

Meteorologia – PL1

1º Semestre - 2026/27

A estrutura vertical da atmosfera

A atmosfera terrestre apresenta uma estrutura vertical complexa: a pressão diminui exponencialmente com a altitude, a temperatura mostra camadas distintas (troposfera, estratosfera, mesosfera e termosfera), e a composição química é relativamente constante até aos ~80 km (homosfera). Acima disso, na heterosfera, gases leves como O atómico e He tornam-se dominantes. Na figura abaixo, podemos analisar esta distribuição vertical.

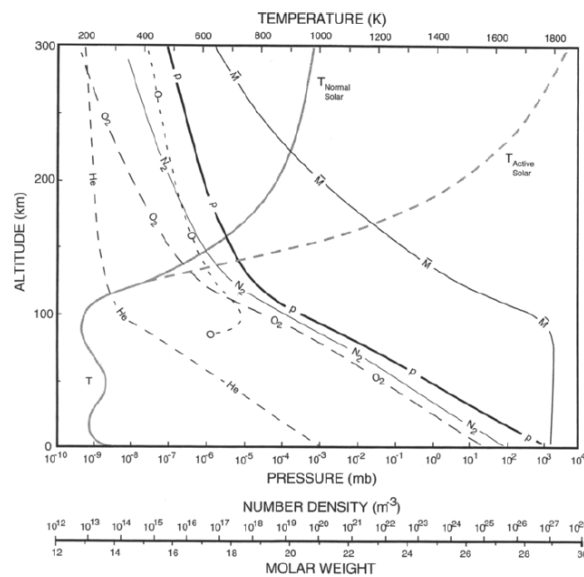


Figure 1: Perfil vertical típico da atmosfera, com p a representar a pressão, T a temperatura, $\bar{M}$ a massa molar média do ar, e os restantes símbolos correspondendo aos respetivos símbolos químicos. Fonte: Salby, 1996.

Dados

Ficheiro PL01_dados.xlsx (na página da cadeira): perfil da *US Standard Atmosphere* (1976) entre 0 e 120 km, com espaçamento de 0.5 km. Colunas:

- altitude_km [km], temperature_K [K], pressure_Pa [Pa], density_kg_m3 [kg m⁻³];
- N2_molefrac, O2_molefrac, O_molefrac, Ar_molefrac: frações molares (adimensionais);
- O3_ppmv: razão de mistura do ozono em partes por milhão em volume (1 ppmv = 10⁻⁶).

A pressão parcial de cada gás é $p_i = x_i p$ (lei de Dalton), onde x_i é a fração molar. Para o ozono, $x_{O_3} = O3_ppmv \times 10^{-6}$. O oxigénio atómico só tem valores acima de ~80 km (abaixo aparece NaN).

Exercícios

1. O perfil de temperatura.

- a) Represente a temperatura em função (i) da altitude, (ii) da pressão em escala linear e (iii) da pressão em escala logarítmica. Que diferenças encontra? Qual das representações em pressão se aproxima mais da representação em altitude, e porquê?
- b) Identifique no gráfico as distintas camadas da atmosfera e as respectivas “pausas”. Calcule o gradiente vertical de temperatura, $\partial T/\partial z$ [K km⁻¹], em cada camada e apresente-o numa tabela. A estratosfera tem um único gradiente?

2. A composição e o balanço de energia.

- c) Quais os responsáveis pelas variações de temperatura em cada camada? Represente cada componente relevante para a resposta: as pressões parciais de N_2 , O_2 , Ar e O (escala logarítmica) e o ozono, lado a lado ou sobrepostos ao perfil de temperatura.
- d) A que altitude é máxima a razão de mistura do ozono? E a sua pressão parcial? E a temperatura na alta estratosfera? Porque é que o máximo de temperatura não coincide com o máximo de ozono?

3. O decaimento exponencial da pressão.

- e) Represente $\ln p$ em função de z . Na troposfera (0-11 km), ajuste uma reta e obtenha a altura de escala H da expressão $p = p_0 e^{-z/H}$. Compare com $H = R_d \bar{T}/g$, onde $R_d = 287 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$, $g = 9.81 \text{ m s}^{-2}$ e $\bar{T}$ é a temperatura média da troposfera.
- f) Que fração da massa total da atmosfera se encontra abaixo dos 5.5 km? E abaixo da tropopausa? (Dica: em equilíbrio hidrostático, a pressão num nível é o peso, por unidade de área, da coluna de ar que está acima.)

Para discussão

- Porque é que em Meteorologia se usa tão frequentemente a pressão (em escala logarítmica) como coordenada vertical?
- Se a radiação solar chega à atmosfera “por cima”, porque é que a troposfera arrefece com a altitude?
- O ajuste da alínea e) continua bom acima dos 11 km? O que é que isso nos diz sobre H ?
- Este perfil é uma média. Onde e quando espera encontrar a tropopausa mais alta? E mais baixa?

Guia prático

1. Importe `numpy`, `pandas` e `matplotlib.pyplot`.
2. Leia o ficheiro com `pd.read_excel(...)` e extraia cada coluna para um *array* (`.values`). Atenção às unidades (Pa $\rightarrow$ hPa).
3. Com a pressão no eixo vertical: `ax.invert_yaxis()` e, para a escala logarítmica, `ax.set_yscale('log')`.
4. Para marcar camadas: `ax.axhline(...)` e `ax.text(...)`. Para gradientes: `np.diff` ou `np.gradient`.
5. Para vários eixos horizontais na mesma figura: `ax.twinx()`. Para o ajuste linear: `np.polyfit(x, y, 1)`.
6. Guarde as figuras (`plt.savefig()`): vai precisar delas na discussão.