

Índice general

Información útil	1
Constantes	1
Símbolos utilizados	4
Prefacio	9
1. La Atmósfera	11
1.1. Problemas Resueltos	13
1.2. Problemas propuestos	16
2. La Radiación Solar	19
2.1. Problemas Resueltos	20
2.2. Problemas propuestos	41
3. La temperatura	47
3.1. Problemas Resueltos	48
3.2. Problemas propuestos	54
4. La termodinámica de la atmósfera	57
4.1. Problemas Resueltos	58
4.2. Problemas propuestos	80
5. La estabilidad atmosférica	83
5.1. Problemas Resueltos	83
5.2. Problemas propuestos	90
6. La dinámica atmosférica	91
6.1. Problemas resueltos	92

6.2. Problemas propuestos	118
7. La circulación atmosférica	121
7.1. Problemas Resueltos	122
7.2. Problemas propuestos	127
8. Oceanografía	131
8.1. Problemas Resueltos	132
8.2. Problemas propuestos	135
9. Clasificación Climática	137
9.1. Problemas Resueltos	138
9.2. Problemas propuestos	141
Apéndice	143
9.3. Programa 1: Presión de saturación para el vapor de agua . .	144
9.4. Programa 2: Climograma	146
Glosario	155
Esquemas	161
Bibliografía	165

Capítulo 1

La Atmósfera

Introducción

Los gases más abundantes en la atmósfera terrestre son el nitrógeno y el oxígeno, que son moléculas diatómicas, y el argón. El vapor de agua es un componente muy variable, su concentración puede variar en un rango de tres órdenes de magnitud, y representa un total del 0.25 % de la masa de la atmósfera.

La concentración de los gases en la atmósfera se expresa mediante diversas relaciones, una de las más frecuentes es la densidad numérica, la cantidad de sustancia presente en un cierto volumen. La densidad numérica es el número de moléculas de un gas por unidad de volumen y tiene unidades de moléculas por metro cúbico. Esta forma de expresar la concentración es útil en el estudio de fenómenos que dependen del número de partículas, moléculas o aerosoles, como son la dispersión y la absorción de la radiación en la atmósfera o en los que tienen lugar reacciones en fase gaseosa.

Dependiendo de las aplicaciones se pueden utilizar otras relaciones; aquí utilizaremos la fracción molar y la densidad numérica para estudiar la composición de la atmósfera y más adelante en el capítulo 4 utilizaremos la presión parcial, que como veremos es muy conveniente para estudiar la formación de nubes y de rocío.

La fracción molar de un gas, que representaremos por χ , se define como el número de moles de ese gas por mol de aire seco y se expresa en unidades de mol mol^{-1} (debido a la gran variabilidad de la concentración de vapor de agua en la atmósfera, es frecuente que en las relaciones se utilice la cantidad

de aire seco). Dado que un mol de cualquier sustancia contiene un número de moléculas igual al número de Avogadro, N_A , el valor numérico de la concentración de un gas en porcentaje de volumen es el mismo que el del porcentaje basado en el número de moléculas o de moles. Por tanto decir que la concentración de nitrógeno molecular N_2 es del 78 % es equivalente a decir que $\chi_{N_2} = 0,78 \text{ mol mol}^{-1}$ o que de cada 100 moléculas de aire 78 son de nitrógeno.

El porcentaje de volumen tiene la ventaja sobre otras formas de medir la concentración de que no depende de la densidad del gas y por tanto no cambia cuando lo hace la presión o la temperatura del aire.

Para los gases traza, cuya concentración en la atmósfera es muy baja ($< 1 \%$), en vez de en tanto por ciento la concentración se expresa en partes, moléculas o moles, por millón ppm^1 . A pesar de sus bajas concentraciones los gases traza tienen un papel esencial en fenómenos como el efecto invernadero, la capa de ozono, la formación de nieblas y otros aspectos del medio ambiente de gran importancia. Cuando no se expresan las magnitudes de que se trata, como en el caso de porcentajes y partes por millón, y si hay ambigüedad, se debe indicar si la concentración es en volumen o en masa con la nomenclatura ppmv y ppmm .

Un concepto importante en el estudio de la composición atmosférica, especialmente cuando hablamos de contaminantes y de gases de efecto invernadero, es el tiempo de residencia o vida media del gas en cuestión. En el caso más sencillo en el que la masa de gas en la atmósfera es constante², este tiempo se define como el cociente entre la masa m de gas y la tasa Φ a la cual el gas entra o sale de la misma. Con esta definición, el tiempo de residencia, $\tau = m/\Phi$, se puede entender como el tiempo que tarda en llenarse o vaciarse el reservorio con una tasa constante. Por ejemplo el tiempo de residencia del agua en el océano es generalmente de unos 3.550 años y en la atmósfera de 11 días.

¹En los textos científicos también se utiliza partes por billón ppb y partes por trillón ppt , donde billón y trillón tienen el valor anglosajón 10^9 y 10^{12} , respectivamente. En este libro evitaremos el uso de estas unidades para que no haya confusión con el significado español de billón (10^{12}) y trillón (10^{18}).

²En general, la tasa de entrada y la de salida no tienen que ser iguales y la masa del reservorio no es constante.

1.1. Problemas Resueltos

Problema 1.1 Con los datos de la tabla 5, página 3, calcule la masa molecular media del aire seco.

Solución:

Si en un determinado volumen tenemos n_d moles de aire, por definición de mol tenemos que la masa molecular del aire es

$$M_d = \frac{m_d}{n_d} = \frac{\sum_i m_i}{n_d},$$

donde m_d es la masa de aire, que es la suma de las masas m_i de los gases que lo componen. Teniendo en cuenta que para cada gas se cumple que $m_i = M_i n_i$, la expresión anterior se puede escribir como

$$\begin{aligned} M_d &= \frac{\sum_i n_i M_i}{n_d} = \sum_i \frac{n_i}{n_d} M_i = \sum_i \chi_i M_i = \chi_{N_2} M_{N_2} + \chi_{O_2} M_{O_2} + \chi_{Ar} M_{Ar} \\ &= 0,7808 \times 28,02 + 0,2095 \times 32 + 0,0093 \times 39,95 = 28,93 \text{ g mol}^{-1} \end{aligned}$$

Comparando con $28,97 \text{ g mol}^{-1}$, que es el valor de la masa molecular del aire seco dado en la tabla 2, vemos que el error cometido al considerar solamente los tres gases más abundantes en la atmósfera es menor del 1 %.

Problema 1.2 En la tabla 5, página 3, se muestra la composición de la atmósfera dando para cada gas su porcentaje en volumen (fracción molar). Exprese la concentración atmosférica en masa específica (fracción másica). Compare el caso del N_2 con el CO_2 . Dato: la masa molecular del aire seco es $M_d = 28,97 \text{ g mol}^{-1}$.

Solución:

Sean m_d , M_d y $n_d = m_d/M_d$ respectivamente la masa, la masa molecular y el número de moles de aire.

Para el nitrógeno N_2 la masa molecular es $M_{N_2} = 28,02 \text{ g mol}^{-1}$ y según la tabla su fracción molar es

$$\chi_{N_2} = \frac{n_{N_2}}{n_d} = 0,7808$$

teniendo en cuenta que el número de moles de nitrógeno es $n_{N_2} = m_{N_2}/M_{N_2}$, la masa específica es

$$\begin{aligned} q_{N_2} &= \frac{m_{N_2}}{m_d} = \frac{n_{N_2} M_{N_2}}{n_d M_d} = \chi_{N_2} \frac{M_{N_2}}{M_d} \\ &= 0,7808 \frac{28,02 \text{ g mol}^{-1}}{28,97 \text{ g mol}^{-1}} = 0,7552 = 75,5 \% \end{aligned}$$

Para el CO_2 la masa molecular es $M_{CO_2} = 44,01 \text{ g mol}^{-1}$ y

$$\chi_{CO_2} = \frac{n_{CO_2}}{n_d} = 4 \times 10^{-4} = 400 \text{ ppmv}$$

y por lo tanto

$$\begin{aligned} q_{CO_2} &= \frac{m_{CO_2}}{m_d} = \chi_{CO_2} \frac{M_{CO_2}}{M_d} \\ &= 4 \times 10^{-4} \frac{44,01 \text{ g mol}^{-1}}{28,97 \text{ g mol}^{-1}} = 6,077 \times 10^{-4} = 607,7 \text{ ppm} \end{aligned}$$

En el caso del nitrógeno $\chi_{N_2} \approx q_{N_2}$ porque su masa molecular es parecida a la del aire, pero para el CO_2 se tiene que $q_{CO_2} = 1,7 \chi_{CO_2}$.

Problema 1.3 Determine el número de moléculas de CO_2 por unidad de volumen (densidad numérica), sabiendo que la concentración de este gas es de 400 ppmv. Datos: presión atmosférica $p_0 = 1000 \text{ hPa}$, temperatura $T = 0^\circ\text{C}$, número de Avogadro $N_A = 6,022 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$, constante de los gases $R = 8,31 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$.