

Capítulo 6

PROCESOS DE TRANSPORTE: DIFUSIÓN Y ÓSMOSIS

- 6.1 Flujo y movimiento de difusión
- 6.2 Leyes de Fick
- 6.3 Ósmosis y presión osmótica
- 6.4 Intercambio transcapilar de sustancias

Introducción

Los **fenómenos de transporte** son los cambios que se producen en un sistema para restaurar el equilibrio cuando en partes del sistema se dan condiciones físicas diferentes: movimiento de **partículas** ante una **variación de concentraciones** (**transporte de partículas**), paso de **calor** ante una **diferencia de temperatura** (**transporte calorífico**), movimiento de **cargas** (conducción eléctrica) ante una **diferencia de potencial** (**transporte eléctrico**)... Aquí nos ocuparemos del primero.

6.1 Flujo y movimiento de difusión

Flujo: cantidad de partículas, energía o carga eléctrica que se traslada en un proceso de transporte por unidad de tiempo (y, a veces también, por unidad de área de una superficie).

Unidades: m^3/s (caudal: flujo de volumen), mol/s o g/s (**flujo de partículas**),
 $\text{W} = \text{J/s}$ (potencia: flujo de energía),
 $\text{A} = \text{C/s}$ (intensidad: flujo de carga).

A partir de ahora **nos concentraremos en el flujo de partículas**.

- **Disolución, soluto y disolvente**

Cuando una sustancia se disuelve en un líquido, las moléculas de la sustancia (*sólido*) se dispersan uniformemente por las del líquido (*disolvente*). La mezcla resultante se llama *disolución*.

- **Concentración molar**

La *concentración molar* c es el número de moles n de soluto, por unidad de volumen:

$$c = \frac{n}{V}$$

Por ejemplo: si $c = 1 \text{ mol/l}$ se dice que la disolución es 1 M , o sea "1 molar".

Un *mol* de una sustancia pura es su masa molecular en u.m.a. (u) expresada en *gramos*. Contiene un *número de moléculas* igual al número de Avogadro $N_A = 6.022 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$.

- **Flujo de partículas**

Cantidad de partículas (moléculas de soluto) que atraviesa una sección perpendicular a la dirección de desplazamiento, **por unidad de tiempo**:

$$J = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta n}{\Delta t} = \frac{dn}{dt}$$

- **Densidad de flujo de partículas**

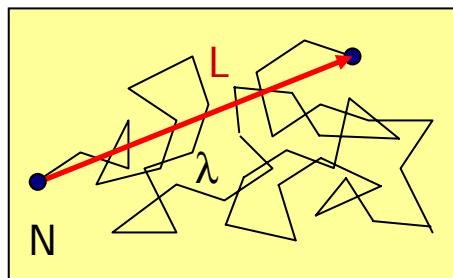
Flujo por unidad de área:

$$j = \frac{J}{S} = \frac{1}{S} \frac{dn}{dt}$$

Movimiento de difusión:

Una partícula en un fluido se puede mover de un lugar a otro debido a que el fluido se mueva (*arrastre*) o bien debido a su propio movimiento (*difusión*). Aquí nos interesa la difusión.

Debido a la agitación térmica, las moléculas de los fluidos poseen un movimiento irregular con multitud de colisiones entre ellas (*movimiento browniano*) que favorece que el soluto se mueva de las zonas mayor a las de menor concentración: *movimiento de difusión*.



Es un movimiento en zig-zag. La distancia media entre dos colisiones consecutivas λ se llama *recorrido libre medio*.

Modelo del *camino aleatorio* o *paseo del borracho*: la distancia L recorrida por una molécula tras N pasos (colisiones) es:

$$L = \lambda\sqrt{N}$$

6.2 Leyes de Fick

Si una sustancia está **en equilibrio**, el **movimiento de zig-zag** de cada una de sus partículas se realiza **con la misma probabilidad en todas direcciones**.

Cuando perturbamos el **equilibrio** (por ejemplo, si hay una diferencia de concentraciones), el **movimiento de difusión** se hace más probable en una dirección que en las otras. El resultado es el **fenómeno de transporte**.

Se llama **gradiente de la concentración** a su variación con la distancia:

$$\text{gradiente} = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta c}{\Delta x} = \frac{\partial c}{\partial x}$$

(hemos supuesto que la concentración varía sólo en la dirección X)

Primera ley de Fick

La densidad de flujo de un determinado tipo de partículas es proporcional al gradiente de su concentración:

$$j = -D \frac{\partial c}{\partial x}$$

el signo menos indica que el flujo va de las zonas de mayor a las de menor concentración

donde D es el **coeficiente de difusión** (unidades de m^2/s).

Si la concentración varía también en las otras direcciones espaciales, hay un flujo en cada dirección. La expresión anterior da sólo la componente j_x

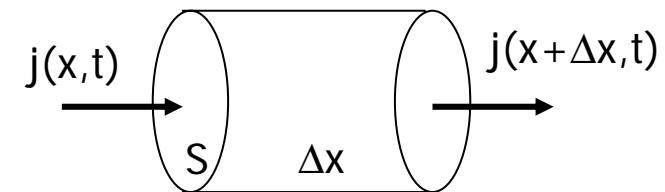
Ecuación de continuidad

La diferencia entre los flujos que atraviesan las dos secciones iguales S debe ser la variación del número de partículas:

$$S j(x) - S j(x + \Delta x) = \frac{\partial(c S \Delta x)}{\partial t}$$

y dividiendo por $S \Delta x$:

$$\lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{j(x) - j(x + \Delta x)}{\Delta x} = \boxed{-\frac{\partial j}{\partial x} = \frac{\partial c}{\partial t}}$$



Nota: si la concentración fuera constante (situación estacionaria), el flujo no varía: resultado que vimos como caudal constante.

Segunda ley de Fick: ecuación de la difusión

Combinando la primera ley de Fick con la ecuación de continuidad:

$$j = -D \frac{\partial c}{\partial x} \Rightarrow \boxed{\frac{\partial c}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2}}$$

Coeficiente de difusión

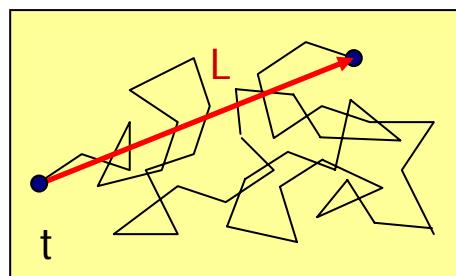
Depende de la naturaleza, tamaño y forma del soluto, la viscosidad η del disolvente y la temperatura T . **Para partículas esféricas de radio r , Einstein encontró que:**

$$D = \frac{k_B T}{6\pi\eta r}$$

$$k_B = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J K}^{-1} \text{ (constante de Boltzmann)}$$
$$1 \text{ K (grado Kelvin)} = 273 \text{ }^{\circ}\text{C}$$
$$T \text{ (K)} = \text{temperatura } ({}^{\circ}\text{C}) + 273 \text{ }^{\circ}\text{C}$$
$$T = \text{temperatura absoluta}$$

Distancia cuadrática media

A partir de la ecuación de la difusión, mediante análisis dimensional deducimos que la distancia media L que recorre una partícula en un intervalo de tiempo t en un movimiento de difusión es:



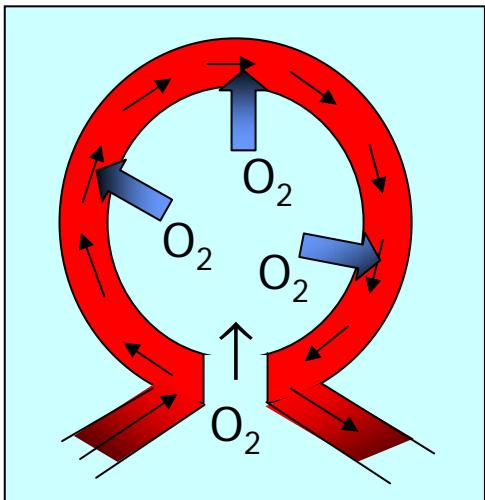
$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \Rightarrow \frac{1}{t} \approx \frac{D}{L^2} \Rightarrow L \propto \sqrt{Dt}$$

Un cálculo más preciso conduce a:

$$L = \sqrt{2Dt} \text{ (en 1 dimensión)}$$

$$L = \sqrt{6Dt} \text{ (en 3 dimensiones)}$$

Ejemplo: difusión de O₂ en los alveolos pulmonares



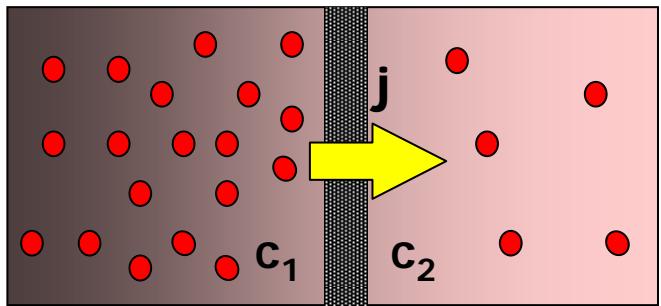
Radio del capilar: $L = 5 \mu\text{m}$

Coeficiente de difusión del O₂ en agua: $D = 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{s}$

$$\Rightarrow t \approx \frac{L^2}{6D} \approx 0.004 \text{ s}$$

La velocidad de la sangre en los capilares pulmonares es $v \approx 0.1 \text{ cm/s}$ y su longitud típica es $e \approx 100 \mu\text{m}$. Por tanto, la sangre está un tiempo $e/v \approx 1 \text{ s}$ en contacto con el O₂, suficiente para que se produzca la difusión.

Difusión a través de membranas. Permeabilidad



Hasta ahora teníamos sólo disolvente y soluto.

Si existe una membrana que separa dos medios de concentraciones c_1 y c_2 , el flujo j de moléculas que la atraviesa cumple una ley parecida a la 1^a ley de Fick:

$$j = P \Delta c$$

$$\Delta c = c_1 - c_2$$

donde P es la *permeabilidad* de la membrana.

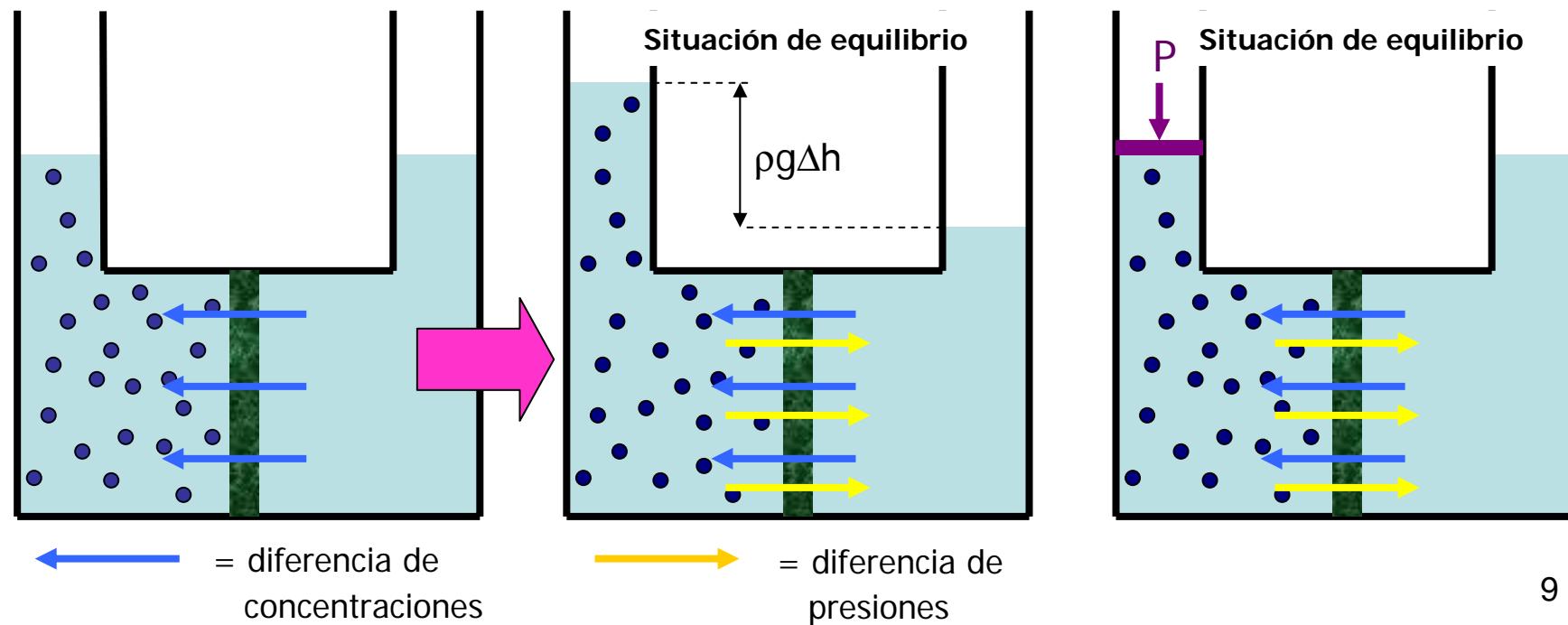
6.3 Ósmosis y presión osmótica

Difusión a través de una membrana semipermeable

Una *membrana semipermeable* deja pasar las moléculas del disolvente pero no las moléculas del soluto.

Ósmosis

Si separamos una disolución (que contiene un soluto) del disolvente puro mediante una membrana semipermeable, se observa un **transporte de disolvente desde la región en la que está puro hacia la disolución**:



Presión osmótica

Vemos que el transporte de disolvente produce una **soprepresión** en el lado izquierdo (disolución) con respecto al derecho, **de valor $pg\Delta h$** .

Se denomina *presión osmótica Π* a la **soprepresión** de la disolución con respecto a la del disolvente puro **en la situación de equilibrio**.

La presión de un émbolo aplicado a la zona izquierda que hace que las alturas se ambos lados se **igualen** es $p = \Pi$.

Si la disolución es **diluida**, las n moléculas de soluto se comportan como un **gas ideal**, cumpliéndose $pV = nRT$. Por tanto, **en el equilibrio tenemos**:

$$\Pi = cRT \quad \text{donde } R = N_A k_B = 8.314 \frac{J}{mol K} \quad (\text{constante de los gases ideales})$$

La presión osmótica es **una propiedad de la disolución**, esté o no en contacto con una membrana semipermeable. Para el plasma sanguíneo:

$$\Pi_{\text{plasma}} = 6.7 \text{ atm}$$

Osmolaridad

A la suma c de las concentraciones c_i (en mol/l) de moléculas de diferentes solutos impermeables a la membrana que hay en una disolución se le llama *osmolaridad* y se mide en **osmoles/l**. La osmolaridad define la presión osmótica de la disolución:

$$\Pi = c_1 RT + c_2 RT + \dots + c_n RT = \sum_{i=1}^n c_i RT = cRT, \quad c = \sum_{i=1}^n c_i$$

Ejemplo: hallar la Π del fluido intracelular cuya osmolalidad es 0.3 osmoles/l

$$\Pi = cRT = \left(0.3 \frac{\text{osmoles}}{\text{l}} \times \frac{1000 \text{ l}}{1 \text{ m}^3}\right) \times \left(8.314 \frac{\text{J}}{\text{mol K}}\right) \times (273 + 37) \text{ K} = 773202 \text{ Pa} = 7.6 \text{ atm}$$

En una célula, la presión osmótica no es la presión del fluido intracelular, sino una *medida de la tendencia del agua (disolvente) a difundirse en la célula*. La presión real en el interior de una célula depende también de la osmolaridad del fluido exterior y de la rigidez de la pared celular.

Si la osmolaridad del fluido intracelular es mayor/menor que en el exterior el agua entrará/saldrá de la célula. Si la diferencia de presiones osmóticas entre interior y exterior es tal que tensión superficial de la célula no puede soportarla, la célula reventará.

Una *disolución isotónica* es la que tiene la osmolaridad del fluido intracelular.

Si su osmolaridad es mayor (menor) es *hipertónica* (*hipotónica*).

Para no alterar el equilibrio de fluidos del cuerpo, los fluidos injectados a un paciente deben ser isotónicos.

Ejemplo: hallar la concentración de una disolución isotónica de glucosa ($C_6H_{12}O_6$) que puede ser injectada a un paciente como alimentación por vía intravenosa.

$$c = 0.3 \text{ osmoles/l} \Rightarrow 0.3 \text{ moles/l de glucosa}$$

$$\text{masa molecular de } C_6H_{12}O_6 = 6 \times 12 + 12 \times 1 + 6 \times 16 = 180 \text{ u} \Rightarrow 1 \text{ mol} = 180 \text{ g}$$

$$\Rightarrow 0.3 \frac{\text{mol}}{\text{l}} = 0.3 \frac{\text{mol}}{\text{l}} \times \frac{180 \text{ g}}{\text{mol}} = 54 \text{ g/l}$$

Ósmosis inversa

Si se aplica una presión mayor que Π a una disolución se consigue que salga disolvente a través de la membrana semipermeable. Así podemos desalinizar agua del mar, lo que resulta ser un proceso poco costoso energéticamente:

agua de mar : $c = 1.08 \text{ osmoles/l}$

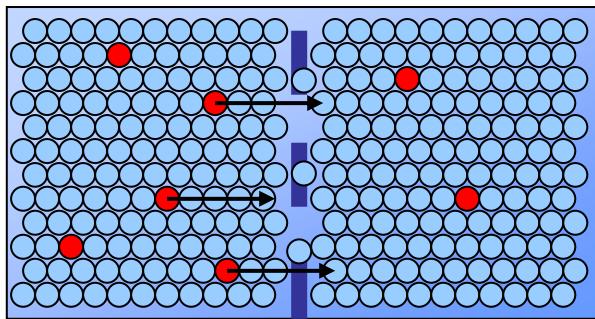
$$\Pi = \left(1.08 \frac{\text{osmoles}}{\text{l}} \times \frac{1000 \text{ l}}{1 \text{ m}^3} \right) \times \left(8.314 \frac{\text{J}}{\text{mol K}} \right) \times (273 + 20) \text{ K} = 2630882 \text{ Pa} = 26 \text{ atm}$$

$$\text{Si purificamos 1 mol} \Rightarrow \Delta V = 18 \text{ cm}^3 : W = Fd = pA \frac{\Delta V}{A} = p\Delta V \approx \Pi\Delta V = 47.3 \text{ J} \quad 12$$

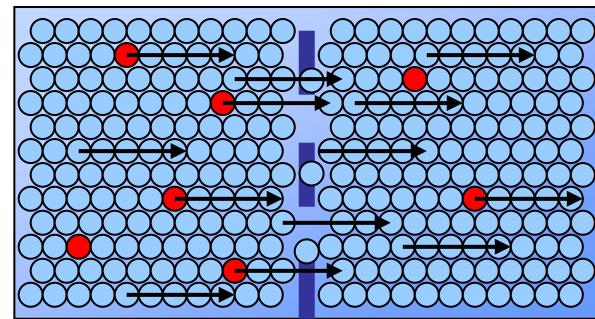
6.4 Intercambio transcapilar de sustancias

Difusión y convección

La presión osmótica juega un importante papel en el intercambio de nutrientes a través de la pared de los capilares sanguíneos o de los conductos del xilema. El transporte puede ser **difusivo** (de mayor a menor concentración de nutriente) o **convectivo** (el disolvente arrastra los nutrientes que puedan atravesar la membrana o a los que ya estén dentro).



Transporte **difusivo** (origen: Δc)



Transporte **convectivo** (origen: $\Delta p - \Delta \Pi$)

Transporte del agua en las plantas por ósmosis

La savia asciende por el xilema, en parte, debido a la diferencia de presión osmótica entre el agua del suelo alrededor de las raíces y la disolución de azúcar (savia) del interior. El agua que penetra arrastra la savia.

La savia tiene una concentración de un 1% en peso de sacarosa ($C_{12}H_{22}O_{11}$) en agua. Supongamos que la temperatura es de 27°C.

a) Hallar la **concentración molar** de la savia:

$$1 \text{ mol de sacarosa} = 12 \times 12 + 22 \times 1 + 11 \times 16 = 342 \text{ g}$$

$$1\% \text{ en peso} \Rightarrow \text{en } 1000 \text{ kg} \approx 1 \text{ m}^3 \text{ hay } 10 \text{ kg de sacarosa} = 10^4 \text{ g} \Rightarrow c = 29.2 \text{ moles/m}^3$$

b) Hallar la **presión osmótica** de la savia:

$$\Pi = cRT = \left(29.2 \frac{\text{moles}}{\text{m}^3} \right) \times \left(8.314 \frac{\text{J}}{\text{mol K}} \right) \times (300 \text{ K}) = 7.28 \times 10^4 \text{ Pa} = 0.72 \text{ atm}$$

c) Hallar la **altura a la que sube la savia**:

Una columna de savia de altura h tiene un volumen $V = Ah$ y pesa ρAhg .

Para equilibrar la presión osmótica:

$$\Pi = \frac{\rho Ahg}{A} = \rho hg \Rightarrow h = \frac{\Pi}{\rho g} = \frac{7.28 \times 10^4 \text{ Pa}}{(1000 \text{ kg m}^{-3}) \times (9.8 \text{ m s}^{-2})} = 7.43 \text{ m}$$