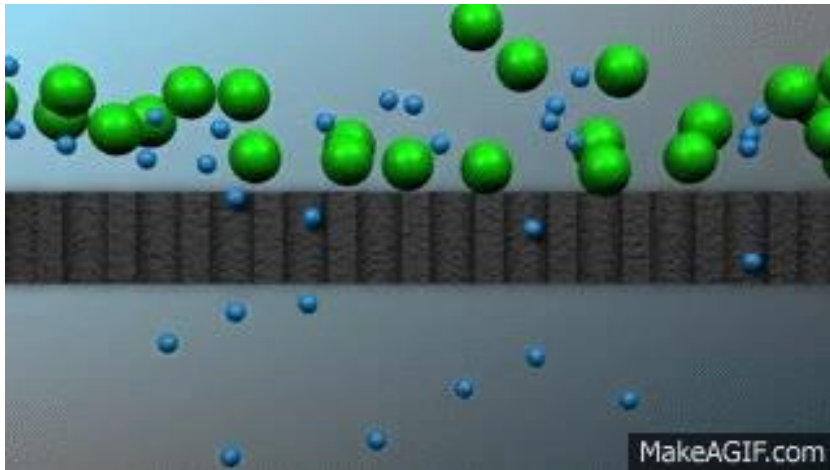


# Operaciones Unitarias 1



Filtración

Cross Flow Filtration

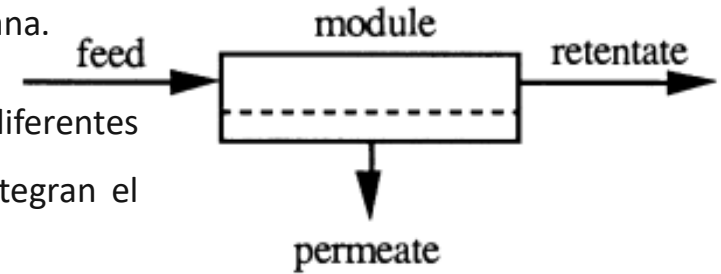


Tecnologías de membranas

## Procesos de membranas descripción, objetivos, configuraciones

Una membrana es una nueva fase que separa dos fases y controla selectivamente el transporte de materiales entre esas fases comportándose como una barrera selectiva. El término selectivo es inherente a la naturaleza y propósito de la membrana.

**Propiedad clave de una membrana:** capacidad para controlar las diferentes velocidades de permeación a través de ella, de las especies que integran el sistema.



En aplicaciones de separación, el objetivo es permitir que un componente de una mezcla penetre libremente en la membrana, al tiempo que dificulta la permeación de otros componentes. Estos objetivos de separación se clasifican en:

Concentración: el componente deseado se encuentra presente a baja concentración y el solvente debe ser eliminado de la corriente de proceso

Purificación: eliminación de impurezas indeseables

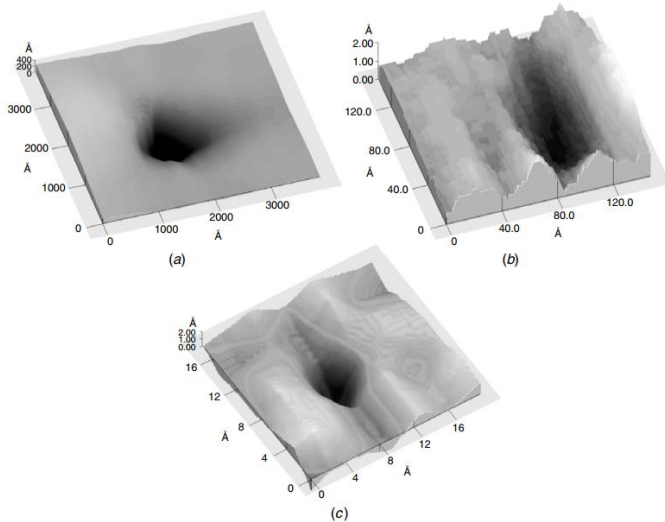
Fraccionamiento: una mezcla debe ser separados en dos o más componentes deseados.

**Beneficios** de la tecnología: a) la separación se puede llevar a cabo continuamente; b) el consumo de energía es generalmente bajo; c) los procesos de membrana se pueden combinar fácilmente con otros procesos de separación; d) la separación se efectúa con bajo nivel de intervención en el proceso (*smooth conditions*); e) fácil escalado; f) las propiedades de la membrana son variables y se pueden ajustar.

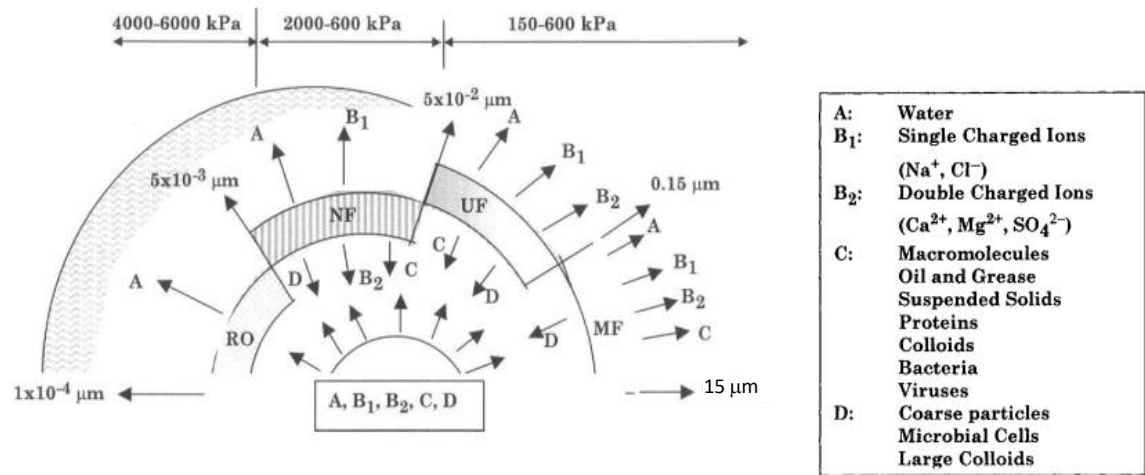
**Inconvenientes:** a) polarización de la concentración / ensuciamiento de la membrana; b) baja vida útil de la membrana; c) Selectividad generalmente baja.

# Procesos de membranas industriales

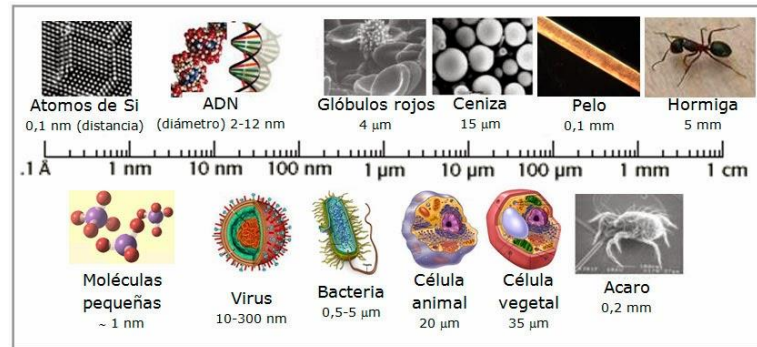
En la microfiltración (a: MF) ultrafiltración (b: UF) el mecanismo es por selección de tamaños. Son procesos relacionados que difieren principalmente en el diámetro promedio de poro



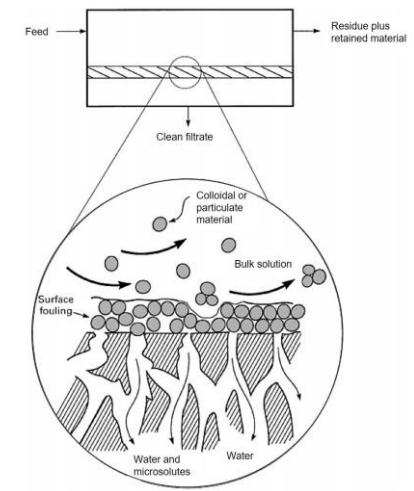
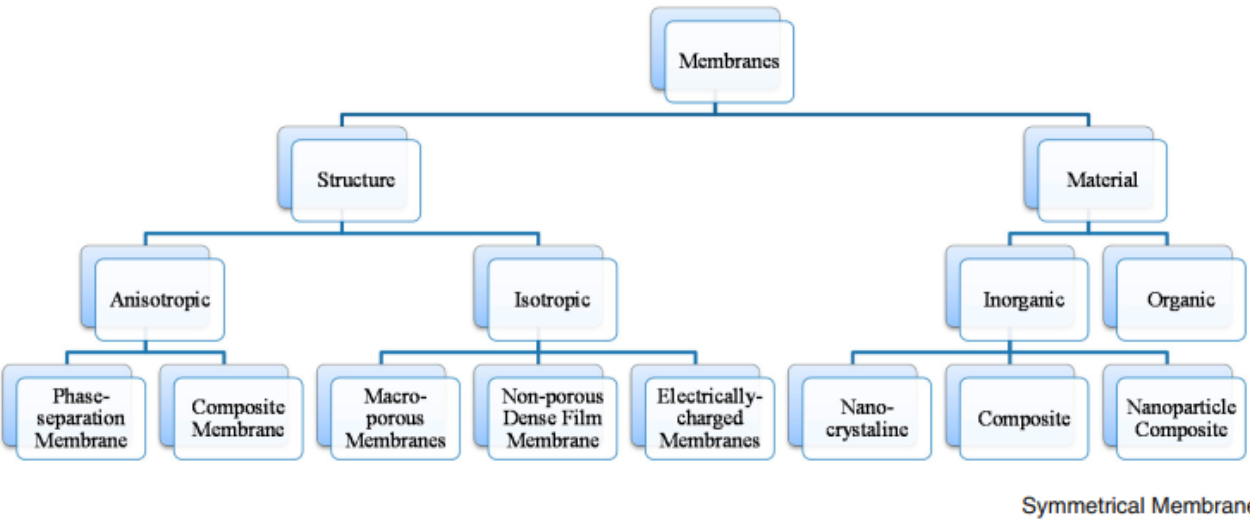
Name of process	Driving force	Separation size range	Examples of materials separated
Microfiltration	Pressure gradient	10–0.1 $\mu\text{m}$	Small particles, large colloids, microbial cells
Ultrafiltration	Pressure gradient	<0.1 $\mu\text{m}$ –5 nm	Emulsions, colloids, macromolecules, proteins
Nanofiltration	Pressure gradient	$\sim$ 1 nm	Dissolved salts, organics
Reverse osmosis (hyperfiltration)	Pressure gradient	<1 nm	Dissolved salts, small organics
Electrodialysis	Electric field gradient	<5 nm	Dissolved salts
Dialysis	Concentration gradient	<5 nm	Treatment of renal failure



En el proceso de nanofiltración (c: NF) la membrana permea solvente y retiene parcialmente solutos; en el proceso ósmosis inversa (RO), la membrana permea solo solvente. Las membranas de RO son tan densas que no existen poros discretos

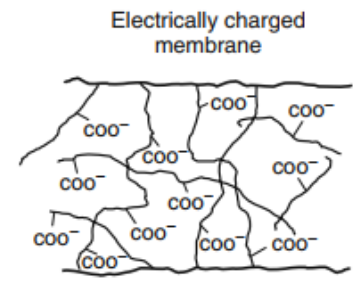
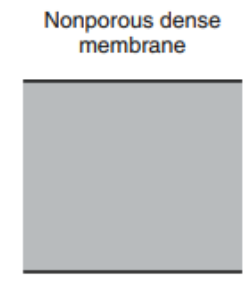
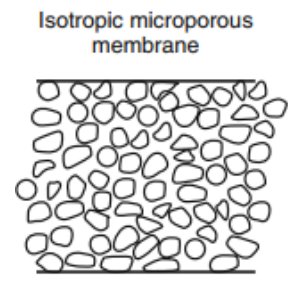


# Procesos de membranas descripción, objetivos, configuraciones

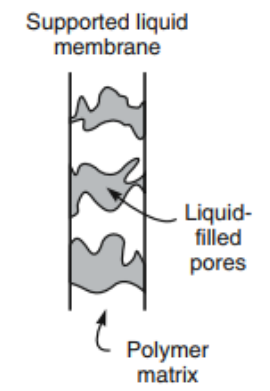
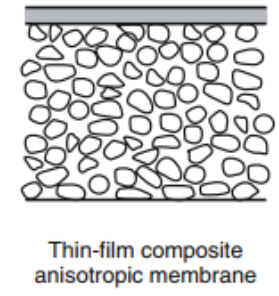
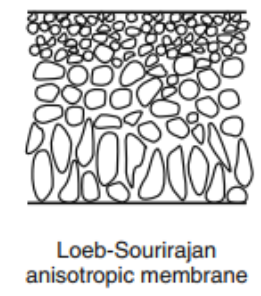


Admite diferentes clasificaciones:

- Según **estructura**: homogénea o heterogénea
- Según **tipo de transporte**: **pasivo**, impulsada por gradientes de presión, temperatura o concentración; **activo**: membranas líquidas soportadas.
- Según su **naturaleza**: sintéticas (orgánicas, inorgánicas) o biológicas
- Según su **condición eléctrica**: neutra o cargada
- Según su **construcción** (en membranas sintéticas): simétricas o asimétricas

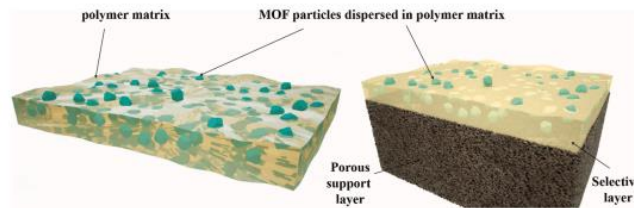
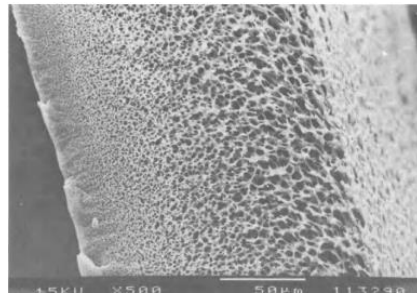
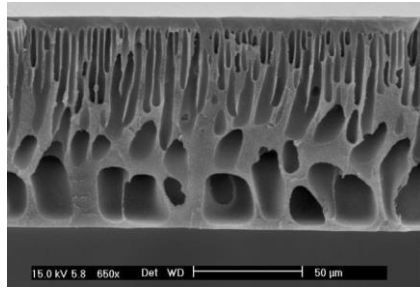
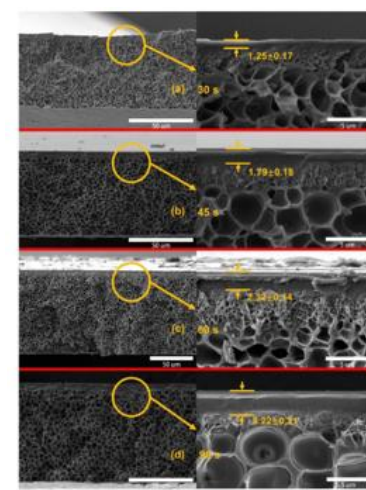


## Anisotropic Membranes

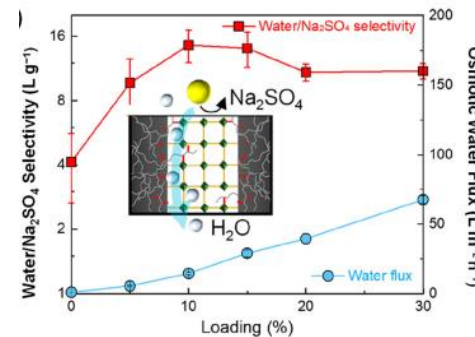
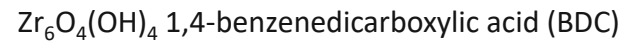
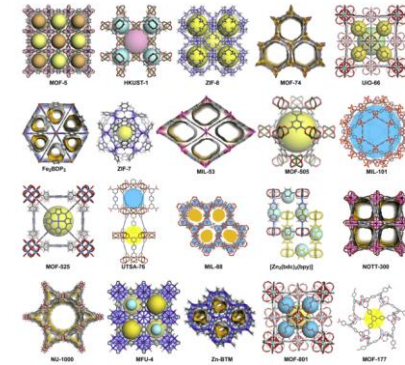
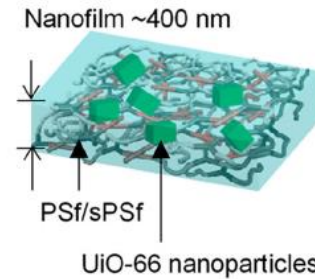
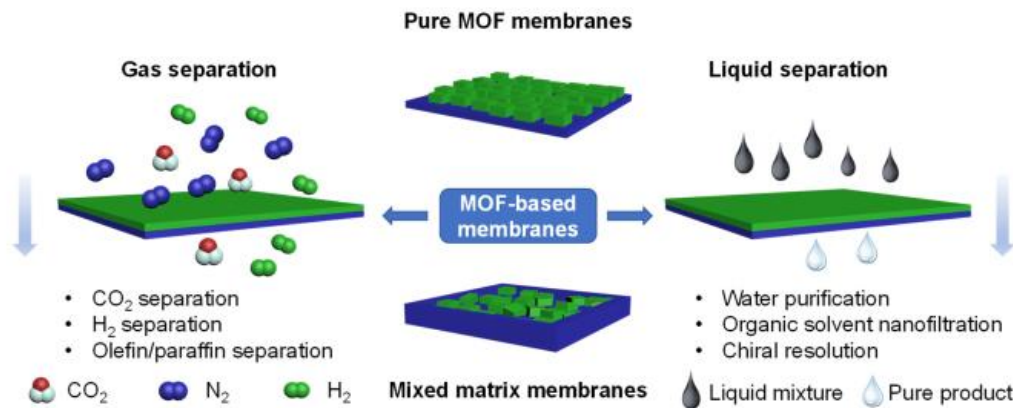


# Procesos de membranas descripción, objetivos, configuraciones

La mayoría de las membranas de MF tienen una estructura de poros simétrica con una porosidad de hasta el 80%, Las membranas de UF y RO tienen una estructura asimétrica que comprende una capa superior de 1 a 2  $\mu\text{m}$  de espesor con el tamaño de poro más fino, sostenida por una matriz de poros más abiertos de aproximadamente 100  $\mu\text{m}$  de espesor



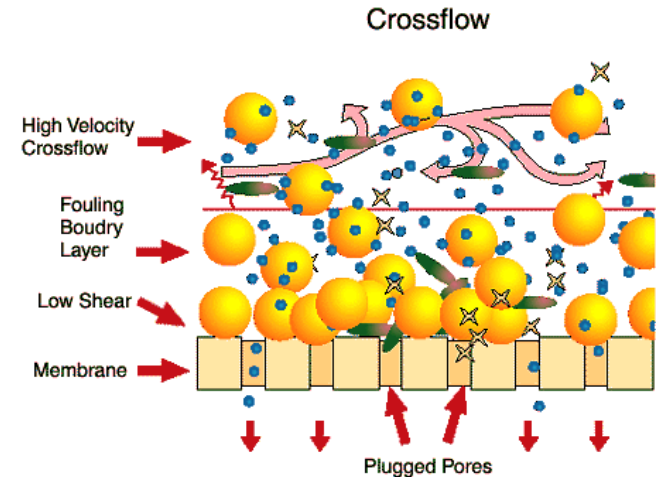
## Metal - Organic Framework (MOF) materials



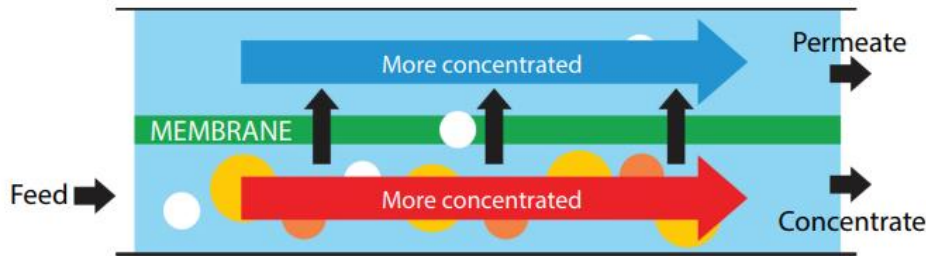
Las principales ventajas de las membranas inorgánicas en comparación con los tipos poliméricos son su mayor estabilidad a la temperatura, lo que permite la esterilización por vapor en aplicaciones biotecnológicas y alimentarias, una mayor resistencia al ensuciamiento y una distribución más estrecha del tamaño de los poros.

## Procesos de membranas Configuración *cross flow*

Un efecto de la filtración de flujo cruzado (*cross flow*) es que el afluente/concentrado al fluir a lo largo de la superficie de la membrana esencialmente "raspa" la superficie para mantenerla libre de depósitos de suspensión e incrustaciones. En la práctica, sin embargo, esta acción no suele ser lo suficientemente eficaz como para evitar por completo que los depósitos se acumulen en la membrana. Eventualmente, las membranas deben retirarse del servicio para limpiarlas o reemplazarlas.



Una consecuencia de esta configuración es el aumento de las concentraciones, en simultáneo, en la alimentación y en el permeado (si éste permitiera, en alguna medida, el pasaje de soluto o fase particulada) a lo largo de la operación. A medida que se elimina más fluido de la corriente de alimentación, el soluto o la fase particulada remanente se concentra más. Y, a medida que la alimentación se vuelve más concentrada, el permeado se volverá más concentrado.

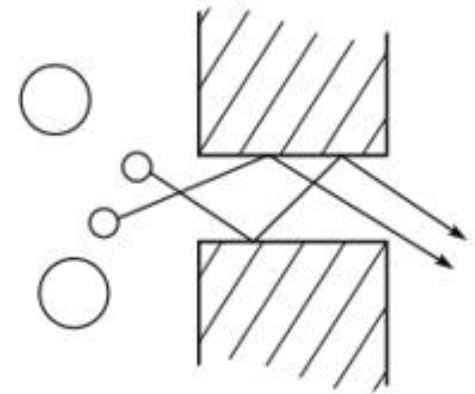


## Procesos de membranas modelos de permeación

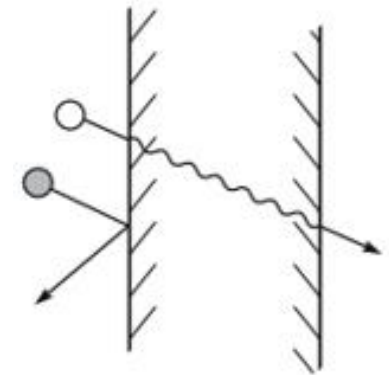
La separación en los procesos de membrana es el resultado de las diferencias en las velocidades de transporte de las especies químicas a través de la interfase. La velocidad de transporte y, por tanto, la magnitud del flujo viene determinada por la fuerza o fuerzas que actúan sobre los componentes individuales y de su movilidad y concentración en la interfase. La movilidad depende del tamaño molecular del soluto y de la estructura de la membrana y la concentración del soluto en la interfase depende fundamentalmente de la compatibilidad química del soluto y del material de la interfase. El proceso de transporte en sí mismo es un proceso de no equilibrio y se describe por una ecuación fenomenológica que relaciona el flujo con la fuerza impulsora conjugada en forma proporcional.

2 tipos de modelos:

- a) Los basados en la termodinámica de no equilibrio
- b) los que tienen en cuenta los posibles mecanismos de transferencia a través de la membrana: modelo de poros (flujo convectivo impulsado por gradientes de presión) y de solución- difusión (La difusión, base este modelo, es el proceso por el cual los permeantes son transportados de una parte de un sistema a otra por un gradiente de concentración). **Ambos tipos pueden ser conjugados en uno único**



Microporous membranes separate by molecular filtration



Dense solution-diffusion membranes separate because of differences in the solubility and mobility of permeants dissolved in the membrane material

# Procesos de membranas modelos de permeación

## Filtración *dead – end*. Ecuación de Kozeny – Carman $Re_m \leq 2 \quad \varepsilon_m \equiv \varepsilon_c$

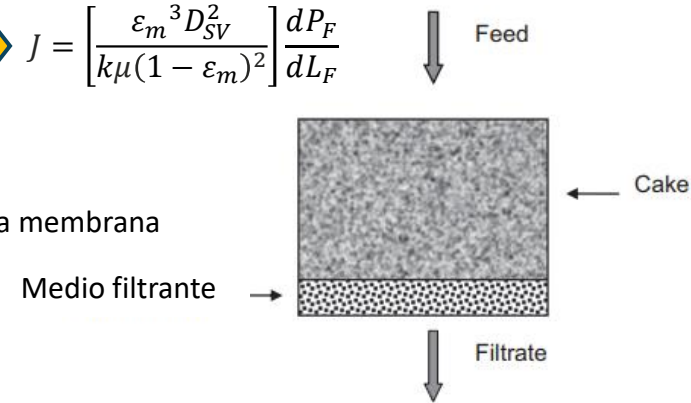
$$\textcircled{1} \quad \frac{dP_m}{dL_m} = k\mu \left[ \frac{(1 - \varepsilon_m)^2}{\varepsilon_m^3} \frac{1}{D_{SV}^2} \right] u = k\mu \left[ \frac{(1 - \varepsilon_m)^2}{\varepsilon_m^3} \frac{1}{D_{SV}^2} \right] \frac{1}{A} \frac{dV_F}{d\theta} = k\mu \left[ \frac{(1 - \varepsilon_m)^2}{\varepsilon_m^3} \frac{1}{D_{SV}^2} \right] J \Rightarrow J = \left[ \frac{\varepsilon_m^3 D_{SV}^2}{k\mu(1 - \varepsilon_m)^2} \right] \frac{dP_F}{dL_F}$$

$$J = \frac{dV_F}{d\theta} \frac{1}{A} = \frac{\Delta P}{\mu(R'_{cake} + R'_m)}$$

$$\left[ \frac{m^3}{s} \frac{1}{m^2} \equiv \frac{m}{s} \right]$$

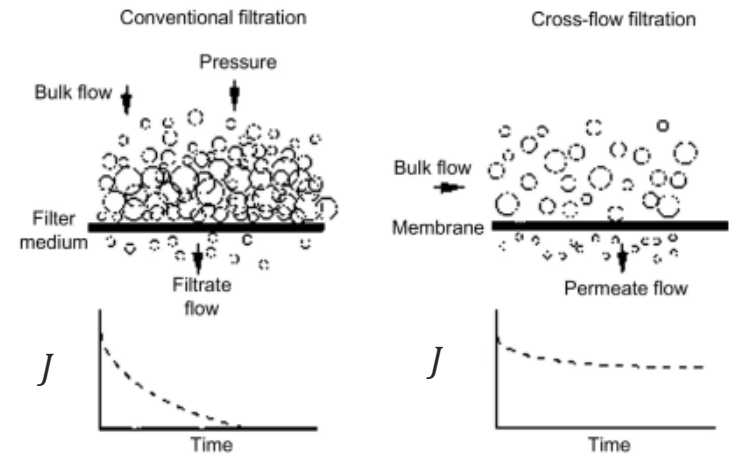
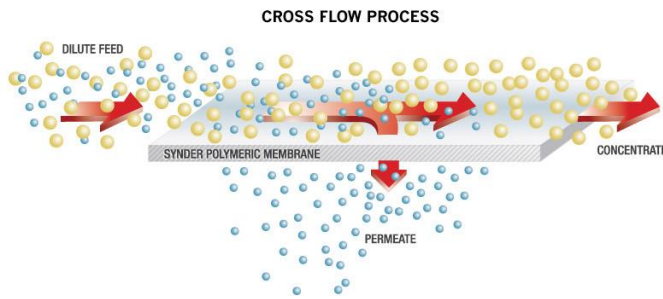
velocidad superficial a través de la membrana

$$R'_m = \alpha_0(\Delta P)^s L'_f C \quad R'_{cake} = \alpha_0(\Delta P)^s \frac{V_F C}{A}$$



## Filtración *cross – flow*. Ecuación general de membrana

$$J = \frac{(\Delta P - \Delta\pi)}{\mu(R'_c + R'_m)}$$



$J \text{ m}^3/\text{s} \cdot \text{m}^2$ : flux de membrana

$\Delta P$ : gradiente impulsor de presión o diferencia de presión transmembrana

$\Delta\pi$ : diferencia de presión osmótica a través de la membrana (sólo aplicable en presencia de solutos, no material particulado) .

$R'_c$ : Resistencia de las capas depositadas sobre la membrana.

$R'_m$ : Resistencia de la membrana



## Procesos de membranas Principio de separación

La membrana tiene la capacidad de transportar un componente más fácilmente que otro debido a las diferencias en las propiedades físicas y/o químicas entre la membrana y los componentes permeantes. El transporte se realiza como resultado de una fuerza motriz que actúa sobre los componentes individuales de la alimentación. En muchos casos, el flux (tasa de transporte por unidad de área) es proporcional a una fuerza impulsora o gradiente

$$J = -A \frac{dX}{dx}$$

$A$ : coeficiente fenomenológico

$X$ : fuerza impulsora (temperatura, presión, concentración)

$J$ : propiedad transportada (mol, volumen, calor, momento)

---

mass flux	$J_m$	=	$-D \, dc/dx$	(Fick)
volume flux	$J_v$	=	$-L_p \, dP/dx$	(Darcy)
heat flux	$J_h$	=	$-a \, dT/dx$	(Fourier)
momentum flux	$J_n$	=	$-v \, dv/dx$	(Newton)
electrical flux	$J_i$	=	$-1/R \, dE/dx$	(Ohm)

---

Para **un componente puro** que permea a través de una membrana, es posible emplear relaciones lineales para describir el transporte. Sin embargo, cuando dos o más componentes permean simultáneamente, tales relaciones no pueden emplearse generalmente, ya que pueden ocurrir fenómenos de acoplamiento en los flujos y fuerzas. Estos fenómenos de acoplamiento pueden describirse en los términos del formalismo de la termodinámica de no equilibrio.



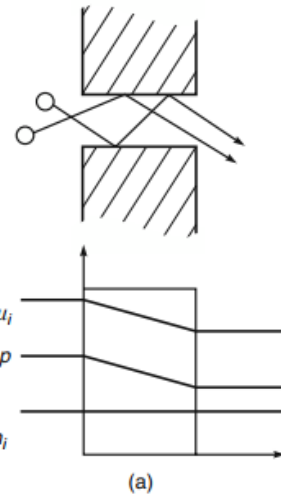
Procesos de membranas modelos de permeación

El punto de partida para la descripción matemática es la proposición, sólidamente basada en la termodinámica, de que las fuerzas impulsoras de presión, temperatura, concentración y potencial eléctrico están interrelacionadas (relación de reciprocidad de Onsager) y que la fuerza motriz general que produce el permeado de una especie química es un gradiente en su potencial químico.

$$J_i = -L_i \frac{d\mu_i}{dx} \quad d\mu_i = RTd\ln(\gamma_i c_i) + V_i dP$$

Supuestos del modelo de permeación. a) los fluidos a ambos lados de la membrana están en equilibrio con el material de la membrana en la interfaz; el gradiente de potencial químico de un lado a otro de la membrana es continuo; a) El modelo de flujo de poros asume que la concentración del permeante es uniforme ( $RTd\ln(\gamma_i c_i) = 0$ ) y que  $\frac{d\mu_i}{dx}$  está representado solo como un gradiente de presión. b) El modelo de difusión-solución asume que la presión ( $dP = 0$ ) dentro de una membrana es uniforme y que el gradiente  $\frac{d\mu_i}{dx}$  de un permeante está asociado solo como un gradiente de concentración.

Microporous membranes separate by molecular filtration

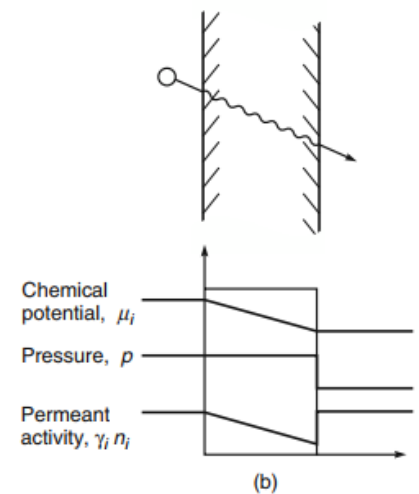


a) modelo de flujo de poros

$$J_i = -L_i V_i \frac{dP}{dx} = -K_i \frac{dP}{dx}$$

Ecuación de permeabilidad de Darcy

Dense solution-diffusion membranes separate because of differences in the solubility and mobility of permeants in the membrane material

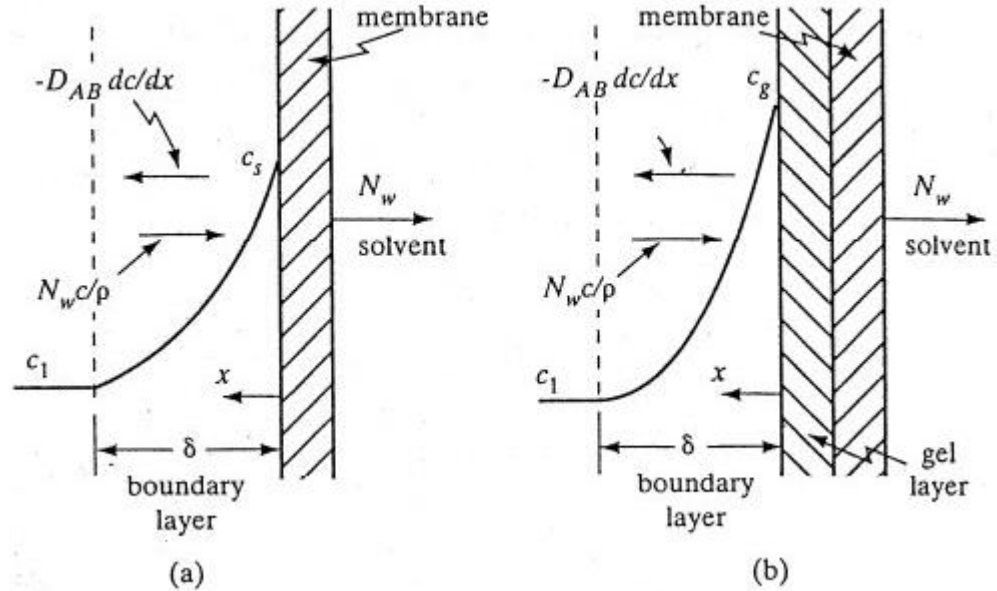


b) modelo de difusión-solución

$$J_i = -L_i \frac{d\mu_i}{dx}$$

## Procesos de membranas polarización por concentración

En los procesos de separación por membrana, una mezcla líquida entra en contacto con el lado de alimentación de la membrana, y un permeado enriquecido en uno de los componentes de la mezcla se retira del otro lado. Debido a que los componentes de la mezcla permean a diferentes velocidades, se pueden formar gradientes de concentración en los fluidos a ambos lados de la membrana. En este caso, las concentraciones en las superficies de las membranas no son las mismas que las concentraciones en las corrientes principales lo cual cambia la permeabilidad a través de la membrana. El fenómeno se denomina polarización de concentración

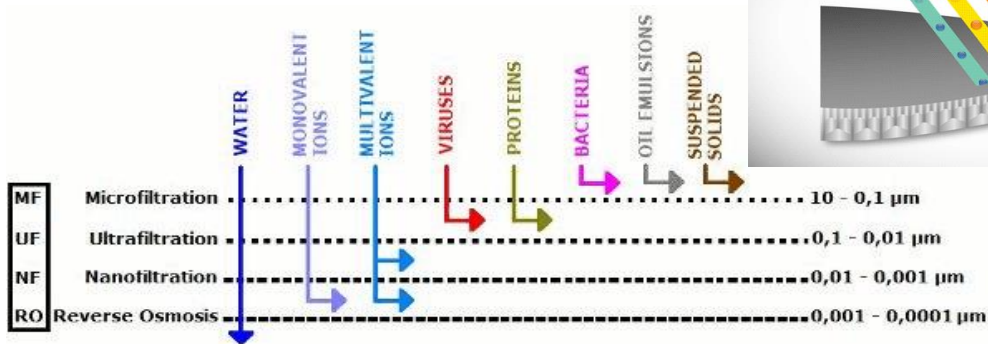
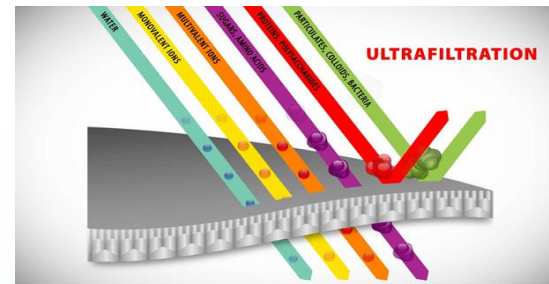
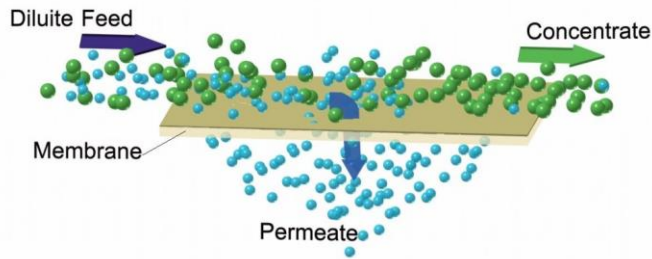


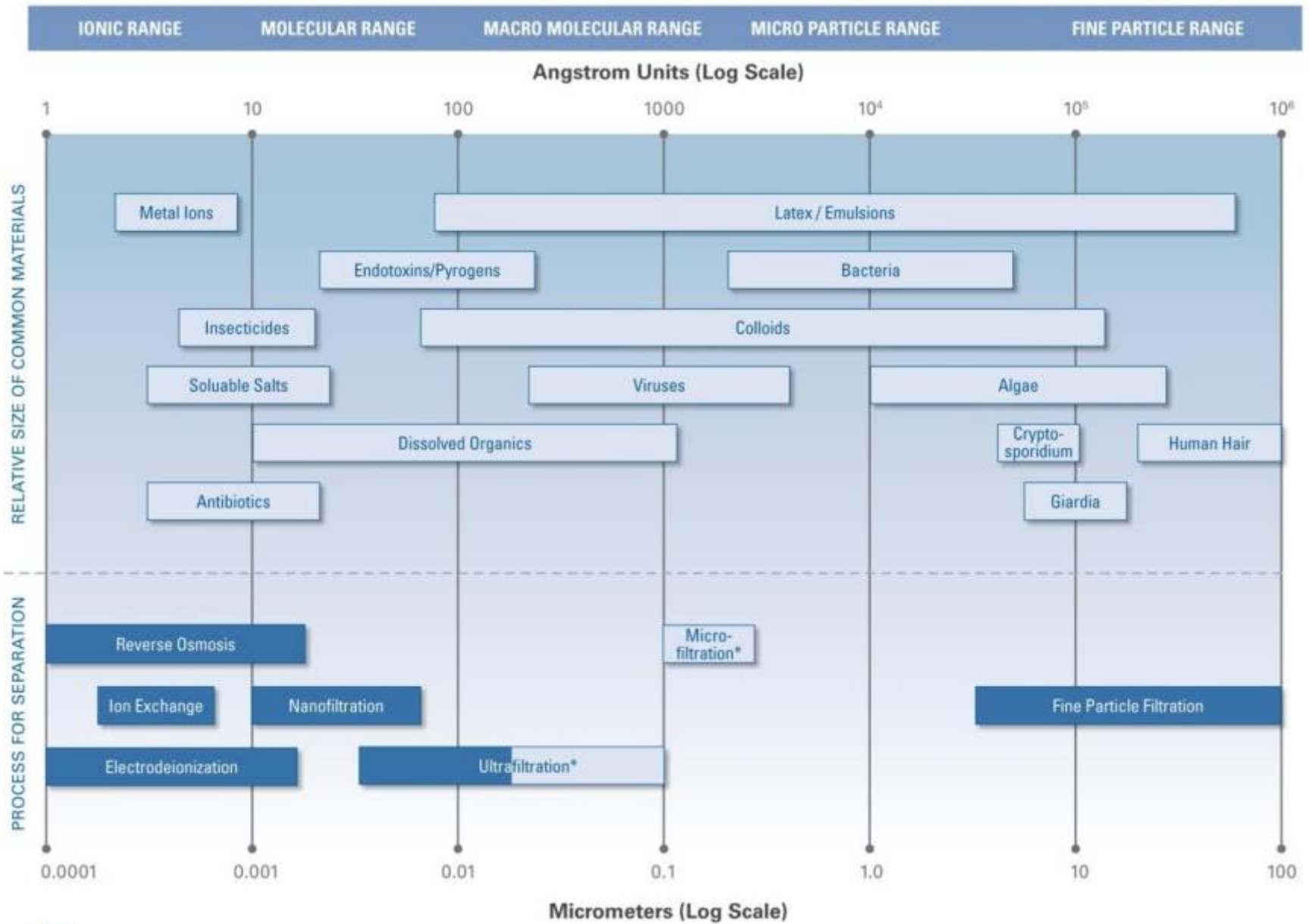
# Operaciones Unitarias 1

## Micro filtración y Ultrafiltración

### Tecnologías de membranas

Cross-Flow Filtration Process





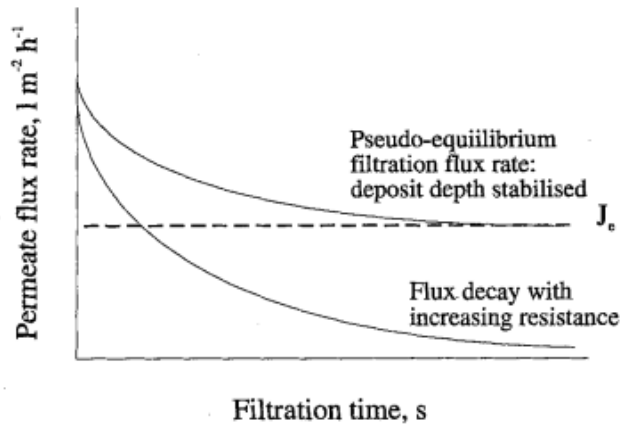
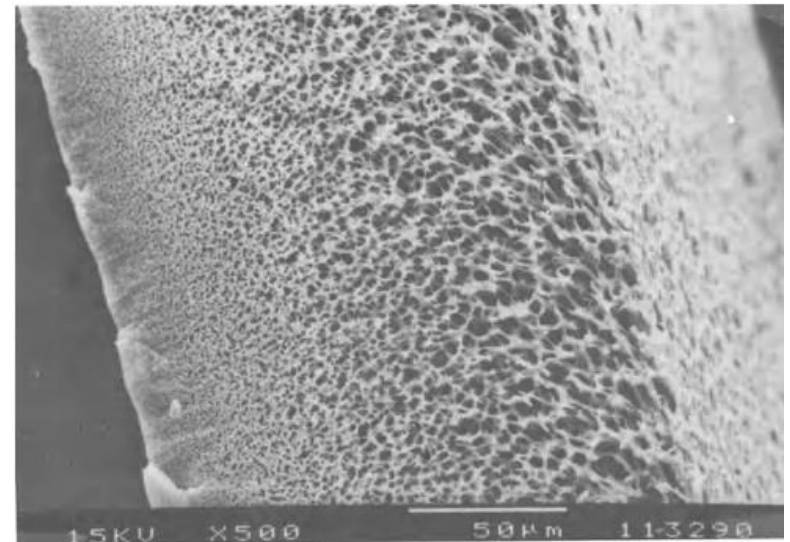
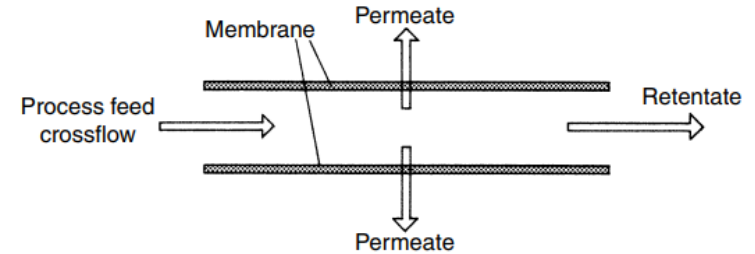
# Microfiltración y Ultrafiltración

La separación sólido-líquido de *slurries* que contienen partículas por debajo de  $10\ \mu\text{m}$  es difícil mediante técnicas de filtración convencionales *dead - end*.

En MF el tamaño de poro del medio filtrante (membrana) está entre  $0,1$  a  $2\ \mu\text{m}$

UF el tamaño de poro del medio filtrante (membrana) está entre  $1\ \text{nm}$  a  $0,05\ \mu\text{m}$

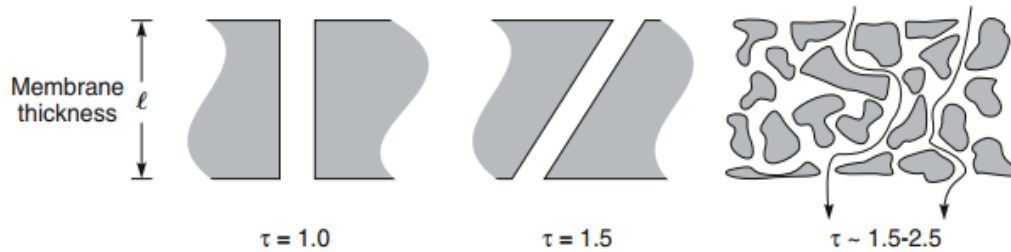
Es interesante notar la relación entre el flux, la porosidad (en este caso de membrana) y tamaño de partícula. El tamaño de partícula involucrada y la disminución de la porosidad necesaria (membranas más densas) implican mayores potenciales impulsores para un dado flux al pasar de MF a UF. Son importantes las membranas asimétricas que manejan mejor el efecto tamiz sin requerir, mayores potenciales impulsores.



# Procesos de membranas modelos de permeación, modelo de flujo de poros, parámetros de caracterización

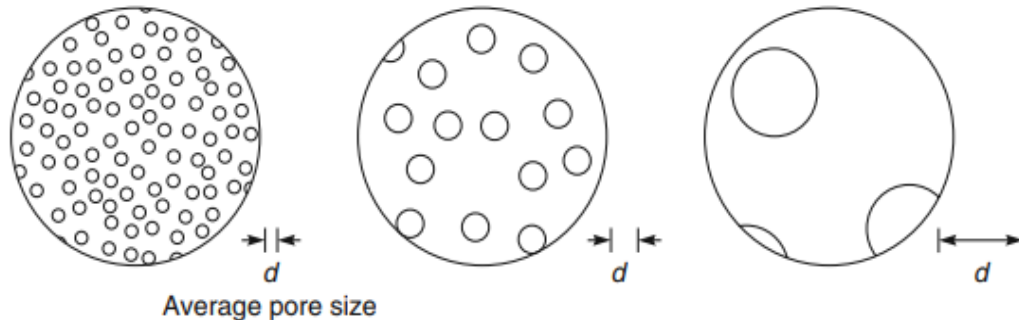
## Parámetros de caracterización

Cross-sections of porous membranes of different tortuosity



Idéntico espesor, diferentes trayectorias (tortuosidad  $\tau$ )

Surface views of porous membranes of equal porosity ( $\varepsilon$ ) but differing pore size



Idéntica porosidad  $\varepsilon$ , diferentes tamaños de poros

Los parámetros disponibles para caracterizar la complejidad de las membranas microporosas también son imperfectos.

a) La porosidad ( $\varepsilon$ ) es la fracción del volumen total de la membrana vacía. Las porosidades promedio típicas son de 0,3 a 0,7. En membranas anisotrópicas la porosidad varía de un punto a otro.

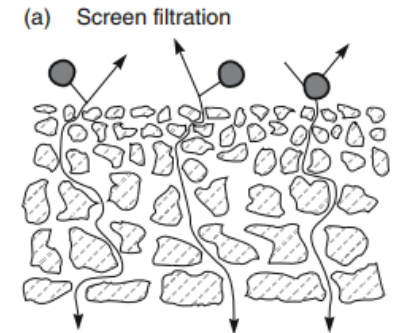
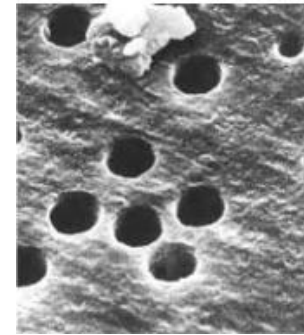
b) La tortuosidad ( $\tau$ ) refleja la longitud del poro promedio en comparación con el espesor de la membrana. Los poros cilíndricos simples en ángulo recto con la superficie presentan  $\tau = 1$ . Los poros toman un camino serpenteante a través de la membrana, por lo que las tortuosidades típicas están en el rango de 1,5 a 2,5.

## Procesos de membranas modelos de permeación, modelo de flujo de poros, mecanismos

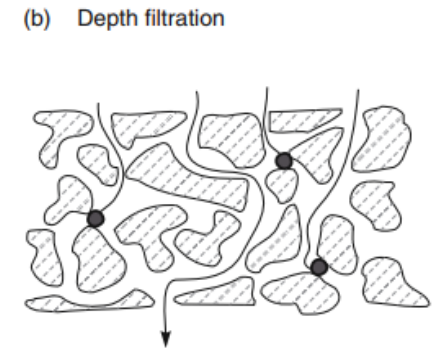
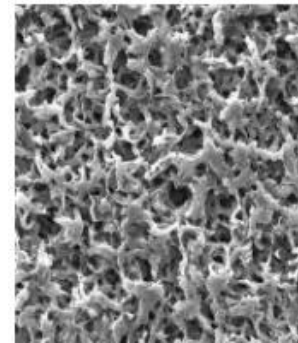
Las membranas microporosas (MF, UF) utilizadas para filtrar partículas de líquidos se dividen en:

a) Filtro por tamiz: las membranas contienen poros superficiales más pequeños que las partículas que se van a eliminar. Estas membranas son anisotrópicas, con una capa superficial microporosa relativamente fina sobre un soporte microporoso más abierto. Las partículas en el fluido permeante son capturadas y se acumulan en la superficie de la membrana. Las partículas lo suficientemente pequeñas como para pasar a través de los poros superficiales normalmente no se capturan en el interior de la membrana.

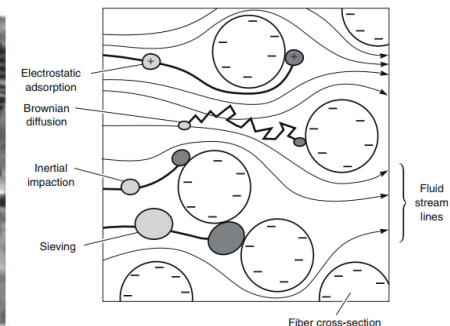
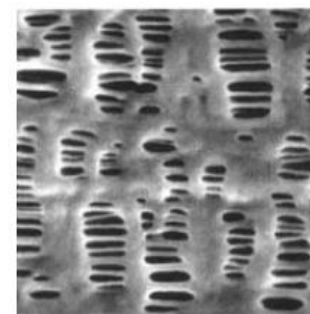
b) Filtro de profundidad: captura las partículas a eliminar en el interior de la membrana. El diámetro medio de los poros de un filtro de profundidad es 10 veces el diámetro de la partícula más pequeña capaz de penetrar en la membrana. Algunas partículas son capturadas en pequeñas constricciones dentro de la membrana, otras por adsorción a medida que penetran en la membrana por un camino tortuoso.



Tamiz molecular: separación por tamaño



Filtración profunda: adsorción



Mecanismo mixto

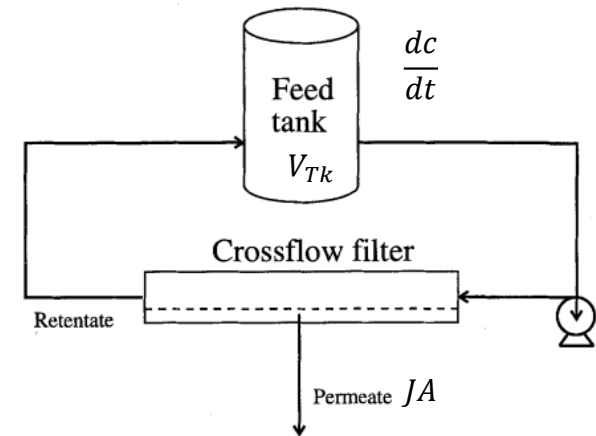
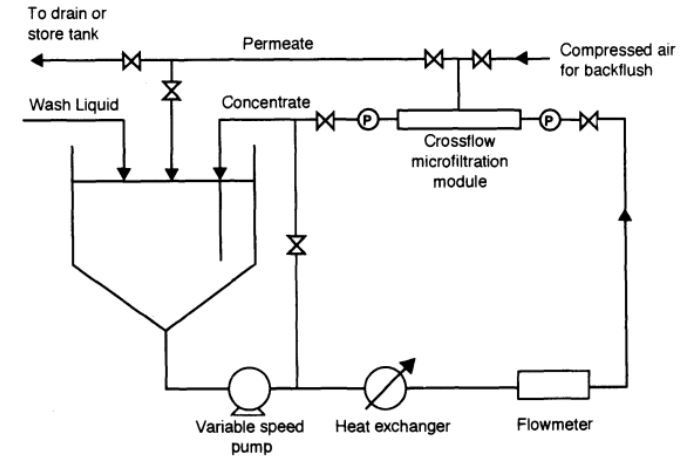
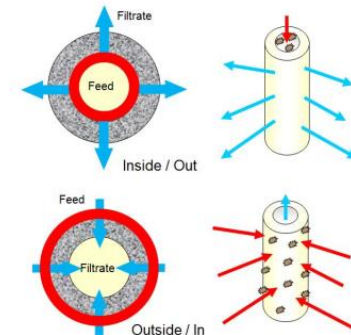
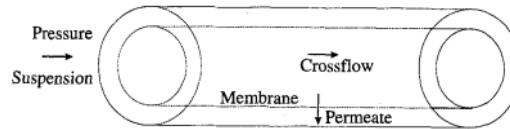
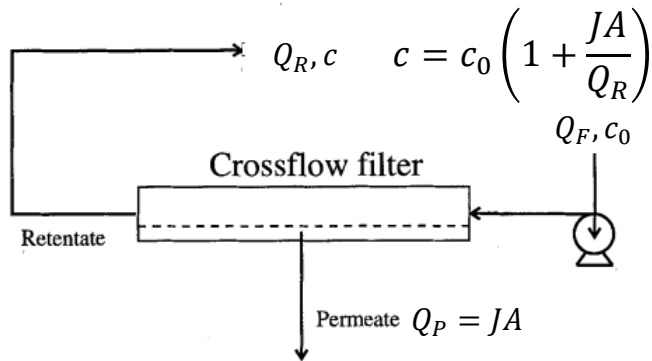


# Microfiltración

El proceso de separación por microfiltración *cross-flow* consiste en concentrar la corriente de alimentación proveniente de un tanque; esta corriente pasa a través de la membrana. El retenido parcialmente concentrado se recicla en el tanque para su posterior procesamiento, mientras que el permeado se almacena o se desecha según sea necesario.

$$c_0 J A = V_{Tk} \frac{dc}{dt} \rightarrow dc = \frac{c_0 J A}{V_{Tk}} dt \rightarrow \int_{c_0}^c dc = \frac{c_0 A}{V_{Tk}} \int_0^t J dt \quad J_{cte}$$

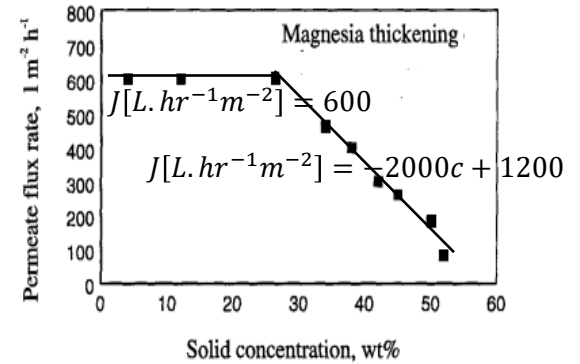
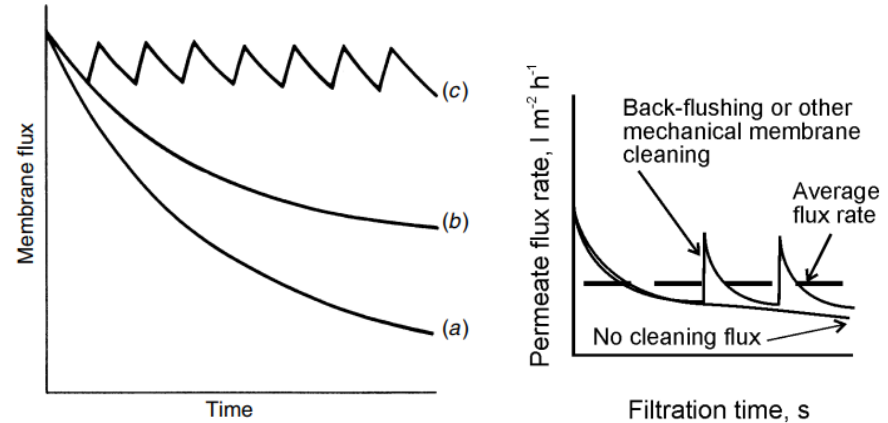
$$c = c_0 + \frac{c_0 J A}{V_{Tk}} t \Rightarrow c = c_0 \left( 1 + J A \frac{t}{V_{Tk}} \right)$$



# Microfiltración

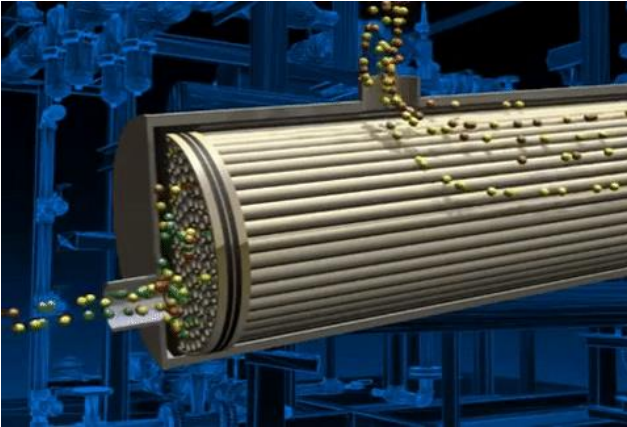
En la práctica, la tasa de permeabilidad de la membrana disminuye con el tiempo debido al ensuciamiento de la membrana (*fouling*); ello provoca el bloqueo de la superficie y de los poros de la membrana por los materiales particulados. La tasa de ensuciamiento depende de la naturaleza de los materiales que se procesan, la naturaleza de la membrana, la velocidad del flujo cruzado y la presión aplicada. Por ejemplo, el aumento de la velocidad del flujo cruzado da como resultado una disminución de la tasa de ensuciamiento.

En un proceso ideal, la microfiltración *cross-flow* permearía el líquido a través de un medio poroso sin la deposición de material particulado. La disminución del flujo que se produce demuestra que este no es el caso. Dado que la disminución se debe a la deposición de partículas que permanece parcialmente sobre la membrana, es aplicable para el diseño las ecuaciones provistas para *dead-end* en condiciones de gradiente impulsor constante



$$t = \frac{\alpha_m \mu C}{2 \Delta P A^2} V_F^2 + \frac{R_m \mu}{\Delta P A} V_F$$

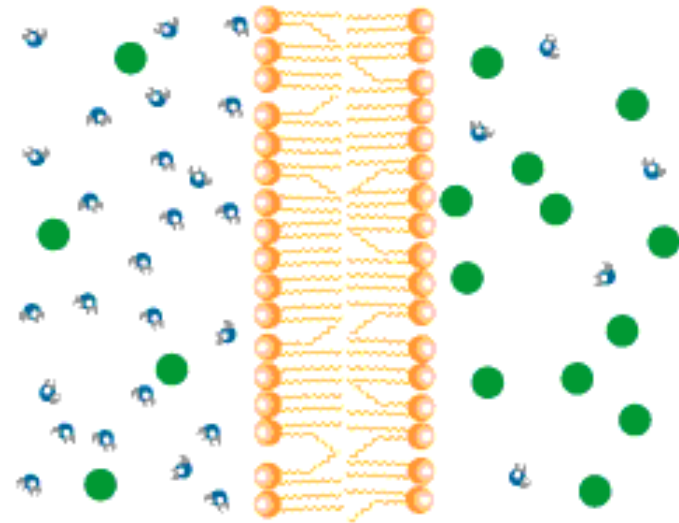
# Operaciones Unitarias 1



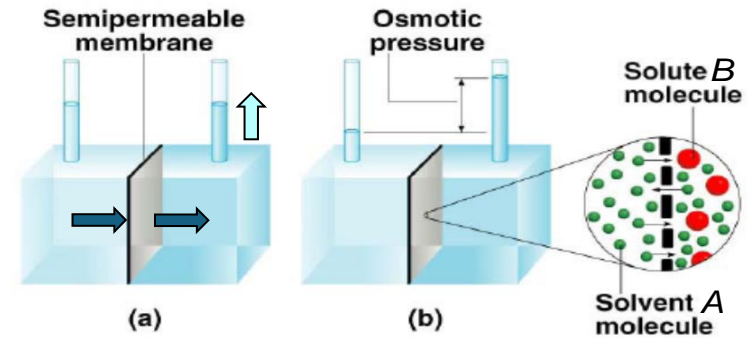
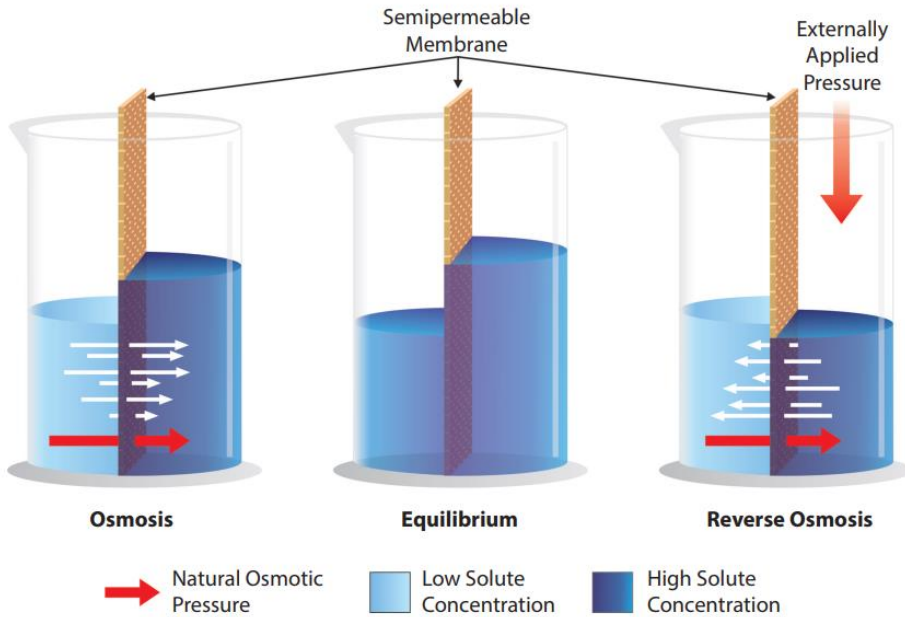
Tecnologías de membranas

Osmosis Inversa (RO, *hyperfiltration*)

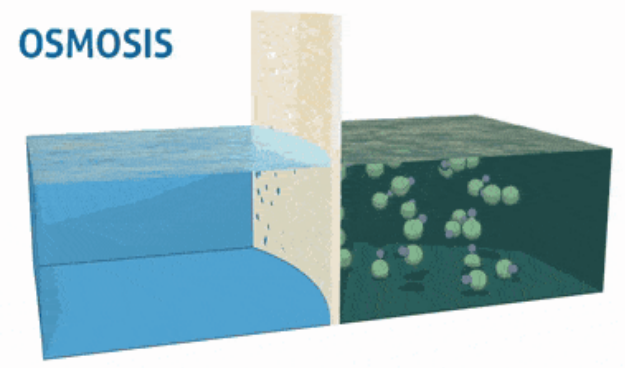
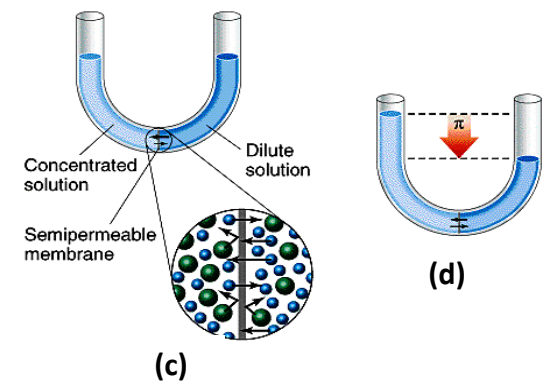
[https://youtu.be/iY\\_f\\_9NWiYA?si=28-8gmW95dy2nNce](https://youtu.be/iY_f_9NWiYA?si=28-8gmW95dy2nNce)  
RO industrial Recuperador de presión



# RO. Parámetros de interés: Presión osmótica $\Pi$ Concepto



$$\mu_{A,izq}^* > \mu_{A,der} = \mu_A^* + RT \ln a_A \quad \mu_{A,izq}^* = \mu_{A,der}$$



Ósmosis es el proceso espontáneo en el que el agua, como solvente, fluye a través de una membrana semipermeable desde una solución con baja concentración de solutos hasta una solución con alta concentración de solutos, impulsada por una diferencia de los potenciales químicos del agua de ambos lados de la membrana.

RO es el proceso inverso

[https://youtu.be/aVdWqbpbv\\_Y?si=rjs0jUoMHLzffAxH](https://youtu.be/aVdWqbpbv_Y?si=rjs0jUoMHLzffAxH)  
How does RO work

RO. Parámetros de interés: Presión osmótica  $\Pi$  Correlaciones

Ecuación de *van't Hoff* (válida en el límite a dilución infinita)  $\Pi = -\frac{RT}{V_A^*} \sum_B \ln(x_A \gamma_A)$   $\Pi = \frac{RT}{V_A^*} x_B$



R: 8.314 kPa.m<sup>3</sup>.kmol<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>

$\Pi$ : presión osmótica kPa

T: Temperatura K

$x_B$ : fracción molar soluto no electrolito

$c_B$ : concentración de la especie química o conjunto de especies químicas kmol.m<sup>-3</sup> o mol.L<sup>-1</sup>

$b_B$ : concentración de la especie química o conjunto de especies química mol.kg<sub>A</sub><sup>-1</sup>

$$\Pi = RT \sum_B c_B$$

Sv: salinidad mg.L<sup>-1</sup>

Correlaciones  $\Pi = \Phi(b_B)$ , solvente, agua

$$\Pi(\text{kPa}) = 8,205(T + 273) \sum_B b_B$$

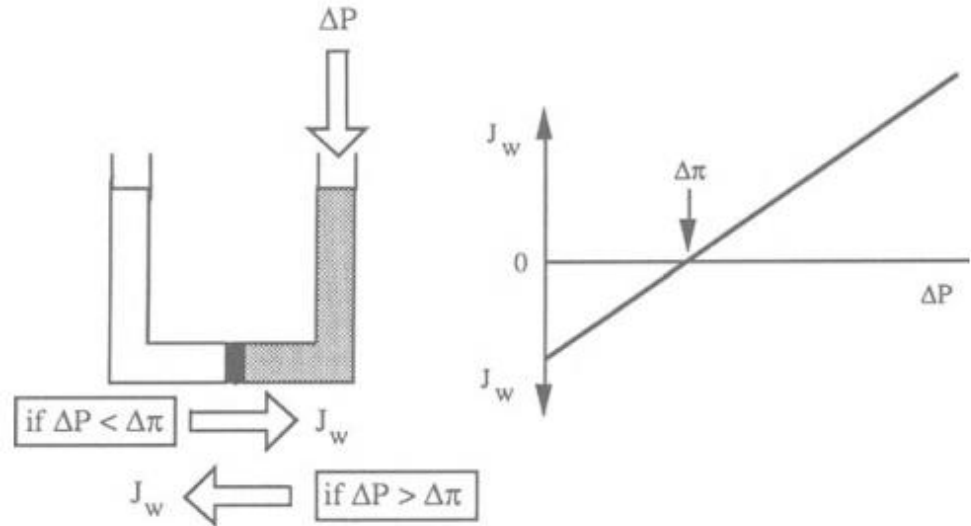
T: Temperatura °C

Correlaciones  $\Pi = \Phi(Sv)$   $\Pi(\text{bar}) = 0,710^{-3} Sv$

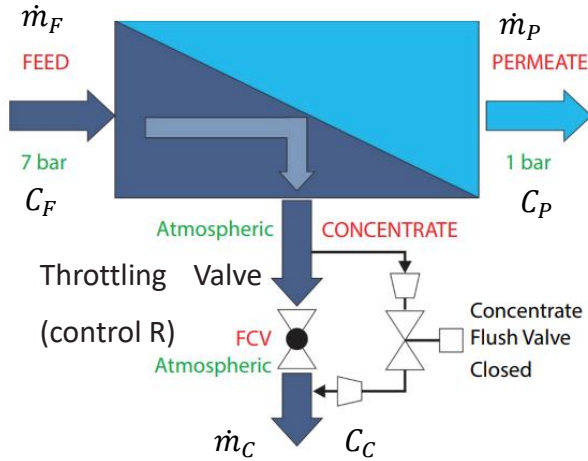
Correlación de Dupont; T: Temperatura °C

$$\Pi_{DP}(\text{bar}) = \frac{Sv(T + 320)}{491000} \quad Sv \leq 20000 \text{ mg/L}$$

$$\Pi_{DP}(\text{bar}) = \frac{0,0117Sv - 34}{14,23} \frac{(T + 320)}{345} \quad Sv > 20000 \text{ mg/L}$$



# Procesos de membranas Configuración *cross flow* algunas definiciones



$\dot{m}_F, \dot{m}_P, \dot{m}_C$ : flujo másico:  $kg_T \cdot hr^{-1}$

$C_{F,i}, C_{P,i}, C_{C,i}$ : fracción másica  $kg_{sol} \cdot kg_T^{-1}$  de un componente específico

Recuperación o conversión (*recovery*):  $R = \frac{\dot{m}_P}{\dot{m}_F}$

Factor de concentración:  $f_{c,i} = \frac{C_{C,i}}{C_{F,i}}$

Pasaje de soluto:  $SP_i = \frac{C_{P,i}}{C_{F,i}}$

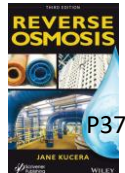
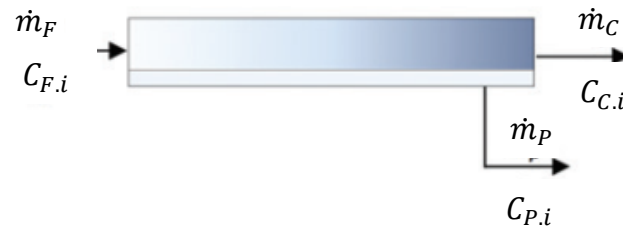
Rechazo (*Rejection*):  $SR_i = \frac{(C_{F,i} - C_{P,i})}{C_{F,i}} = 1 - \frac{C_{P,i}}{C_{F,i}} = 1 - SP_i$

## Balance de masa de un componente específico *i*

$$\dot{m}_F C_{F,i} = \dot{m}_P C_{P,i} + \dot{m}_C C_{C,i} \Rightarrow 1 = \frac{\dot{m}_P C_{P,i}}{\dot{m}_F C_{F,i}} + \frac{\dot{m}_C C_{C,i}}{\dot{m}_F C_{F,i}} \Rightarrow 1 = R(1 - SR_i) + (1 - R)f_{c,i}$$

$$\frac{C_{P,i}}{C_{F,i}} \downarrow \Rightarrow (1 - SR_i) \rightarrow 0$$

$$f_{c,i} = \frac{1 - R(1 - SR_i)}{(1 - R)} \Rightarrow f_{c,i} \cong \frac{1}{(1 - R)}$$

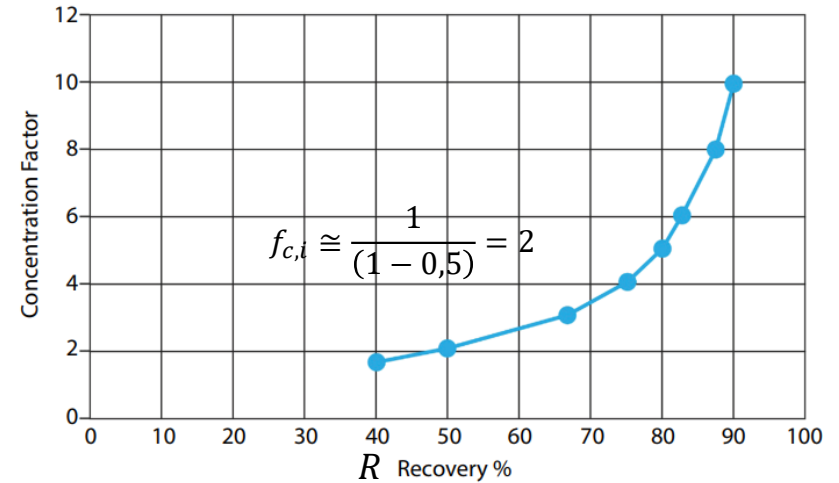


## Procesos de membranas Configuración *cross flow* aspectos operativos

En la operación se fija selecciona la recuperación  $R$  del sistema; No es una propiedad de la membrana. Debe considerarse el equilibrio entre una mayor recuperación, lo que resulta en menos agua concentrada para eliminar, pero también una menor pureza del permeado.

En la práctica, la recuperación se ajusta mediante la válvula de control de flujo ubicada en la corriente de concentrado. El estrangulamiento de la válvula dará como resultado una mayor presión de funcionamiento, lo que fuerza más agua a través de la membrana en lugar de transferirla lo largo del lado de alimentación/concentrado de la membrana, y da como resultado una mayor recuperación. Esta acción también disminuirá el  $SR_i$ .

La recuperación  $R$  es fijada por la operación. Excederse en el valor de la recuperación puede resultar en un ensuciamiento acelerado e incrustaciones de las membranas, porque hay menos agua disponible para limpieza de la membrana en el lado del concentrado.



Concentration factor as a function of recovery.

Recovery (%)	Concentration factor
50	2
66	~ 3
75	4
80	5
83	6
87.5	8

RO. Parámetros de interés: flux de solvente (agua)  $J_w$ ;

Flux se define como la cantidad de una especie química que pasa a través de un área determinada durante un tiempo determinado. En RO se consideran tanto el flujo de agua como el de soluto. Según el modelo solución – difusión resulta:

$$J_w = K_w(\Delta P - \Delta\pi) \quad J_w \text{ se define como el volumen de agua que pasa a través de un área de membrana en la unidad de tiempo, } m^3.m^{-2}.s^{-1} \text{ o } L.m^{-2}.s^{-1} \text{ o } m.s^{-1} \text{ o } m.day^{-1}$$

$K_w$ : coeficiente de permeabilidad (o coeficiente de permeabilidad hidrodinámica).  $m^3.m^{-2}.hr^{-1}.bar^{-1}$   $K_w = K_{w,25^\circ C} 1,03^{(T-25)}$

$\Delta P = (P_F - P_P)$  diferencia de presión entre la alimentación y el permeado. *bar*  $5.10^{-5} \leq K_w \leq 5.10^{-3}$  .  $K_w$  es

$\Delta\pi = (\pi_F - \pi_P)$  diferencia de presión osmótica entre la alimentación y el permeado. *bar* único para cada membrana.

[Ósmosis inversa | Membranas de agua Nano, Ultra y Microfiltración \(membranes.com\)](#)



Permeability of various hydranautics membranes at 25°C [8].

Nota 1:  $J_w$  depende directamente de la presión y la concentración a través de la presión osmótica. Además, es único para cada membrana específica

Nota 2: En general, a medida que disminuye  $J_w$ ,  $SR_i$  tiende a aumentar. Esta característica mutuamente excluyente de las membranas de RO, permeabilidad y selectividad es consecuencia del modelo de difusión-solución.

Membrane type	Model number	Flux (m/d)	Test pressure (bar)	Permeability (m/bar-d)	Solute rejection (%)
Seawater	SWC5-LD	0.919	55	0.0167	99.8
Brackish Water*	CPA7-LD	1.17	15.5	0.0757	99.8
Brackish Water	CPA5-LD	1.11	15.5	0.0722	99.7
Brackish Low Energy	ESPA2-LD	1.02	10.3	0.0989	99.6

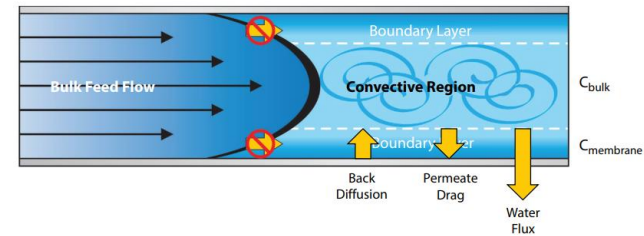
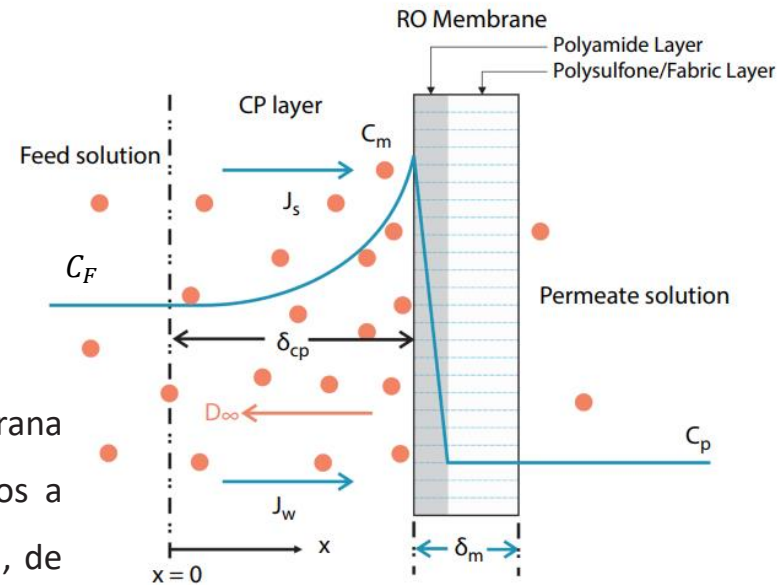
\*Next generation polymeric membrane.



## Procesos de membranas polarización por concentración en RO

Describe el gradiente de concentración dentro del elemento de membrana que se crea como consecuencia del cross-flow. Existe un gradiente de concentración de solutos entre el *bulk* de la corriente afluyente y la que se presenta en la superficie de la membrana

El fluido, en su trayectoria transversal hacia la superficie de la membrana para permearla, arrastra solutos (*permeate drag*). El flujo de solutos a través de la membrana se inhibe debido al rechazo de la membrana, de modo que a medida que el fluido permea, los solutos forman una capa que permanece en la superficie de la membrana. Los solutos tienden a permanecer cerca de la membrana en una capa límite, presentando flujo difusivo hacia el *bulk* de la corriente. La hidrodinámica axial y transversal de la membrana influyen en el fenómeno



$\beta$  es el módulo de polarización de concentración. En RO  $\beta > 1$ , la concentración de solutos en la superficie de la membrana  $C_m$  es siempre mayor a la del bulk,  $C_F$ . Si  $J_w$  aumenta,  $\beta \gg 1$ . También la disminución de la velocidad de *cross flow* incrementará  $\delta_{CP}$  y  $\beta \gg 1$ . Un mayor valor de  $\beta$  aumenta la posibilidad de que los depósitos se acumulen en la membrana y tal vez la incrusten

$$\beta = \frac{C_m}{C_F} = \exp \left[ J_w \frac{\delta_{CP}}{D_{\infty}} \right]$$

$$\beta \sim 1,2 - 2,0$$

RO. Parámetros de interés: flux de soluto  $J_{S,i}$ . Relaciones entre parámetros

$$J_{S,i} \text{ (kg}_{\text{sol}} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{hr}^{-1}) \text{ se define como: } J_{S,i} = K_{S,i}(C_{Vm} - C_{VP}) \cong K_S(C_{VF} - C_{VP}) \quad K_{S,i} = K_{S,i,25^\circ\text{C}} 1,03^{(T-25)}$$

$K_{S,i}$  ( $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  o  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) es el coeficiente de permeabilidad del soluto  $i$ .  $J_{S,i}$  es independiente de la presión. Depende solo de la diferencia de concentración del soluto en la superficie de la membrana  $C_{V,i,m}$ ,  $\text{kg}_{S,i} \cdot \text{m}^{-3}$  y la concentración en el permeado  $C_{V,i,P}$ ,  $\text{kg}_{S,i} \cdot \text{m}^{-3}$ .  $K_{S,i}$  es único para cada membrana específica.

Relaciones entre parámetros       $\pi_F = \Phi(\beta C_{VF}, T)$        $\Delta\pi = (\pi_F - \pi_P)$        $NDP = (\Delta P - \Delta\pi)$

flux de soluto/ flux de agua

$$C_{V,i,P} = \frac{J_{S,i}}{J_w} = \frac{K_{S,i}(C_{V,i,F} - C_{V,i,P})}{K_w(\Delta P - \Delta\pi)} = \frac{K_{S,i}}{K_w NDP} (C_{V,i,F} - C_{V,i,P}) \Rightarrow \frac{C_{V,i,P}}{C_{V,i,F}} = \frac{K_{S,i}}{K_w NDP} \frac{(C_{V,i,F} - C_{V,i,P})}{C_{V,i,F}} \Rightarrow (1 - SR_i) = \frac{K_S}{K_w NDP} SR_i$$

$$1 = \frac{K_{S,i}}{K_w NDP} SR_i + SR_i \Rightarrow 1 = \left( \frac{K_{S,i}}{K_w NDP} + 1 \right) SR_i \Rightarrow 1 = \left( \frac{B_i}{NDP} + 1 \right) SR_i \Rightarrow 1 = \left( \frac{B_i + NDP}{NDP} \right) SR_i \Rightarrow SR_i = \left( \frac{NDP}{B_i + NDP} \right)$$

Membrana debe tener la mayor afinidad por el solvente y la menor para el soluto  $B_i = \frac{K_{S,i}}{K_w} \rightarrow 0$

La última ecuación expresa la relación entre la fuerza impulsora  $NDP$  y la selectividad de la membrana (esto es su factor de rechazo,  $SR_i$ ). Mayor selectividad requiere mayor Diferencia de Presión Neta,  $NDP$ .

$$f_{c,i} = \frac{1 - R(1 - SR_i)}{(1 - R)} = \frac{C_{V,i,C}}{C_{V,i,F}} \quad R = \frac{\dot{m}_P}{\dot{m}_F} \quad J_w = K_w NDP \quad \frac{\dot{m}_F}{\rho_F} = Q_{vw} = J_w A_m \Rightarrow \dot{m}_F = J_w A_m \rho_F$$

# Configuraciones de elementos de RO

4 configuraciones básicas de elementos RO:

- a) placa y marco, con láminas planas;
- b) tubular;
- c) *Hollow Fine Fiber* (fibra fina hueca);
- d) *Spiral Wound* (enrollado en espiral, con láminas planas).

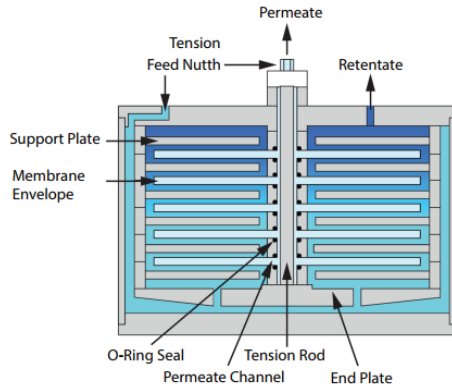
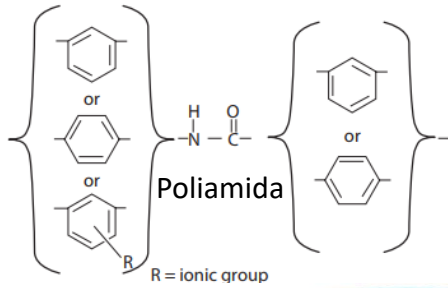
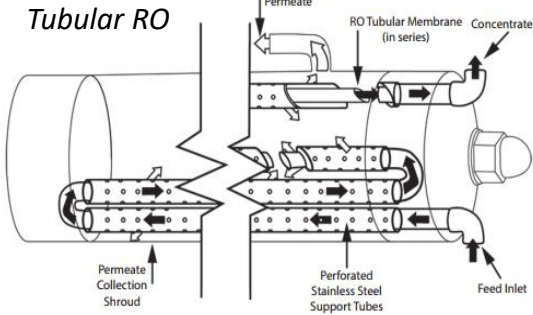
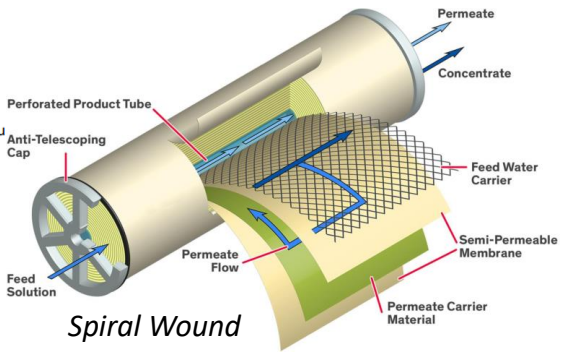
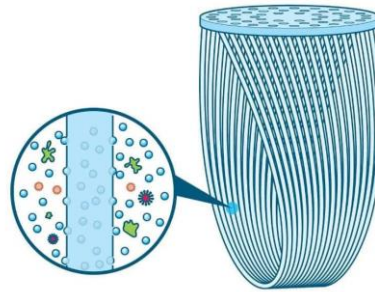
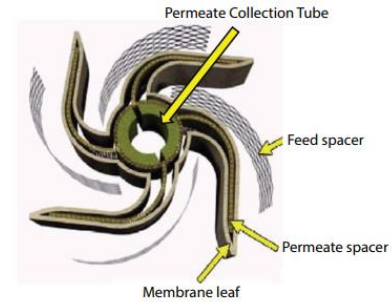


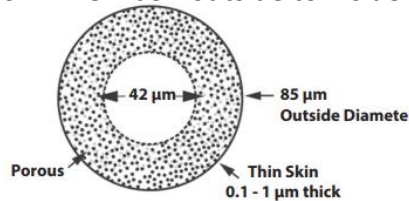
Plate and Frame RO



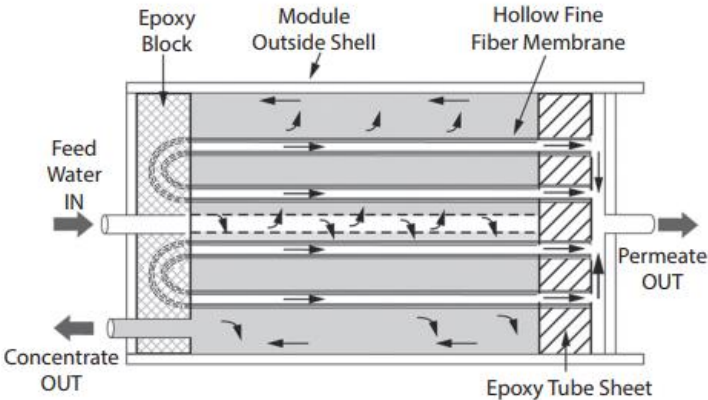
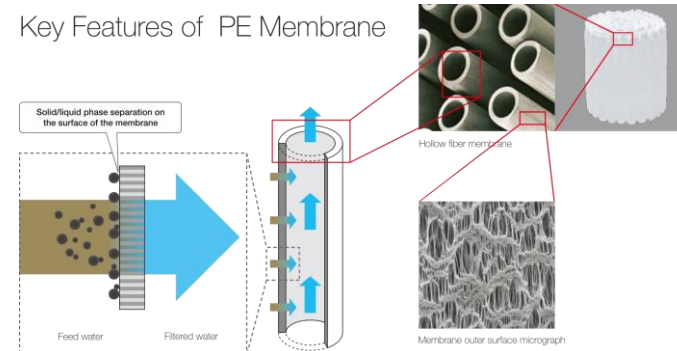
Membranas de fibra hueca (Dupont poliamida aromática) flux de 1,7 a 5 L.m<sup>-2</sup>.hr<sup>-1</sup>



Hollow Fine Fiber: outside to inside



Key Features of PE Membrane



## Configuraciones de Plantas: MF, UF, NF y RO

*feed and bleed operations:* El *start – up* es similar a un sistema batch: el retenido se recicla inicialmente en su totalidad. Cuando se alcanza la concentración de soluto requerida dentro del circuito, una fracción del bucle se purga continuamente. La corriente de alimentación es la suma de los caudales de permeado más concentrado. Ventaja: la concentración final está disponible de forma continua. Desventaja: el bucle funciona a una concentración equivalente a la concentración final en el sistema batch y, por lo tanto, el flujo es menor que el flujo promedio batch, con un requisito de área de membrana correspondientemente mayor.

*continuous single-pass operations:* La concentración de la corriente de alimentación aumenta gradualmente a lo largo de varias etapas de módulos de membrana dispuestos en serie. El alimento solo alcanza su concentración final en la última etapa. No hay reciclaje y el sistema tiene un tiempo de residencia bajo.

