



Meteorologia Básica I

Balanço de Energia e Defesa Planetária

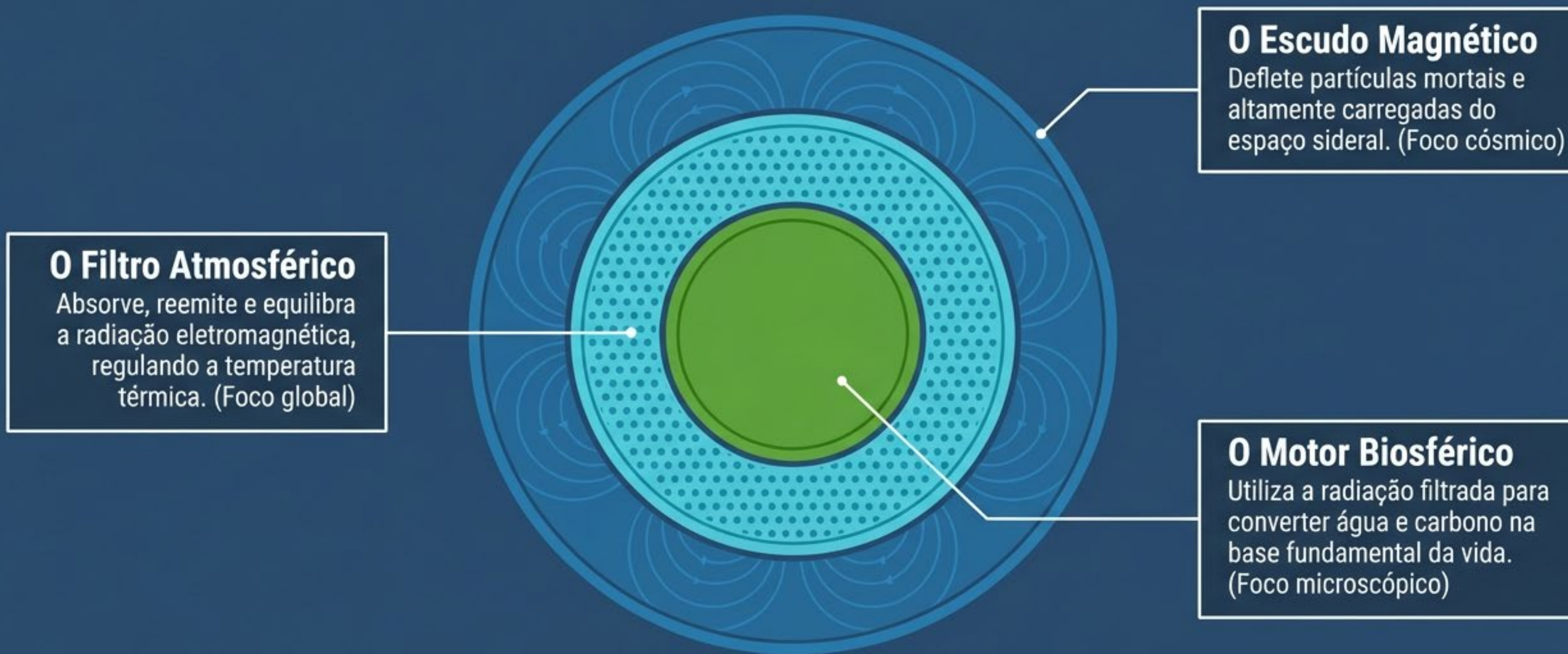
Prof. Reinaldo Haas
Universidade Federal de Santa
Catarina - UFSC

Balanço Energético e Defesa Planetária

Como a Terra filtra, equilibra e utiliza a radiação solar para sustentar a vida.



AS CAMADAS DA VIDA



A Terra não é uma rocha passiva no espaço; é um sistema de defesa ativo composto por barreiras sobrepostas que transformam radiação letal em energia vital.

A Primeira Linha de Defesa Ativa do Planeta

Descoberta (1958)

Identificados por James Van Allen através da sonda Explorer 1.

O Mecanismo

Forças de Lorentz obrigam partículas carregadas a viajar em um padrão helicoidal ao longo das linhas do campo geomagnético. Ao se aproximarem dos polos, a velocidade zera e elas rebatem (*bouncing*) para o outro polo.

A Estrutura

Cinturão Interno: Altitude de 1.000 a 5.000 km. Formado por prótons altamente energéticos.

Cinturão Externo: Composto primariamente por elétrons energéticos aprisionados.



A Brecha na Armadura: Anomalia do Atlântico Sul (AMAS)

O escudo não é perfeitamente simétrico. Uma depressão no campo magnético sobre o Brasil e o Atlântico Sul permite que a radiação do cinturão interno alcance altitudes mais baixas.



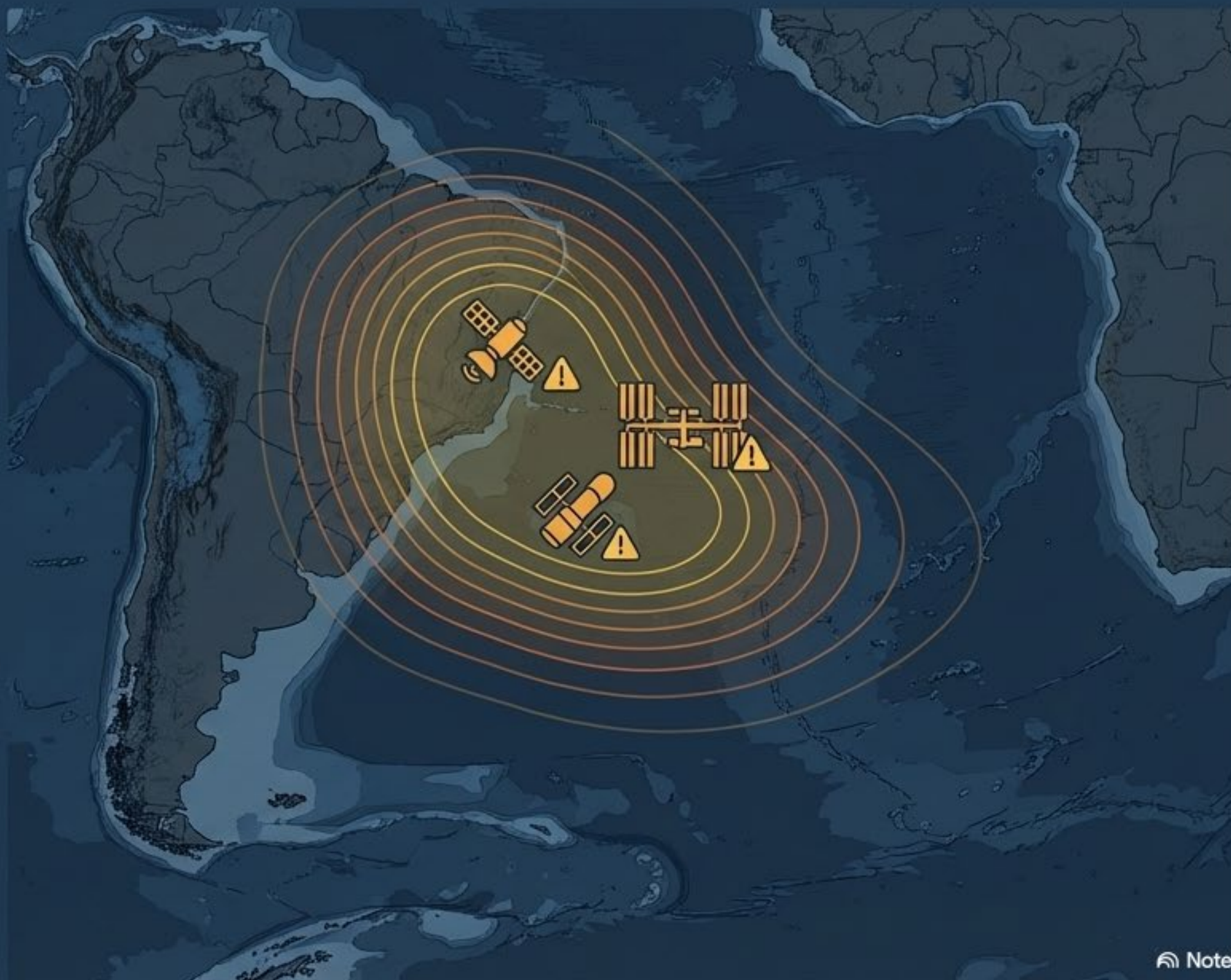
Satélites: Em órbitas com inclinações de 35° a 60° enfrentam forte exposição à radiação por vários minutos.



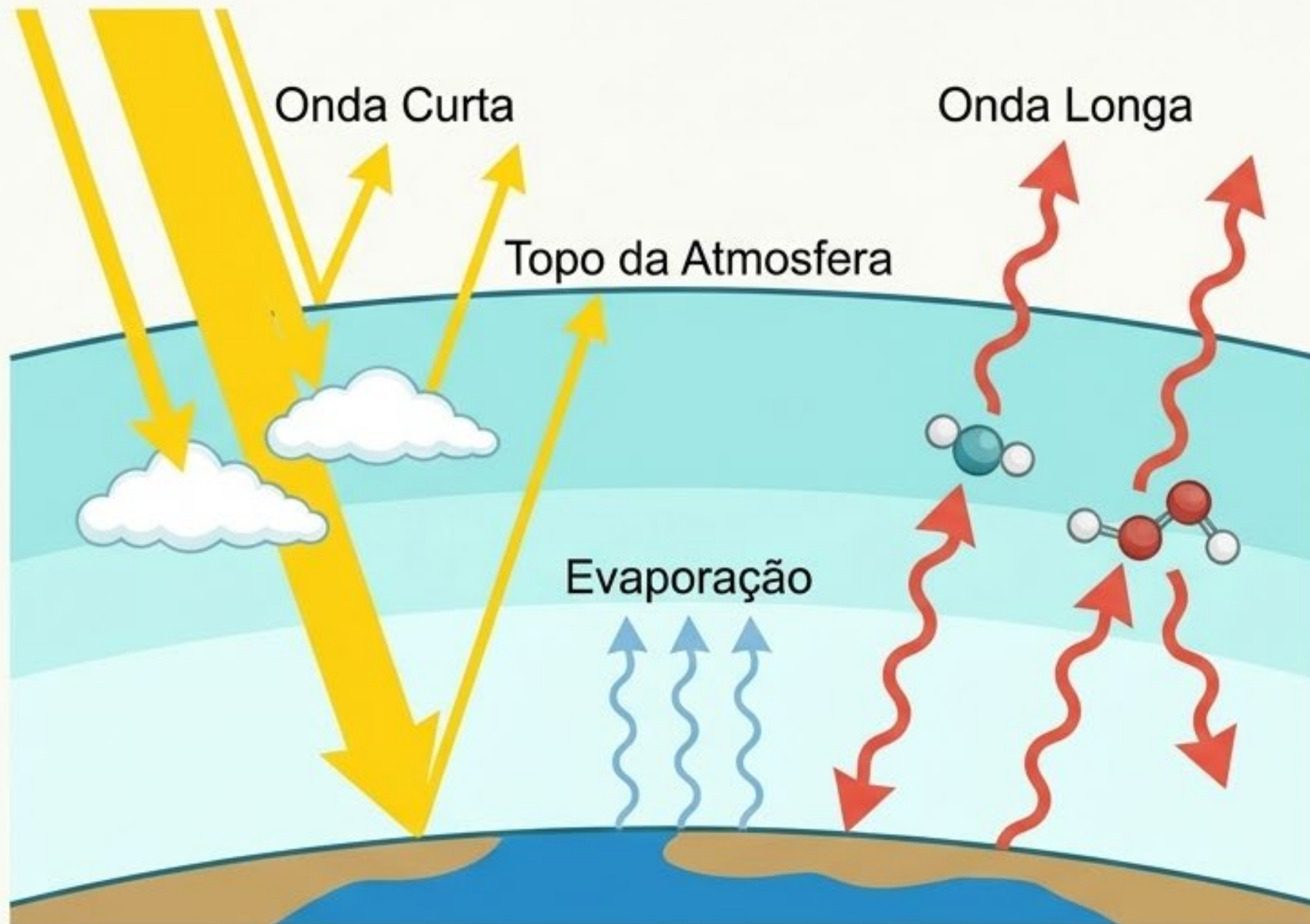
Estação Espacial Internacional: Orbitando com inclinação de 51,6°, exige revestimentos de proteção rigorosos especiais.



Telescópio Hubble: Forçado a interromper observações astronômicas ao cruzar esta região para evitar danos aos sensores.



O Grande Filtro: Balanço de Radiação Atmosférica



Entrada: Radiação de onda curta entra pelo topo da atmosfera. Parte é espalhada; parte é transmitida à superfície.

Absorção: A Terra absorve essa energia, gerando evaporação e fluxo de calor sensível.

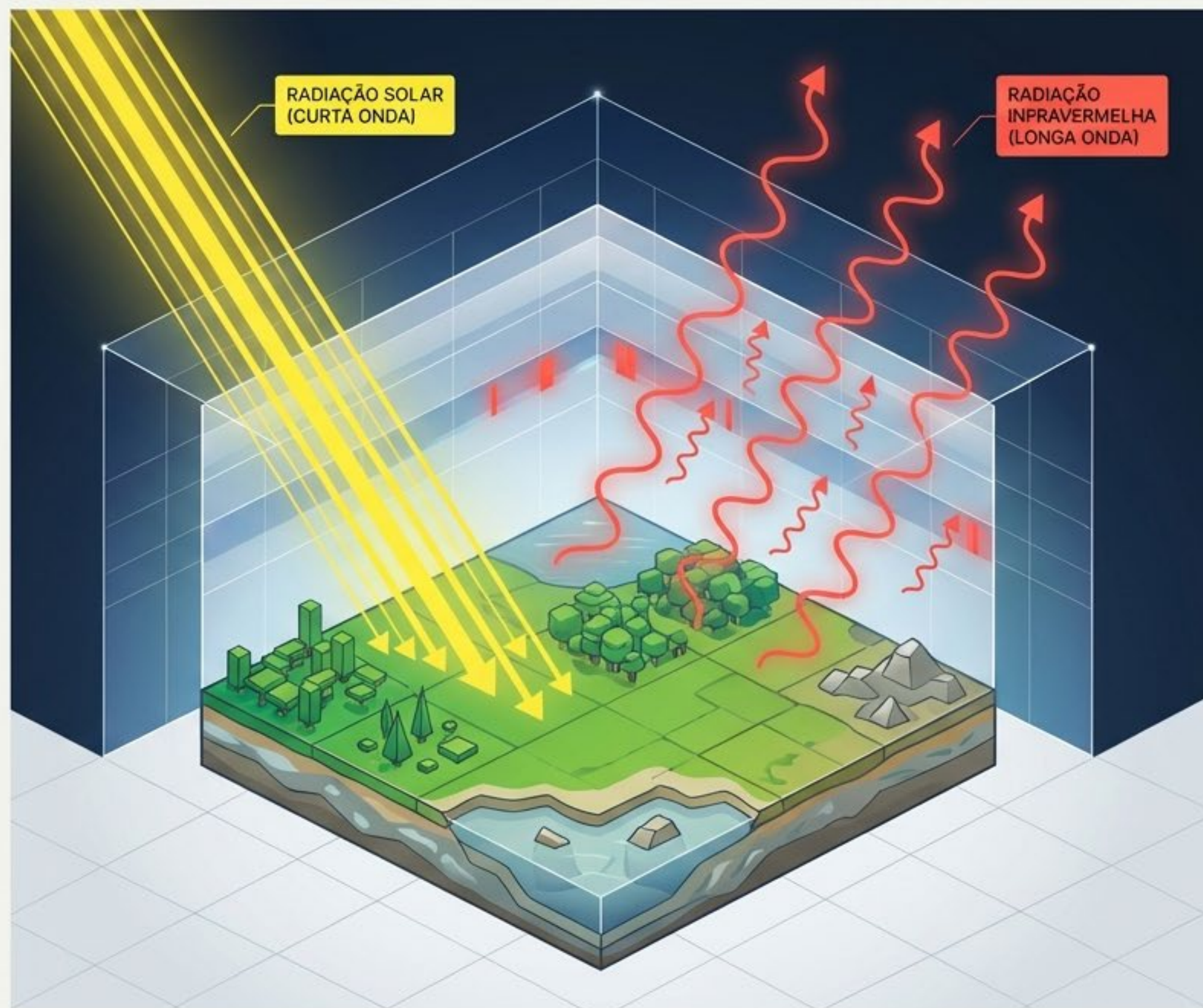
Saída: A superfície aquecida emite radiação de onda longa (infravermelho) de volta para cima.

Efeito Estufa: A atmosfera absorve a onda longa e a reemite para a superfície, garantindo a temperatura habitável.

A Máquina Térmica da Terra

Radiação, Atmosfera e o Balanço de Energia: A jornada térmica do espaço molecular à escala planetária.

Meteorologia Básica I - Transferência de Energia na Atmosfera.



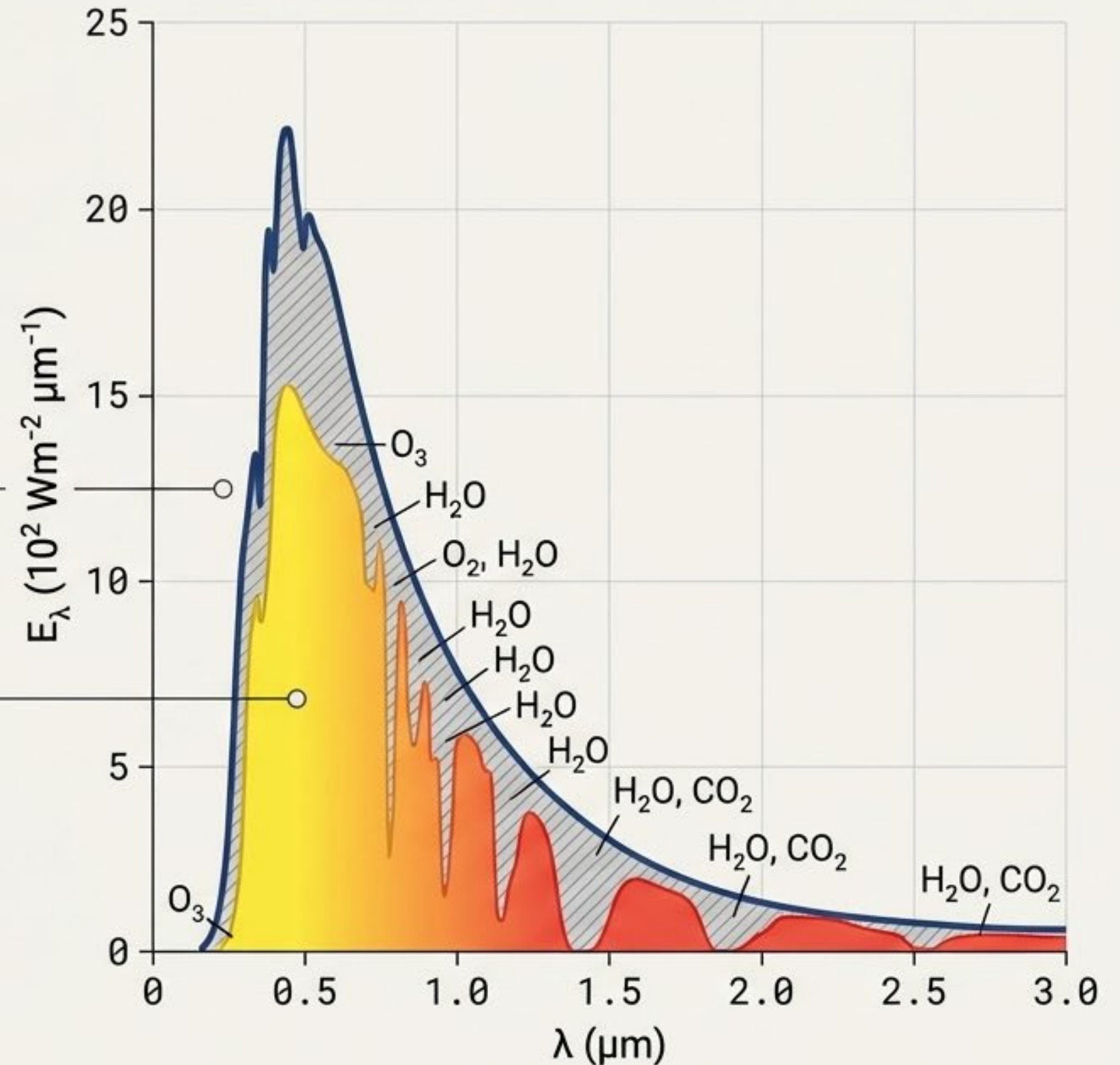
O Filtro Protetor: A Janela Atmosférica

Apenas uma fração da radiação atinge a superfície. A área de diferença entre o topo da atmosfera e o nível do mar representa a filtragem.

Janela Visível/UV: Onde a onda curta flui quase sem resistência (44% luz visível).

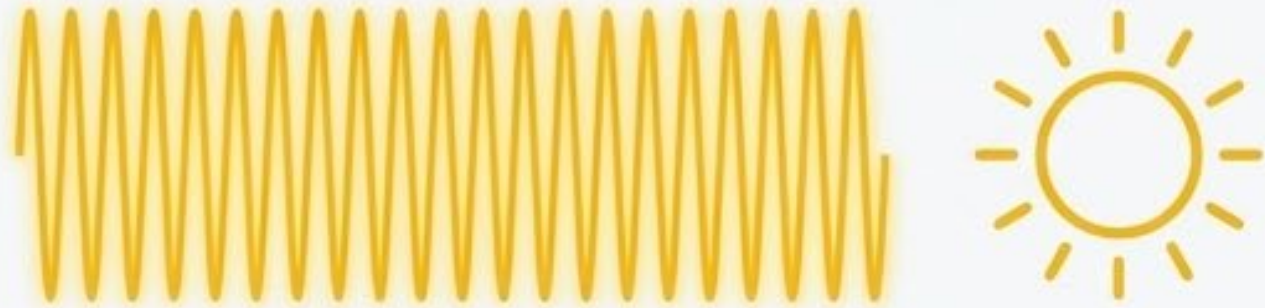
Absorção e Espalhamento

- **Espalhamento:** Por nuvens, aerossóis e moléculas de ar.
- **Absorção Direta:** Moléculas específicas como O_3 (Ozônio) e H_2O (Vapor d'água) devoram bandas específicas do espectro antes que cheguem ao chão.



O Espectro Duplo: A Física da Radiação

Radiação Solar Incidente



Radiação Terrestre Emitida



Tipo: Radiação de Onda Curta

Energia: Alta

Composição: Contém a Janela no Visível e banda UV.

Ação: Atravessa a atmosfera e é o motor principal do sistema terrestre.

Tipo: Radiação de Onda Longa (Calor)

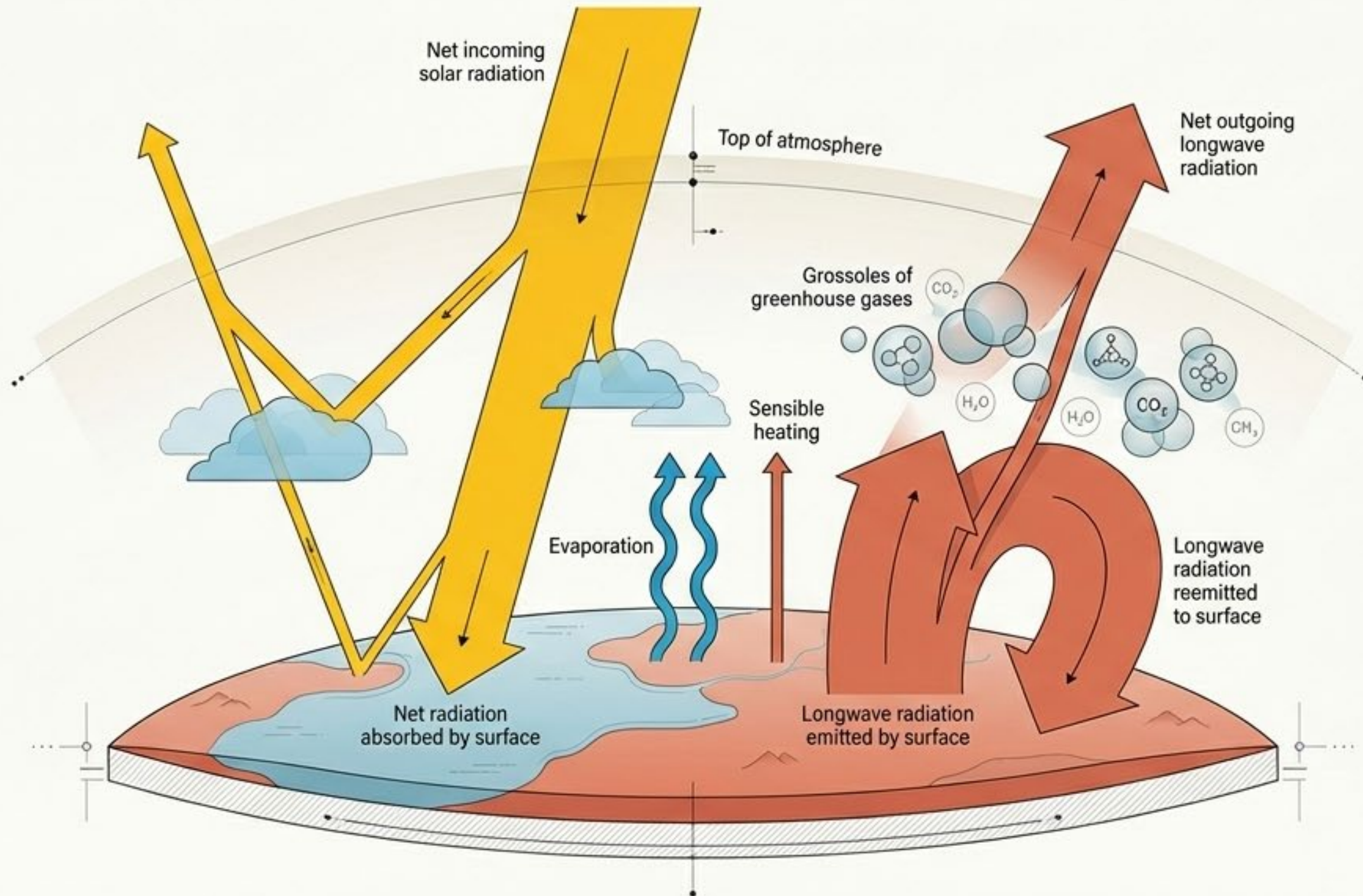
Energia: Baixa energia fotônica (não dissocia componentes químicos).

Composição: Banda Infravermelha (0.7 μm até ~ 1000 μm / 1 mm).

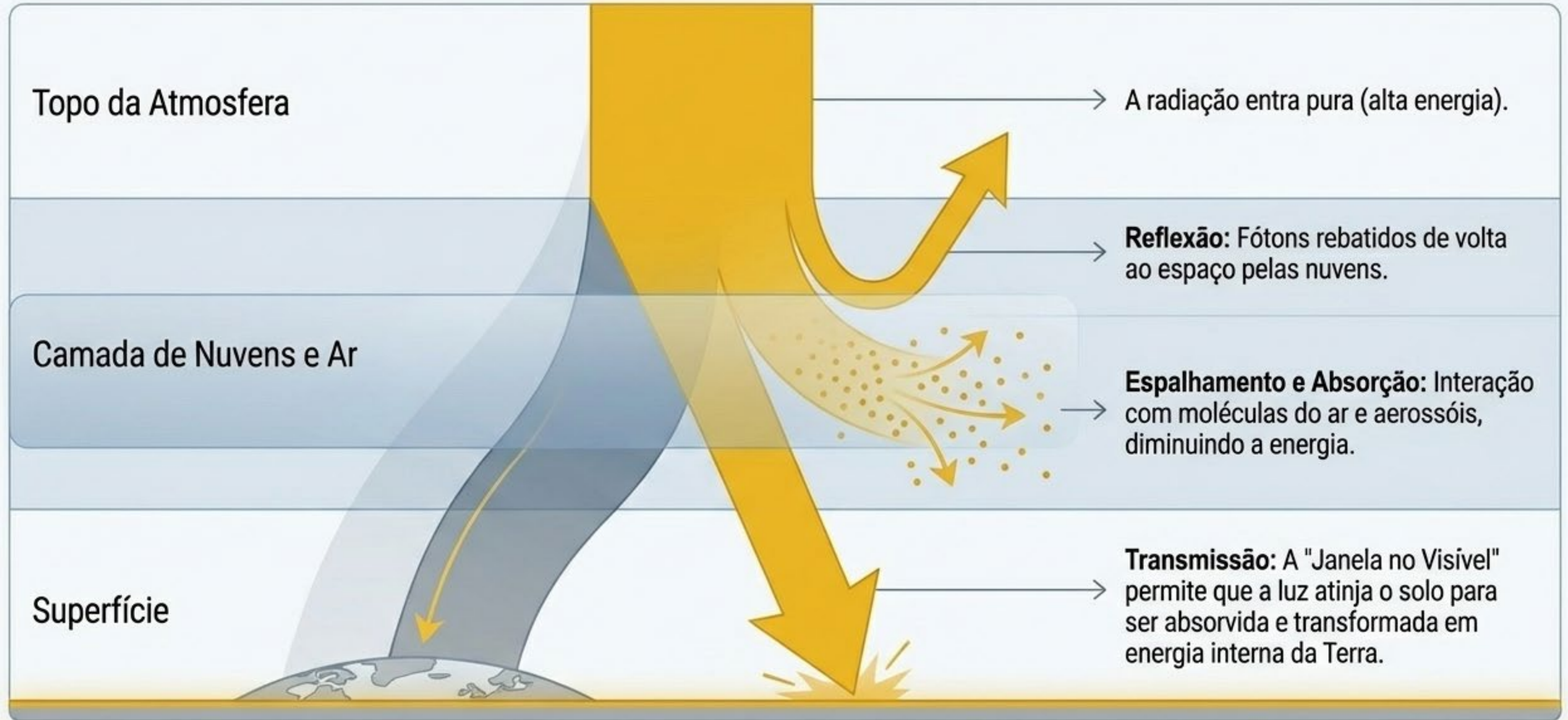
Ação: Crucial para a troca de calor vertical; fortemente absorvida por gases estufa.

O Balanço Global de Energia

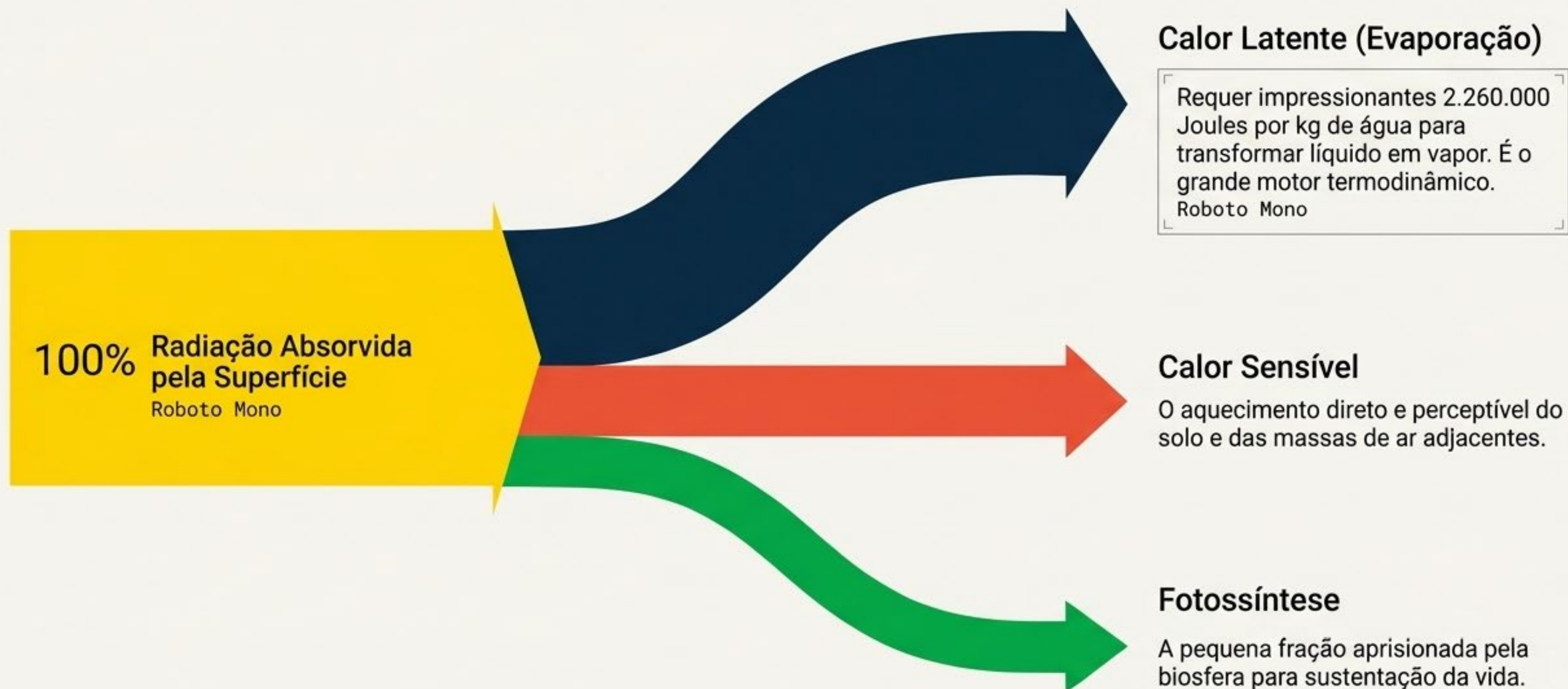
A estabilidade climática depende de um orçamento perfeito: a radiação solar incidente (onda curta) deve retornar ao espaço como onda longa e reflexão.



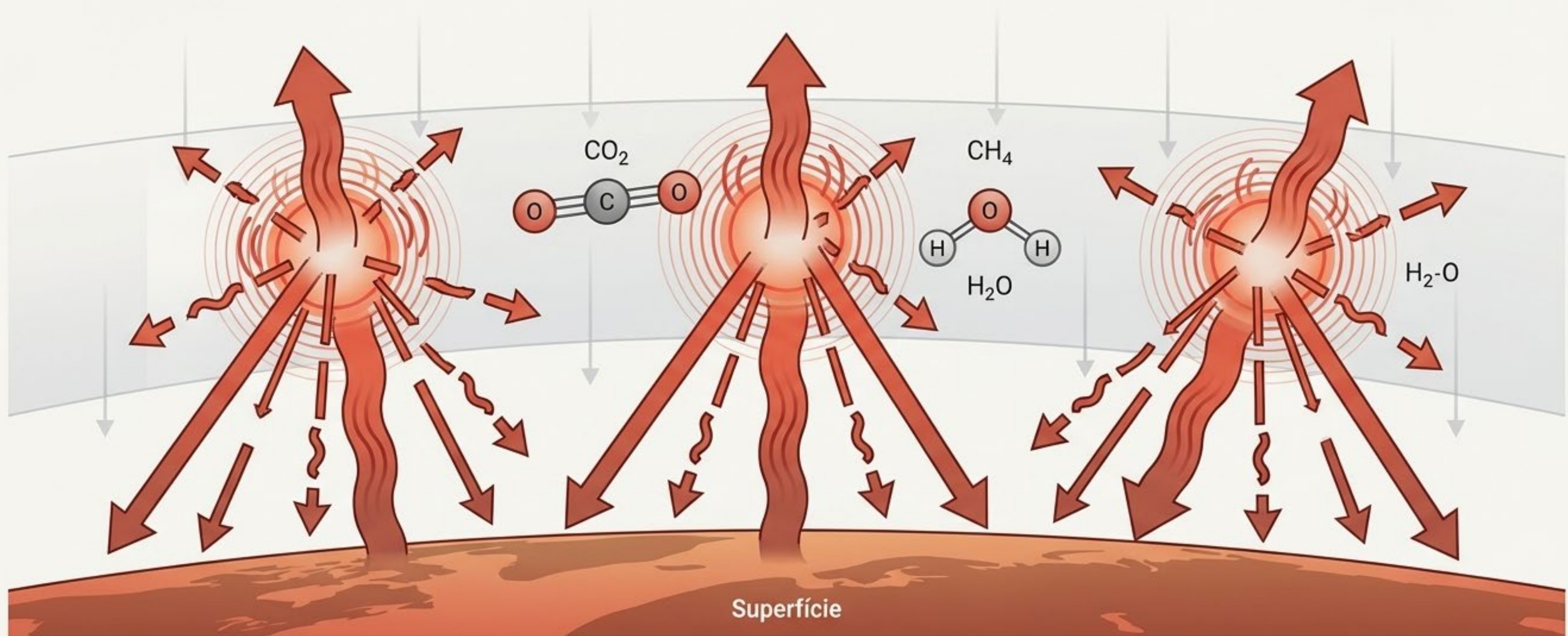
A Chegada: O Destino da Onda Curta



O Destino da Energia na Superfície



O Labirinto Infravermelho (Efeito Estufa)



A Emissão:

A superfície aquecida irradia energia de volta para cima na forma de Radiação de Onda Longa.



O Gatilho Químico:

A banda infravermelha não quebra moléculas, mas possui a frequência exata para fazer os gases estufa vibrarem.

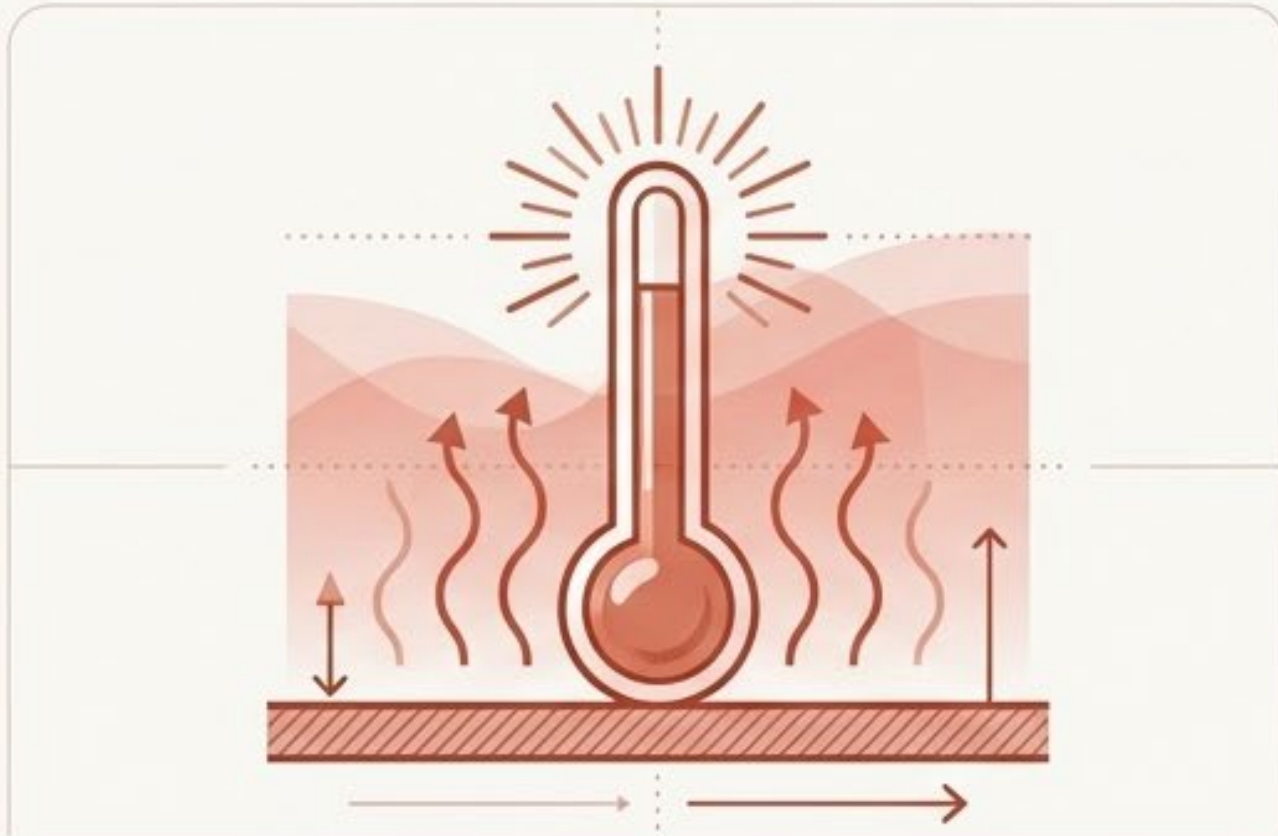


A Re-emissão:

As moléculas absorvem e re-emitem o calor em todas as direções. Grande parte retorna à superfície, atrasando a perda térmica.

A Resposta da Superfície: Como a Terra Gasta a Energia

Calor Sensível



Energia usada para aquecer diretamente o ar em contato com o solo. É a temperatura térmica que nós efetivamente "sentimos".

Calor Latente / Evaporação

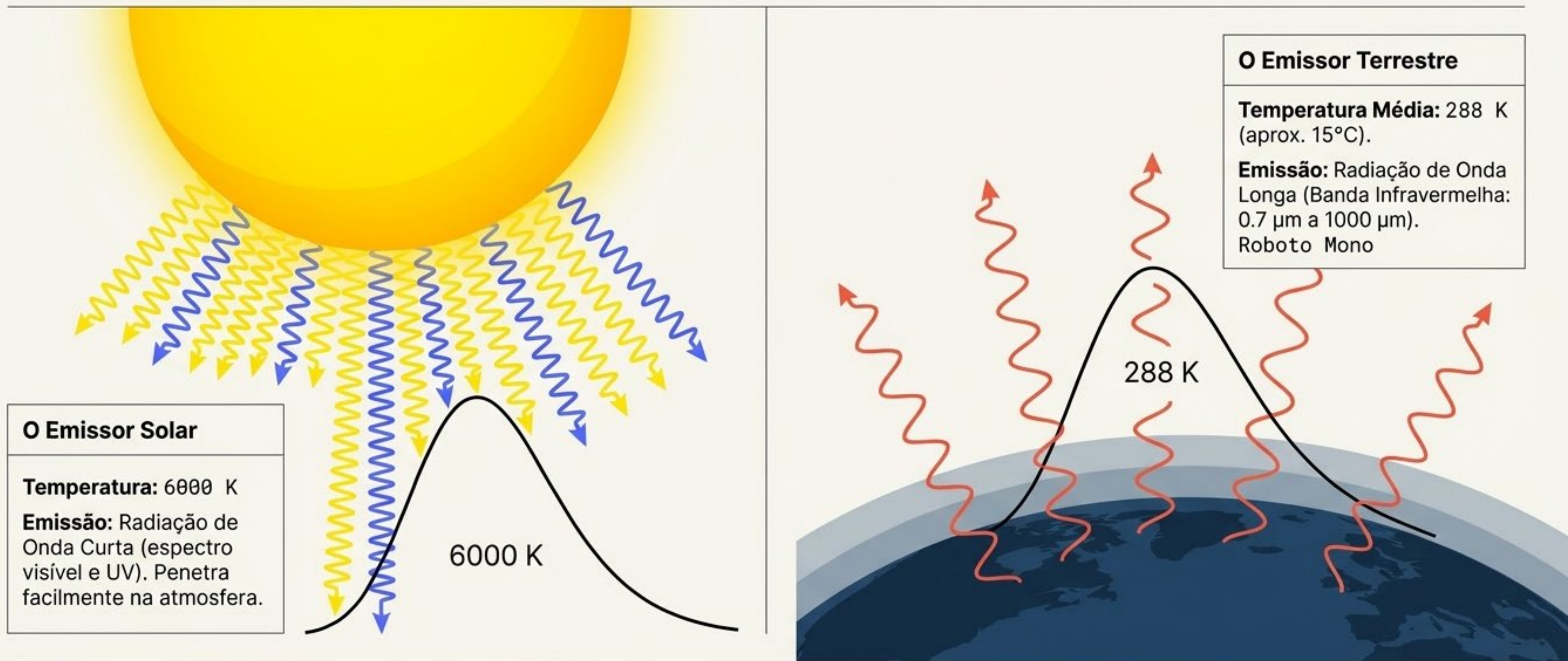


Energia consumida mecanicamente na evaporação da água. Transfere umidade e energia latente (invisível) para a atmosfera, atuando como o combustível da biosfera.

O Ciclo de Vida da Radiação no Sistema Terrestre

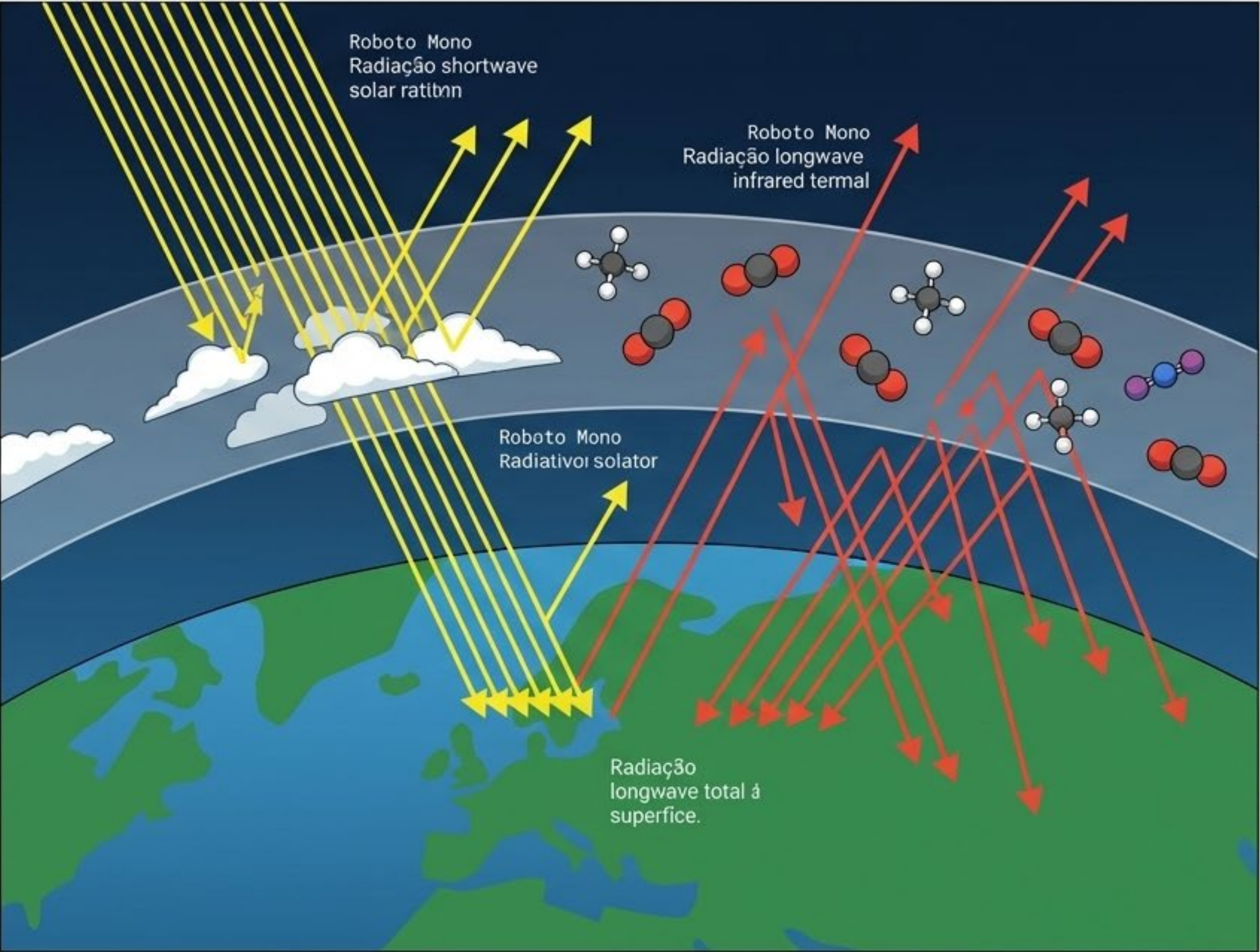


A Grande Transformação: Onda Curta vs. Onda Longa



Insight: A energia infravermelha não possui força para dissociar componentes químicos (fotoquímica), mas é perfeitamente calibrada para induzir vibração molecular — a chave para o calor.

Macro-Mecânica do Efeito Estufa



A Mecânica do Efeito Estufa

O Orçamento Radiativo	
70%	da radiação total é absorvida (atmosfera e superfície).
30%	é refletida diretamente de volta ao espaço.

A Armadilha (The Trap)	
A Terra irradia o calor absorvido em ondas longas. Gases de Efeito Estufa (GEE) de longa duração (CO2, CH4, N2O) absorvem esta energia e a re-emitem em todas as direções — inclusive de volta para baixo.	

Delta de Temperatura	
1	Sem GEE Natural: -18°C (Inóspito)
2	Com GEE Natural: 14°C (Habitável)
3	A Crise: O aumento antropogênico intensifica este cobertor.

Arquitetura Química: Por que certos gases aprisionam calor?

O espectro infravermelho é cego para moléculas simples, mas interage violentamente com geometrias complexas que atuam como 'antenas' térmicas.

Diatômicas (Invisíveis ao Calor)



Exemplos: N_2 , O_2 , CO

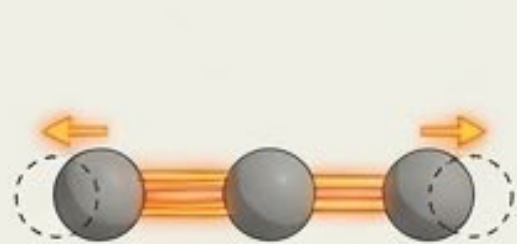
Mecânica: Apenas dois átomos. Estrutura rígida, vibram muito pouco. Quase não interferem na onda longa.

Triatômicas (As Antenas de Calor)

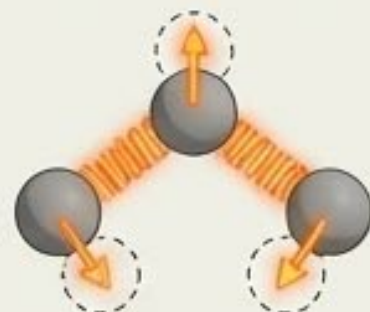


Exemplos: CO_2 , H_2O , N_2O , O_3 , CH_4 .

Mecânica: Três ou mais átomos. As forças interatômicas de ligação atuam como 'molas' flexíveis, possuindo múltiplos modos vibracionais e níveis de energia próprios.



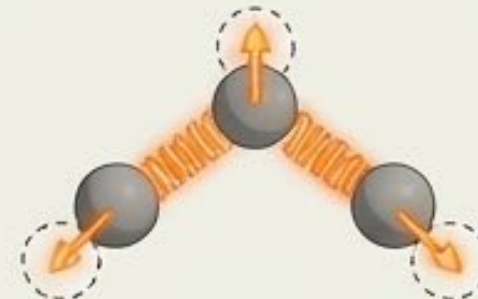
Symmetric stretch
 ν_1



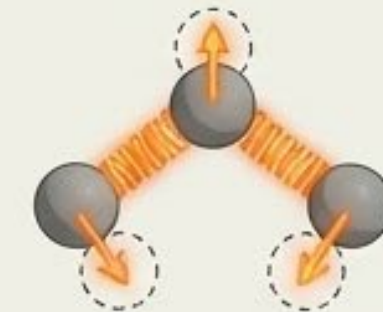
Bending
 ν_2



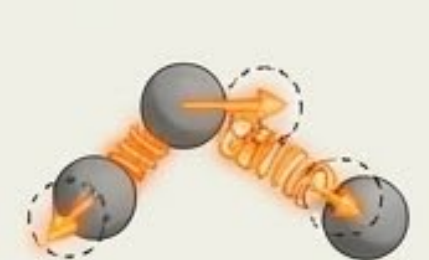
Asymmetric stretch
 ν_3



Symmetric stretch
 ν_1



Bending
 ν_2



Asymmetric stretch
 ν_3

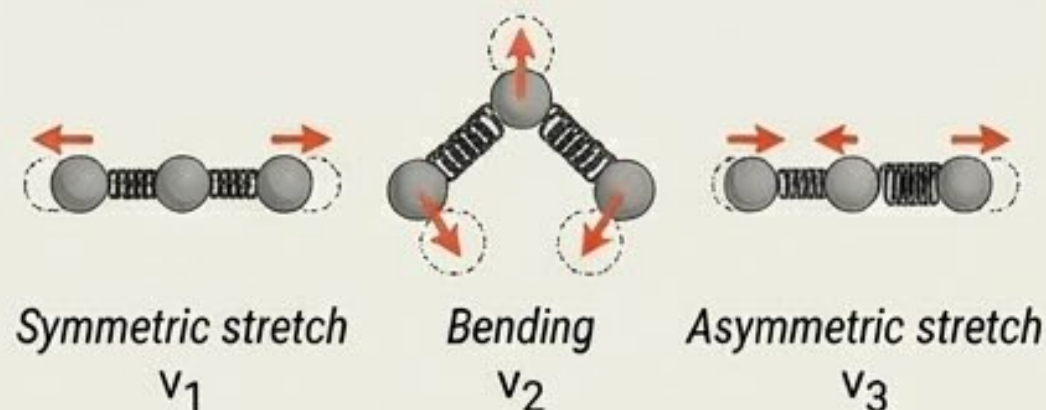
A Dança Molecular do Calor

Modos Vibracionais Normais:

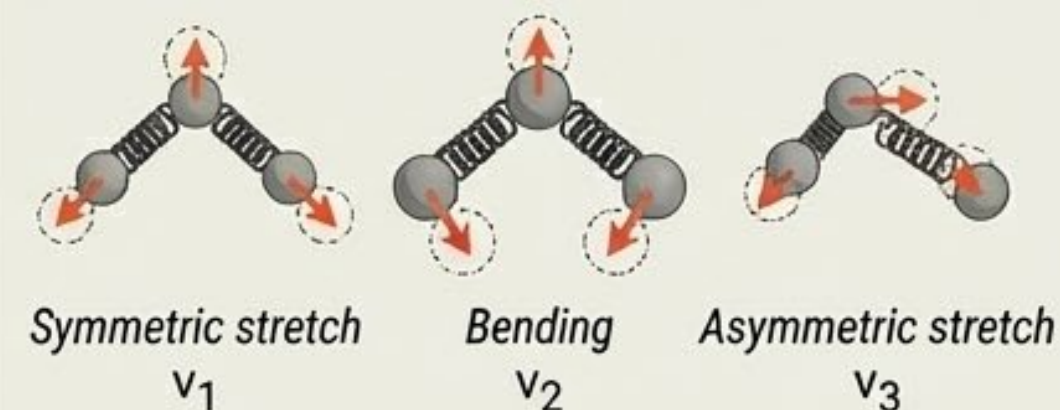
Cada estrutura possui uma combinação de entortamentos (Bending) e estiramentos (Stretching).

Estiramento Simétrico vs Assimétrico.
Entortamento (ν_2).

Linear Triatomic



Nonlinear Triatomic



Estudo de Caso: O Metano (CH_4)

O aumento do Metano altera brutalmente o balanço energético. Por quê?

Os movimentos simultâneos dos átomos de Carbono e Hidrogênio geram modos característicos violentos quando atingidos pelo infravermelho:

Modo o3: **3156.8 cm^{-1}**

Modo o4: **1367.4 cm^{-1}**

O Ciclo de Amplificação: O Vapor D'água



3. A Força Multiplicadora:

O vapor de água é um GEE extremamente potente em banda infravermelha.



3.

Regra dos 7%:

Para cada **grau Celsius (1°C)** de aumento na temperatura média, a **atmosfera retém 7% a mais de vapor de água**, amplificando o aprisionamento inicial de calor.

1.

1. Gatilho Inicial:

Aumento de CO_2 antropogênico aumenta levemente a temperatura base.

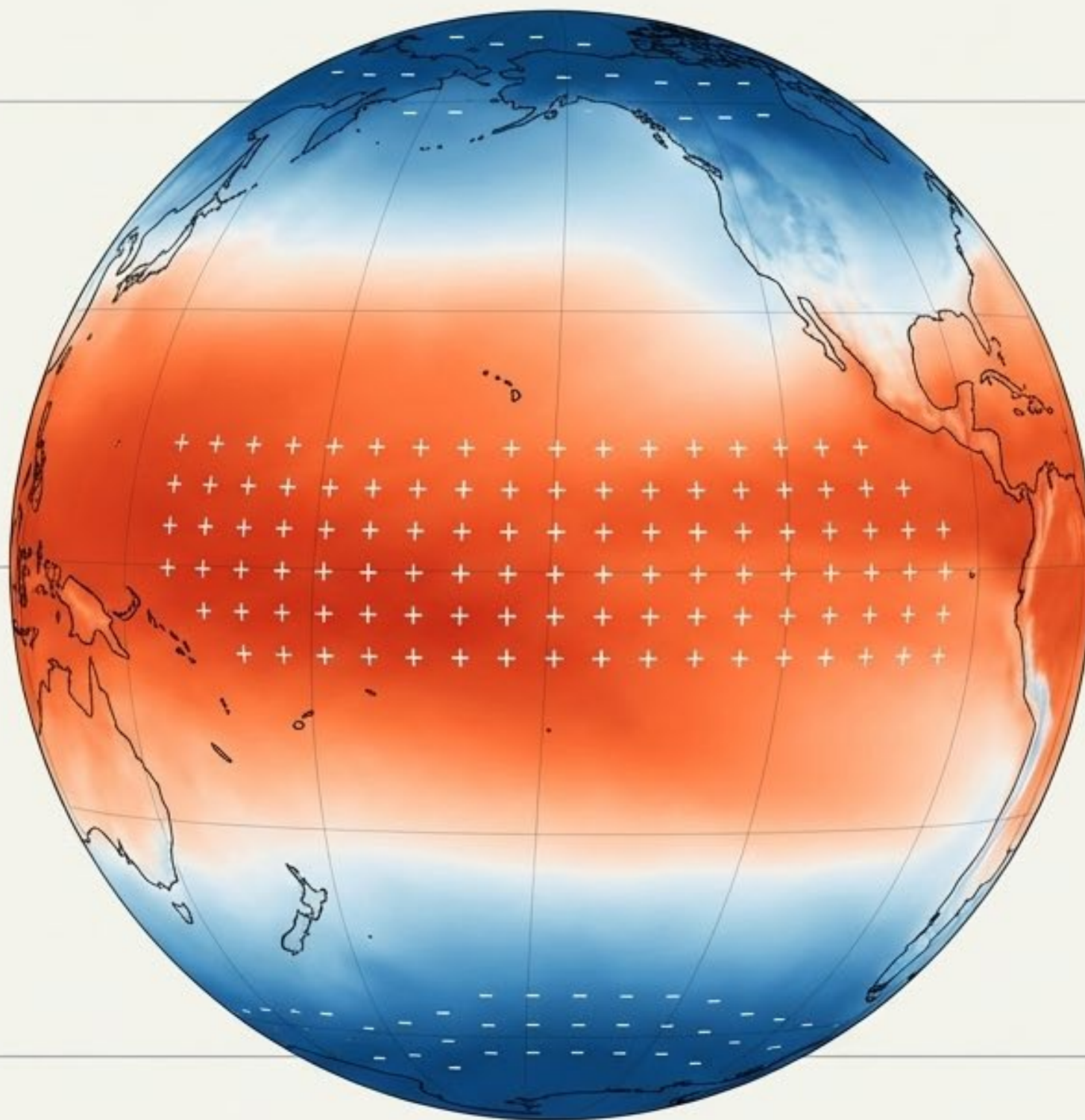


2.

2. Evaporação Acelerada:

Oceanos e biosfera mais quentes liberam mais H_2O na atmosfera.





O Desequilíbrio Global: Equador vs. Polos

O aprisionamento de energia não é uniforme. A geometria esférica cria uma tensão térmica permanente.

A ZONA DE GANHO (Superávit):

Latitudes abaixo de 40° N/S recebem uma carga contínua de radiação muito superior à que conseguem emitir.

A ZONA DE PERDA (Déficit):

Latitudes acima de 40° N/S perdem calor continuamente para o espaço.

O Dilema Físico

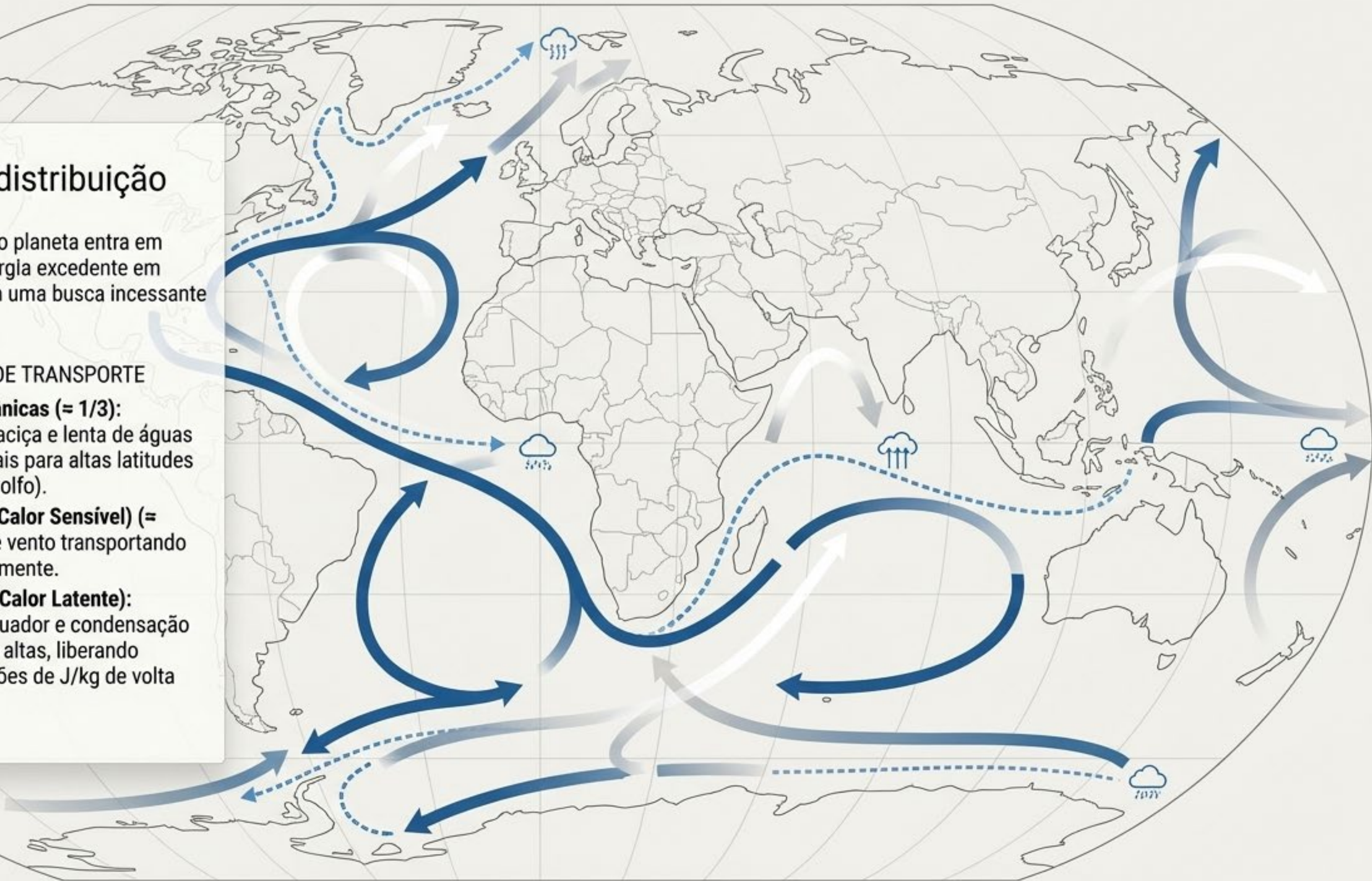
Se não houvesse uma mecânica de redistribuição, os oceanos equatoriais ferveriam e os polos congelariam em níveis absolutos.

A Grande Redistribuição

A máquina térmica do planeta entra em ação, forçando a energia excedente em direção aos polos em uma busca incessante por equilíbrio.

OS TRÊS MOTORES DE TRANSPORTE

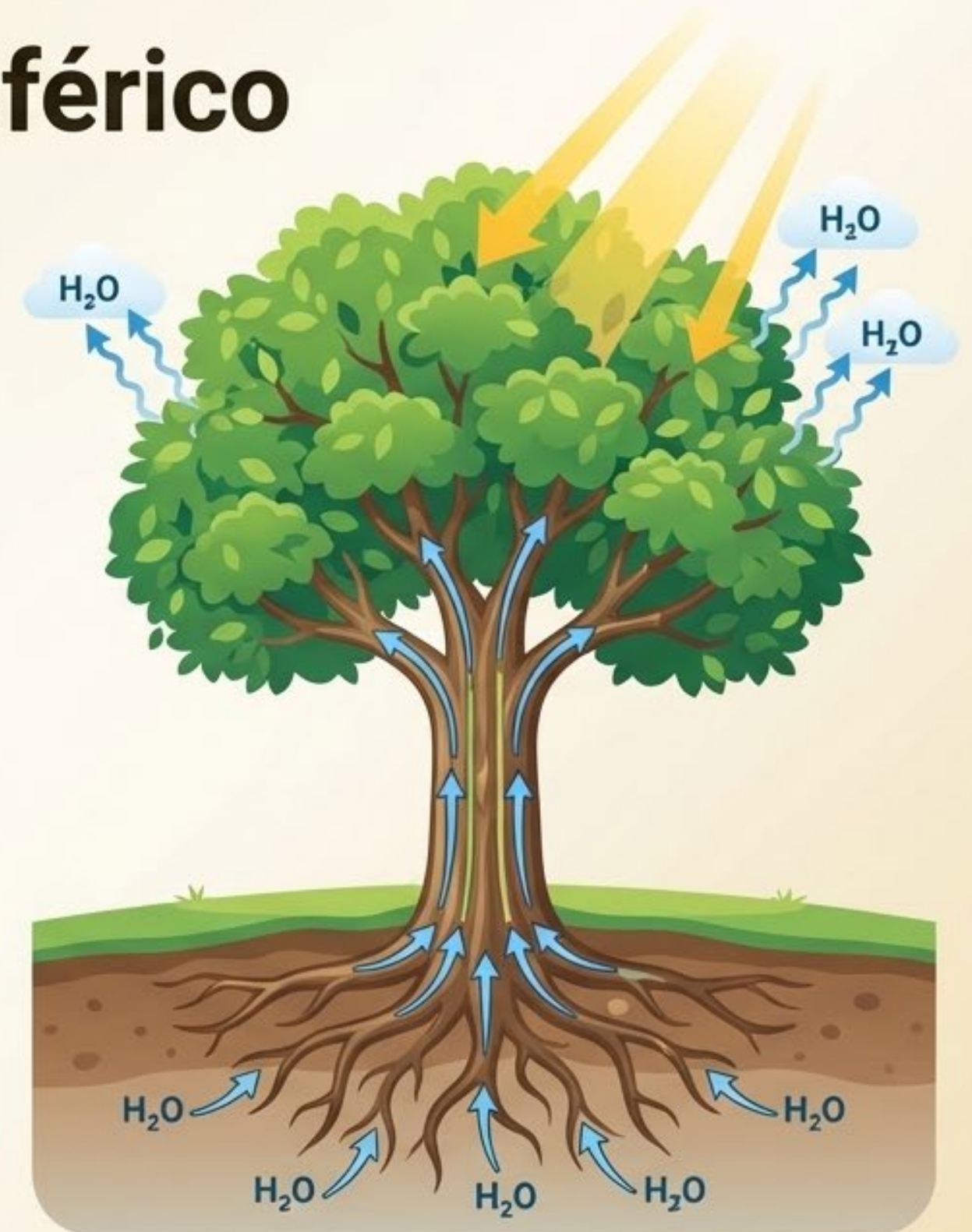
- **1. Correntes Oceânicas (= 1/3):** Movimentação maciça e lenta de águas quentes superficiais para altas latitudes (ex: Corrente do Golfo).
- **2. Massas de Ar (Calor Sensível) (= 1/3):** Correntes de vento transportando ar aquecido fisicamente.
- **3. Ciclo da Água (Calor Latente):** Evaporação no equador e condensação em latitudes mais altas, liberando aqueles 2,26 milhões de J/kg de volta para a atmosfera.



Camada 3: O Sumidouro Biosférico

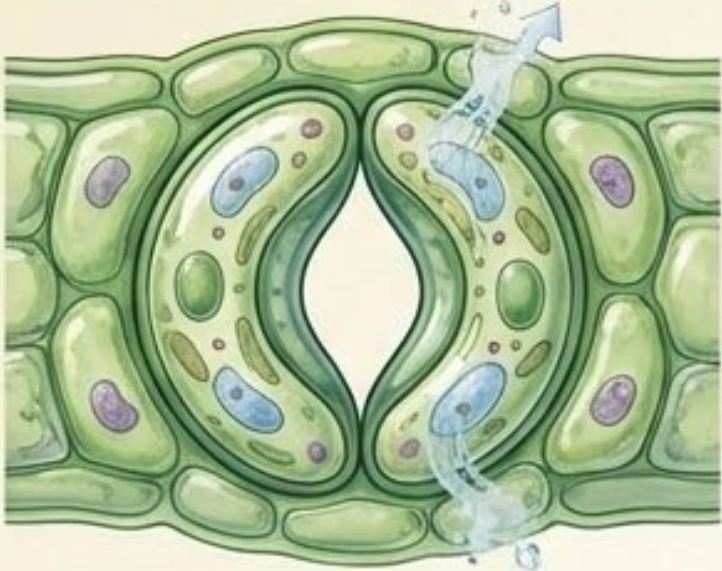
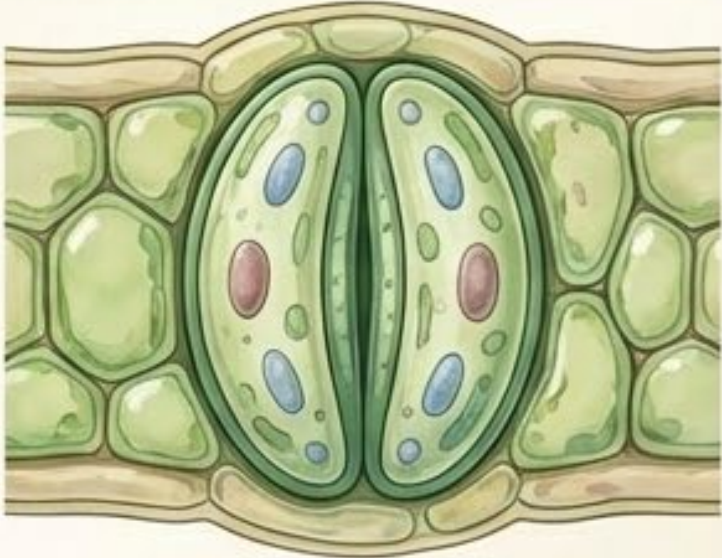
A energia que ultrapassa a atmosfera atua como o motor primário do ciclo hidrológico e da vida.

1. A radiação aquece a superfície, fornecendo calor sensível e latente.
2. A água (H_2O) entra pelas raízes profundas e viaja pelo tecido da planta.
3. Impulsionada pela Radiação Fotossinteticamente Ativa, a água alcança as folhas.
4. A folha realiza a transpiração e a fotossíntese ($CO_2 + 2H_2O \rightarrow CH_2O + O_2 + H_2O$), conectando a transferência de energia ao ciclo do carbono.

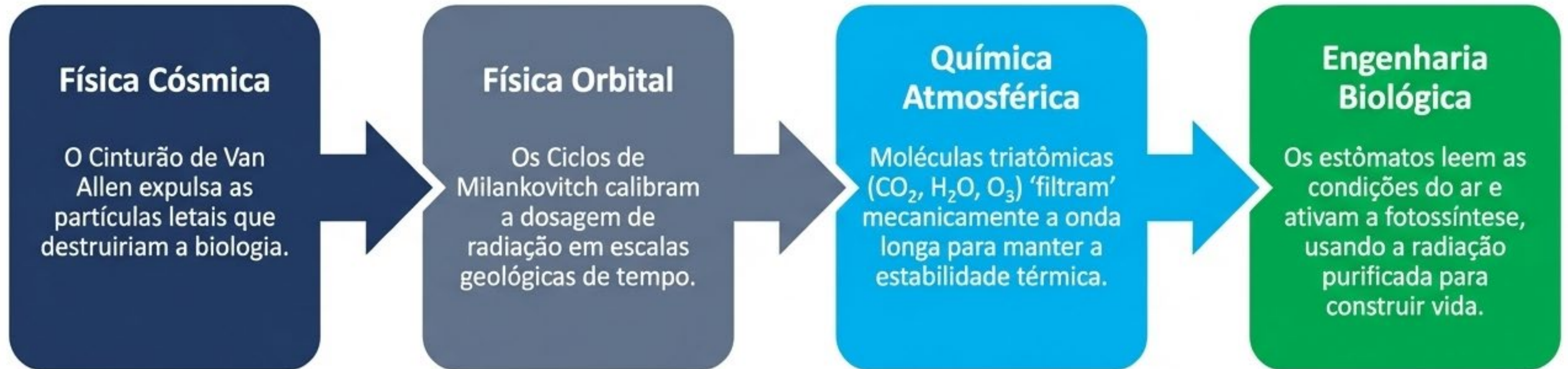


Matriz de Decisão: O Algoritmo dos Estômatos

A vegetação controla a transpiração atuando como válvulas dinâmicas que reagem ao ambiente.

Válvula Aberta (Estômato Aberto)	Válvula Fechada (Pequena Abertura)
	
✓ Nível de Luz: Alto	⚠ Nível de Luz: Pouca luz
✓ Umidade da Folha e Ar: Suficiente / Presente	⚠ Umidade: Folha seca / Ar muito seco
✓ Temperatura: Adequada (Ideal)	⚠ Temperatura: Extrema (Muito fria ou muito quente)
✓ Carbono: CO ₂ Moderado	⚠ Carbono: Alta concentração de CO ₂
✓ Nutrição: Alto Nitrogênio na folha	⚠ Nutrição: Baixos níveis de Nitrogênio

O Sistema de Suporte à Vida Totalmente Integrado



O balanço energético da Terra não é um número estático. É um motor dinâmico e contínuo onde a astronomia, a física quântica e a biologia microcelular operam em perfeito alinhamento.