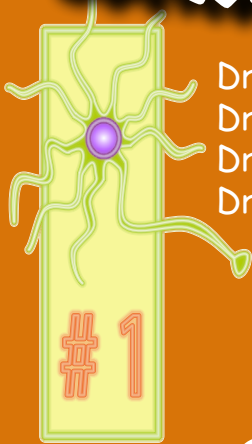


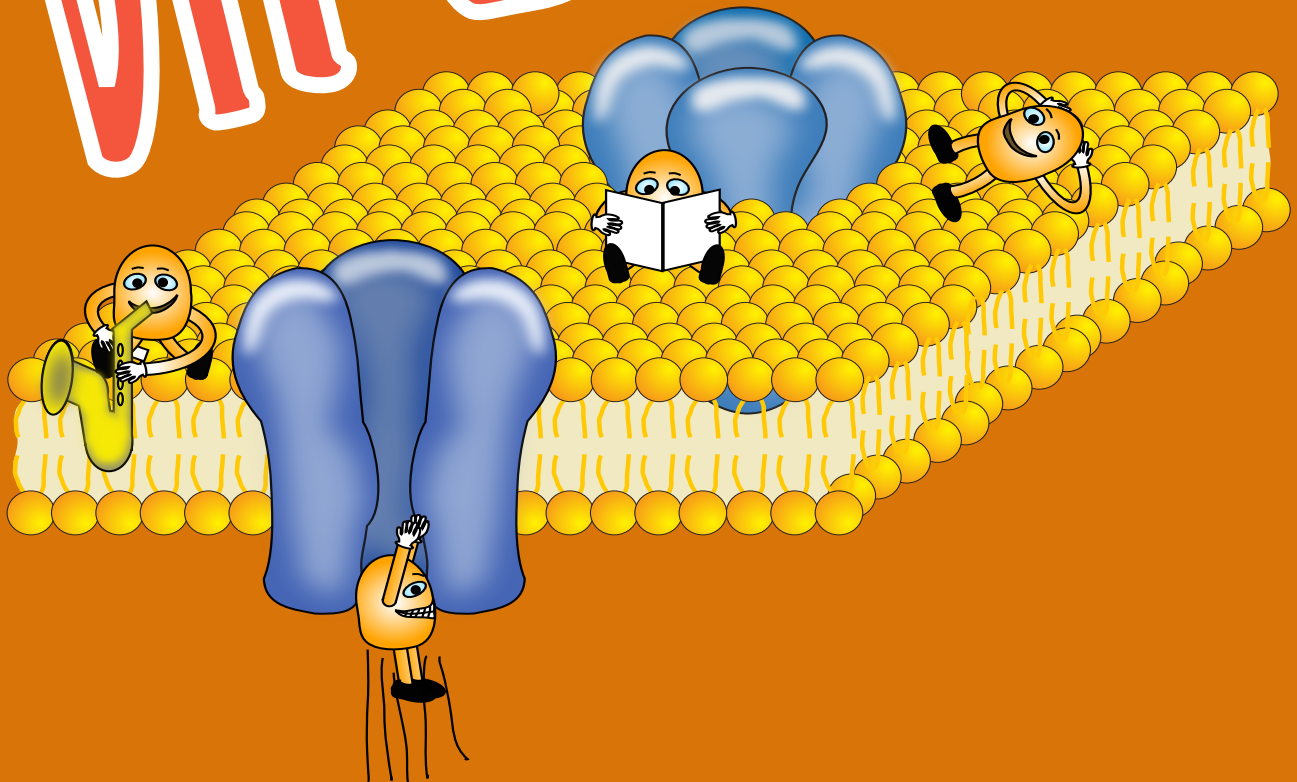
# SERIE: FISIOLÓGÍA PARA TODOS



Dr. Jorge Bravo Martínez  
Dra. Blanca Alicia Delgado-Coello  
Dra. Julieta Garduño Torres  
Dr. Raúl Sampieri Cabrera

#1

# DIFUSIÓN



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO  
FACULTAD DE MEDICINA  
DEPARTAMENTO DE FISIOLÓGÍA

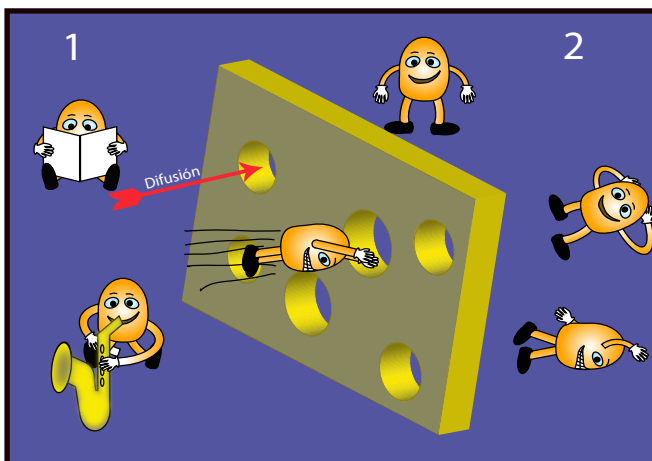


Facultad de Medicina



# DIFUSIÓN SIMPLE

En una solución homogénea, tanto el agua como los solutos están en movimiento (calor) y la temperatura es una medida del movimiento de estas partículas. Este movimiento de las partículas se realiza al azar, sin que ninguna dirección domine. Si aumentamos el calor a la solución, la temperatura aumentará y la velocidad de las partículas también.



Al colocar una membrana permeable, hemos dividido en 2 compartimientos (1 y 2), con igual concentración de solutos y de agua. Las moléculas de soluto del compartimiento 1 se están moviendo en todas direcciones al igual que en el compartimiento 2. Puede suceder por azar que una molécula de soluto acierte a pasar a través de la membrana, de 1 hacia 2. Se dirá, entonces, que la molécula difundió de 1 hacia 2. Así pues difusión es el movimiento de una partícula, de un lugar a otro, con una fuerza impulsora: el calor. En esas mismas condiciones, también puede haber movimiento de moléculas de 2 hacia 1. Esta difusión es, entonces, un proceso de mezcla, ya que partículas que estaban en 1 se podrán encontrar en 2 y viceversa.

El número de moléculas que atraviesan la membrana en un cierto tiempo es el flujo, en nuestro caso, tendremos dos flujos simultáneos: uno de 1 hacia 2 y otro de 2 hacia 1. Si la temperatura de ambos compartimientos es la misma, se puede decir que los dos flujos unidireccionales son iguales, lo que se representa como:

$$J_{12} = J_{21}, \text{ ya que } C_1 = C_2$$

Si agregamos más soluto en el lado 1, aumentando su concentración, mientras que permanece igual en el lado 2, entonces:

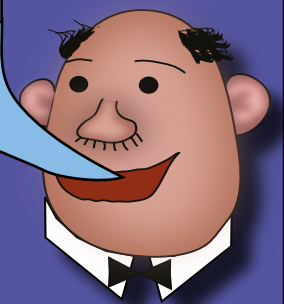
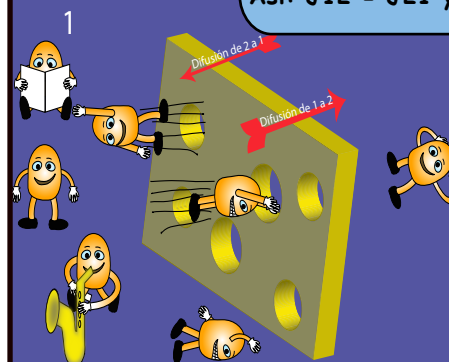
$$J_{12} > J_{21}, \text{ ya que } C_1 > C_2$$

El flujo neto será:

$$J_{\text{neto}} = J_{12} - J_{21}$$

En una solución no homogénea: (que en un lado tiene mayor concentración que en el otro) en el lado más concentrado es mayor la probabilidad de que las partículas choquen entre sí. El movimiento se realiza hacia donde esta probabilidad disminuya (el lado menos concentrado).

La definición de difusión es: "Difusión es el pasaje de una sustancia desde el lugar más concentrado al lugar menos concentrado". Esto es correcto para el flujo neto, pero también hay difusión con concentraciones iguales, Así:  $J_{12} = J_{21}$  y  $J_{\text{neto}} = 0$



# LEY DE FICK

Esta ley establece los factores de los que depende la magnitud del flujo difusional a través de la solución y en los casos en que la membrana ofrece alguna restricción al paso de la sustancia, a través de la solución y de ella. De acuerdo a esta ley, a temperatura constante, el flujo unidireccional será:

$$J_{12} = D \cdot A \cdot C_1$$

donde D es el coeficiente de difusión, A el área, C1 es la concentración de la sustancia en el compartimiento 1. Del mismo modo:

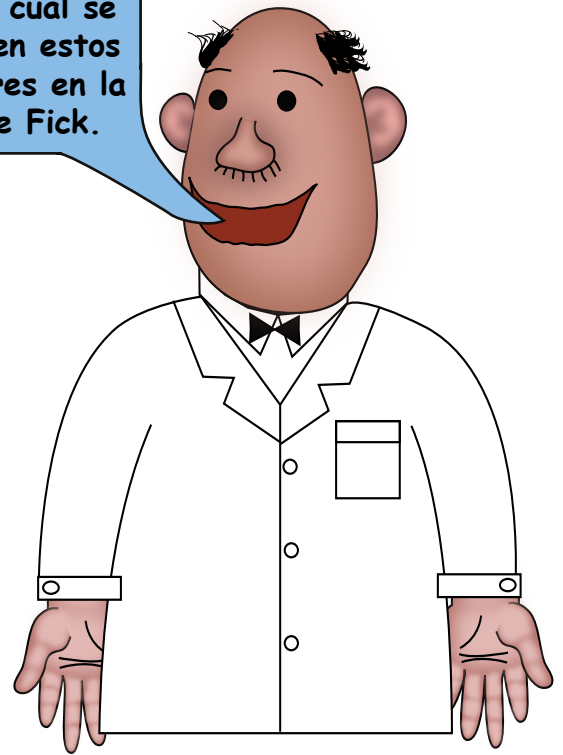
$$J_{21} = D \cdot A \cdot C_2$$

donde C2 es la concentración de la sustancia en el compartimiento 2. El flujo neto será:

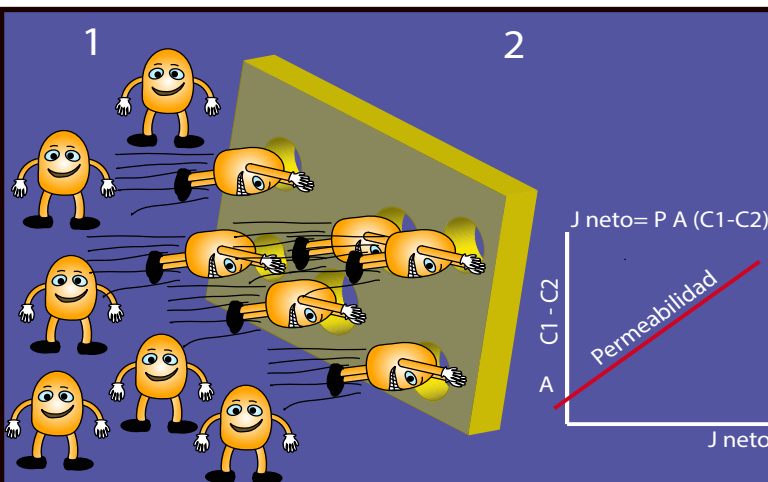
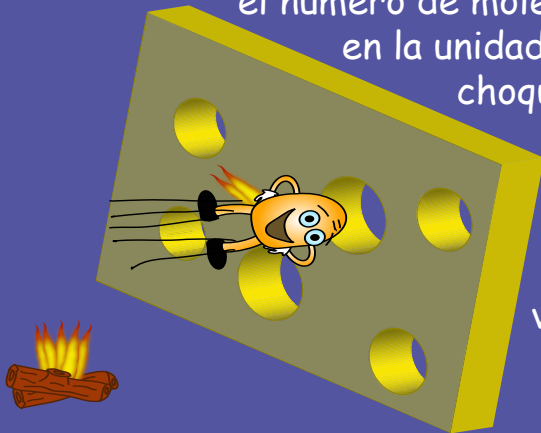
$$J_{\text{neto}} = J_{12} - J_{21} = D \cdot A \cdot ((C_1 - C_2) / \Delta X)$$

donde x es la distancia que separa los puntos en que fueron medidas las concentraciones C1 y C2.

Veamos ahora, en detalle, la razón por la cual se incluyen estos factores en la Ley de Fick.



La temperatura: Cuanto mayor sea la agitación térmica, mayor será el número de moléculas que en la unidad de tiempo choquen contra la membrana y, eventualmente, la atraviesen.



La concentración: Es evidente que, a una misma temperatura, cuanto mayor sea el número de partículas por unidad de volumen, mayor será el número de éstas que estarán en condiciones de atravesar la membrana.

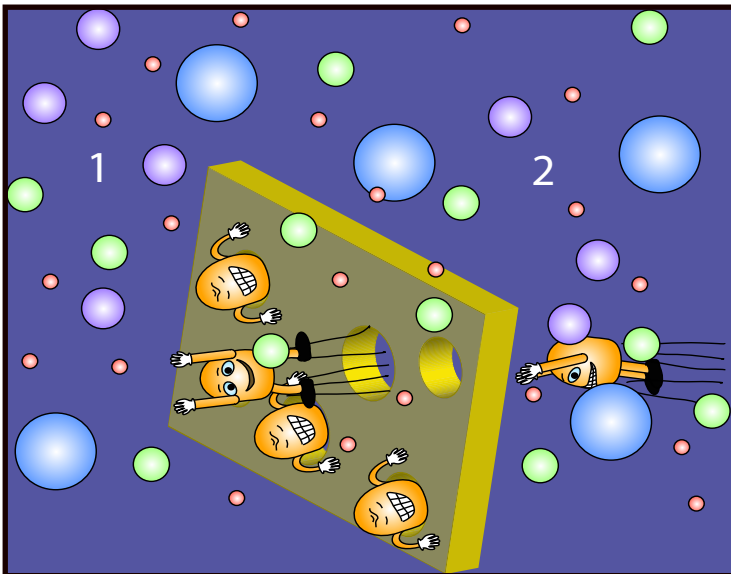
La Ley de Fick escrita en su forma:  $J_{\text{neto}} = \text{permeabilidad} \cdot A \cdot (C_1 - C_2)$

indica que el flujo difusional es una función lineal de la concentración. Por lo tanto, a mayor diferencia de concentración, habrá mayor flujo. Si se mantiene el área constante, la pendiente estará dada por la permeabilidad.

A = área de difusión.

$\Delta C = C_1 - C_2 =$  gradiente de concentración.

D = coeficiente de difusión.



La distancia que separa los puntos en los cuales se ha tomado la concentración. El "viaje" de una molécula a través de las soluciones y a través de la membrana está alterada por la fricción (Ley de Stokes) o roce entre ella y las partículas del medio. Cuanto mayor sea la distancia, mayor será el efecto de la fricción. Al cambio de concentración a lo largo de una distancia se le llama gradiente de concentración, así:

$$\text{Gradiente} = \frac{(C_1 - C_2)}{\Delta X}$$

donde  $C_1$  y  $C_2$  son las concentraciones en el lado 1 y 2, respectivamente, y  $x$ , la distancia.

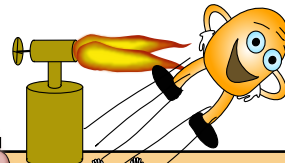
El área de la membrana: Es obvio que no será lo mismo contar cuántas moléculas atraviesan en 1 segundo, por ejemplo 1 cm<sup>2</sup> de membrana, que las que atraviesan 10 cm<sup>2</sup>:

a mayor área, mayor flujo. Si la membrana pone una resistencia al paso de solutos, el flujo será menor. El agua muy posiblemente también se vea limitada en su pasaje,

pero no necesariamente en la misma medida que el soluto, y una determinada membrana puede "frenar" más a una partícula que a otra.

Einstein visualizó al fenómeno de la difusión como el movimiento de partículas movidas por la agitación térmica, impedido por la fricción que hay entre las partículas y el medio que las rodea (ley de Stokes).

**El coeficiente de difusión:**  
Este coeficiente (D) es directamente proporcional a la temperatura. A mayor temperatura, mayor la movilidad de las partículas, así que mayor será la difusión.



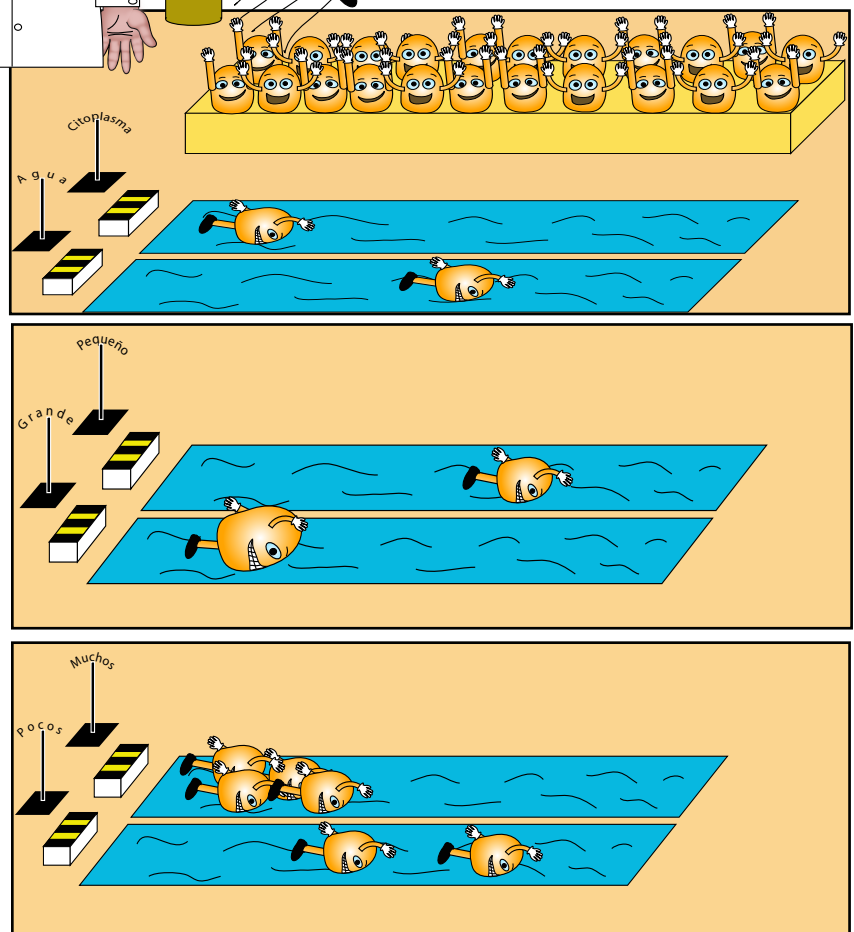
La movilidad de las partículas es inversamente proporcional a la fricción (ley de Stokes:  $6\pi\eta rN$ ) del ion con las partículas del solvente. Esta fricción depende de varias cosas:

- a) La viscosidad del solvente.- una partícula tiene mas fricción y viajará más lentamente en un solvente más viscoso.
- b) El radio de la partícula de soluto.- entre más grande sea la partícula de soluto con más moléculas de solvente chocará, aumentando la fricción.
- c) La cantidad de partículas de soluto.- a mayor número de partículas mayor será la fricción.

Así (tomando en cuenta todo), la ecuación del coeficiente de difusión es:

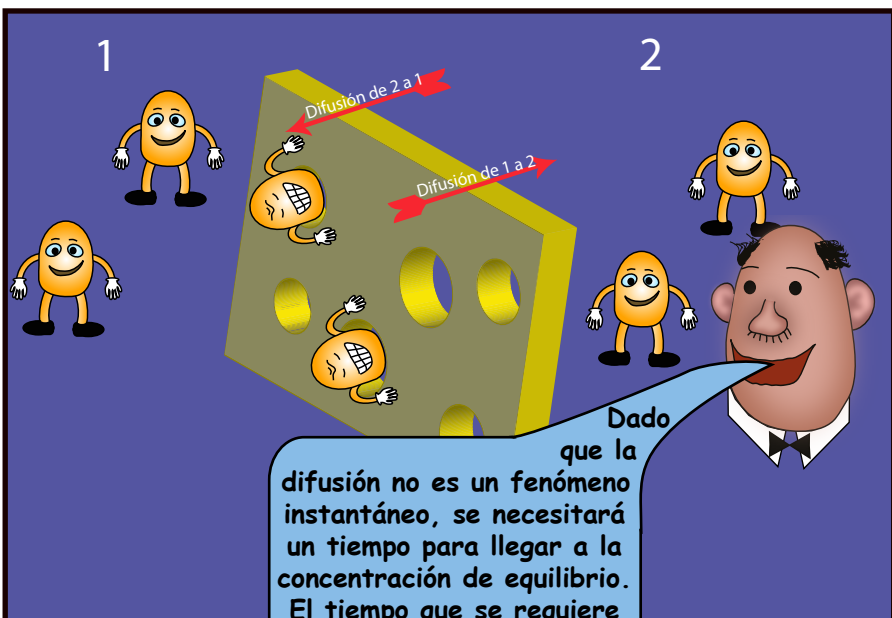
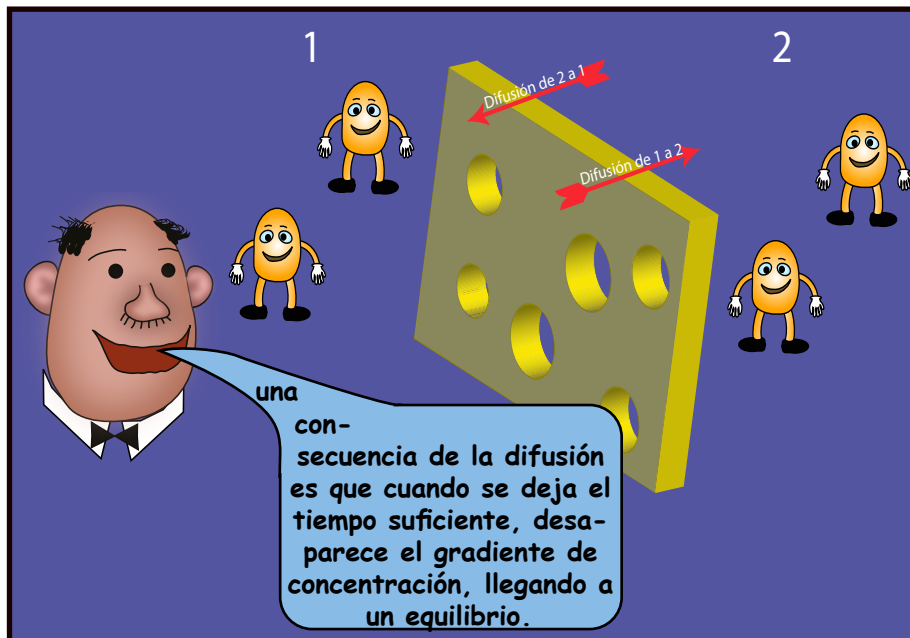
$$D = \frac{RT}{6\pi\eta rN}$$

donde  $\eta$  = viscosidad del solvente;  $r$  = radio de la partícula; y  $N$  número de partículas.  
 $R$  = constante de la ley de los gases ideales.  
 $T$  = temperatura.



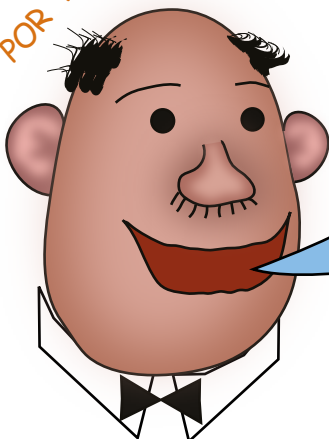


Si en un recipiente hay mayor concentración de soluto en un lado que del otro, el movimiento de partículas será hacia el lado menos concentrado, ya que en ese lado la probabilidad de que las partículas choquen entre sí es menor que en el otro lado. La migración neta de partículas se detendrá en el momento en que la probabilidad de choque entre ellas sea la misma en todos lados (llegando a un equilibrio), es decir, cuando las concentraciones sean las mismas en todos lados.

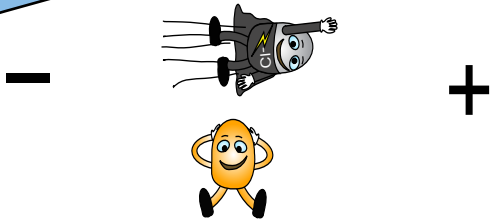


El tiempo que se necesita para llegar al equilibrio dependerá de las condiciones del sistema. Lo más importante es la permeabilidad de la membrana: cuanto más pequeño sea el valor de permeabilidad, mayor será el tiempo requerido. La concentración de un compartimiento disminuye mientras que la del otro aumenta. Cuando se ha llegado a la condición de equilibrio,  $C_1$  se ha hecho igual a  $C_2$ , el flujo neto desaparece, pero persisten los flujos unidireccionales. Esto es, que sigue habiendo paso de sustancias del lado 1 ( $J_{12}$ ) y del lado 2 al 1 ( $J_{21}$ ), pero en forma tal que  $J_{12} = J_{21}$ , de modo que el  $J_{neto} = 0$ . Por supuesto, en el equilibrio también habrá flujos unidireccionales de agua.

MOVIMIENTO DE IONES POR FUERZAS ELÉCTRICAS

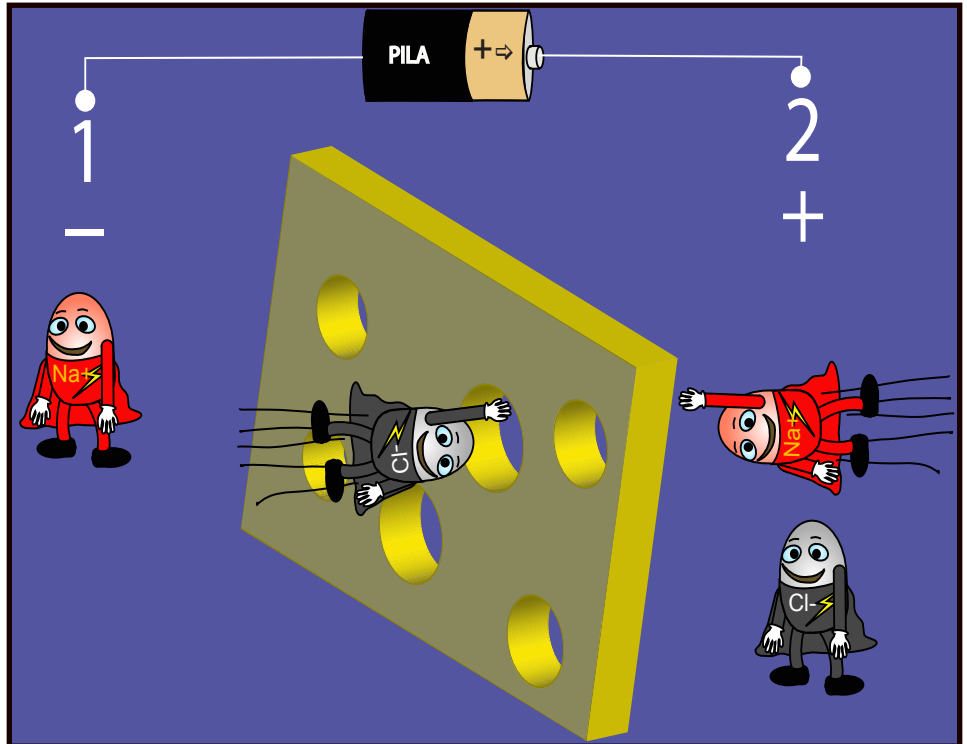


Para que haya un flujo neto por difusión tiene que haber una diferencia de concentración y no interesará si el soluto es un electrolito, que se disocia en iones, o un no-electrolito. Ahora, si por alguna razón, entre los dos compartimientos hay una diferencia de potencial eléctrico, éste no tendrá efecto sobre el movimiento de un no-electrolito, que no tiene carga neta, pero influirá enormemente sobre los iones. De este modo, el potencial eléctrico se convierte en un nuevo tipo de fuerza impulsora.



# POTENCIAL de DIFUSIÓN

Si la concentración de NaCl, a ambos lados de un frasco, es igual, los flujos unidireccionales serán iguales y el flujo neto será de cero. Coloquemos, ahora, un par de electrodos unidos a una pila, de modo que el electrodo sumergido en 2 sea (+) y el sumergido en 1 sea (-). Se establecerá un flujo  $\text{Na}^+$  de 2 hacia 1 que será mayor que el flujo de  $\text{Na}^+$  de 1 hacia 2, lo que hará que el flujo neto sea distinto de cero. Lo contrario ocurre con el Cl, para el cual el flujo de 1 hacia 2 será mayor que de 2 hacia 1.



$J_s$  es el flujo de solutos (iones) en mol.  $s^{-1}$  que ocurre por efecto del campo eléctrico.  $m$  (por "movilidad") es la mayor o menor facilidad con que la solución, o la solución y la membrana, dejan pasar los iones.  $A$  es el área,  $\Delta E / \Delta x$  es el gradiente de energía eléctrica que hay entre ambos lados de la membrana (es el cociente entre la diferencia de energía ( $E_1 - E_2$ ) y el espesor de la membrana  $\Delta x$ ).

Flujo por gradiente eléctrico y concentración iónica:

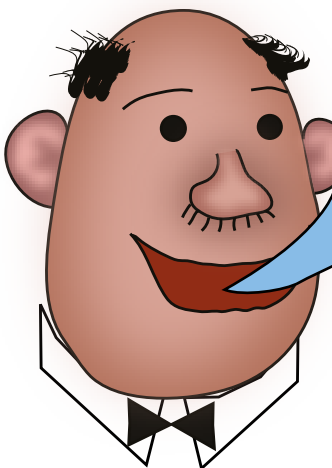
$\Delta E$  es la diferencia de energía eléctrica que, en última instancia, arrastra a los iones de un compartimiento a otro. La cantidad de iones que esa energía arrastre en la unidad de tiempo dependerá, también, de la concentración de iones que haya en el compartimiento desde donde vienen los iones. En el ejemplo anterior, los iones  $\text{Na}^+$  se moverán de 2 hacia 1 porque 2 es positivo. El flujo de  $\text{Na}^+$  dependerá del Voltaje y de la concentración de  $\text{Na}^+$  en el compartimiento 2. De ese modo se puede escribir la ecuación de flujo unidireccional por gradiente eléctrico como:

$$J_s = m \cdot A \cdot C \cdot \Delta E / \Delta X$$

donde  $C$  es la concentración en el compartimiento de donde viene el ion.

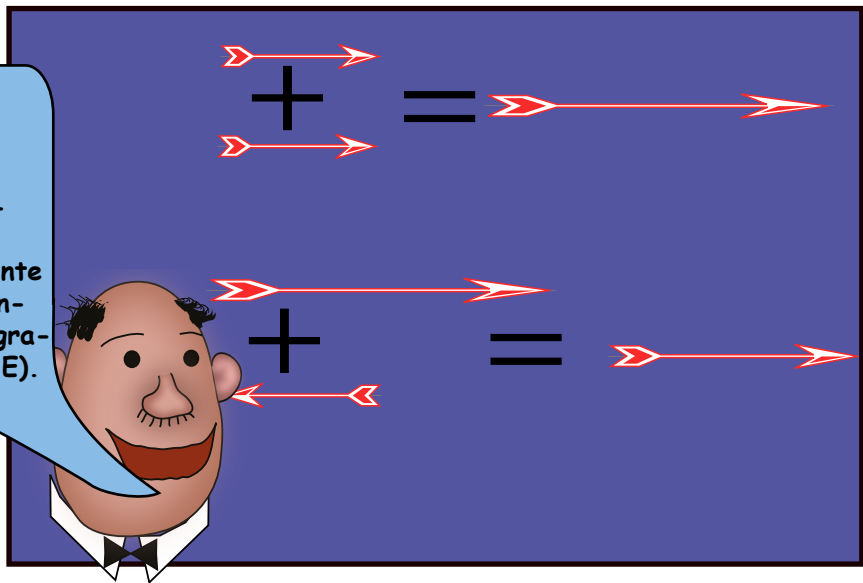


El flujo por fuerzas eléctricas es, como todos los flujos, un número de moles que pasan en la unidad de tiempo y será proporcional a:  
 $J_s = m \cdot A \cdot (\Delta E / \Delta X)$



Estos vectores se suman para dar una resultante que indica dirección y magnitud del movimiento de las partículas. Si ambos apuntan hacia la misma dirección, la resultante es en la misma dirección y mayor magnitud (mayor rapidez del flujo iónico). Si se oponen, entonces la magnitud será menor y la dirección será la del vector mayor.

El movimiento de las partículas está dado por dos gradientes independientes, que se comportan como dos vectores: el gradiente químico o de concentración  $\Delta Q$  y el gradiente eléctrico  $\Delta E$ .

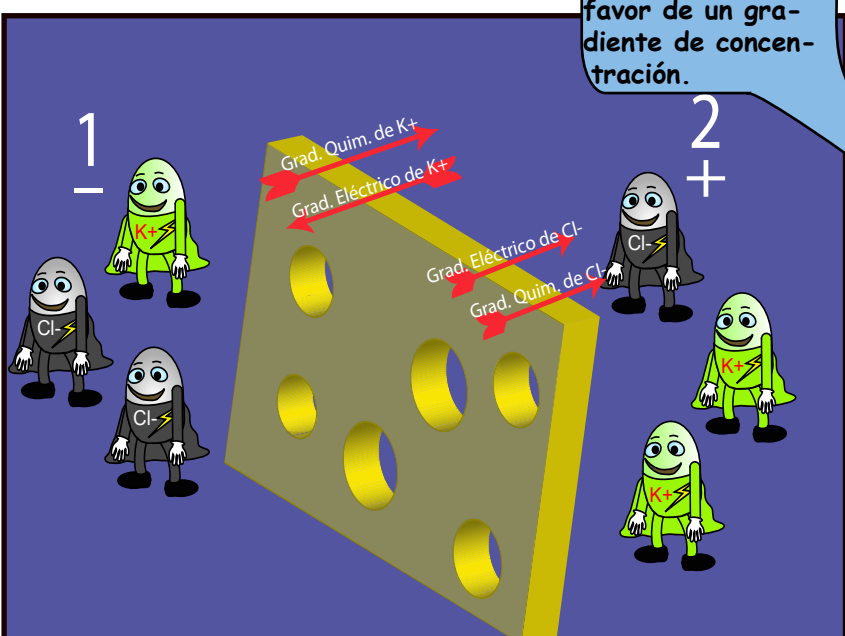


Los potenciales de difusión pertenecen a la categoría de los fenómenos pasivos, ya que están vinculados a las propiedades de las soluciones, a las diferencias de concentración a ambos lados de la membrana y a la permeabilidad de la membrana para determinados iones.



Este es el origen del potencial de difusión: un potencial eléctrico vinculado a la difusión de iones que tienen distinta permeabilidad, a favor de un gradiente de concentración.

En un recipiente separado en dos compartimientos por una membrana, en el lado uno la concentración de KCl es mayor que en el lado 2. Ambos lados son eléctricamente neutros dado que hay la misma cantidad tanto de K como de Cl. Sin embargo, se establece un gradiente químico tanto para el K como para el Cl de 1 hacia 2. La membrana al tener mayor permeabilidad para el potasio, hace que el flujo de este ion sea mayor al de Cl.



Esa ventaja es suficiente para que entre el lado 1 y el lado 2 aparezca una diferencia de potencial eléctrico, con el signo positivo en 2 y negativo en 1. Esta diferencia de potencial eléctrico entre ambos lados tiene como efecto sobre los iones: uno, frenar el flujo difusional de K hacia el lado 2 y aumentar el del Cl. Así, si por la diferencia en los coeficientes de permeabilidad difusional, los iones K+ y Cl pasaban la membrana a distintas velocidades, ahora, por la aparición de una nueva fuerza impulsora ( $\Delta V$ ), éstos tienden a pasar con velocidades similares.

# Bibliografía:

## Libros.-

Arons P.S., Boron W.F., Boulpaep E.L., Capítulo 5: "Transporte de Solutos y Agua", En: "Fisiología Médica", Eds. Boron W.F. y Boulpaep E.L., 3ra ed, 2017, USA.

## Artículos.-

J. Philibert (2005). One and a half century of diffusion: Fick, Einstein, before and beyond. Archived 2013-12-13 at the Wayback Machine Diffusion Fundamentals, 2, 1.1-1.10.

H. Mehrer; N.A. Stolwijk (2009). "Heroes and Highlights in the History of Diffusion" (PDF). Diffusion Fundamentals. 11 (1): 1-32.

T. Teorell (1935). "Studies on the "Diffusion Effect" upon Ionic Distribution. Some Theoretical Considerations". Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America. 21 (3): 152-61. Bibcode:1935PNAS...21..152T. doi:10.1073/pnas.21.3.152. PMC 1076553. PMID 16587950.

Bian, Xin; Kim, Changho; Karniadakis, George Em (2016-08-14). "111 years of Brownian motion". Soft Matter. 12 (30): 6331-6346. Bibcode:2016SMat...12.6331B. doi:10.1039/c6sm01153e. PMC 5476231. PMID 27396746.

## Videos.-

<https://www.youtube.com/watch?v=jhszFBtBPoI>

[https://www.youtube.com/watch?v=S\\_Y\\_\\_0q0SOU](https://www.youtube.com/watch?v=S_Y__0q0SOU)