

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS  
FACULDADE DE METEOROLOGIA  
INTRODUÇÃO À FÍSICA DA ATMOSFERA  
TURMA 2020 - 1

UNIDADE 1:

# COMPOSIÇÃO E ESTRUTURA DA ATMOSFERA

**Professor:**

**Mateus da Silva Teixeira**

## UNIDADE 1 – COMPOSIÇÃO E ESTRUTURA DA ATMOSFERA

### 1.1 Pressão e Densidade

1.1.1 Balanço Hidrostático

1.1.2 Pressão Como Coordenada Vertical

1.1.3 Densidade Atmosférica / Oceânica

### 1.2 Composição

1.2.1 Gases Permanentes

1.2.2 Componentes Variáveis – Vapor de Água, Dióxido de Carbono – Ozônio

### 1.3 Temperatura

1.3.1 A Zeroésima Lei da Termodinâmica

1.3.2 Temperatura e Energia Cinética Molecular – Calor– Temperatura Absoluta

1.3.3 Escalas de Temperatura

1.3.4 Perfis da Temperatura Atmosférica – Descrição Gráfica – Troposfera – Tropopausa – Estratosfera – Taxa de Variação Vertical da Temperatura com a Altura do Meio Ambiente – Inversões – Inversão da Radiação – Inversões de Subsidência – Inversão na Camada Limite – Inversão Marinha

1.3.5 Estrutura Termal Média da Atmosfera

1.3.6 Variação Latitudinal e Zonal

### 1.4 Na Prática

1.4.1 Medidas da Temperatura

1.4.2 Vento (Wind chill)

1.4.3 Observação de Ar Superior

1.4.4 Diagrama Skew-T – Introdução e Apresentação Geral

# A ATMOSFERA

- Cobre todo o planeta;
- Está ligada à Terra pela ação da gravidade;
- Altamente compressível (ar): sem um topo definido como o oceano;
- Compressibilidade como resposta a uma variação da pressão: também é responsável por uma variedade de fenômenos atmosféricos, tais como nuvens, precipitação, furacões e tempestades;
- Alguns aspectos de sua composição observada e a estrutura vertical bruta, são observados como sendo relativamente constantes.



Fonte da imagem: <http://news.mit.edu>

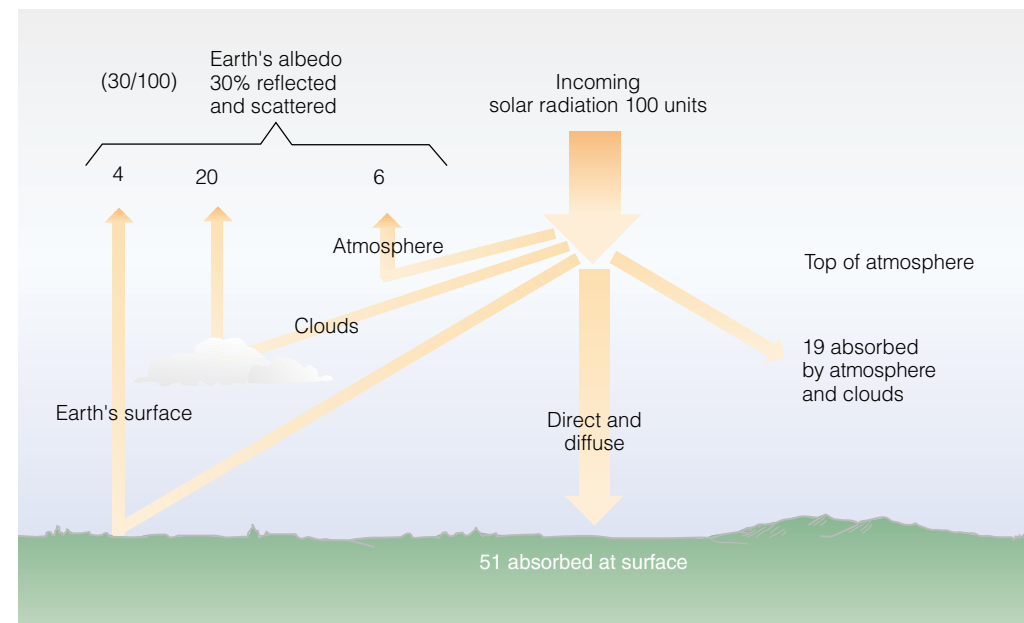
# A ATMOSFERA

## Propriedades óticas:

- Aproximadamente transparente à radiação solar;
- Aproximadamente opaca à radiação terrestre;
- Absorção e reemissão deve-se às moléculas do ar e às gotículas nas nuvens -> base do sensoriamento remoto por satélites
- Espalhamento da radiação provoca efeitos óticos: azul do céu, p. ex.
- Presença de nuvens reflete ~ 20% da radiação solar de volta ao espaço.



Fonte da imagem: <http://news.mit.edu>



## 1.1 Pressão e Densidade

### 1.1.1 Balanço Hidrostático

Com excelente aproximação, a *pressão* medida sobre qualquer ponto dentro da atmosfera é igual ao *peso por unidade de área da atmosfera* acima desse ponto – isto é, a atmosfera está essencialmente em balanço hidrostático (Unidade 4).

Equilíbrio hidrostático: é um conceito da mecânica dos fluidos significando um balanço entre o campo gravitacional e o gradiente de pressão.

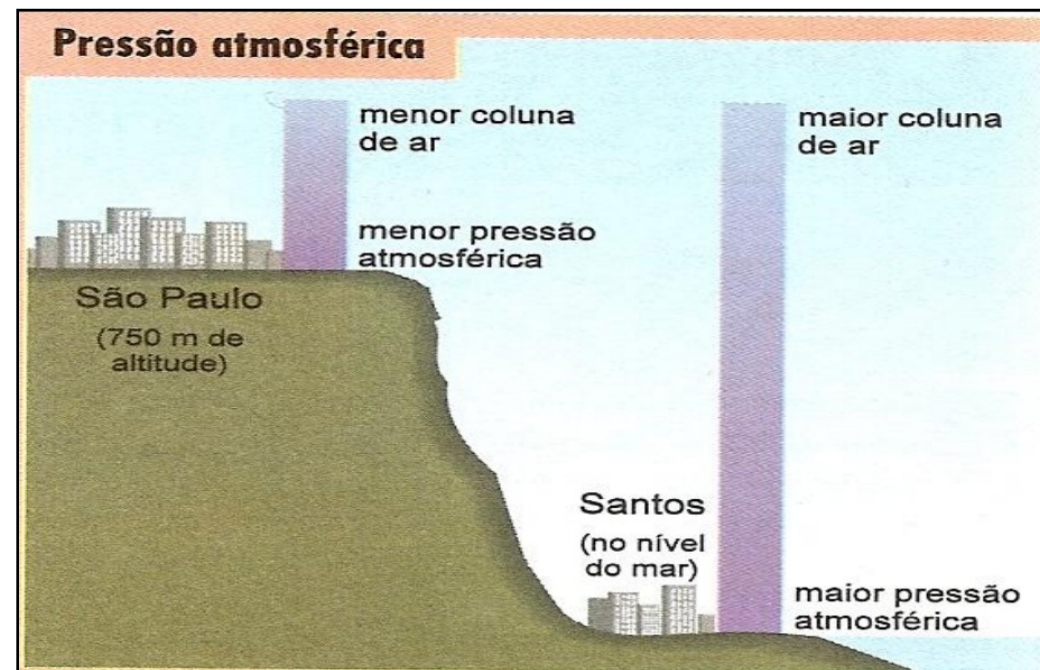
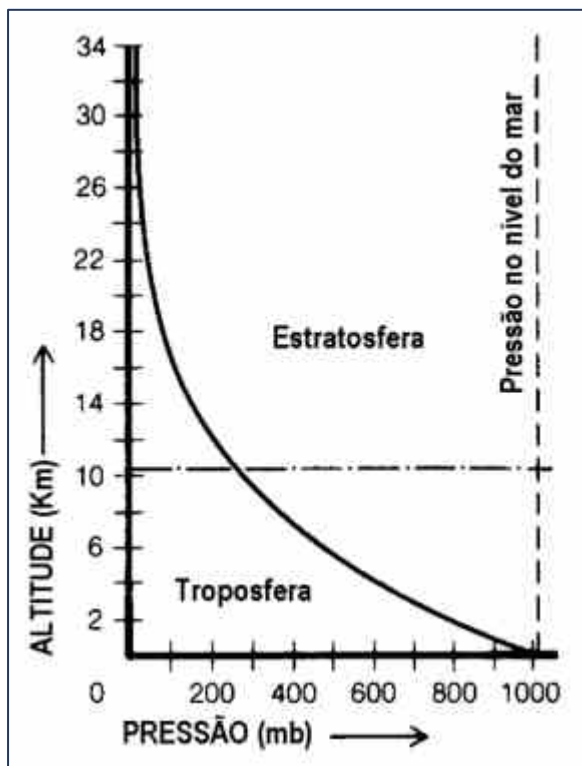
Recordamos que a pressão tem a dimensão de força por unidade de área. Relembre, também, que o peso de um objeto é uma força e é dada por:

$$F_g = m \cdot g$$

onde  $m$  é a massa do objeto e  $g$  a aceleração devido à gravidade (aproximadamente  $9,81 \text{ m s}^{-2}$  ao nível do mar).

## 1.1.2 Pressão como uma Coordenada Vertical

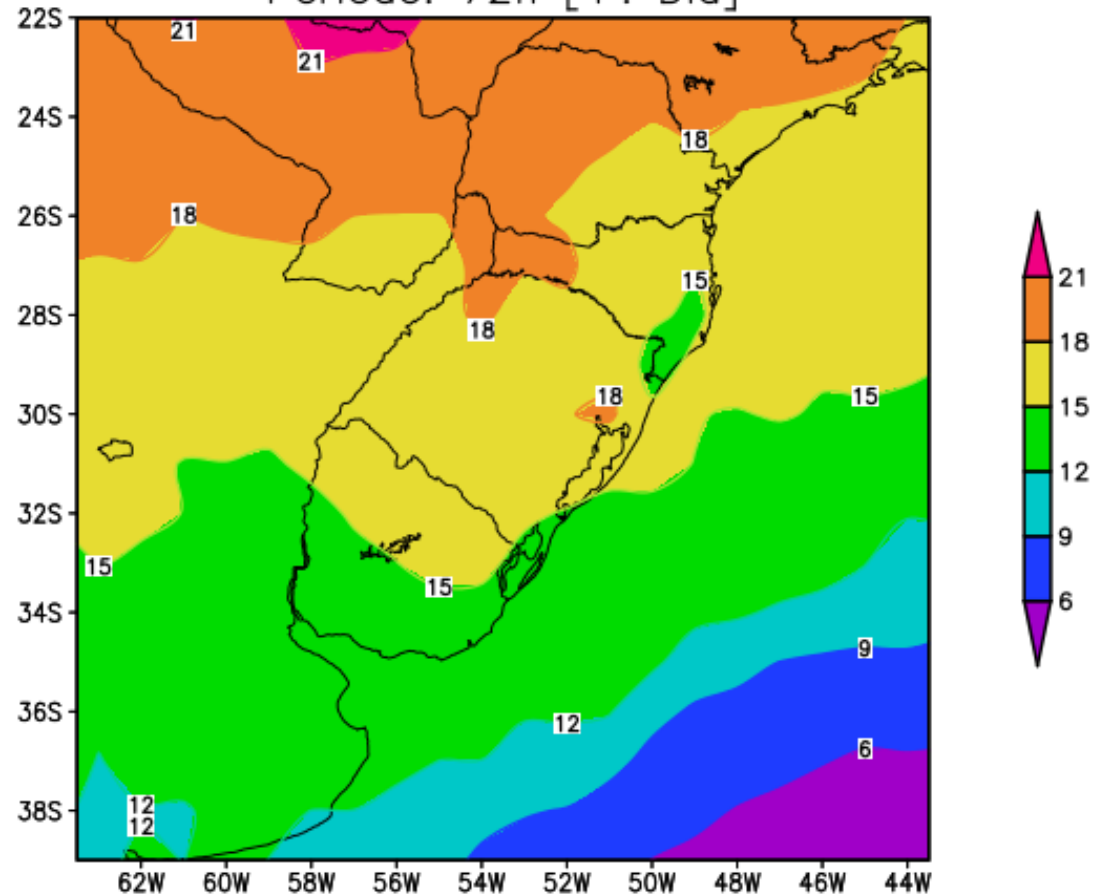
Na meteorologia é comum usar a pressão  $p$  ao invés da altitude  $z$  como coordenada vertical – isto é, como uma medida de onde você está verticalmente na atmosfera.



A altitude geométrica  $z$  associada com uma pressão particular não é constante, mas varia de alguma forma de tempo em tempo e de local para local.

## 1.1.2 Pressão como uma Coordenada Vertical

TEMPERATURA – 850 hPa (C)  
Validade: DOM – 17/MAR/2019 – 00h GMT  
Período: 72h [4°. Dia]



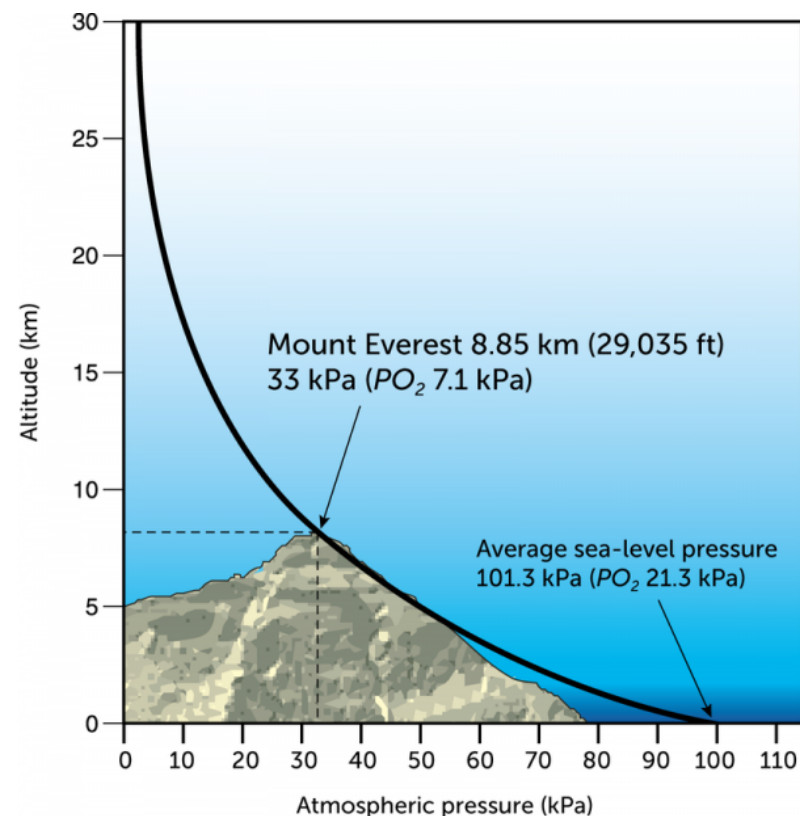
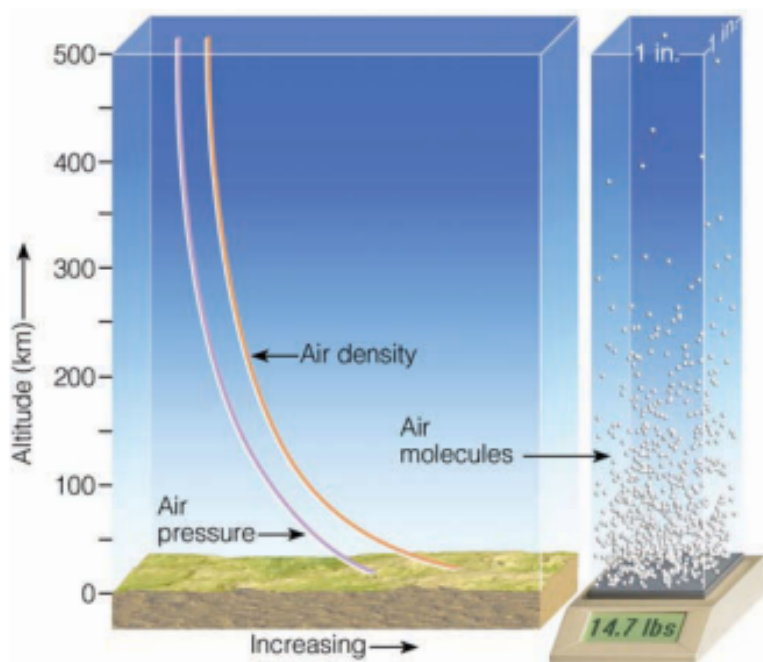
MODELO GFS: 14/MAR/2019

CPMet/UFPel

### 1.1.3 Densidade Atmosférica

Próximo ao nível do mar, um valor típico da densidade do ar é cerca de  $1,2 \text{ kg.m}^3$ , isso é cerca de 1/800 avos da densidade da água, que é de cerca de um quilograma por litro, ou  $1000 \text{ kg m}^{-3}$ .

Sob uma pressão maior, próximo da superfície, o ar será comprimido para uma maior densidade do que no caso em baixas pressões (maiores altitudes), onde deve apresentar uma densidade mais baixa.





## 1.2 Composição

Podemos agrupar os constituintes da atmosfera terrestre nas quatro seguintes categorias:

1. Os assim chamados gases permanentes : principalmente o nitrogênio ( $N_2$ ), oxigênio ( $O_2$ ) e o argônio (Ar), mais os gases traços e outros inertes (nobres). Coletivamente esses gases constituem o que nós comumente referimos como constituintes do ar seco.
2. O vapor de águas ( $H_2O$ ) em três fases (sólido, líquido e vapor).
3. Constituintes gasosos variáveis, além da água: p.ex, dióxido de carbono ( $CO_2$ ), ozônio( $O_3$ ), óxido nitroso ( $N_2O$ ) e metano ( $CH_4$ ).
4. Aerossóis - i.e. partículas sólidas e líquidas além da água.

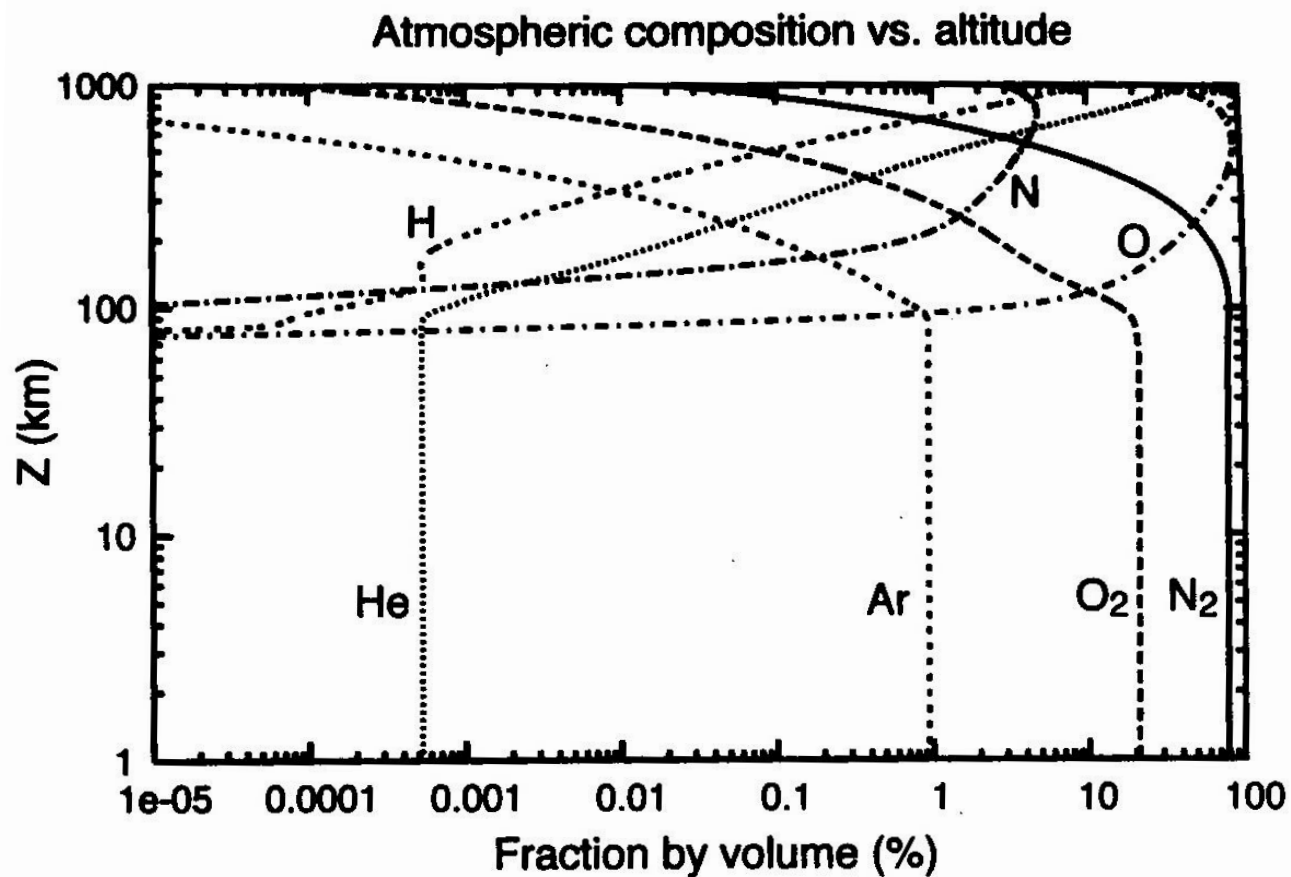


Fig. 1.3 Proporções típicas dos gases selecionados no ar seco em função da altitude. Note a súbita transição de proporções constantes abaixo de 100 km para uma composição variável acima desse nível ( fonte: NRLMSIS-00 modelo de Mike Picone, Alan Hedin e Doug Drob)

### Lembrando...

TABLE 9.1 Composition of Dry Air at Sea Level		
Constituent	% Volume	% Mass
N <sub>2</sub>	78.08	75.52
O <sub>2</sub>	20.95	23.14
Ar	0.93	1.29
CO <sub>2</sub>	0.037	0.05
Ne	$1.82 \times 10^{-3}$	$1.27 \times 10^{-3}$
He	$5.24 \times 10^{-4}$	$7.24 \times 10^{-5}$
CH <sub>4</sub>	$1.7 \times 10^{-4}$	$9.4 \times 10^{-5}$
Kr	$1.14 \times 10^{-4}$	$3.3 \times 10^{-4}$

### 1.2.1 Gases Permanentes

Abaixo de cerca de 100 km de altitude, os gases permanentes são encontrados misturados com uma proporção aproximadamente fixas. Isso é por que:

- (1) os processos que adicionam ou removem esses gases da atmosfera (fontes e sumidouros respectivamente) são ambos muito lentos e aproximadamente em balanço em longos períodos de tempo;
- (2) a ação da agitação do vento e a turbulência são suficientemente eficientes em manter a baixa atmosfera bem misturada, de forma que não aparece (cria) diferenças significativas na concentração - em diferentes locais ou altitudes.

## Constituintes chaves do ar na atmosfera abaixo de 100 km

Constituent	Fraction by volume in (or relative to) dry air	Remarks
Nitrogen (N <sub>2</sub> )	78.1%	
Oxygen (O <sub>2</sub> )	20.9%	
Water vapor (H <sub>2</sub> O)	(0–5%)	highly variable in time and space
Argon (Ar)	0.93%	inert
Carbon dioxide (CO <sub>2</sub> )	383 ppm	concentration as of 2007; increasing 1.6 ppm per year
Neon (Ne)	18 ppm	inert
Helium (He)	5 ppm	inert
Methane (CH <sub>4</sub> )	1.7 ppm	increasing due to human activities
Krypton (Kr)	1 ppm	inert
Nitrous Oxide (N <sub>2</sub> O)	0.35 ppm	
Carbon Monoxide (CO)	0.07 ppm	
Ozone (O <sub>3</sub> )	0–12 ppm	highly variable concentration; high in stratosphere and in polluted air
Chlorofluorocarbons (CFCl <sub>3</sub> , CF <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub> , etc.)	~10 <sup>-10</sup>	industrial origin

## Acima de 100 km:

- o ar para de se comportar como um fluido bem misturado
- moléculas individuais apresentam longas trajetórias sem colidirem muito frequentemente com as outras moléculas.
- A gravidade tende a prever que as moléculas mais pesadas atinjam altitudes mais elevadas, e há uma predominância de moléculas mais leves como o H e o He.
- A intensa radiação solar quebra (foto dissociação), as moléculas diatômicas, como o N<sub>2</sub> e o O<sub>2</sub> - de forma que as espécies monoatômicas aumentam com a altitude.

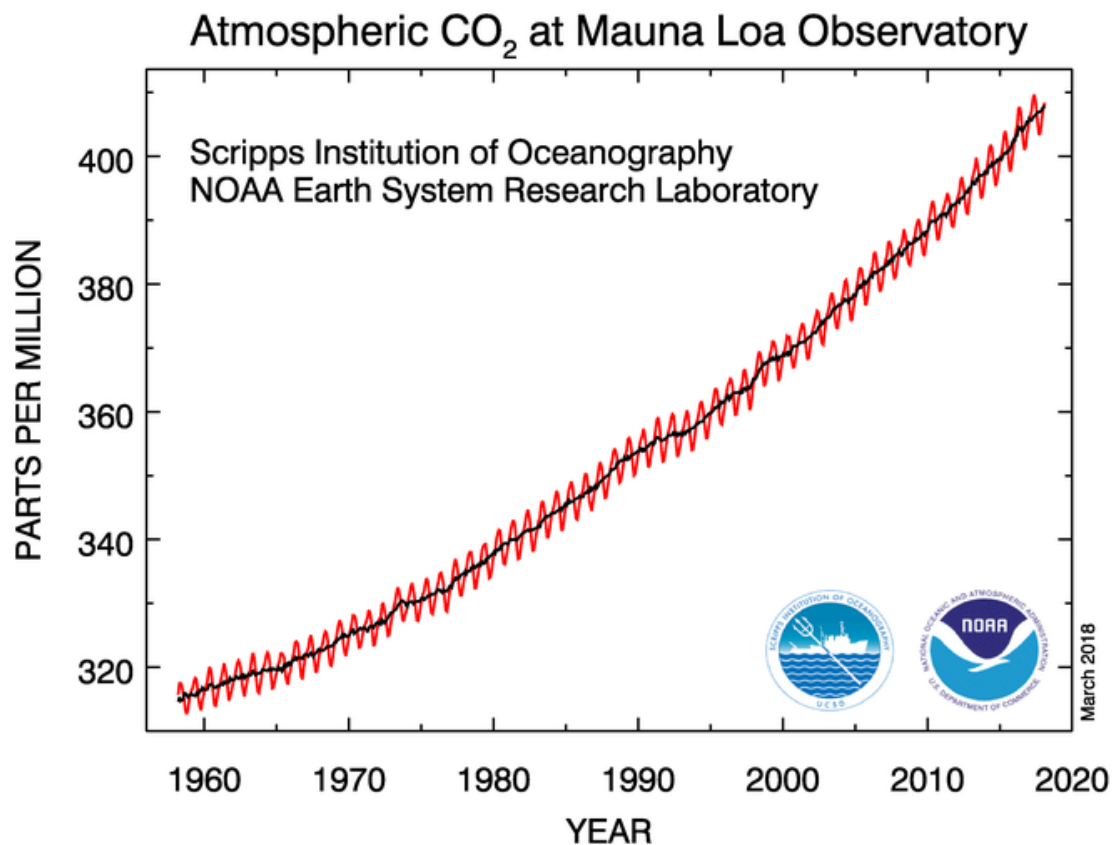
## 1.2.2 Componentes Variáveis

### Vapor de Água

- é uma substancia que está constantemente sendo adicionado e removido da atmosfera.
- a distribuição da água na atmosfera é altamente variável, tanto no espaço como no tempo.
- pode apresentar em uma fração variando - de quase zero no ar frio e seco, até cerca de 3% por massa ou 5% por volume, no ar quente e muito úmido.
- muito mais importante sob o ponto de vista da meteorologia devido ao papel central na termodinâmica e no balanço de energia da atmosfera, bem como na formação de nuvens, chuvas e neves.

## Dióxido de Carbono

- O dióxido de carbono contribui com menos de 0,04% , por volume, na constituição da atmosfera
- As plantas pegam o CO<sub>2</sub> do ar, e pela fotossíntese os componentes orgânicos do carbono, e libera o oxigênio de volta para o ar.
- A oxidação da matéria orgânica, seja pela respiração animal, combustão, ou decaimento, retorna o CO<sub>2</sub> para a atmosfera.

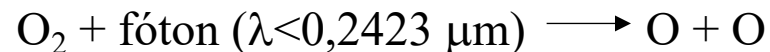


- Grandes quantidades de dióxido de carbono presente inicialmente na atmosfera da Terra foram extraídas pelos organismos que fabricavam as conchas de carbonato de cálcio. Muitos desses carbonatos estão atualmente mantidos “presos” em depósitos de calcários na crosta terrestre.
- Desempenha um papel importante no balanço de energia atmosférica, pela habilidade de absorver e emitir intensamente a radiação infra-vermelha, e ser transparente para a maior parte da radiação solar (de ondas curtas).

## Ozônio

- é um constituinte traço altamente variável que é tanto prejudicial como benéfico, dependendo onde é encontrado na atmosfera.
- próximo da superfície, como um dos muitos componentes da poluição fotoquímica - então é um poluente
- constituinte natural da atmosfera acima de cerca de 20 km de altitude – na camada de ozônio, onde ele atua como um escudo da superfície da terra contra a prejudicial radiação ultravioleta de ondas curtas.

Nas altitudes bem elevadas, os fótons altamente energéticos do sol podem quebrar diretamente a ligação da molécula do O<sub>2</sub> de acordo com a reação química:



O átomo do oxigênio livre resultante da reação acima pode então combinar com um O<sub>2</sub> para formar o ozônio de acordo com a reação química:

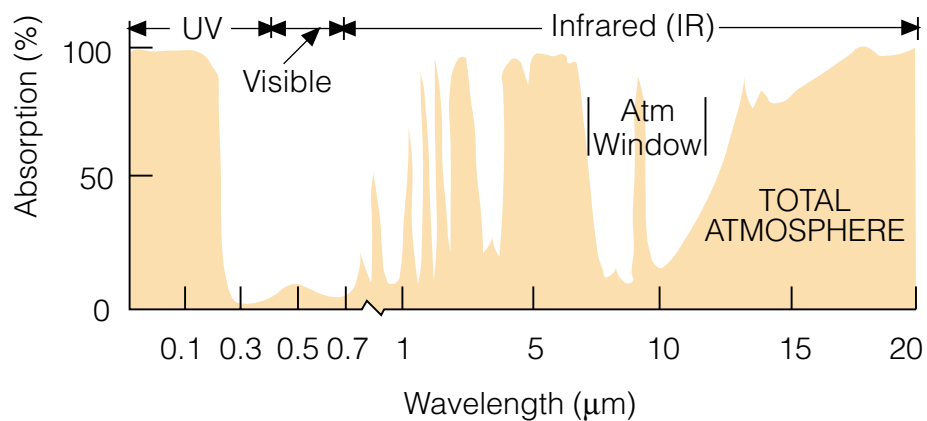
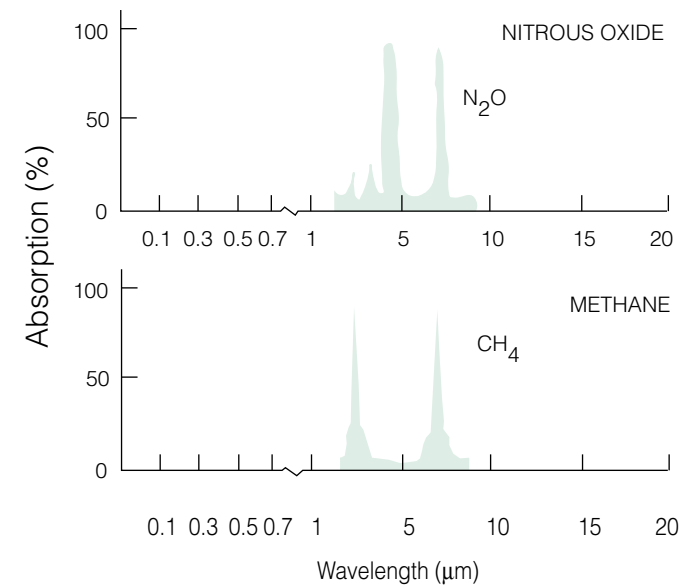
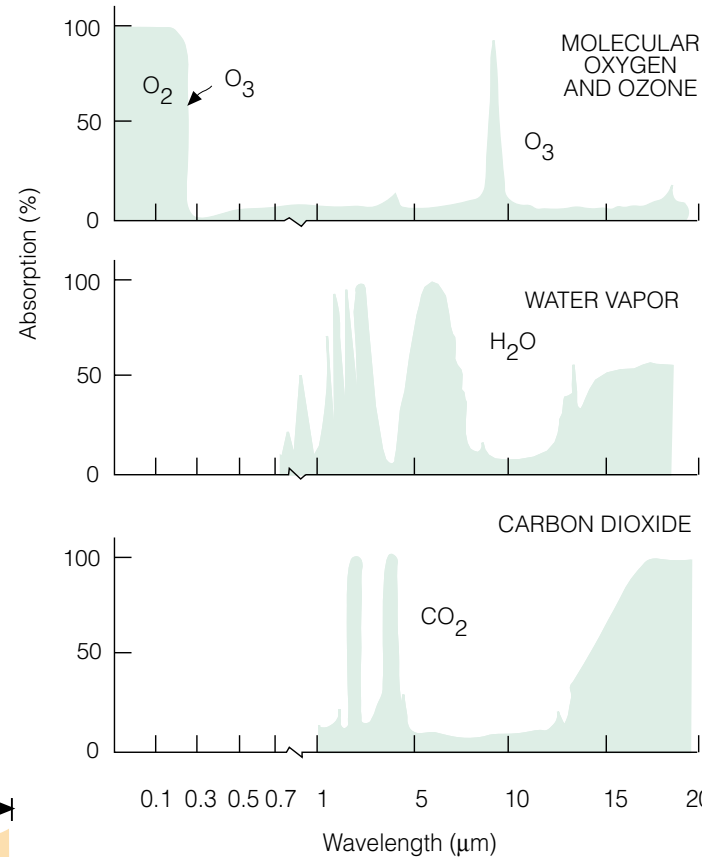
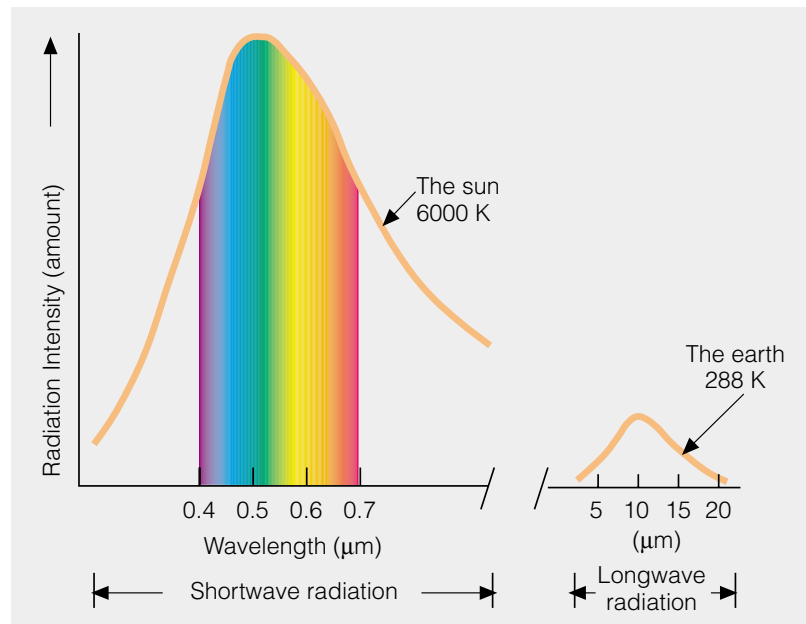


onde M é uma terceira molécula ou um átomo (necessário para carregar para longe a energia liberada na reação).

- O ozônio tem a propriedade de efetivamente absorver a radiação ultravioleta com comprimento de onda entre 0,24 μm e cerca de 0,31 μm. A maior parte da radiação proveniente do sol, com comprimentos de onda menores que cerca de 0,32 μm nunca atingem a superfície da terra.



## Interação dos gases constituintes da Atmosfera com as radiações solar e terrestre:



**Mais detalhes na disciplinas de**  
*Física da Radiação Atmosférica – 5º semestre*  
*Climatologia – 5º semestre*  
*Meteorologia por Satélite - Optativa*



## 1.3 TEMPERATURA

### O que é temperatura?

- quantidade que determina a direção na qual a energia térmica (“calor”) escoará quando dois objetos forem colocados em contato um ao outro.
- No nível microscópico, a temperatura de uma particular substância é proporcional à energia cinética média de suas moléculas.

#### 1.3.1 A Zeroésima Lei da Termodinâmica

Ela trata do equilíbrio térmico e vincula equilíbrio a temperatura, por isso, é também conhecida como lei do termômetro.

**Teoria:** se dois sistemas estiverem em equilíbrio separadamente com um terceiro sistema, eles estarão em equilíbrio entre si. Ela sugere que quando dois sistemas estão em equilíbrio termodinâmico deve existir um parâmetro que tem o mesmo valor nos dois sistemas. Este parâmetro é a temperatura.

### 1.3.2 Temperatura e energia cinética molecular

- A temperatura é em última análise uma medida da energia cinética associada com os movimentos caóticos das moléculas.
- Uma substância cujas moléculas estão girando violentamente tem maior temperatura, que àquela da mesma substância, quando as moléculas estão mais ou menos em repouso.
- Se um corpo com movimento energético molecular maior, for posto em contato com outro, na qual as moléculas têm pouca energia molecular, as colisões transferirão energia do objeto com maior temperatura para o objeto de menor temperatura - até que seja estabelecido o equilíbrio, que no caso – os corpos acabam tendo com a mesma temperatura.
- Essa é a natureza da **condução térmica**.

#### Então, o que definimos como CALOR?

É a troca de energia entre dois corpos por condução.

Note que um objeto não pode ter calor - o calor só existe na forma de troca entre dois objetos ou quando da conversão de energia dentro de um objeto.

o calor se refere àquilo que pode ser imaginado como uma energia não direcionada ou caótica ao nível molecular.

## Escalas de Temperatura

**Graus Celsius (°C)** – Internacionalmente aceita e a mais comum no Brasil

**Graus Fahrenheit (°F)** – Mais usada em países de língua inglesa

**Kelvin (K)** – Escala absoluta, usada para fins científicos

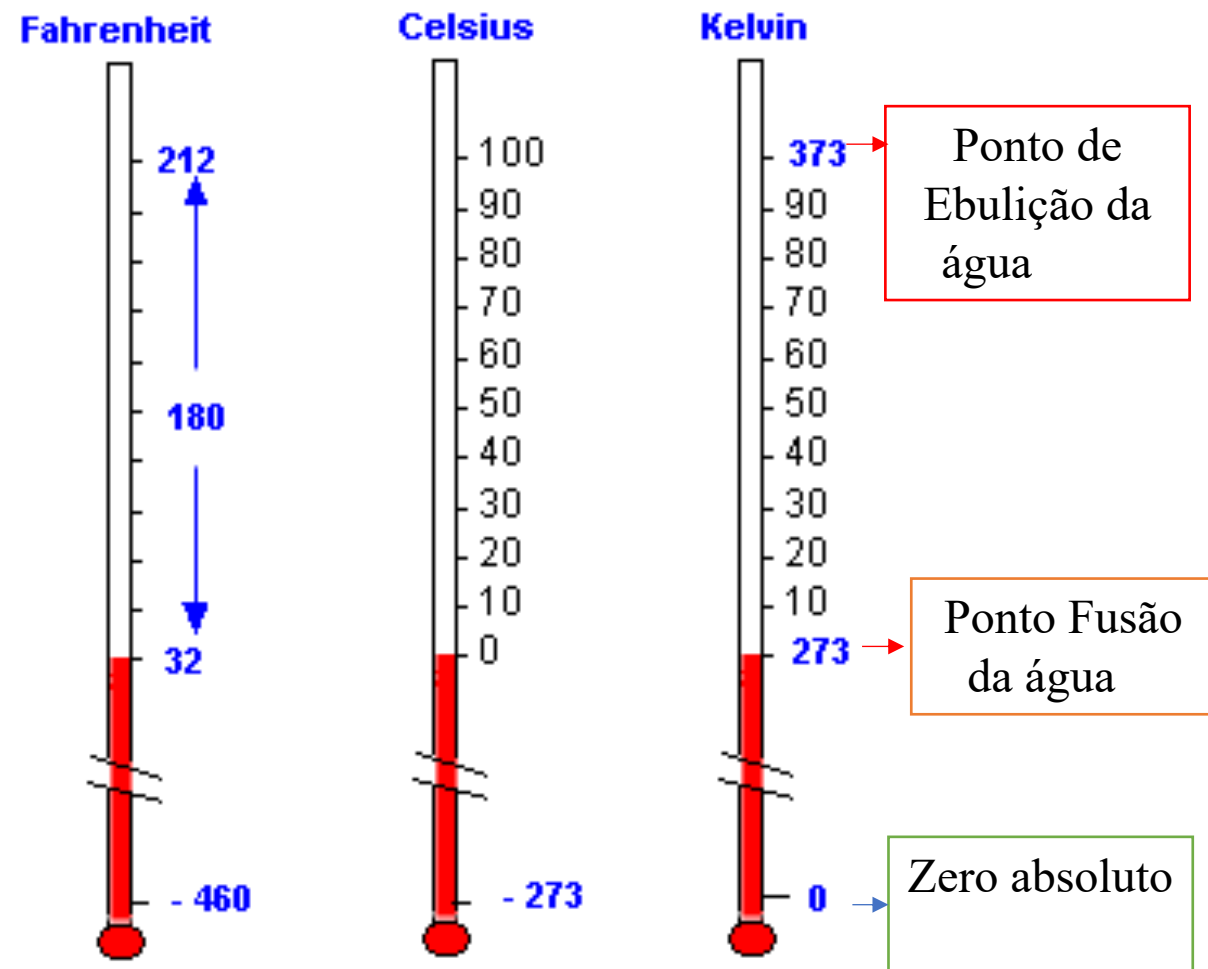
### Conversão de escalas

$$T_{\text{Kelvin}} = T_{\text{Celsius}} + 273,15$$

$$T_{\text{Kelvin}} = \frac{T_{\text{Fahrenheit}} + 459,67}{1,8}$$

$$T_{\text{Fahrenheit}} = 1,8 \cdot T_{\text{Celsius}} + 32$$

$$T_{\text{Celsius}} = \frac{T_{\text{Fahrenheit}} - 32}{1,8}$$



**Ponto zero da escala Kelvin = zero absoluto**

## 1.3.4 Perfis da Temperatura Atmosférica

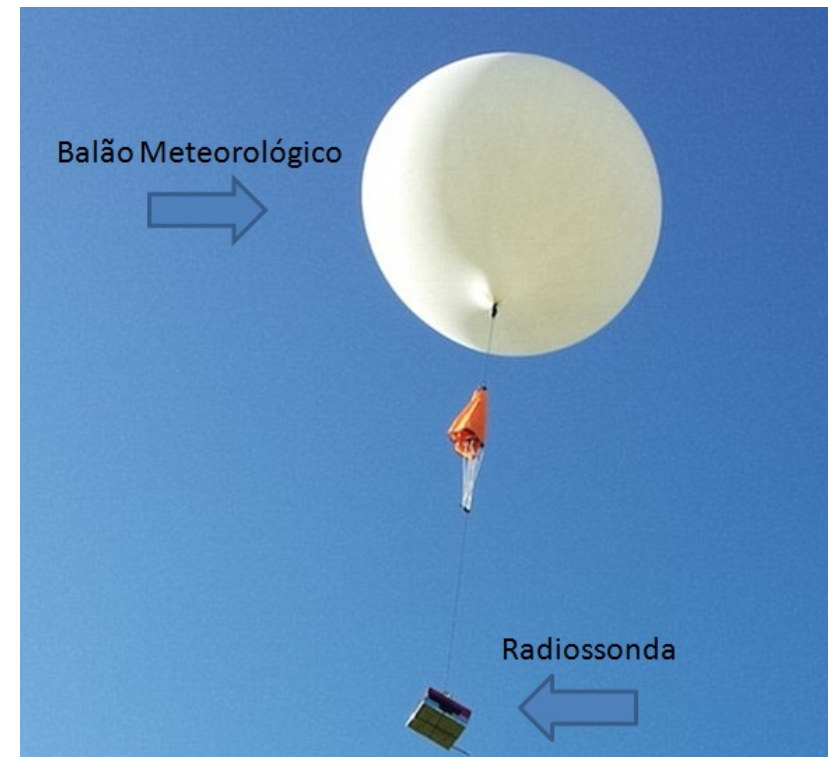
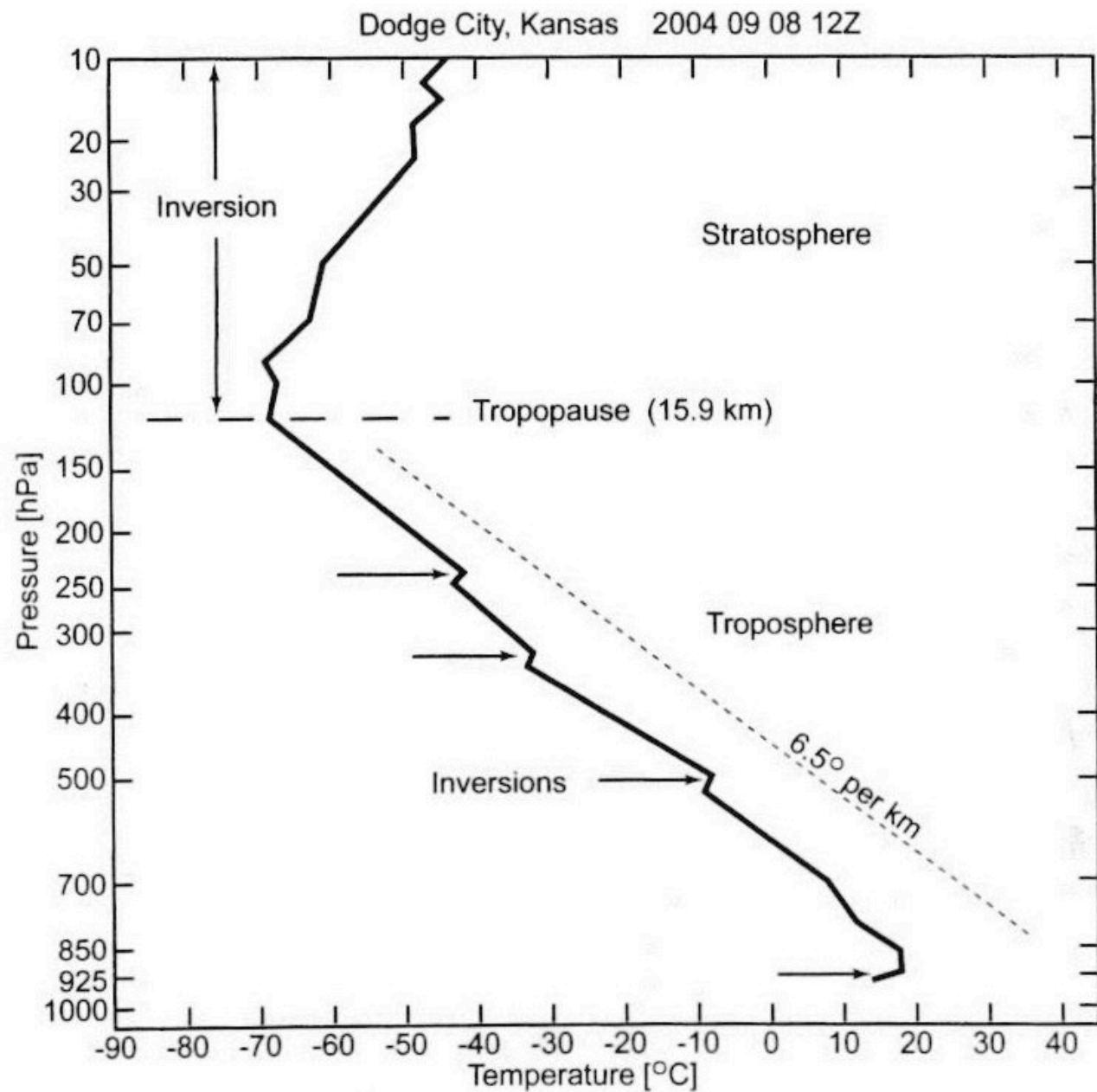


Figura: Exemplo de um perfil típico de da temperatura atmosférica de estação das latitudes médias durante o outono

## Taxa de Variação Vertical da Temperatura (TVVT) do Meio Ambiente [ Razão de Lapso do Meio Ambiente]

A TVVT do meio ambiente,  $\Gamma$  em qualquer altitude é definida como a taxa local de decréscimo da temperatura com a altitude.

$$\Gamma = -\frac{\partial T}{\partial z} \longrightarrow \Gamma = -\frac{T_2 - T_1}{z_2 - z_1}$$

- Muito embora a TVVT na troposfera varie de local para local e de dia para dia, muitas vezes nós supomos um valor típico para de cerca de 6,5 °C/km. Essa TVVT padrão é apresentada na plotagem como uma linha reta tracejada.
- Essa é apenas uma média: há algumas camadas dentro da qual a temperatura diminui mais lentamente com a altura ou mesmo aumenta, e em outras onde ela decresce mais rapidamente.

## Inversões

**Inversão da Radiação** é formada como resultado do esfriamento radiativo da superfície durante a noite e conseqüentemente da camada de ar diretamente em contato com o solo

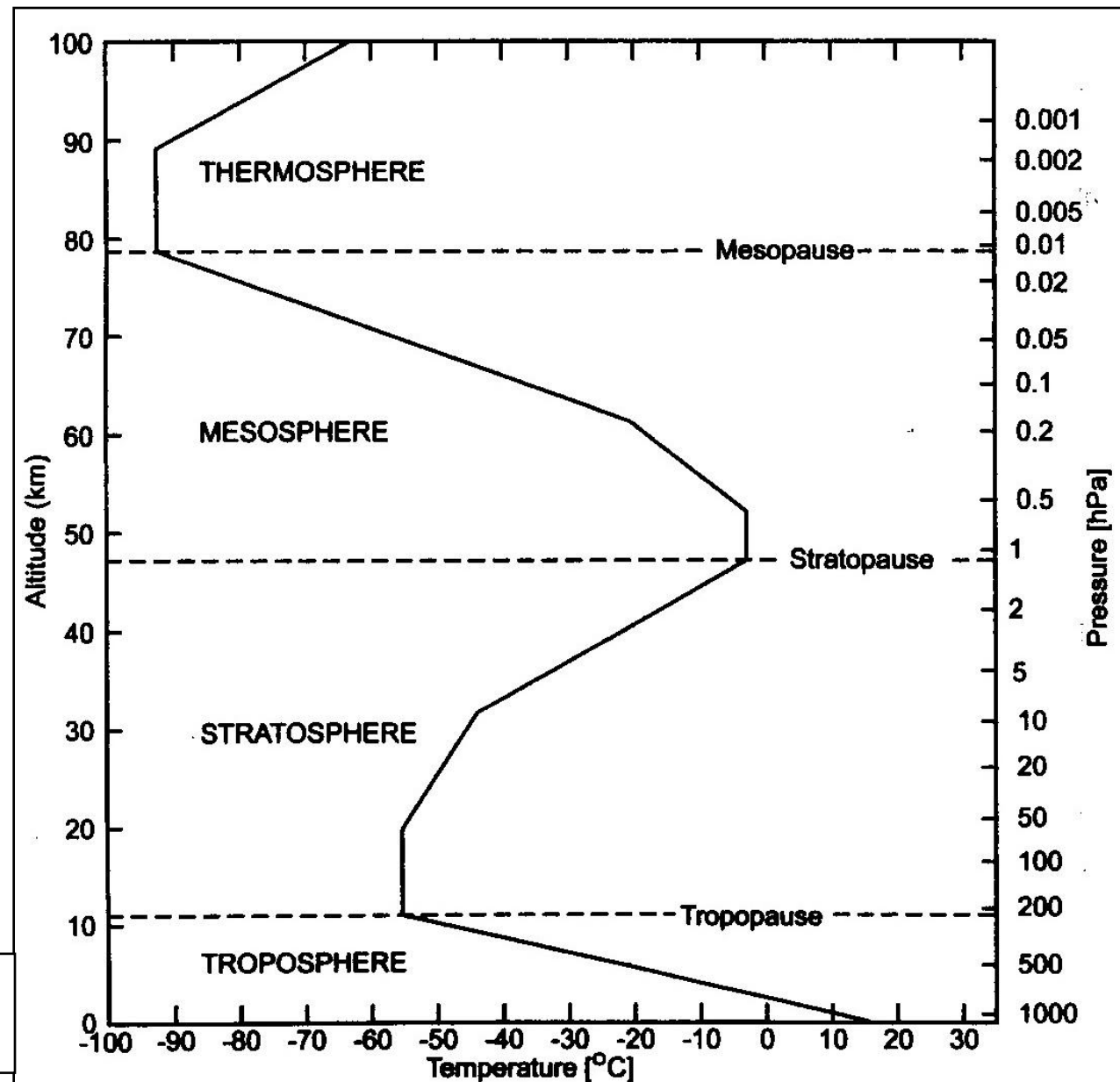
**Inversões de Subsidência** podem formar quando o ar baixar das altitudes maiores, aquecendo por compressão a medida que isso ocorre. Será discutido na seção 5.8.1.

**Inversão frontal** pode aparecer em uma sondagem feita do lado frio de uma frente de (quente ou fria) de superfície

**Inversão da camada limite** frequentemente delimita o topo da camada de mistura da superfície, que pode estar em qualquer local desde algumas dezenas de metros a vários quilômetros de profundidade.

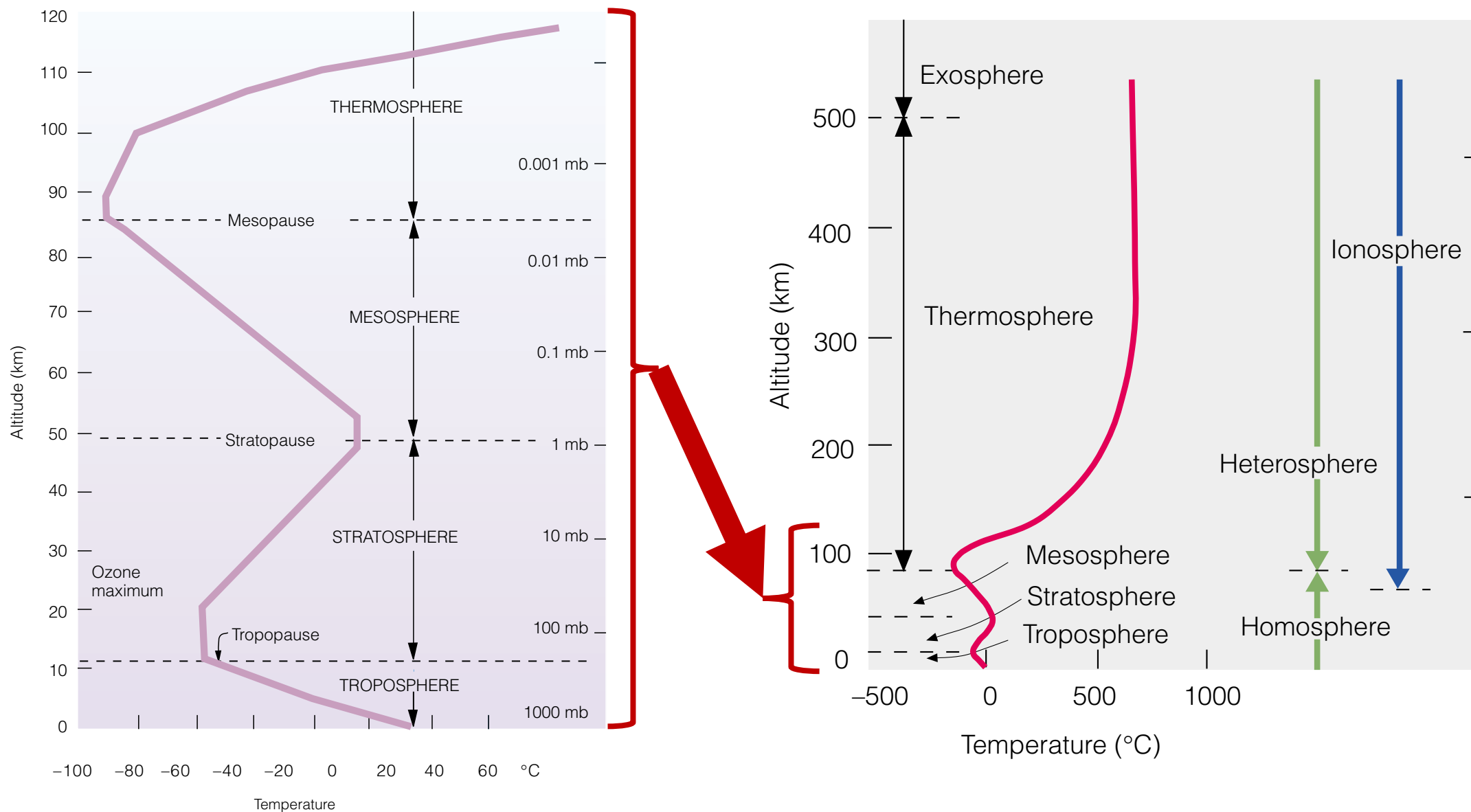
**Inversão Marinha** é o tipo de inversão de camada limite especialmente forte que se desenvolve quando o quente, ar continental subsidente derrapa no frio, ar úmido - formado pelo contato com a superfície do oceano relativamente fria.

## 1.3.5 Estrutura Termal Média da Atmosfera



Estrutura idealizada da temperatura da atmosfera  
abaixo de 100 km

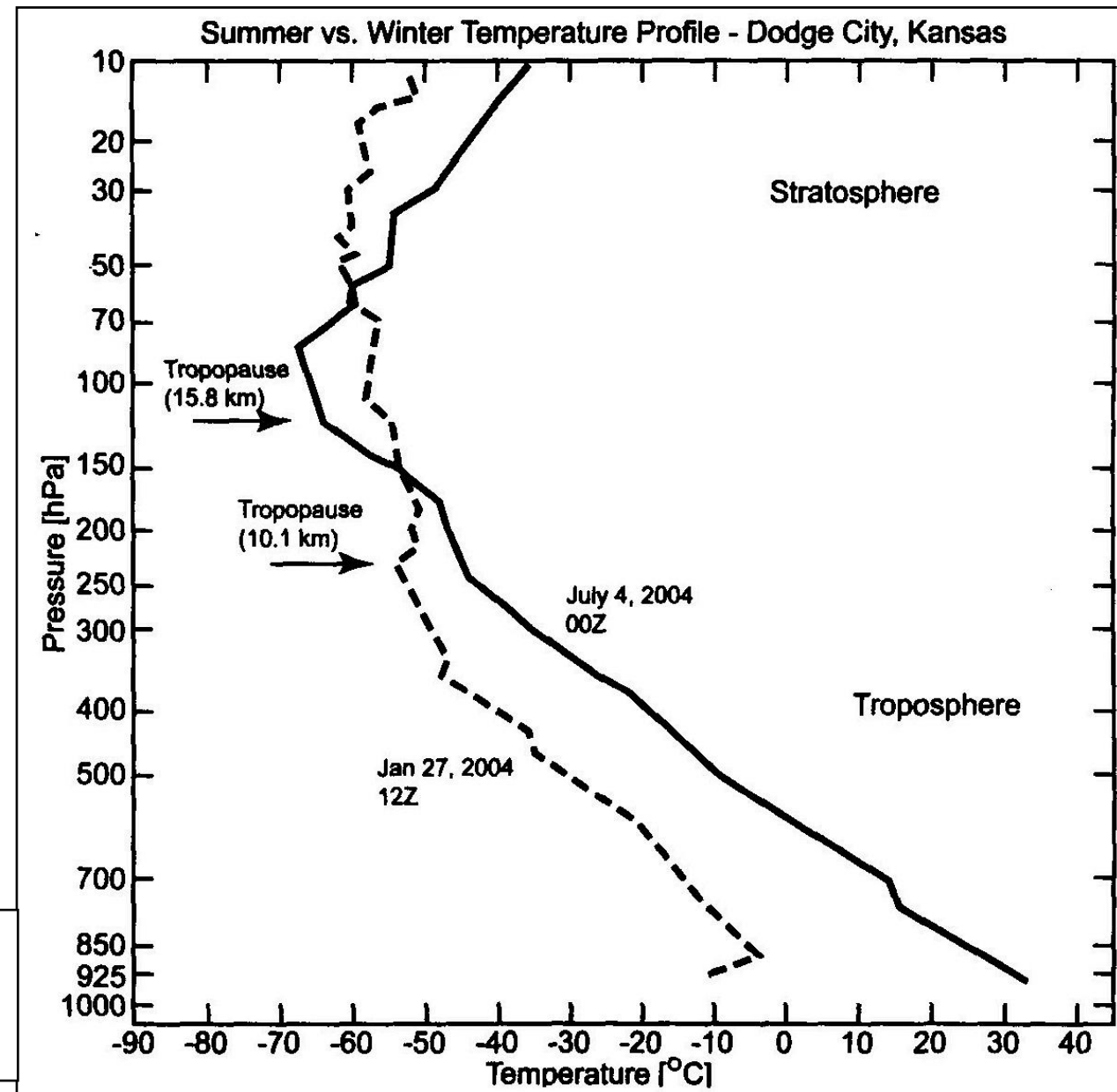
## Estrutura vertical da atmosfera: visões diferentes!

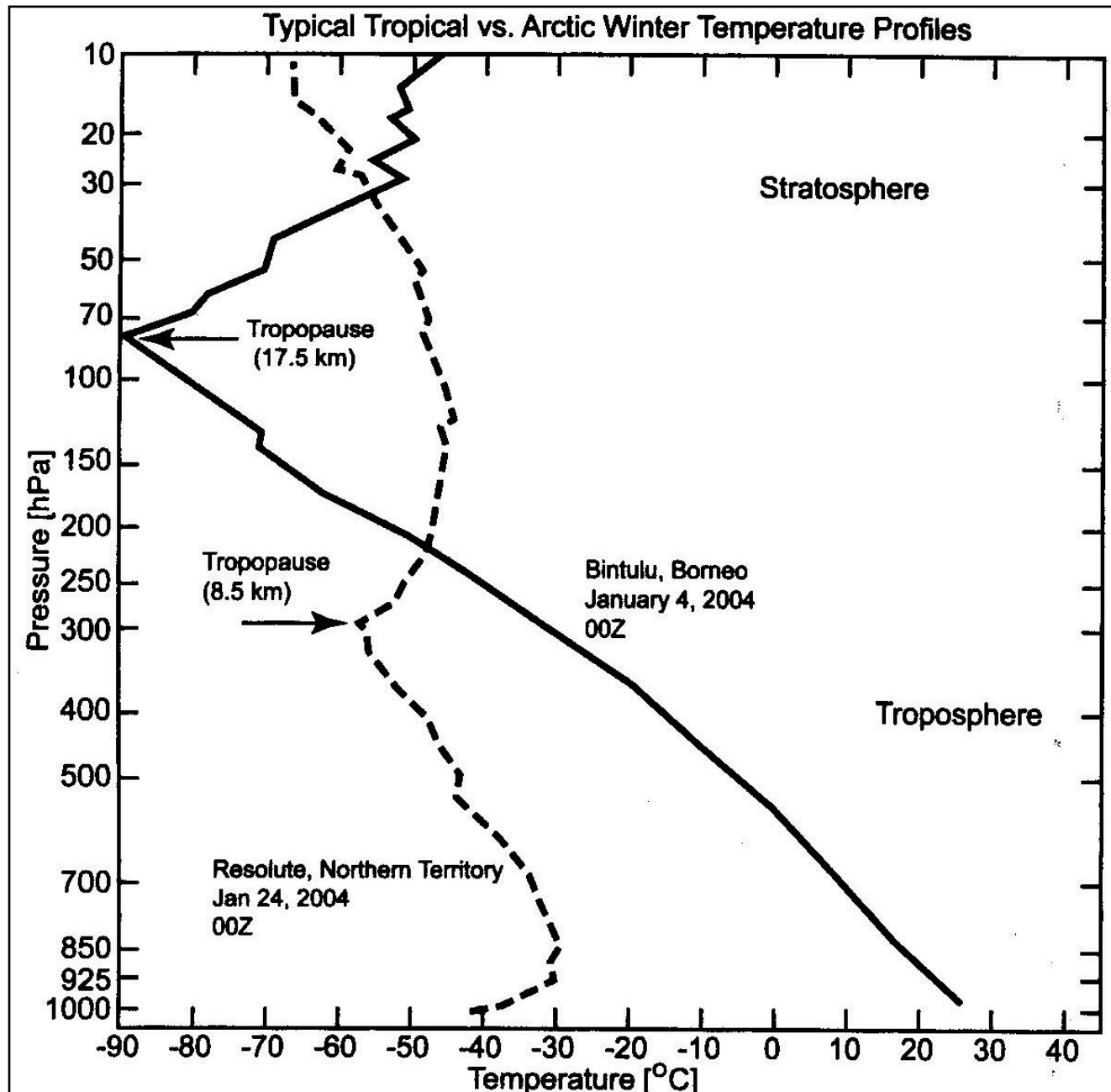




### 1.3.6 Variação Latitudinal e Sazonal

Exemplo de perfis de temperatura de estação das latitudes médias – linha sólida no verão e tracejada no inverno.





Sondagem típica tropical (sólida) e no inverno ártico (tracejado)



### 1.4.1 Medidas da temperatura



Termômetro líquido em vidro

### Termistores e termopares



Abrigo meteorológico

## 1.4.2 Vento (wind chill)

O Índice de resfriamento, ou ainda (índice de) resfriamento pelo vento (do inglês **Wind chill**) é a temperatura aparente sentida pela pele exposta, devido a uma combinação entre a temperatura do ar e a velocidade do vento.

Efeito do vento na temperatura (windchill)

	10 °C	5 °C	0 °C	-5 °C	-10 °C	-15 °C	-20 °C	-25 °C	-30 °C	-35 °C	-40 °C	-45 °C	-50 °C
10 km/h	8,6	2,7	-3,3	-9,3	-15,3	-21,1	-27,2	-33,2	-39,2	-45,1	-51,1	-57,1	-63,0
15 km/h	7,9	1,7	-4,4	-10,6	-16,7	-22,9	-29,1	-35,2	-41,4	-47,6	-51,1	-59,9	-66,1
20 km/h	7,4	1,1	-5,2	-11,6	-17,9	-24,2	-30,5	-36,8	-43,1	-49,4	-55,7	-62,0	-69,3
25 km/h	6,9	0,5	-5,9	-12,3	-18,8	-25,2	-31,6	-38,0	-44,5	-50,9	-57,3	-63,7	-70,2
30 km/h	6,6	0,1	-6,5	-13,0	-19,5	-26,0	-32,6	-39,1	-45,6	-52,1	-58,7	-65,2	-71,7
35 km/h	6,3	-0,4	-7,0	-13,6	-20,2	-26,8	-33,4	-40,0	-46,6	-53,2	-59,8	-66,4	-73,1
40 km/h	6,0	-0,7	-7,4	-14,1	-20,8	-27,4	-34,1	-40,8	-47,5	-54,2	-60,9	-67,6	-74,2
45 km/h	5,7	-1,0	-7,8	-14,5	-21,3	-28,0	-34,8	-41,5	-48,3	-55,1	-61,8	-68,6	-75,3
50 km/h	5,5	-1,3	-8,1	-15,0	-21,8	-28,6	-35,4	-42,2	-49,0	-55,8	-62,7	-69,5	-76,3
55 km/h	5,3	-1,6	-8,5	-15,3	-22,2	-29,1	-36,0	-42,8	-49,7	-56,6	-63,4	-70,3	-77,2
60 km/h	5,1	-1,8	-8,8	-15,7	-22,6	-29,5	-36,5	-43,4	-50,3	-57,2	-64,2	-71,1	-78,0

Os campos azuis indicam a possibilidade de congelamento (**frostbite** em inglês) em 30 minutos ou menos. A referência para risco de congelamento é a pele a uma temperatura de -4,8 °C, quando cerca de 5% das pessoas sofrem do fenômeno.

Válido para temperaturas abaixo de 9 °C

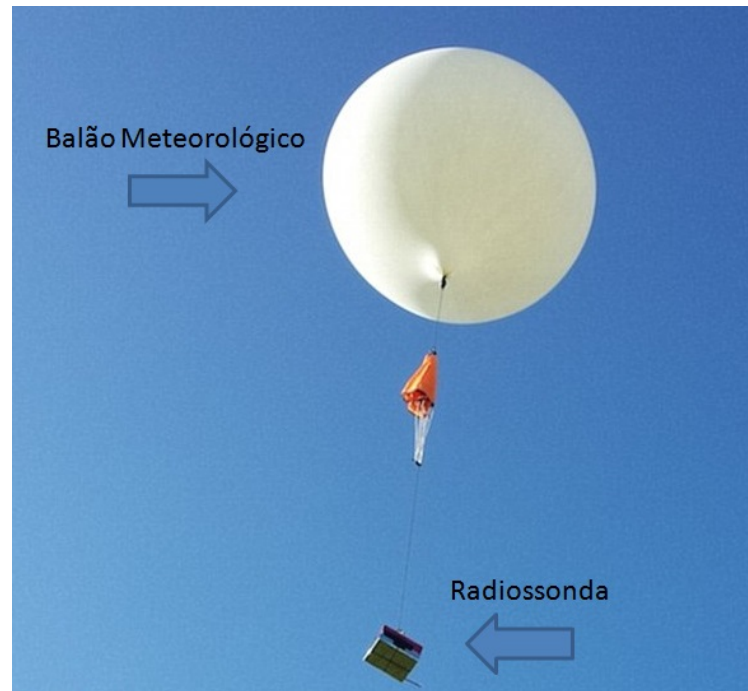
### 1.4.3 Observação de Ar Superior



As aeronaves são equipados com uma variedade de instrumentos sofisticados incluindo dropsondas, para observação termodinâmica e microfísica do meio ambiente dentro e próximos dos furacões e outros sistemas de tempestades.



## Radiossonda



Balão pronto para ser lançado. Ele é inflado para ter uma conhecida taxa de ascensão. Eles são liberados sem uma carga e são rastreados visualmente até que eles desaparecem na base da camada de nuvem. O lapso de tempo desde o lançamento (até desaparece) permite estimar e determinar a altura da base da nuvem com razoável precisão.

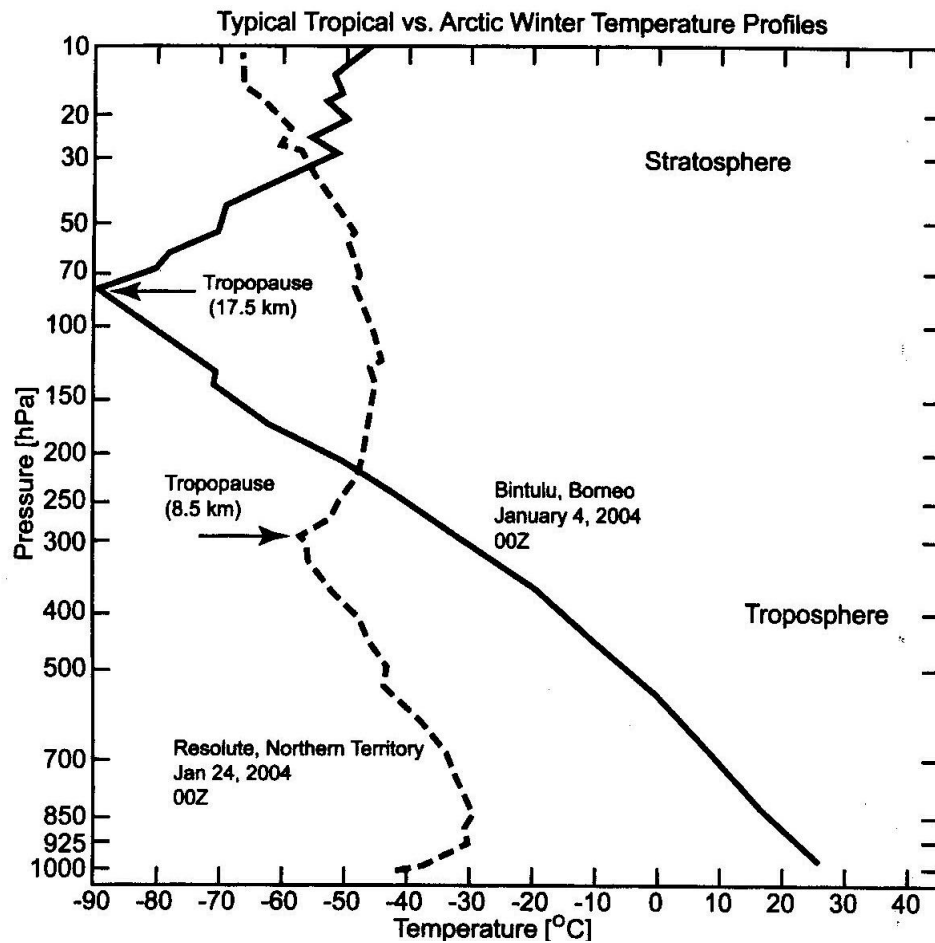
Sensor de Temperatura  
 Sensor de Umidade  
 Sensor de Pressão  
 Unidade de Navegação  
 Transmissor  
 Bateria  
 Balão

**Table 1.3:** Typical balloon performance. *Reprinted from the WMO Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation (CIMO Guide) Seventh Ed. (2006).*

Weight (g)	10	30	100	200	350	600	1000	1500	3000
Initial diameter (cm)	30	50	90	120	130	140	160	180	210
Typical payload (g)	0	0	0	250	250	250	250	1000	1000
Free lift (g)	5	60	300	500	600	900	1100	1300	1700
Ascent rate (m/min)	60	150	250	300	300	300	300	300	300
Max. height (km)	12	13	30	21	26	31	34	34	38

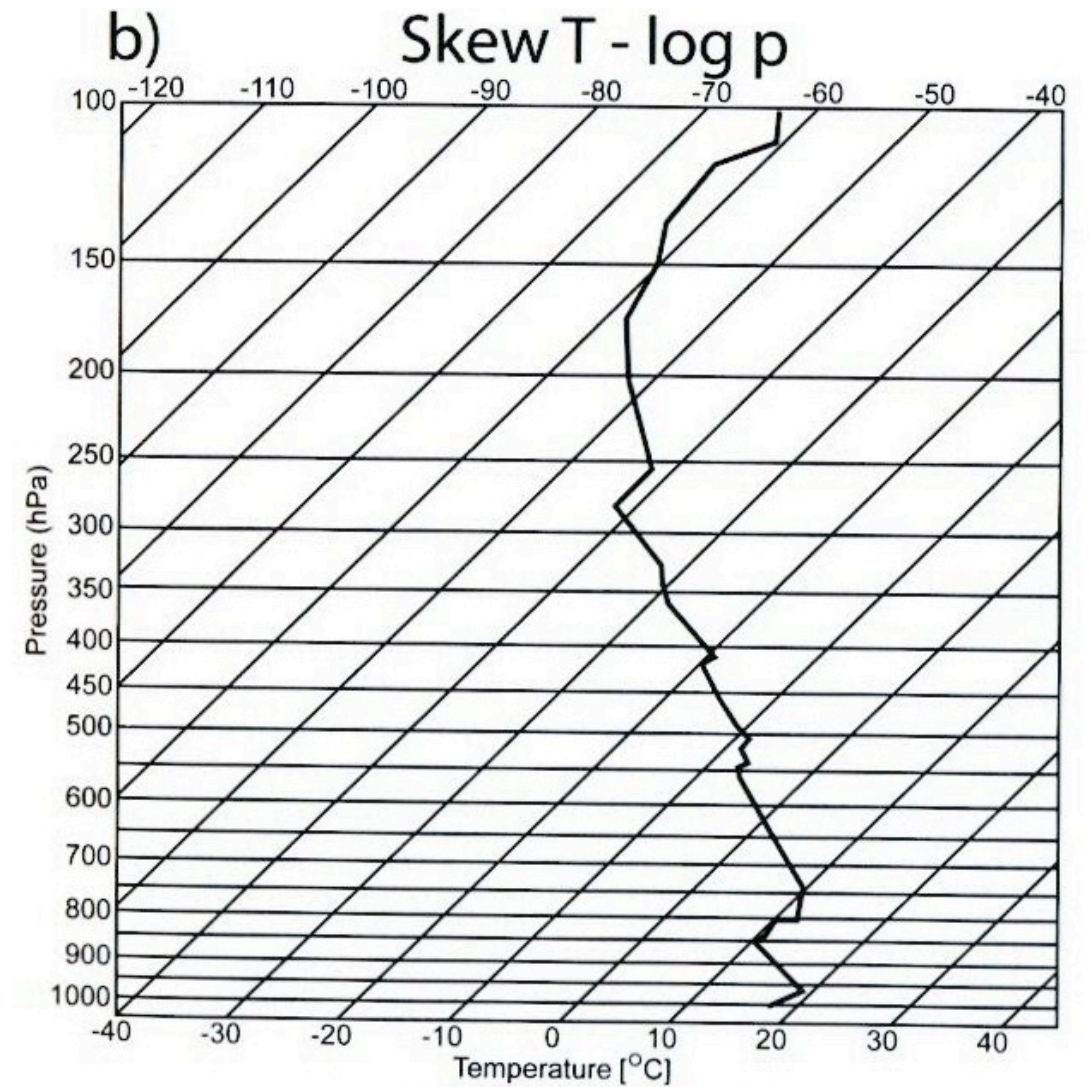
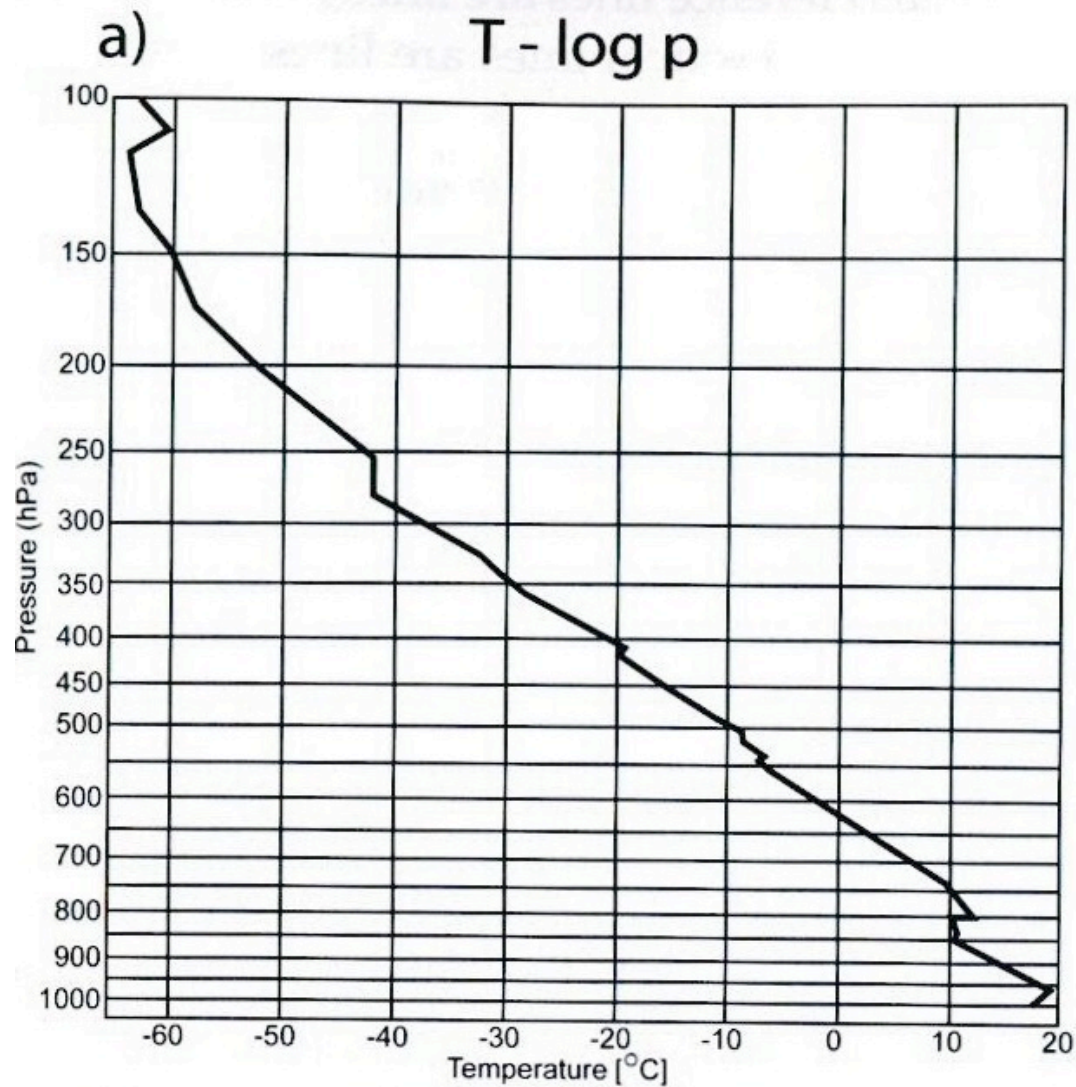
## 1.4.4 Diagrama Skew-T

Emagrama: representação gráfica temperatura vs Pressão



Exemplo de emagrama

Lembre que a temperatura da atmosfera geralmente diminui de forma mais ou menos permanente com a altitude (troposfera).



12Z 25 Aug 2005 Green Bay, WI

Comparação de emagrama (topo) e skew-T (baixo)  
representações de um mesmo perfil de temperatura atmosférica.