



# Laboratorio: Ósmosis

Ismael Acosta  
([iacosta@fcien.edu.uy](mailto:iacosta@fcien.edu.uy))  
Facultad de Ciencias, UdelaR

# Contenido de la clase

- Introducción
- Actividad 1:
  - Fundamento y diseño experimental.
  - Toma de datos.
  - Discusión.
- Actividad 2:
  - Fundamento y diseño experimental.
  - Toma de datos.
  - Discusión.

# Contenido de la clase

- **Introducción**
- Actividad 1:
  - Fundamento y diseño experimental.
  - Toma de datos.
  - Discusión.
- Actividad 2:
  - Fundamento y diseño experimental.
  - Toma de datos.
  - Discusión.

## ¿Qué es la Ósmosis?

Movimiento *pasivo* de un solvente a través de una membrana semipermeable. En general, el solvente es el agua.

Una **membrana semipermeable** es aquella estructura que contiene un filtro que impide el paso de ciertas moléculas, pero permite el pasaje de otras. Generalmente esta distinción es por tamaño.

La ósmosis se genera debido a una diferencia de potencial del solvente.

El **potencial electroquímico** de una especie química es:

$$\mu_x = \mu_0 + RT \ln(C_x) + z_x F \psi_x$$

Para el caso del agua (pura) el componente eléctrico es nulo,

$$\mu_{H_2O} = RT \ln(a_{H_2O})$$

Donde,

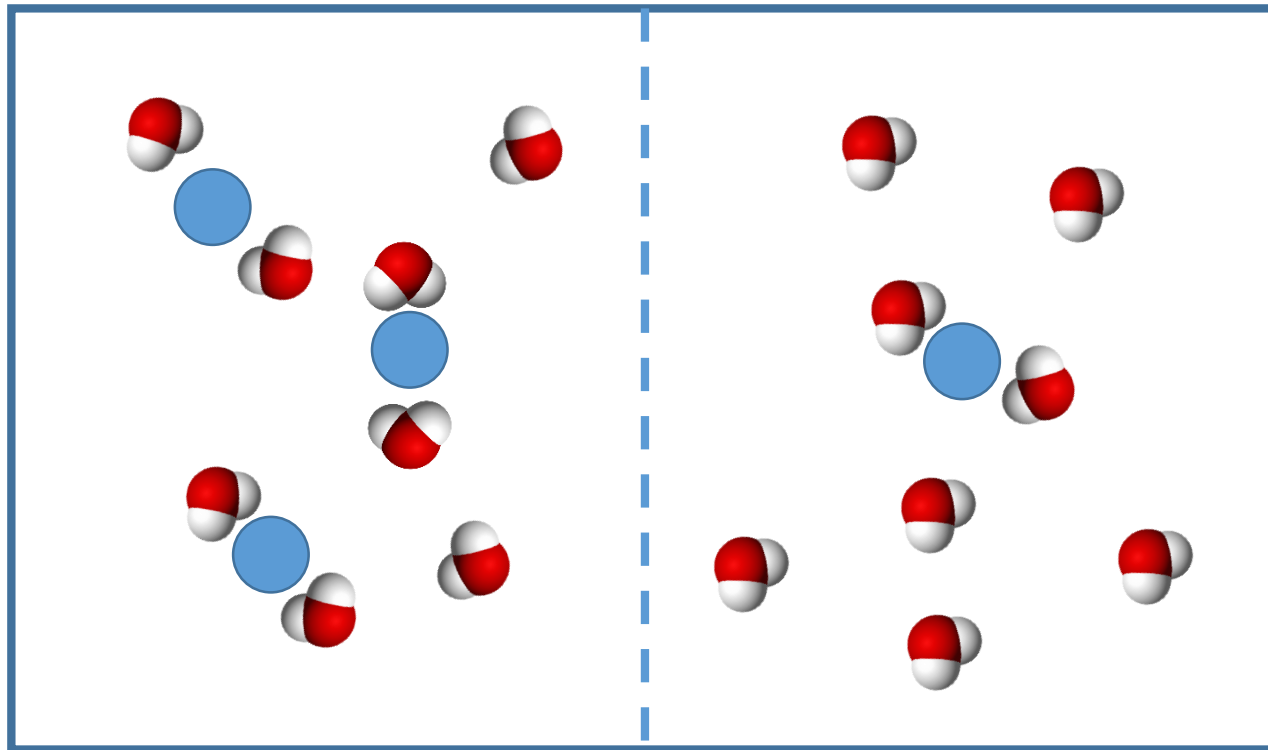
$\mu_{H_2O}$  es el potencial electroquímico del agua

$R$  es la Constante Universal de los Gases

$T$  es la Temperatura Absoluta (en  $K$ )

$a_{H_2O}$  es la Actividad del Agua

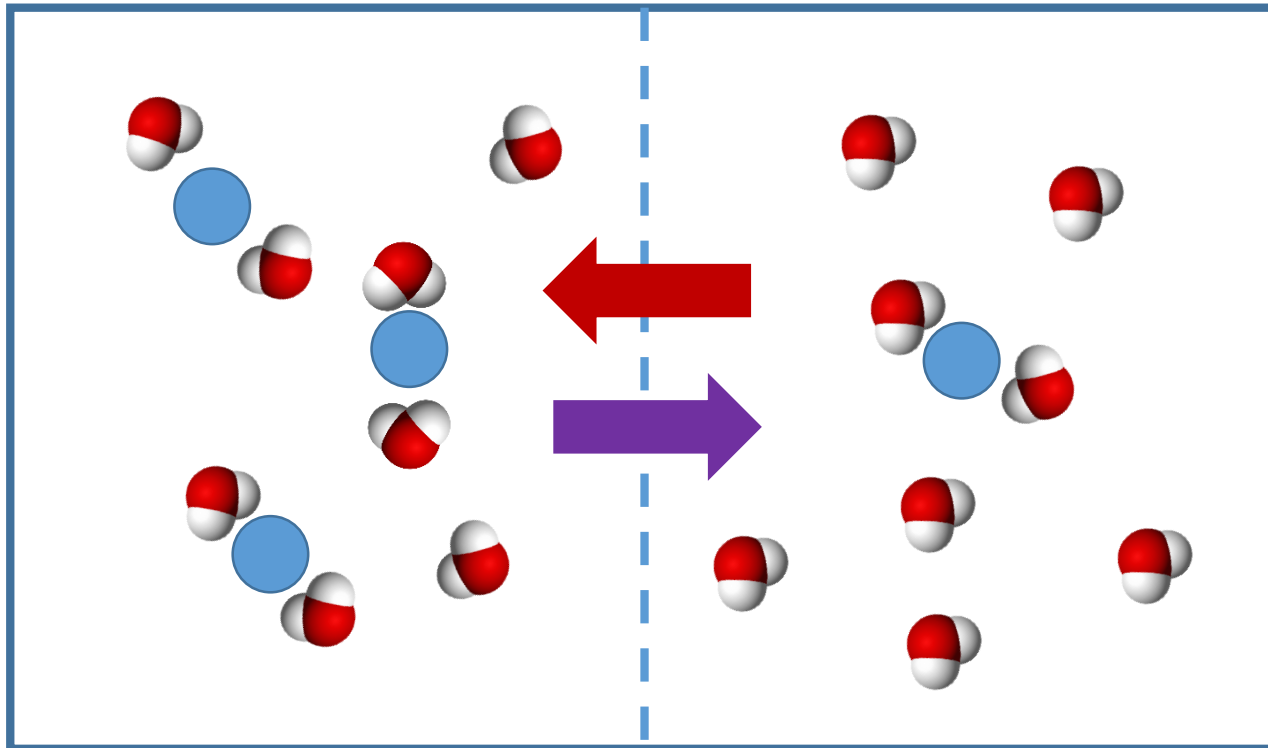
La **actividad del agua** es una medida de la cantidad de moléculas disponibles para el transporte osmótico.



La cantidad de moléculas de agua en ambos compartimentos es la misma, pero en el compartimento de la derecha hay más moléculas disponibles para moverse, y por lo tanto, su actividad es mayor.



El movimiento de agua es en contra del gradiente de concentración del soluto.



● Soluto ● Agua

Si la membrana es no permeable al soluto, los potenciales se igualarán en el equilibrio a través de un movimiento de agua hacia la izquierda (**flecha roja**). Si la membrana fuera permeable al soluto habría un flujo de soluto hacia la derecha (**flecha violeta**).

# Presión Osmótica

Es la presión necesaria para impedir el flujo del solvente que se mueve por ósmosis. En soluciones muy diluidas, obedece la **Ley de van't Hoff**:

$$\Pi = iCRT$$

Ver Anexo de esta presentación para demostración.

Donde,

$\Pi$  es la Presión Osmótica (en *kPa*)

$i$  es el número de partículas *osmóticamente activas*

$C$  es la concentración de soluto  $\left(\frac{\text{mol}}{\text{L}}\right)$

$R$  es la Constante Universal de los Gases  $\left(8,314 \frac{\text{kPa L}}{\text{mol K}}\right)$

$K$  es la Temperatura Absoluta (en *K*)



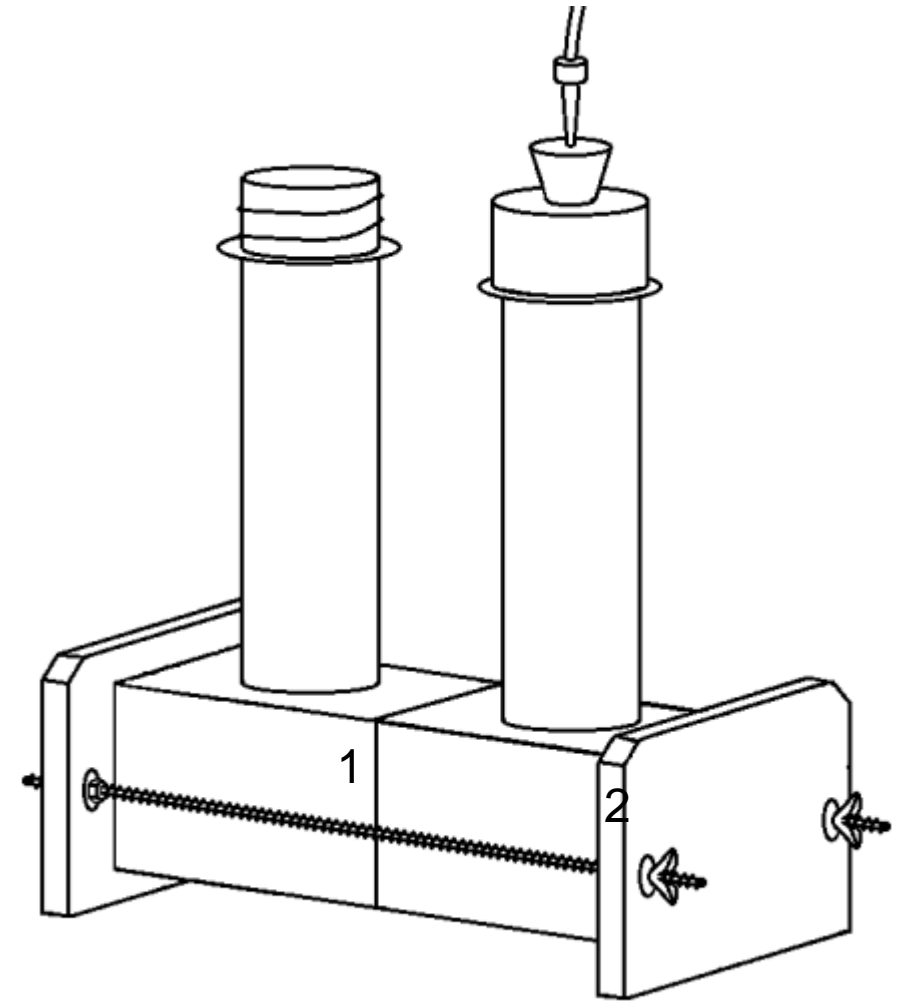
# Contenido de la clase

- Introducción
- Actividad 1:
  - Fundamento y diseño experimental.
  - Toma de datos.
  - Discusión.
- Actividad 2:
  - Fundamento y diseño experimental.
  - Toma de datos.
  - Discusión.

# Contenido de la clase

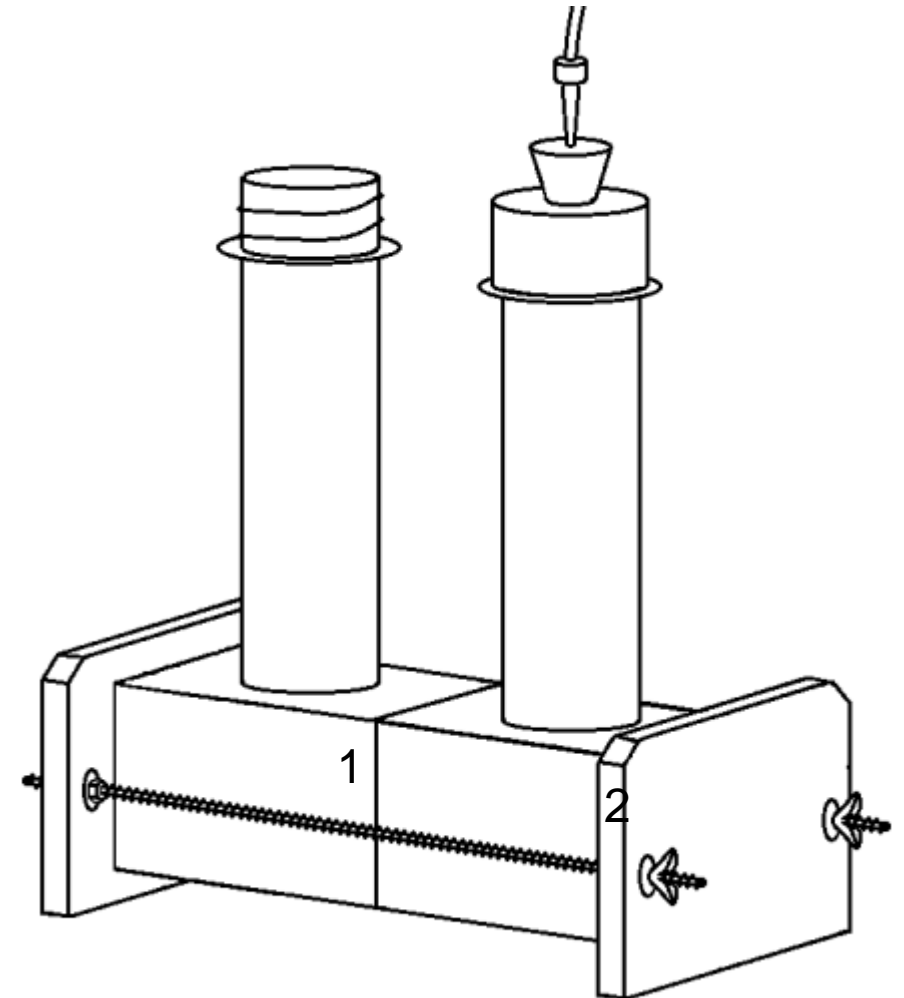
- Introducción
- **Actividad 1:**
  - **Fundamento y diseño experimental.**
  - Toma de datos.
  - Discusión.
- Actividad 2:
  - Fundamento y diseño experimental.
  - Toma de datos.
  - Discusión.

El dispositivo experimental consta de dos tubos: el tubo 1 contiene agua destilada, y el tubo 2 contiene diferentes concentraciones de sacarosa. Por ósmosis, el agua tenderá a ir desde el tubo 1 al tubo 2 hasta alcanzar el equilibrio.

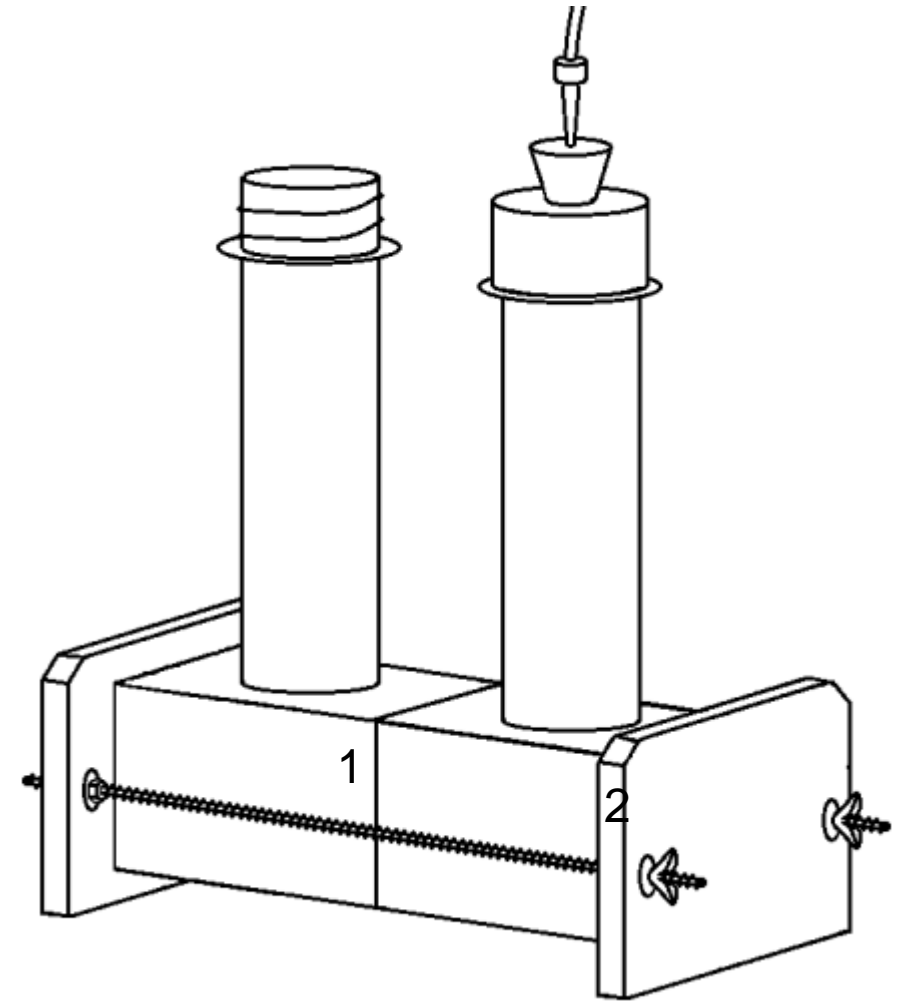


El flujo de agua hacia el tubo 2 aumenta el volumen de la columna de agua al tiempo que disminuye el volumen de gas por encima de ésta. Esta disminución de volumen genera un aumento de la presión generada sobre el sensor, de acuerdo con la **Ley de Boyle.**

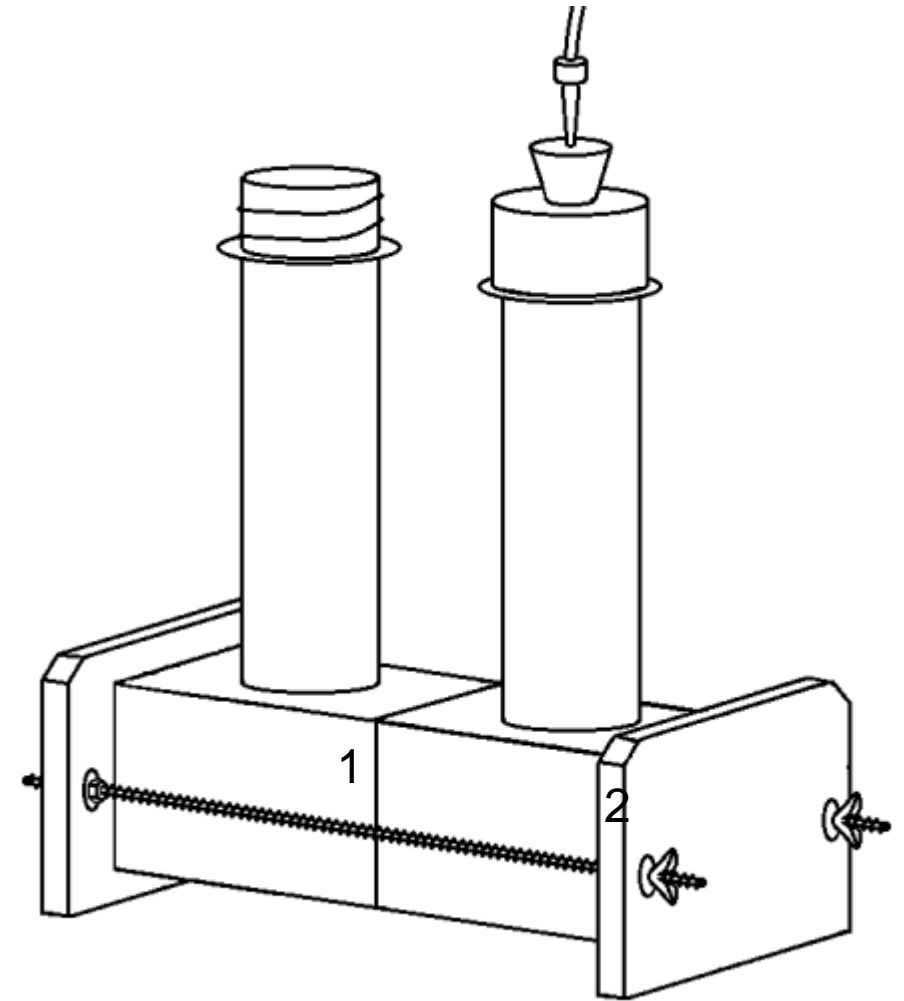
$$PV = cte.$$



El sensor consta de una membrana sensible a los cambios de presión. Esta variación de presión es proporcional a un cambio en la diferencia de potencial eléctrico que es registrada en la interface y computada en el software.



Las variaciones de presión son relativamente pequeñas comparadas con la presión atmosférica ( $\sim 101 \text{ kPa}$ ) por lo que el sensor tiende a redondear las mediciones dentro del intervalo de tiempo asignado. Esto se observará gráficamente como una curva escalonada.



# Contenido de la clase

- Introducción
- **Actividad 1:**
  - Fundamento y diseño experimental.
  - **Toma de datos.**
  - Discusión.
- Actividad 2:
  - Fundamento y diseño experimental.
  - Toma de datos.
  - Discusión.

# Contenido de la clase

- Introducción
- **Actividad 1:**
  - Fundamento y diseño experimental.
  - Toma de datos.
  - **Discusión.**
- Actividad 2:
  - Fundamento y diseño experimental.
  - Toma de datos.
  - Discusión.



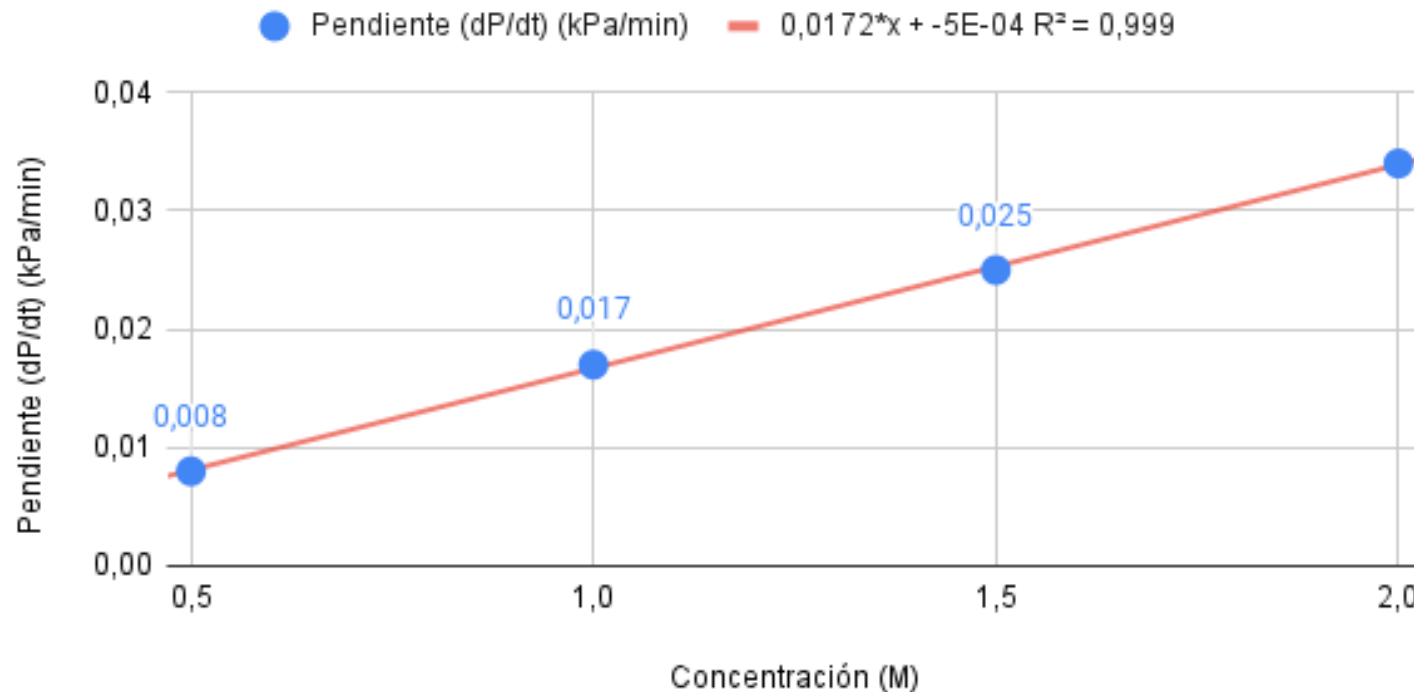
Se observa un comportamiento lineal entre la concentración y el cambio de la presión con el tiempo.

A medida que se incrementa la concentración de soluto, la velocidad de cambio de la presión es mayor.

<b>Concentración (M)</b>	<b>Pendiente (<math>dP/dt</math>) (kPa/min)</b>
2,0	0,034
1,5	0,025
1,0	0,017
0,5	0,008

## dP/dt (kPa/min) vs. Concentración (M)

Laboratorio: Ósmosis



La *pendiente* de esta curva es la **tasa de cambio de la presión por unidad de tiempo y mol de soluto**. Realizando el análisis dimensional correspondiente, la pendiente de esta curva se puede cuantificar en  $W/mol$ .

$$\left[ \frac{p}{Mt} \right] = \frac{\left[ \frac{F}{A} \right]}{\left[ Mt \right]} = \left[ \frac{F}{\left( \frac{n}{V} \right) At} \right] = \left[ \frac{FV}{nAt} \right] = \left[ \frac{Fd}{nt} \right] = \left[ \frac{W}{nt} \right] = \left[ \frac{P}{n} \right] = \frac{Watts}{mol}$$

Presión es Fuerza sobre Área  
 Molaridad es mol sobre volumen  
 Volumen sobre Área es distancia  
 Fuerza por Distancia es Trabajo  
 Trabajo sobre tiempo es Potencia

La pendiente obtenida es una medida de la **energía por unidad de tiempo y mol** que genera el movimiento de agua producto de la diferencia de concentración de soluto en los compartimientos. En este caso, la pendiente es cercana al valor:  $\sim 17,2 Pa \text{ mín}^{-1} M^{-1}$ .

**Pregunta 1: Es sabido que la ósmosis no depende de la naturaleza de los solutos, sino de su concentración. Sin embargo, para esta práctica en particular, la elección de sacarosa como soluto único no es arbitraria.**

**¿Qué características deben tenerse en cuenta al momento de seleccionar el soluto más conveniente para una experiencia como ésta?**

La membrana es ***no permeable*** a la sacarosa, debido a su tamaño molecular. Para realizar esta práctica se tomó en cuenta esta propiedad física de la molécula. Si quisiéramos reemplazar la sacarosa con otra molécula deberíamos tomar en cuenta si es permeante o no.

La membrana puede ser *permeable* o no permeable a un soluto. El soluto puede ser *permeante* o no permeante a la membrana.

**Pregunta 2: ¿Qué relación se observa entre la concentración inicial de la solución y la tasa de variación de la presión de gas en la Actividad 1? ¿Es esto razonable? Discuta.**

A mayor concentración inicial de solución, mayor es la tasa de variación de la presión del gas. Esto se debe a que la diferencia de potenciales químicos del agua es mayor a medida que aumenta la concentración de soluto. La velocidad con la que varía la presión es directamente proporcional a la concentración de soluto.

Ver Anexo de esta presentación para una explicación más detallada.

## **Pregunta 3: Discuta las razones potenciales para explicar la variación en las tasas de cambio de presión, registradas por los diferentes grupos a concentraciones específicas de sacarosa.**

Las variaciones pueden deberse a diversos factores:

- Hidratación de la membrana semipermeable.
- Posibles diferencias de altura entre las columnas de agua.
- El sellado del dispositivo experimental.
- Posibles diferencias en las diluciones.
- Error humano de manipulación.

**Pregunta 4: Prediga el efecto del aumento y la disminución de la temperatura inicial en las tasas de cambio de presión. De la misma forma, prediga el efecto del aumento y disminución del volumen de la columna de agua destilada sobre dichas tasas. ¿En qué escenario una variable podría compensar a la otra? Explique.**



Si aumenta la temperatura **aumenta la velocidad promedio** de las partículas en cada uno de los compartimentos. Este aumento favorece la colisión de las moléculas de agua con la membrana semipermeable y por lo tanto, su transporte a través de ella.

Si bien *el estado final de equilibrio es el mismo* (por que las concentraciones no cambian), aumentar la temperatura genera una mayor velocidad en el transporte de agua, y por lo tanto, una velocidad mayor en el cambio de la presión con el tiempo.

Aumentar el volumen de la columna de agua destilada genera una **presión hidrostática** adicional que favorece el transporte de agua a través de la membrana semipermeable, y por lo tanto aumentará la tasa de cambio de la presión con el tiempo.

Esta presión adicional es mecánica y proporcional a la diferencia de alturas de acuerdo con el **Principio de Bernoulli**.

Análogamente, disminuir la altura de la columna de agua destilada generará una disminución en la velocidad con la que se alcanza el equilibrio.

Podría existir una situación en la cual *el aumento de temperatura se contrarreste con una disminución del volumen* de la columna de agua destilada, de forma tal que el efecto neto sobre la velocidad de cambio de la presión sea nulo respecto a la situación original.

Situaciones biológicas donde es necesario mantener el equilibrio osmótico podría implicar el uso de estrategias similares tomando en cuenta el entorno ambiental y las condiciones fisiológicas celulares.

# Contenido de la clase

- Introducción
- Actividad 1:
  - Fundamento y diseño experimental.
  - Toma de datos.
  - Discusión.
- Actividad 2:
  - Fundamento y diseño experimental.
  - Toma de datos.
  - Discusión.

# Contenido de la clase

- Introducción
- Actividad 1:
  - Fundamento y diseño experimental.
  - Toma de datos.
  - Discusión.
- **Actividad 2:**
  - **Fundamento y diseño experimental.**
  - Toma de datos.
  - Discusión.

El potencial hídrico en muchos tipos de organismos obedece la siguiente relación:

$$\Psi_{H_2O} = \Psi_p + \Psi_s$$

¿Cómo se obtiene esta expresión? Ver Anexo de esta presentación.

Donde,

$\Psi_{H_2O}$  es el potencial hídrico (en *kPa*)

$\Psi_p$  es el potencial de presión (en *kPa*)

$\Psi_s$  es el potencial de solución (en *kPa*)

A partir de esta relación es posible predecir *la dirección del flujo* de agua, sabiendo que siempre se moverá desde la región de mayor potencial hacia la región de menor potencial. La adición de soluto disminuye el potencial hídrico, mientras que la dilución o el aumento de la presión generan un aumento del potencial hídrico.

En esta práctica utilizaremos trozos de tejido vegetal (papa) previamente sumergidos en soluciones con diferentes concentraciones de sacarosa.

El contacto con diferentes concentraciones genera un efecto de entrada o salida de agua de la papa que se pueden cuantificar como el porcentaje de cambio en la masa.

$$\Delta m = \left( \frac{m_f - m_i}{m_i} \right) \times 100$$



Concentración ( $M$ )	Masa inicial (g)			
	Verde	Amarillo	Azul	Blanco
0	7	7,9	5,6	10,7
0,33	3,5	10	10	6,8
0,67	7,2	9,1	9,1	7,0
1	7,3	6,7	6,7	7,2

# Contenido de la clase

- Control de lectura: Práctico 05
- Introducción
- Actividad 1:
  - Fundamento y diseño experimental.
  - Toma de datos.
  - Discusión.
- Actividad 2:
  - Fundamento y diseño experimental.
  - Toma de datos.
  - Discusión.

# Contenido de la clase

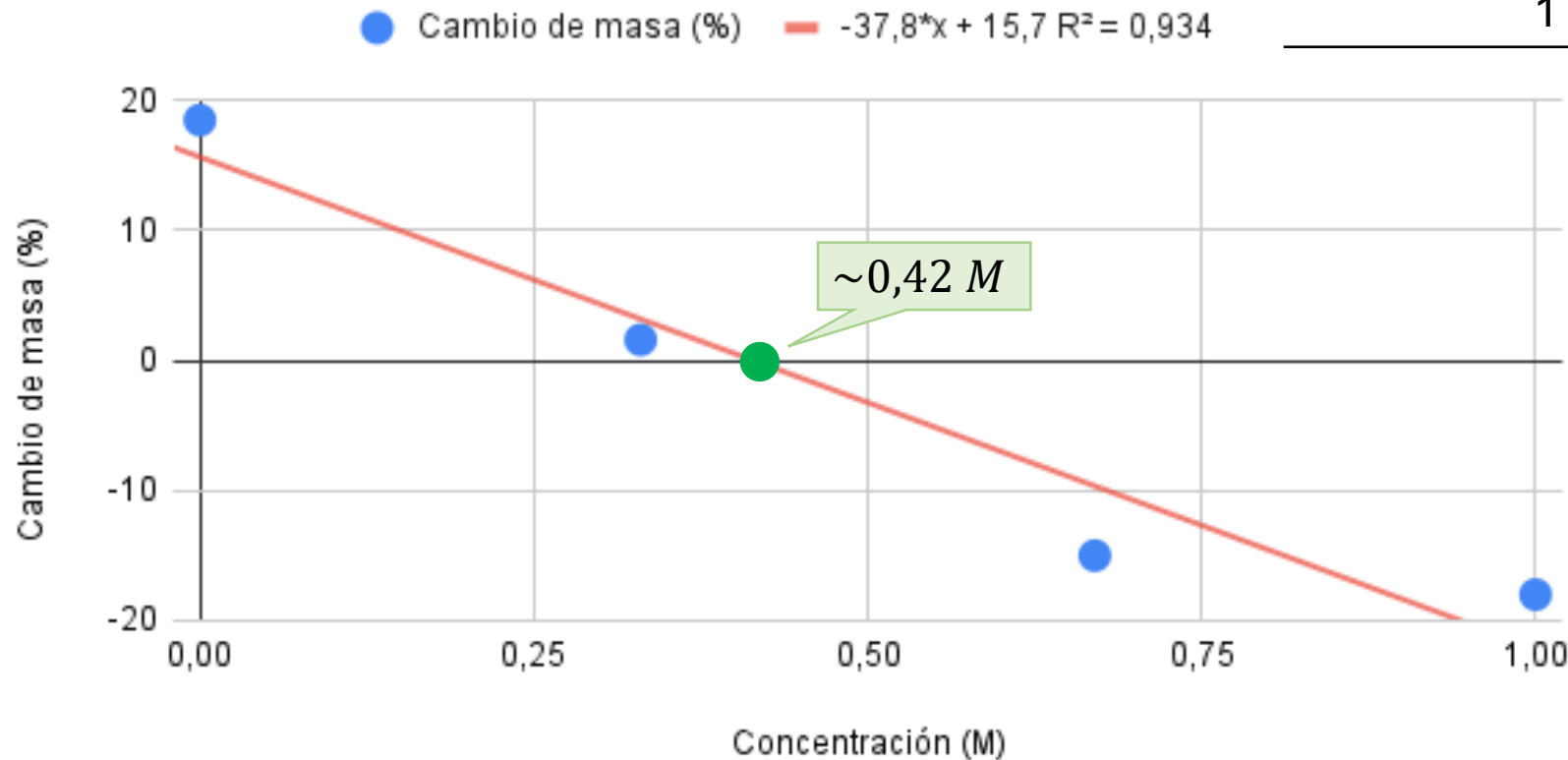
- Control de lectura: Práctico 05
- Introducción
- Actividad 1:
  - Fundamento y diseño experimental.
  - Toma de datos.
  - Discusión.
- **Actividad 2:**
  - Fundamento y diseño experimental.
  - **Toma de datos. [Ver protocolo]**
  - Discusión.

# Contenido de la clase

- Control de lectura: Práctico 05
- Introducción
- Actividad 1:
  - Fundamento y diseño experimental.
  - Toma de datos.
  - Discusión.
- **Actividad 2:**
  - Fundamento y diseño experimental.
  - Toma de datos.
  - **Discusión.**

## Cambio de masa (%) vs. Concentración (M)

Laboratorio: Ósmosis



Concentración (M)	Cambio de masa (%)
0	18,5
0,33	1,6
0,67	-15
1	-18

El valor de concentración para el cual el cambio de masa es nulo, es la **raíz de la ecuación de la recta** de mejor ajuste de los datos.

# El Potencial de Solución se obtiene a partir de la Ley de Van't Hoff:

$$\Psi_s = -iCRT$$

¿Por qué  
 $i = 1$ ?

$$\Psi_s = -(1)(0,42 M) \left( 8,314 \frac{kPa L}{mol K} \right) (298 K) = -1040 kPa$$

Si el Potencial de Presión es  $\Psi_p = 0$ , entonces el Potencial de Agua es:

¿Por qué?

$$\Psi_{H_2O} = \Psi_p + \Psi_s = \Psi_s = -1040 kPa \cong -10,3 atm$$

**Pregunta: Si en lugar de muestras de tejido vegetal se hubiesen escogido muestras de origen animal: ¿podría haber ocurrido alguna consecuencia no deseada sobre las células de la misma? Explique.**

Las células animales no poseen una pared celular rígida (o semi-rígida) como las células vegetales. Esto podría implicar que a una determinada presión osmótica, ingrese agua suficiente al interior celular generando la lisis de la membrana plasmática, liberando material celular al medio.

# Resumen

La ósmosis es un fenómeno físico espontáneo de transporte de agua desde la región de mayor potencial hacia la región de menor potencial.

En células, este fenómeno tiene una especial relevancia en el mantenimiento de las concentraciones de iones y otras sustancias relevantes en el metabolismo.

Dependiendo de la diferencia de concentraciones del medio externo e interno, el flujo de agua puede implicar la entrada o salida de la célula.



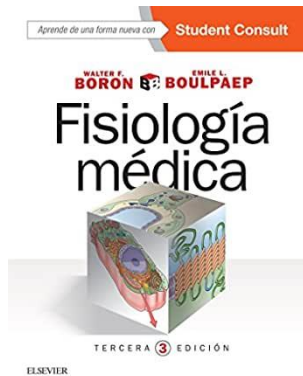
# Resumen

La ósmosis depende de la cantidad de moléculas de agua disponibles para el transporte (es decir, su actividad).

A mayor diferencia de concentraciones entre el medio interno y externo, mayor será la rapidez en el cambio de la presión con el tiempo.

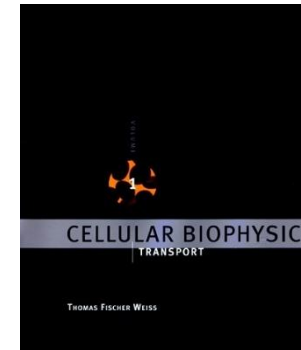
Diferentes concentraciones del medio externo pueden implicar la pérdida o ganancia de masa de un tejido. Debido a esto, existen diferentes estrategias para solventar posibles cambios en el potencial hídrico.

# Bibliografía *(con enfoque biofísico)*



Boron, W. F., & Boulpaep, E. L. (2016). *Medical physiology E-book*. Elsevier Health Sciences. Cap. 5: Transport of Solutes and Water. Págs.: 132-141.

**[Disponible en Biblioteca] (en español)**  
**[Disponible en EVA] (en inglés)**



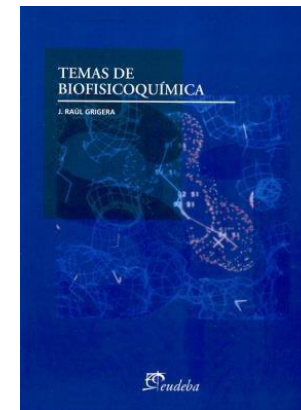
Weiss, T. F. (1996). *Cellular biophysics. Vol. 1: Transport*. MIT Press. Cap. 4: Solvent transport. Págs.: 185-279.

**[Disponible en Biblioteca]**



Garrahan, P. J., & Rega, A. F. (1977). *Transporte a través de la membrana celular*. Cap. 4: Transporte de agua. Págs.: 35-43.

**[Disponible en Biblioteca]**



Grigera, J. R. (2011). *Temas de biofísicoquímica* (No. 577.3 GRI). Cap. 5: Flujos. Págs.: 158-171. Cap. 8: El agua en las células. Págs.: 205-215.

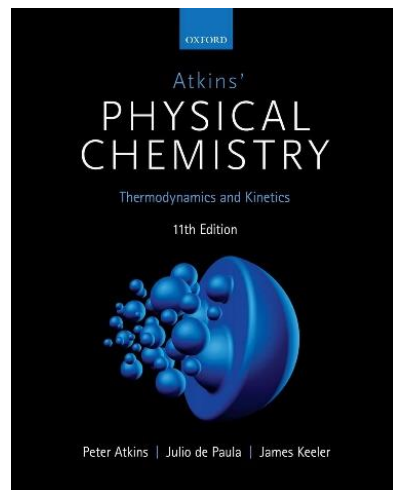
**[Disponible en Biblioteca]**

# Bibliografía *(con enfoque físicoquímico)*



Levine, I. N., Ureña, Á. G., & Gayo, A. R. (2004). *Fisicoquímica* (6ta Edición). Barcelona, España: McGraw-Hill.  
Cap. 12: Equilibrio de fases en sistemas multicomponentes.  
Págs.: 332-336.

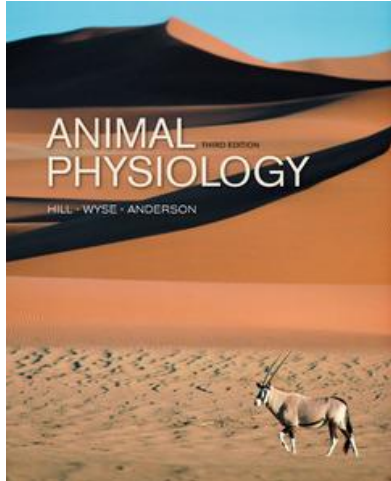
**[Disponible en Biblioteca]**



Atkins, P., Atkins, P. W., & de Paula, J. (2014). *Atkins' physical chemistry*. Oxford University Press.  
Cap. 5: Mezclas simples.  
Págs.: 162-165.

**[Disponible en Biblioteca]**

# Bibliografía *(con enfoque fisiológico)*



Hill, R. W., Wyse, G. A., Anderson, M., & Anderson, M. (2004). *Animal physiology* (2<sup>nd</sup> Edition). Massachusetts: Sinauer associates.

Cap. 5: Transport of Solutes and Water. Págs.: 117-124.

**[Disponible en Biblioteca] (en español)**



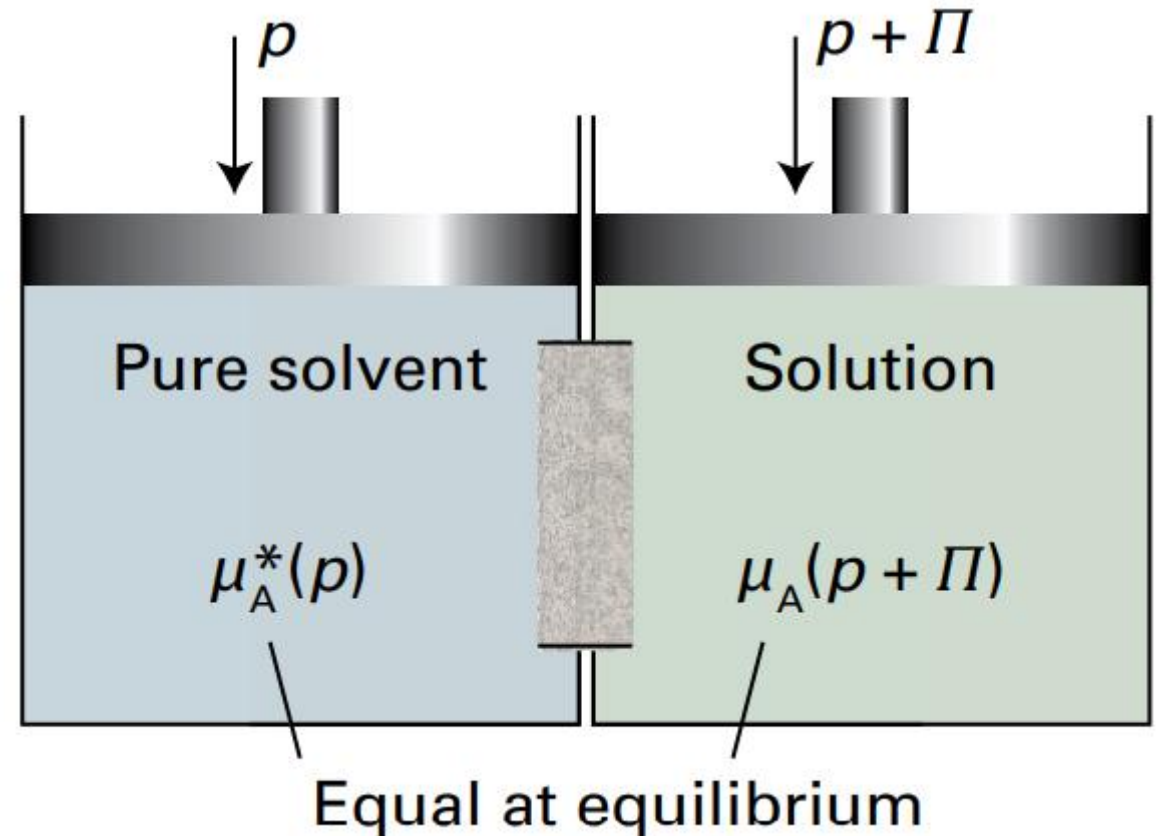
Azcón-Bieto, J., & Talón, M. (2008). *Fundamentos de fisiología vegetal*. McGraw-Hill Interamericana.

Cap. 2: El agua en la planta. Movimiento del agua en el sistema suelo-planta-atmósfera. Págs.: 25-39.

**[Disponible en Biblioteca]**

# Anexo: Ley de van't Hoff

Considere dos recipientes (izquierdo y derecho), cada uno asociado a un pistón en la parte superior. Los compartimentos están separados por una membrana semipermeable. El compartimento izquierdo contiene solvente (no electrolito) puro, cuyo potencial químico es  $\mu_A^*$  (el \* se utiliza para indicar que el potencial químico es del solvente puro).



El potencial del compartimento izquierdo depende de la presión a la que está sometida la columna de solvente. Por lo tanto, el potencial químico es una función de la presión hidrostática:

$$\mu_A^*(p)$$

El compartimento del lado derecho contiene un soluto disuelto en el solvente. El volumen de ambos compartimentos es el mismo. La presión total a la que está sometida la solución tiene dos componentes: la presión hidrostática  $p$  y la presión osmótica  $\Pi$ . Por lo tanto, el potencial químico de la solución es:

$$\mu_A(p + \Pi)$$

A su vez, el potencial químico depende de los moles de soluto (no electrolito) en solución ( $n_x$ ).

$$\mu_A(n_x, p + \Pi)$$

**En el equilibrio**, la relación entre  $\mu_A(n_x, p + \Pi)$  y  $\mu_A^*(p)$  es:

$$\mu_A(n_x, p + \Pi) = \mu_A^*(p)$$

Por otro lado (ver Práctico 04),

$$\mu_A(n_x, p + \Pi) = \mu_A^*(p + \Pi) + RT \ln(n_x)$$

Sustituyendo,

$$\mu_A^*(p) = \mu_A^*(p + \Pi) + RT \ln(n_x)$$

$$\mu_A^*(p + \Pi) = \mu_A^*(p) - RT \ln(n_x)$$

El efecto de la variación de la presión sobre el potencial químico del solvente puede expresarse como:

$$\mu_A^*(p + \Pi) = \mu_A^*(p) + \int_p^{p+\Pi} V dp$$

Donde  $V$  es el volumen. Esta expresión se obtiene a partir de la Energía Libre de Gibbs y su relación con el potencial químico.

$$\mu_A^*(p) + \int_p^{p+\Pi} V dp = \mu_A^*(p) - RT \ln(n_x)$$

$$\int_p^{p+\Pi} V dp = -RT \ln(n_x)$$



Asumiendo que los cambios de presión son suficientemente pequeños podemos suponer un volumen constante:

$$\int_p^{p+\Pi} V dp = V(p + \Pi - p) = V\Pi$$

Por lo tanto,

$$-RT \ln(n_x) = V\Pi$$

Si la solución es muy diluida, podemos aproximar:  $\ln(n_x) \approx -n_x$

$$-RT(-n_x) = V\Pi \implies RTn_x = V\Pi$$

Agrupando,

$$RT \frac{n_x}{V} = \Pi \implies \mathbf{\Pi = RT C_x}$$

# Anexo: Flujo de agua

Sabemos que el flujo neto de agua depende de la movilidad de la molécula, su concentración y una fuerza impulsora (en este caso, la diferencia de potenciales químicos):

$$J = uC_w \frac{d\mu}{dx}$$

Donde  $u$  es la movilidad del agua y  $C_w$  su concentración molar.

Utilizando un razonamiento análogo a la demostración de la Ley de van't Hoff, podemos expresar el potencial del agua como,

$$\mu_w = \mu_{soluta} + \bar{V}P$$

Donde  $\bar{V}$  es el volumen molar parcial del agua y  $P$  la presión hidrostática. Por tanto,

$$\frac{\partial \mu_w}{\partial x} = \frac{\partial \mu_s}{\partial x} + \bar{V} \frac{\partial P}{\partial x}$$

Asumiendo volumen constante.

Sustituyendo en la ecuación de flujo,

$$J = -uC_w \left( \frac{\partial \mu_s}{\partial x} + \bar{V} \frac{\partial P}{\partial x} \right)$$

Asumiendo una membrana infinitamente delgada de grosor  $a$  y que los gradientes dentro de ella son constantes,

$$J = -uC_w \left[ \left( \frac{\mu_{si} - \mu_{se}}{a} \right) + \bar{V} \left( \frac{P_i - P_e}{a} \right) \right] = -\frac{uC_w}{a} (\Delta\mu_s - \bar{V} \Delta P)$$

Sabiendo que,  $\Delta\mu_s = -\bar{V} \Delta\pi$

$$J = -\frac{uC_w\bar{V}}{a} (\Delta P - \Delta\pi)$$

Si renombramos  $C_w\bar{V} \equiv \beta$  (**Coeficiente de Partición**),

$$J = -\frac{u\beta}{a} (\Delta P - \Delta\pi)$$

Multiplicando por  $\bar{V}$  obtenemos un flujo expresado en unidades de  $mol\ cm^{-2}\ s^{-1}$ ,

$$J = -\frac{u\beta\bar{V}}{a} (\Delta P - \Delta\pi)$$

$$J_w = -u C_w \frac{d\mu}{dx} = -\frac{u\beta\bar{V}}{a} (\Delta P - \Delta\pi)$$

Sustituyendo por la Ley de van't Hoff y tomando  $\Delta P \approx 0$

$$J_w = \frac{u\beta\bar{V}}{a} (iRT C_i - iRT C_e) = \frac{u\beta\bar{V} iRT}{a} \Delta C$$

Por tanto el flujo neto de agua es directamente proporcional a la diferencia de concentraciones de soluto.

$$J_w \propto \Delta C$$

Por otra parte, la Ley de los Gases Ideales establece que,

$$PV = nRT$$

$$\frac{d}{dt}(PV) = \frac{d}{dt}(nRT) = 0$$

$$\frac{dP}{dt}V + \frac{dV}{dt}P = 0 \Rightarrow \frac{1}{P} \frac{dP}{dt} = - \frac{1}{V} \frac{dV}{dt}$$

Esta relación es válida para el gas encerrado por la columna de agua y el dispositivo a temperatura constante. El volumen que aumenta la columna de agua se pierde en el gas encerrado,

$$\frac{dV_g}{dt} = - \frac{dV_w}{dt}$$

Puesto que el volumen total del tubo es fijo, se tiene que:

$$V_T = V_g + V_w \Rightarrow V_g = V_T - V_w$$

$$\frac{dP}{dt} \frac{1}{P} = - \frac{1}{V_T - V_w} \left( - \frac{dV_w}{dt} \right) = \frac{1}{V_T - V_w} \frac{dV_w}{dt}$$

Por su parte, sabemos que el flujo de agua es,

$$J_w = \frac{dn_w}{dt} \frac{1}{A} = \frac{dm_w}{dt} \frac{1}{AM_w} = \frac{d}{dt} (\rho_w V_w) \frac{1}{AM_w} = \frac{\rho_w}{AM_w} \frac{dV_w}{dt}$$



Puesto que el volumen total del tubo es fijo, se tiene que:

$$V_T = V_g + V_w \Rightarrow V_g = V_T - V_w$$

$$\frac{dP}{dt} \frac{1}{P} = - \frac{1}{V_T - V_w} \left( - \frac{dV_w}{dt} \right) = \frac{1}{V_T - V_w} \frac{dV_w}{dt}$$

Por su parte, sabemos que el flujo de agua es,

$$J_w = \frac{dn_w}{dt} \frac{1}{A} = \frac{dm_w}{dt} \frac{1}{A \overline{M}_w} = \frac{d}{dt} (\rho_w V_w) \frac{1}{A \overline{M}_w} = \frac{\rho_w}{A \overline{M}_w} \frac{dV_w}{dt} = \lambda \frac{dV_w}{dt}$$

Con  $\lambda = \rho_w / A \overline{M}_w$ .

Sustituyendo la expresión para la presión en la ecuación de flujo,

$$J_w = \lambda \left( \frac{V_T - V_w}{P} \right) \frac{dP}{dt} = \sigma \lambda \frac{dP}{dt}$$

Con  $\sigma \equiv (V_T - V_w)/P$ , constante.

Igualando esta expresión a la obtenida por Ley de van't Hoff,

$$\sigma \lambda \frac{dP}{dt} = \frac{u\beta \bar{V} i R T}{a} \Delta C \implies \frac{dP}{dt} = \frac{u\beta \bar{V} i R T}{a \lambda \sigma} \Delta C \implies \frac{dP}{dt} \propto \Delta C$$

# Anexo: Potencial Hídrico

Desde el punto de vista energético, el potencial hídrico  $\Psi_{H_2O}$  corresponde al trabajo que habría que suministrar a un volumen de agua en solución para llevarla al estado de potencial de referencia  $\Psi_0$ .

Para el potencial de referencia se adopta  $\Psi_0 = 0$ , por lo que todos los potenciales hídricos son negativos. La relación entre Potencial Hídrico y Potencial Químico del Agua es:

$$\Psi = \frac{\mu - \mu_0}{V}$$

La relación entre Potencial Hídrico y Potencial Químico del Agua es:

$$\Psi = \frac{\mu - \mu_0}{V}$$

Donde,

$\Psi$  es el potencial hídrico de la solución de interés

$\mu$  es el potencial químico del agua en la solución de interés

$\mu_0$  es el potencial químico de referencia del agua

$V$  es el volumen de agua de la solución

Notar que  $\Psi$  tiene unidades de  $J m^{-3}$  por lo que se expresa en unidades de presión ( $Pa$  en el SI).

En sistemas biológicos, el potencial hídrico es la suma algebraica de varios componentes:

$$\Psi = \Psi_p + \Psi_s + \Psi_m + \Psi_g$$

Donde,  $\Psi_p$  es el potencial de presión, o la diferencia hidrostática.

$\Psi_s$  es el potencial de soluto, o potencial osmótico.

$\Psi_m$  es el potencial mátrico, asociado a sólidos disueltos.

$\Psi_g$  es el potencial gravitatorio.

En células vegetales, el potencial hídrico viene determinado fundamentalmente por las componentes osmótica y de presión,

$$\Psi = \Psi_p + \Psi_s$$