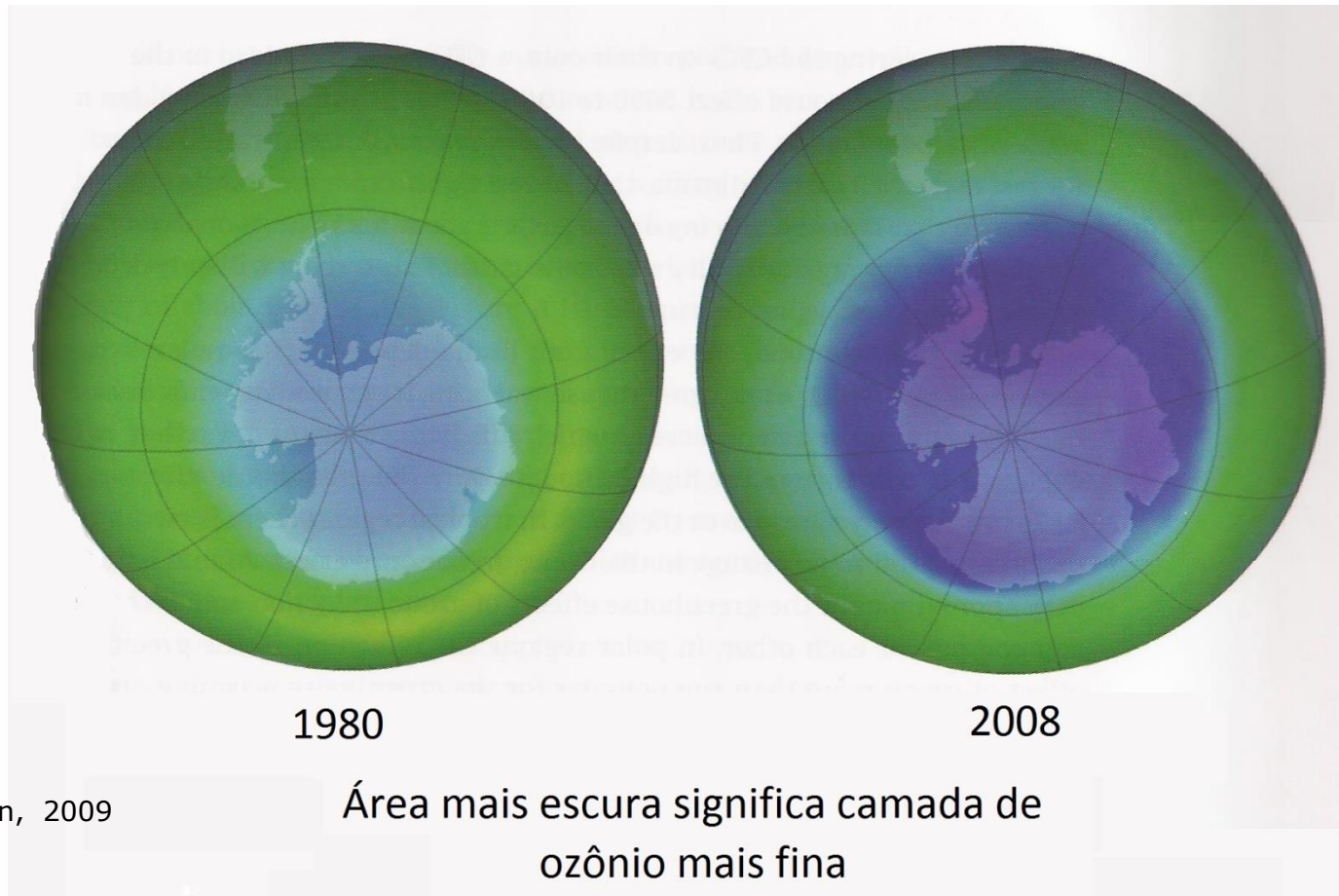
Destruição da camada de ozônio

- Existe ozônio em duas regiões da atmosfera:
 - Baixa troposfera e superfície da Terra
 - Estratosfera (entre 10 e 50 km de altitude)
- Em cada região o problema do O_3 é distinto:
 - Superfície da Terra – poluição
 - Estratosfera – destruição da camada de O_3
- Não está ligado ao problema do aquecimento global, mas é outro problema ambiental global causado pela ação humana.

Ozônio na estratosfera

- Concentração em torno de 300 ppb (partes por bilhão).
- Função do O_3 é absorver a radiação solar ultravioleta que é danosa à saúde dos seres vivos.
- Observa-se redução de O_3 de até 9 % em regiões de latitude mais elevada
- Consequências da redução de O_3 e aumento da incidência de radiação UV:
 - Maior incidência de cancer de pele causado pela radiação ultravioleta
 - Redução da capacidade imunológica
 - Danos às colheitas
 - Destruição dos elos iniciais da cadeia alimentar marinha
 - Diminui a capacidade de fotossíntese dos fitoplanctons (vegetais unicelulares) que são alimentos para peixes.

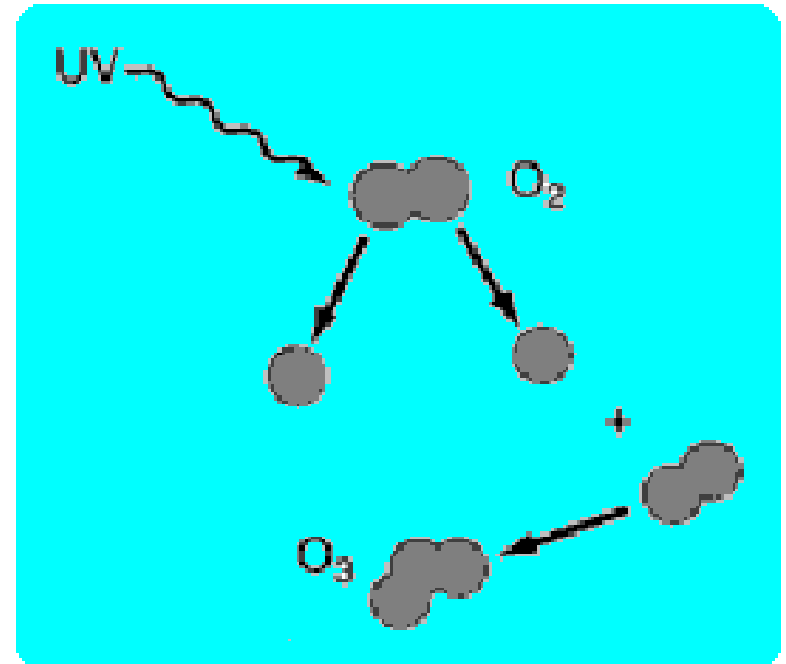
Redução da camada de ozônio na Antártida



Fonte:
J. Houghton, 2009

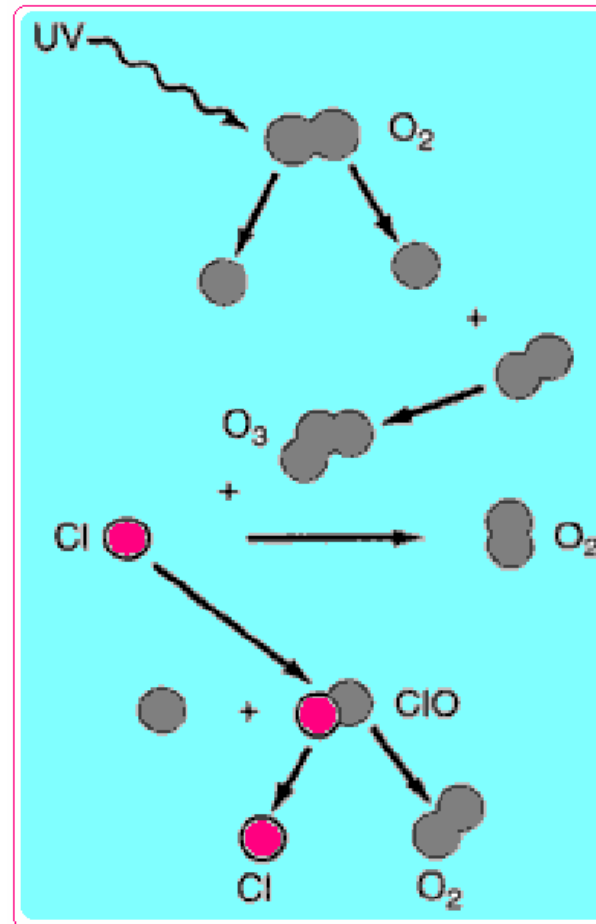
Formação da camada de O₃ na estratosfera

- Na atmosfera, a radiação UV destrói moléculas de O₂ liberando átomos livres de O.
- Os átomos livres de O reagem com moléculas de O₂ formando moléculas de O₃
- Na atmosfera há um equilíbrio entre O₃, O₂ e O.



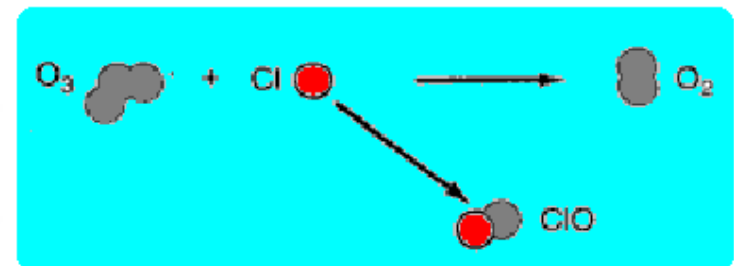
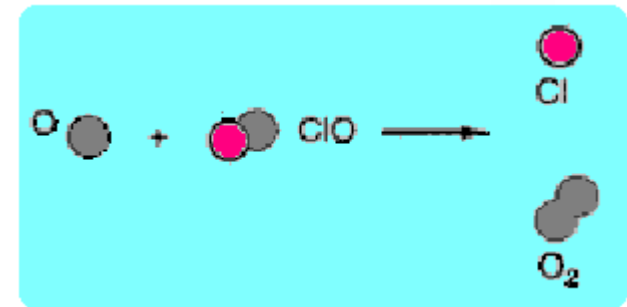
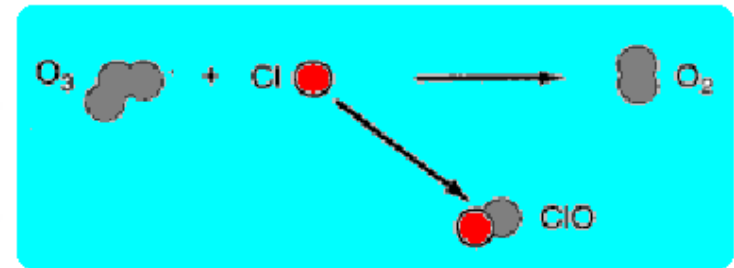
Mecanismo de destruição Ozônio na estratosfera

- O mecanismo ainda não está plenamente conhecido.
- O CFC sobe até a estratosfera.
- Reage com radiação UV e libera um átomo de Cl.
- O cloro livre tem uma reatividade elevada com O_3 e perturba o equilíbrio existente.



Mecanismo da destruição da camada de ozônio

- O átomo de cloro livre reage com o O_3 formando O_2 de ClO .
- O oxigênio livre na estratosfera reage com o ClO liberando o átomo de Cl .
- O átomo de cloro livre ataca outra molécula de O_3 e reinicia o processo.
- As reações precisam de escuridão e baixa temperatura (sobre os polos).
- Um átomo de cloro livre pode destruir até 10000 moléculas de O_3 .

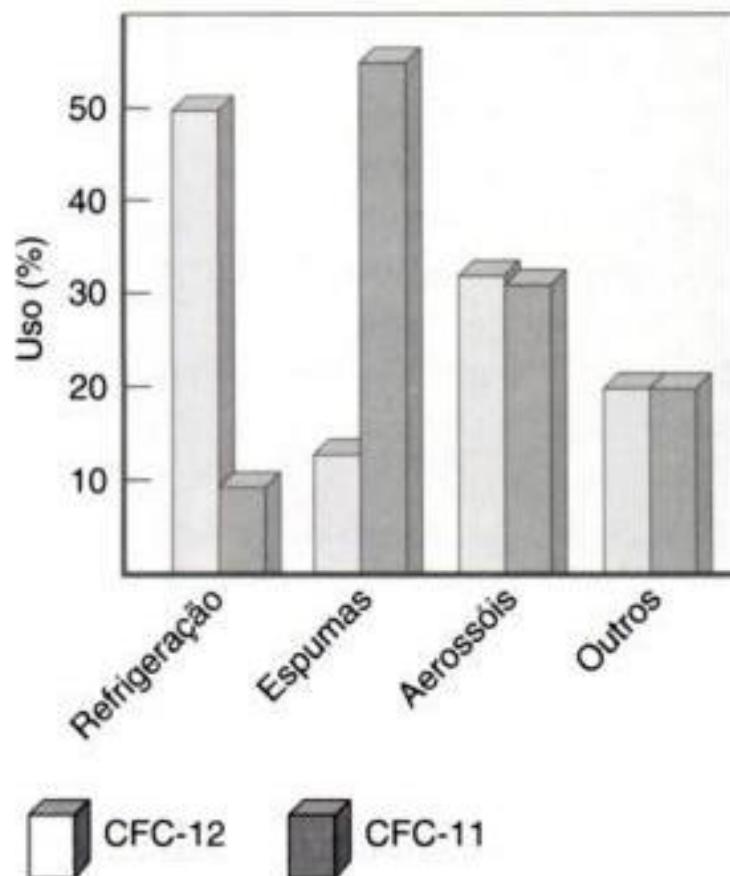


Produtos químicos que contribuem para a destruição da camada de ozônio

Produto Químico	Emissões em 1985 (mil toneladas)	Vida Média na Atmosfera* (anos)	Aplicações	Taxa de Crescimento Anual (%)	Contribuição Percentual para a Destruição do Ozônio
CFC-11	238	76	Espumas, aerossóis, refrigeração	5	26
CFC-12	412	139	Ar condicionado, refrigeração, espumas, aerossóis	5	45
HCFC-22	72	22	Refrigeração, espumas	11	0
CFC-113	138	92	Solventes	10	12
Halon 1211	3	12	Extintores de incêndio	23	1
Halon 1301	3	101	Extintores de — incêndio	—	4
Tricloroetano	474	8	Solventes	75	5
Tetracloroeto de Carbono	66	67	Solventes	1	8

*Tempo necessário para que 63% da concentração do produto químico seja eliminada pela atmosfera. (World Watch Institute [www.worldwatch.org], State of the World, 1989)

Usos do CFC nos produtos e serviços industriais





Proteção da camada de ozônio

- Em 1978 o uso de CFC foi banido nos EUA.
- Em 1985, cientistas observaram uma redução na concentração de ozônio na estratosfera sobre a Antártida.
 - A concentração caía para 50 % durante a primavera.
 - Denominados buracos na camada de ozônio.
- Tal também foi observado na região ártica.
- Protocolo de Montreal em 1987
 - Congelamento da produção de CFCs aos níveis de 1986
 - Redução da produção a 50 % até 1999
 - Completo banimento nos países desenvolvidos de CFC a partir de 2000.
 - Países em desenvolvimento podem ainda utilizar (prazo mais longo para banimento).



Fim