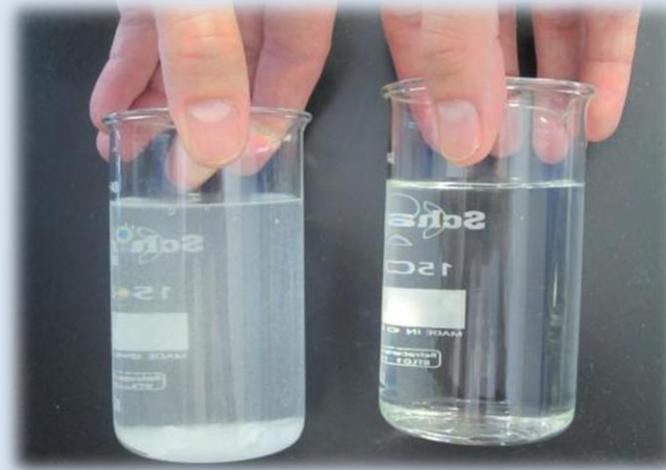


# OSMOSIS DIRECTA

## ESTADO ACTUAL Y PERSPECTIVAS DE FUTURO



*Xavier Simón*



*Environmental & Bio Technologies | CIRCULAR ECONOMY*



Cátedra FACSA de innovación  
en el ciclo integral del agua

UNIVERSITAT  
JAUME·I

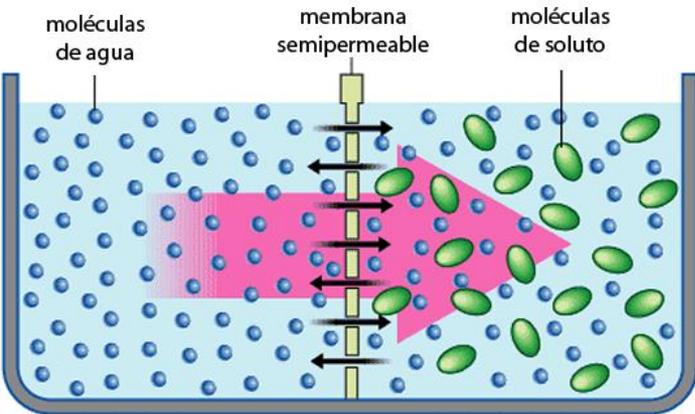
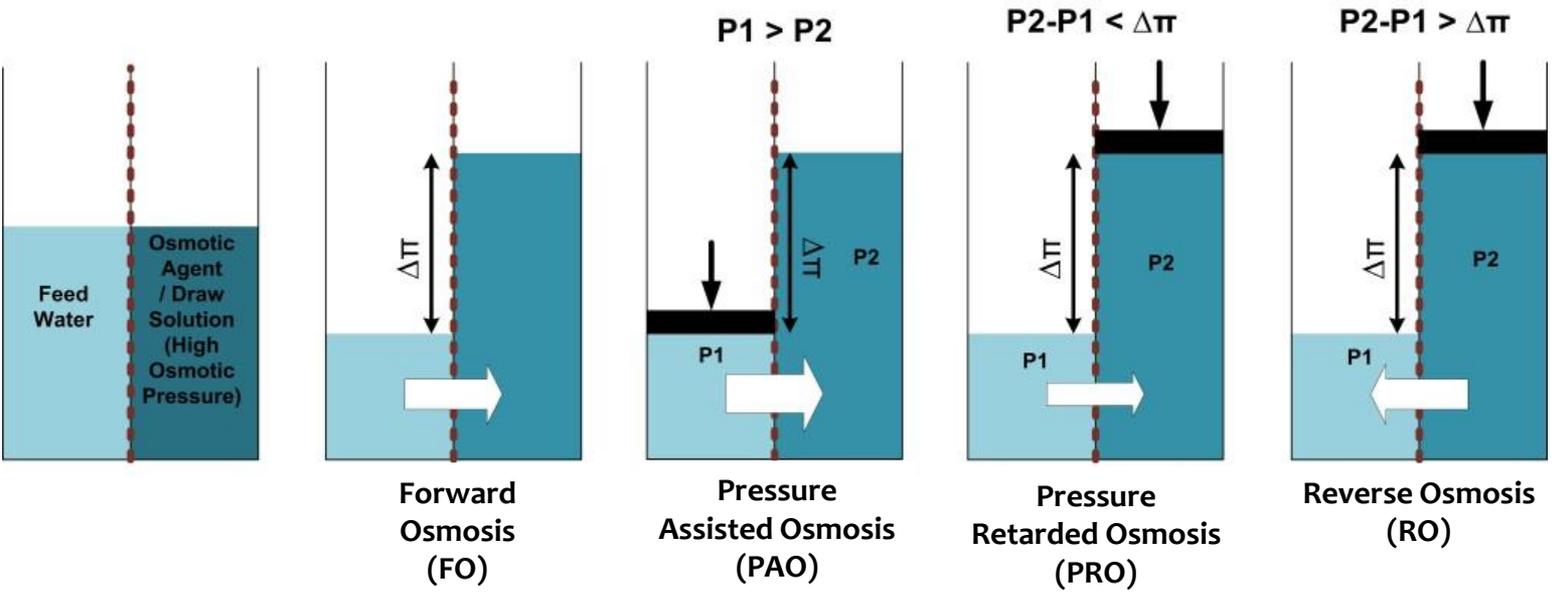
Castellón

14 diciembre 2017

- Procesos Osmóticos
- Osmosis Directa (OD)
- Componentes: Sol. alimento | Sol. extractora | Membranas
- Polarización int./ext. | Fouling | Limpieza
- Aplicaciones y ejemplos de la OD:
  - Desalinización de agua
  - Reutilización de agua
  - Aguas residuales urbanas / deshidratación de fangos
  - Aguas industriales
  - Lixiviados de vertedero
  - Generación de energía (blue energy)
  - Fertirrigación
  - Concentración de productos (ej. alimentos líquidos)
  - Bolsas de hidratación
- Conclusiones y observaciones futuras

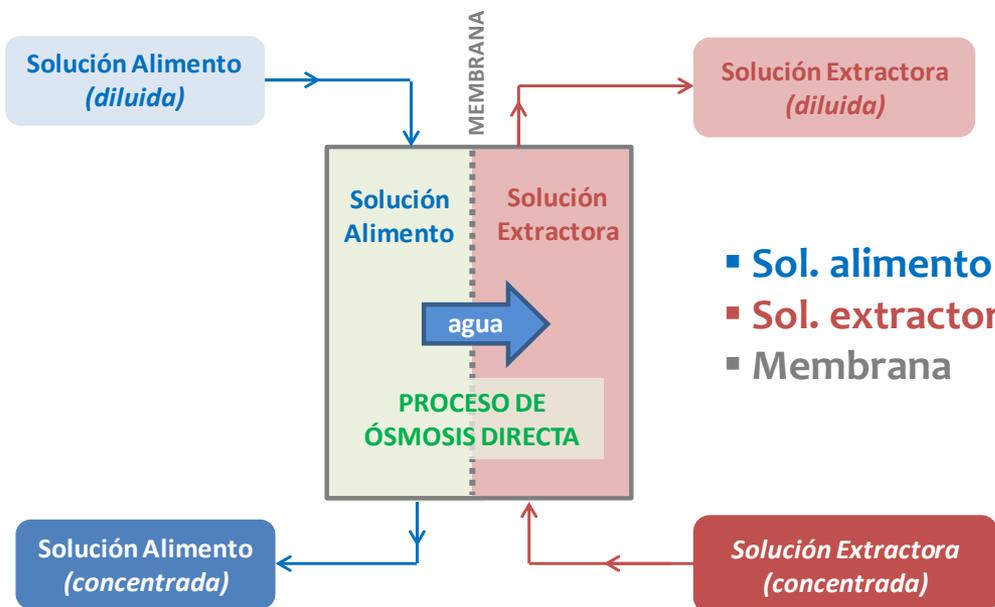
# Procesos Osmóticos?

Los **Procesos Osmóticos** utilizan la diferencia de presión osmótica ( $\pi$ ) de las soluciones a través de una membrana semipermeable “para extraer agua de una solución de diluida a una solución más concentrada”.

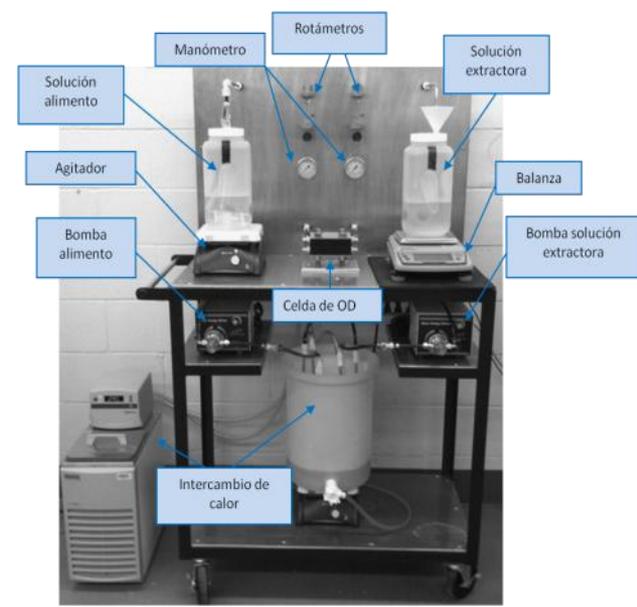


En la **Osmosis Directa (OD)** la diferencia de presión osmótica provoca la difusión del agua a través de una membrana semipermeable desde la **solución de alimentación** hasta la **solución extractora**.

# Proceso de Osmosis Directa (OD)



- Sol. alimento
- Sol. extractora/osmótica
- Membrana



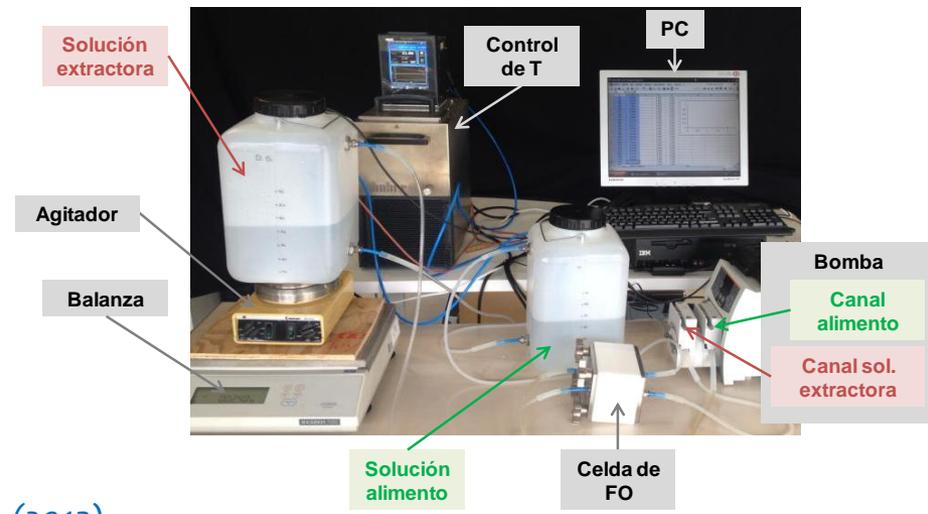
Anastasio and McCutcheon; 2013

$$J_w = A \left\{ \frac{\pi_D \exp\left(-\frac{J_w S}{D}\right) - \pi_F \exp\left(\frac{J_w}{k}\right)}{1 + \frac{B}{J_w} \left[ \exp\left(\frac{J_w}{k}\right) - \exp\left(-\frac{J_w S}{D}\right) \right]} \right\}$$

$$J_s = B \left\{ \frac{c_D \exp\left(-\frac{J_w S}{D}\right) - c_F \exp\left(\frac{J_w}{k}\right)}{1 + \frac{B}{J_w} \left[ \exp\left(\frac{J_w}{k}\right) - \exp\left(-\frac{J_w S}{D}\right) \right]} \right\}$$

$J_w, J_s$ : Flujo de agua/sal  
 $\pi_D, \pi_F$ : Presión osm. sol. alimento/extractora  
 $A, B$ : Permeabilidad del agua/sal  
 $D$ : Difusividad del soluto  
 $k$ : Coeficiente de transferencia de materia  
 $S$ : Parámetro estructural de la membrana (espesor, tortuosidad, porosidad)

Tirafferri et al., J. Membr. Sci. (2013)





- **Agua de mar**
- **Agua salobre**
- **Salmueras**
- **Aguas residuales**
- **Lixiviado de vertedero**
- **Fangos de depuradora**
- **Alimentos líquidos**
- ...



# Solución osmótica - I

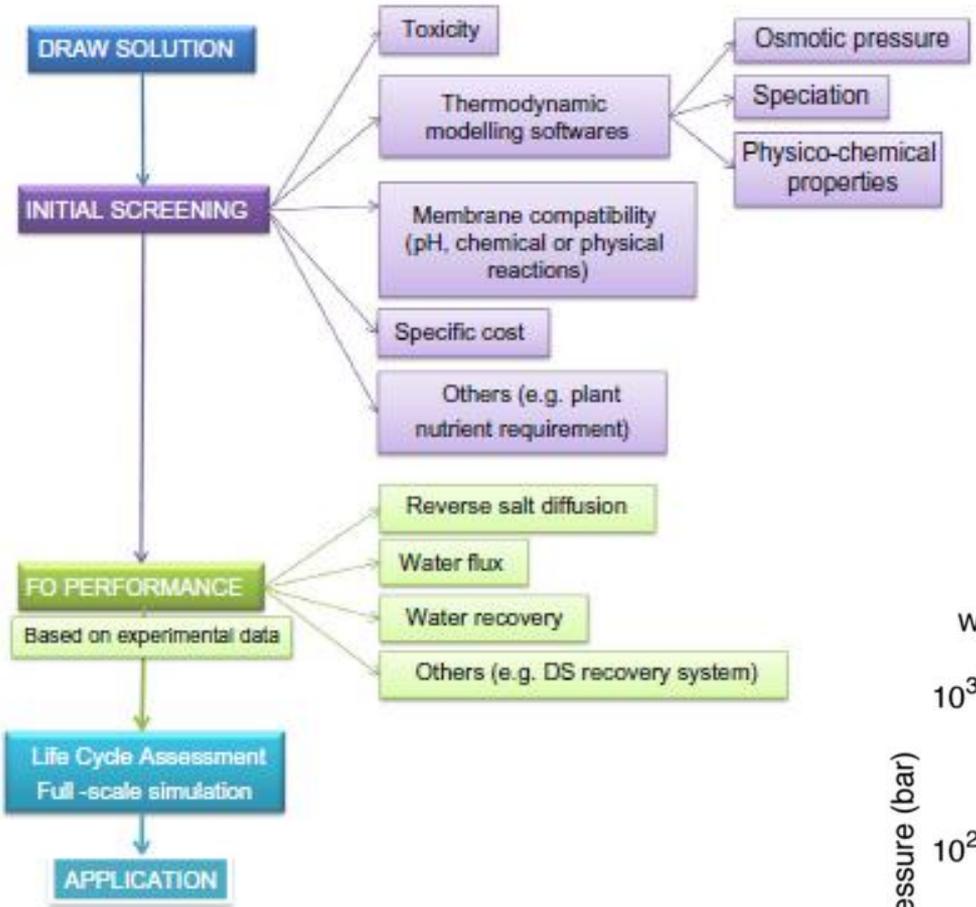
- Capaces de generar  $\pi \uparrow$
- Ser estables
- No reaccionar con la membrana
- Solubles en agua
- Baja difusión a través de la membrana
- Fácilmente regenerable/reutilizable
- Coste

*Ge et al. J. Membr. Sci. (2013)*

*Klaysom et al. Chem. Soc. Rev. (2013)*

	Soluto	Regeneración	Ventaja	Desventaja
Inorgánicos	NaCl, MgCl <sub>2</sub> , NaSO <sub>4</sub>	NF, RO, destilación	Barato, fácilmente disponible	Dificultad de separación
	Carbonatos metálicos, oxalatos, tartratos	Cambio de pH y filtración	Bajo coste de producción	CAPEX elevado
	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	Precipitación multi-etapa	Elevada pureza del producto	Consumibles químicos, diseño a gran escala
Termolíticos	SO <sub>2</sub>	Stripping del gas	Proceso de regen. barato	Toxic
	NH <sub>3</sub> -CO <sub>2</sub>	Termolisis (60°C)	Elevada pureza del producto, elevada $\pi$ , reconc. con calor residual	Toxic
Orgánicos	Alcoholes	Destilación		Difícil de separar
	Glucosa y otros azúcares	No es necesario	No es necesaria la separación	Aplicaciones limitadas
	Albúmina	Desnaturalización y solid. si se calienta	Elevada solubilidad en agua	Baja $\pi$
	2-metilimidazol y derivados	FO-MD	Diseñar con elevada $\pi$	Aumenta el ICP si se modifica
	Acetato de Mg y otras sales org.	Biodeg. en un OsMBR	Fuente de C	Aplicaciones limitadas
Polímeros	Polietilenglicol (PEG)	UF o NF	Fácilmente recuperable	Baja $\pi$
	Ác. grasos derivados de PEG	Precipitación y filtración	Elevada $\pi$	Necesario control de T
	Ácido poliacrílico	UF	Elevada $\pi$ (disociación grupos)	Aumenta la $\mu$
	Hidrogel	Deshidratación con T / P	Deshidratación a partir del sol	Bajo flujo de agua
	NP magnéticas	Campo magnético o UF	Fácil recuperacion, no hay flujo reverso	Agregación

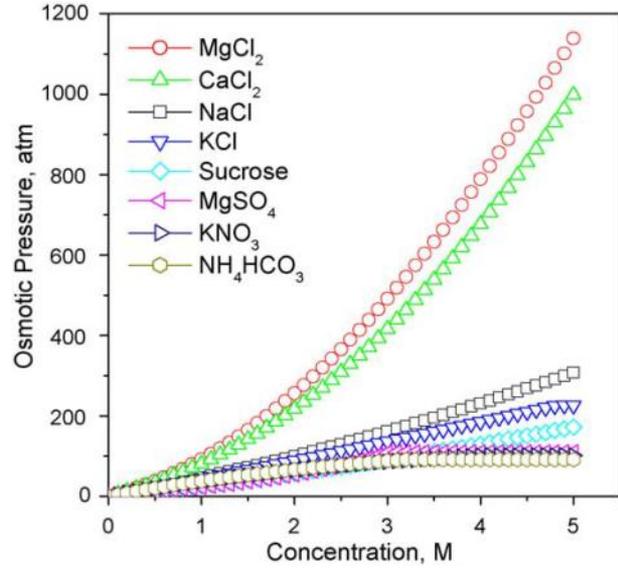
# Solución osmótica - II



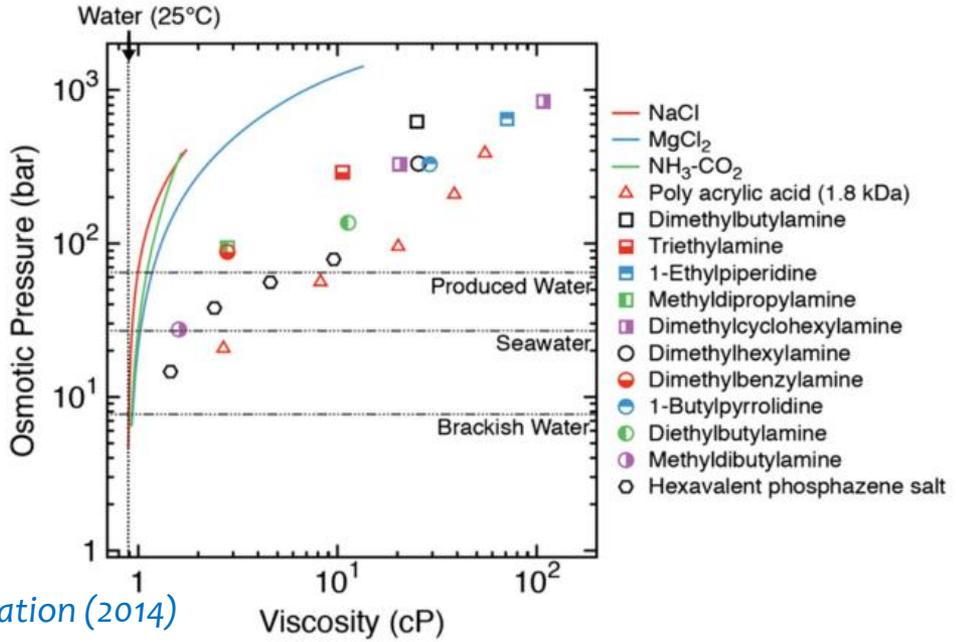
Chekli et al., Desalin. Water Treat. (2012)

Las sales solubles inorgánicas y termolíticas siguen siendo las más ampliamente utilizadas y las más efectivas.

Shaffer et al. Desalination (2014)



Cath et al. J. Memb. Sci (2006)



# Membranas de OD - I

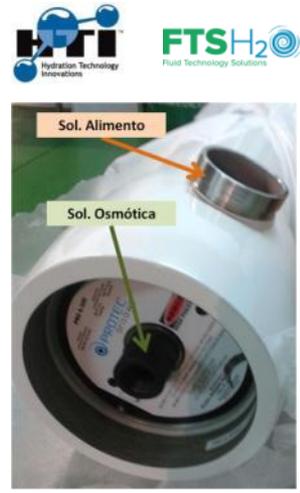
- Elevada permeabilidad al agua
- Elevada retención de sales
- Baja polarización de la concentración
- Buena estabilidad química y mecánica
- Asimétricas
- Acetato de celulosa (CA) / Compuestas (TFC)
- Espesor de  $\approx 150 \mu\text{m}$  (capa activa  $\approx 50 \mu\text{m}$ )

## Configuraciones | Proveedores:

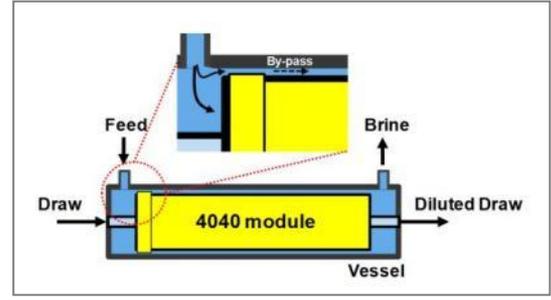
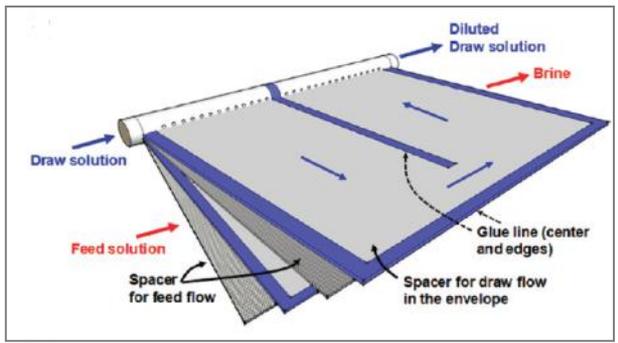
Hoja Plana



Hoja Plana



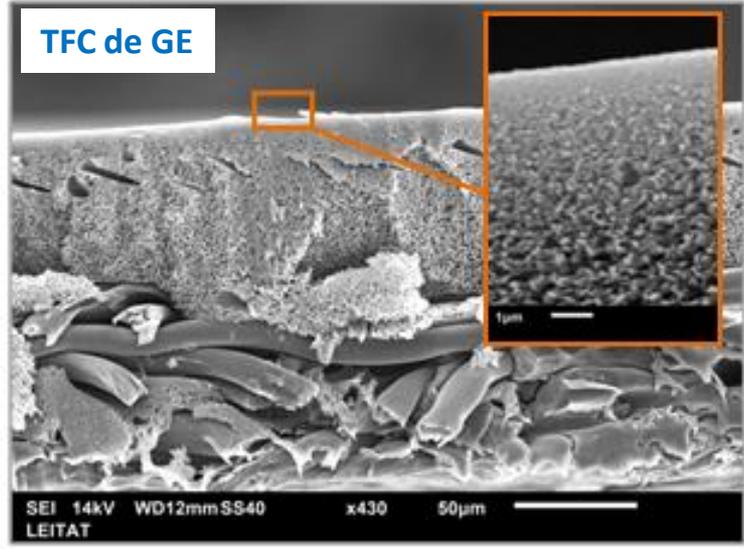
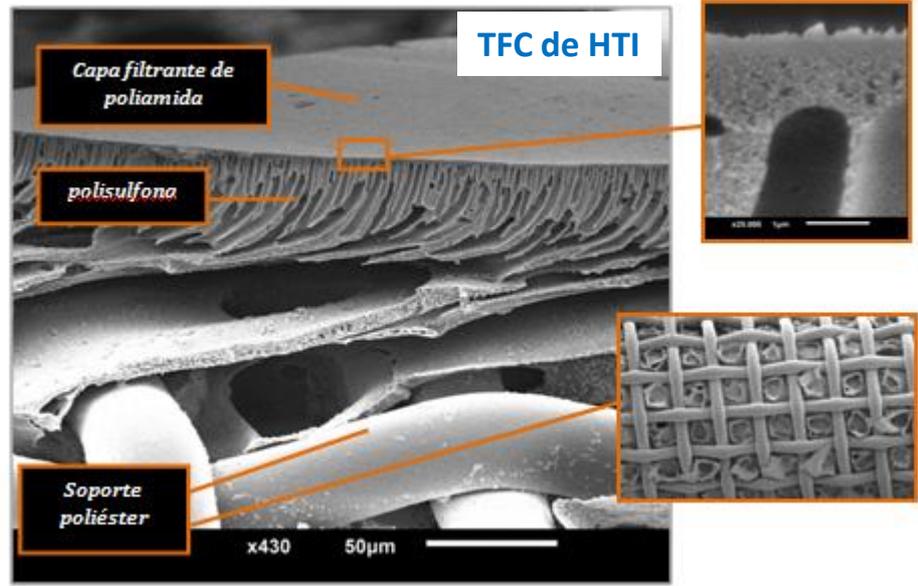
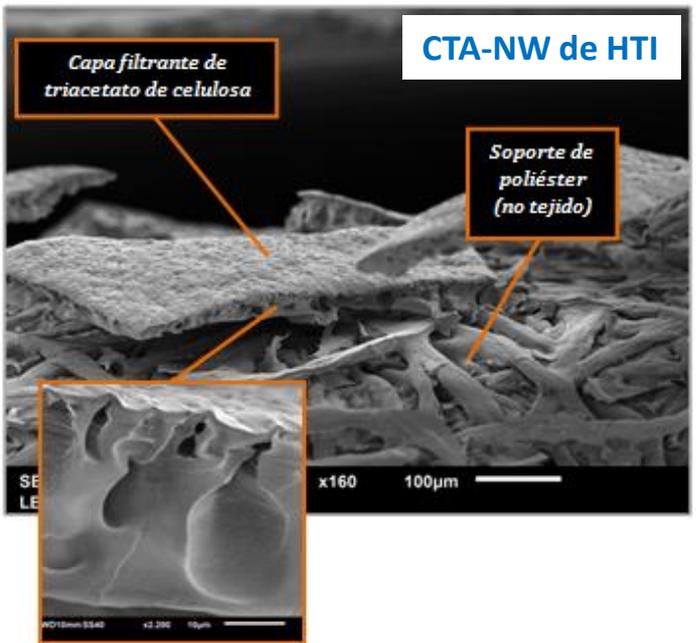
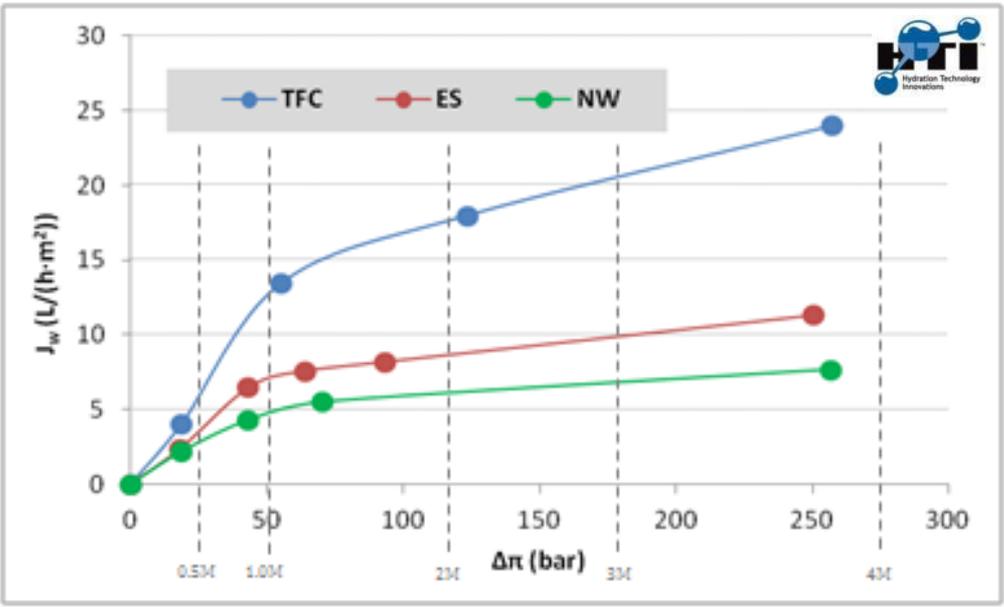
Kim & Park Environ. Sci. Technol. 2011

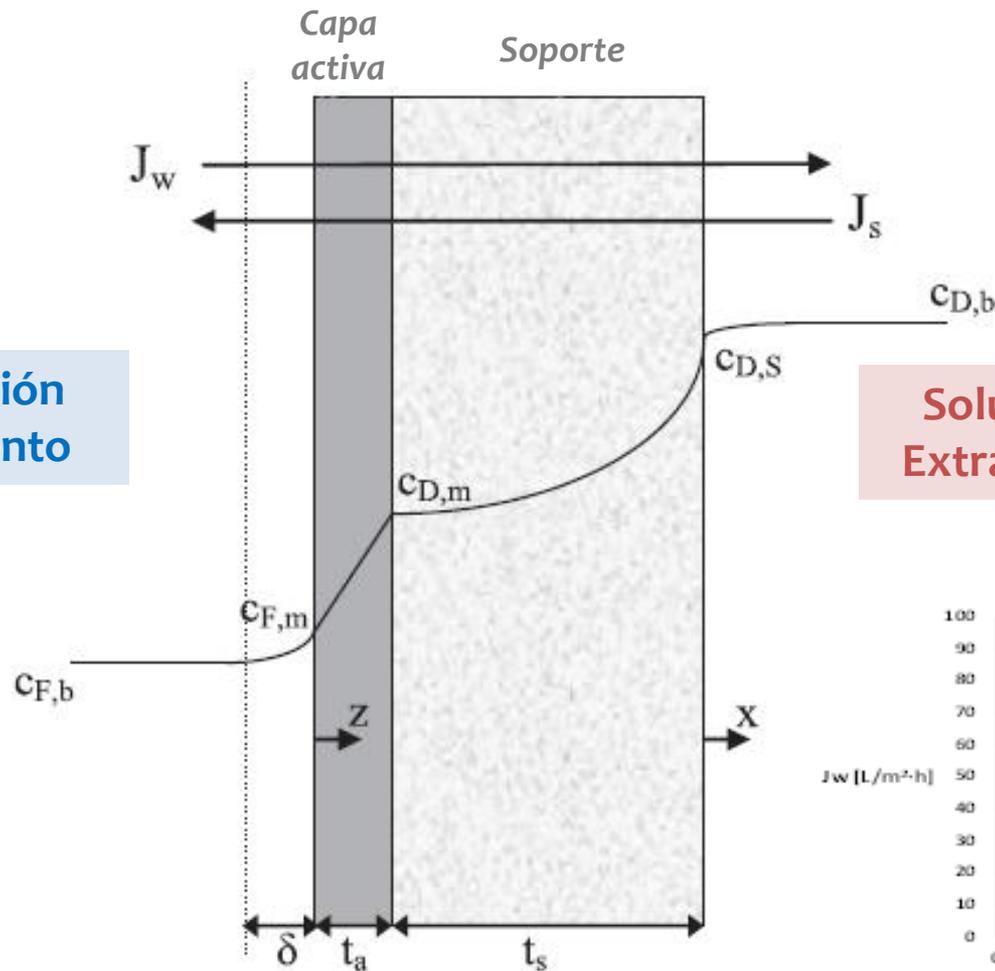


Fibra Hueca



# Membranas de OD - II

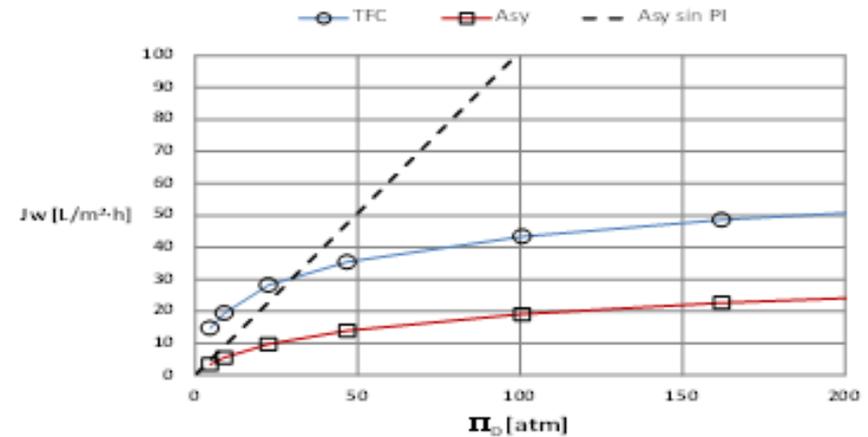




$$J_w = A(\Delta\pi_m)$$

Solución Alimento

Solución Extractora



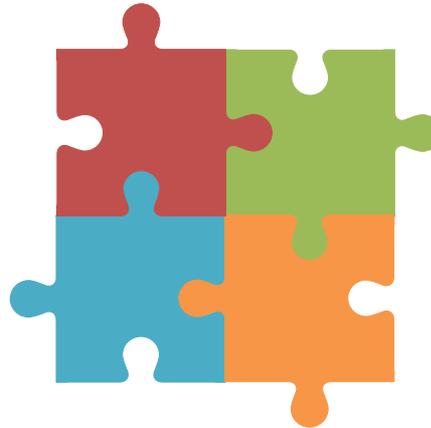
La polarización interna dentro del soporte poroso de la membrana (ICP) y la polarización de la concentración externa (ECP) hacen que la  $\Delta\pi$  efectiva sea menor que la que es en el seno de los dos fluidos

## Fouling coloidal

Deposición de partículas coloidales

## Fouling orgánico

Deposición y adsorción de compuestos orgánicos macromoleculares



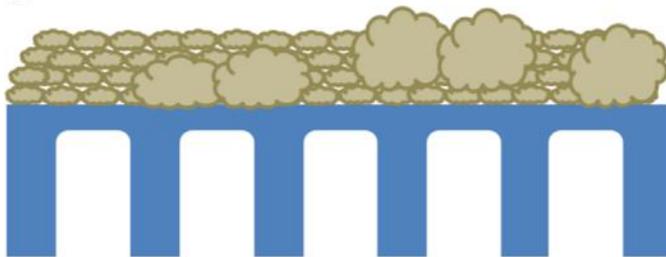
## Biofouling

Adhesión y acumulación de microorganismos y desarrollo de biofilm.

## Scaling inorgánico

Precipitación o cristalización de compuestos inorgánicos

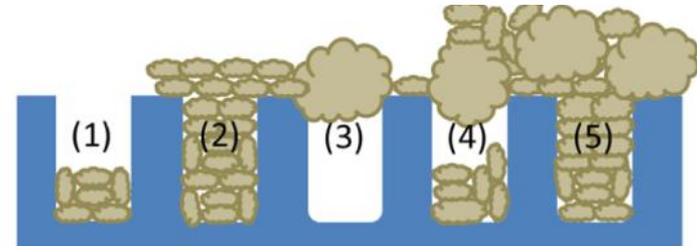
### Capa activa orientada a la solución alimento



Deposición de fouling en la superficie de la capa activa de la membrana y posterior formación de la “torta”.

*She et al., J. Membr. Sci. (2016)*

### Capa activa orientada a la solución extractora



- (1) Si el fouling tiene un tamaño pequeño puede entrar en el soporte poroso
- (2) Taponamiento interno del poro
- (3) Si el fouling tiene un tamaño más grande la deposición es en la parte exterior del poro
- (4) y (5) cuando el fouling contiene fouling de tamaño pequeño y grande

## Limpieza Física

- Lavado superficial (surface flushing)
- Lavado con aire (air scouring)
- Contralavado (backwashing)

—————> **Osmotic backwashing** *Blandin et al., Membrane (2016)*

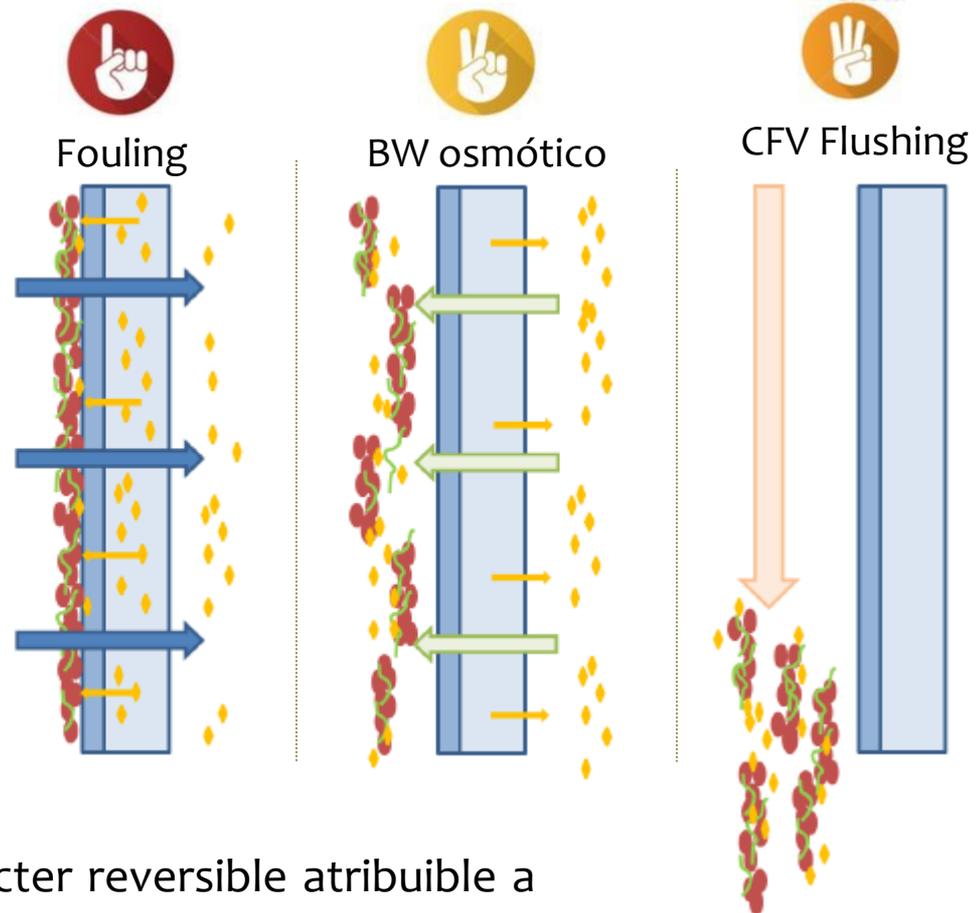
## Limpieza Química

- NaOH
- EDTA
- NaOCl
- Detergentes

## Limpieza Biológica

- Agentes bioactivos (ej. enzimas, QQ, QS)

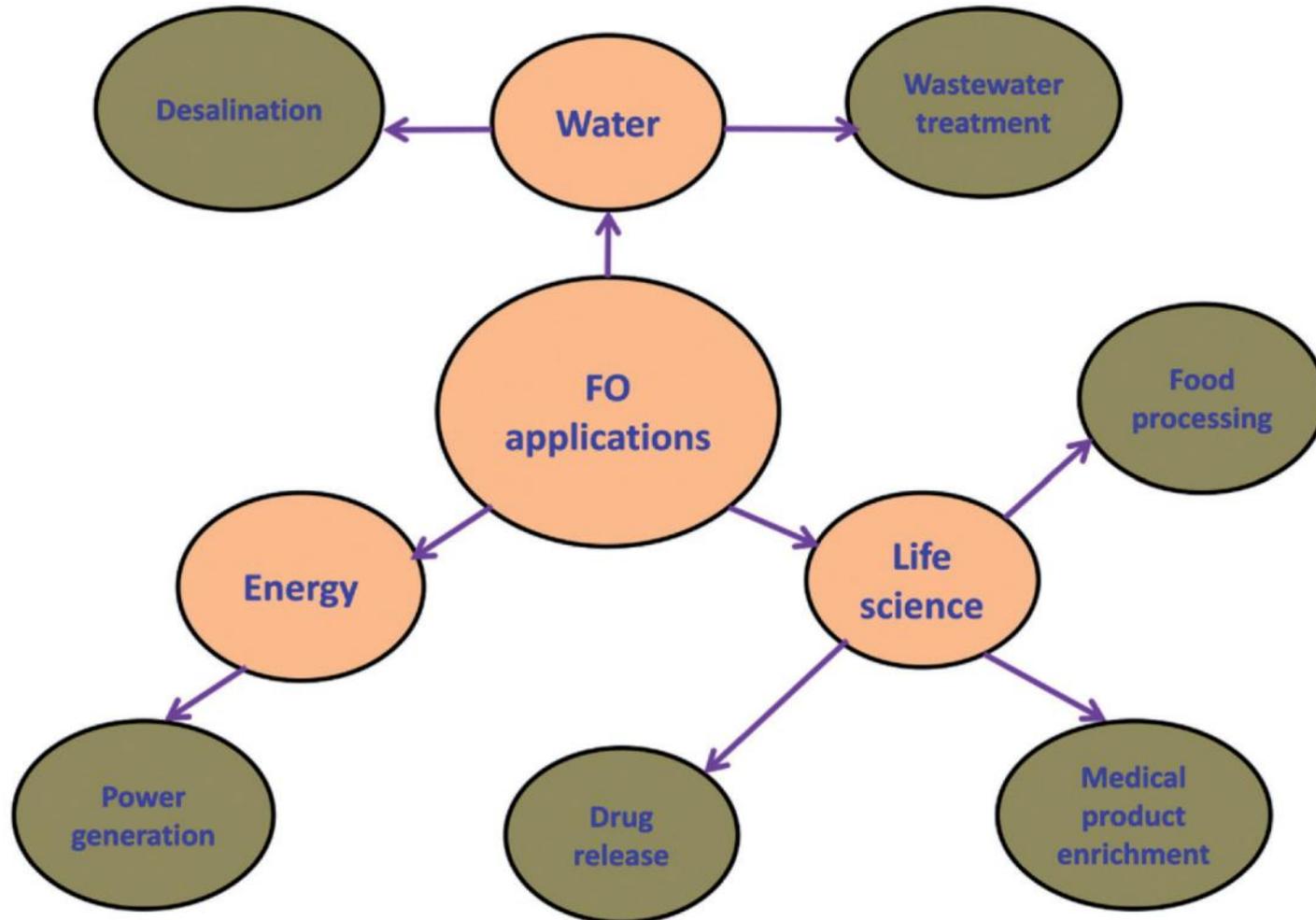
*She et al., J. Membr. Sci. (2016)*



El fouling (orgánico) en FO tiene un carácter reversible atribuible a una menor compactación gracias a la baja presión hidráulica.

La FO ofrece la ventaja de reducir los costes derivados de las limpiezas químicas.

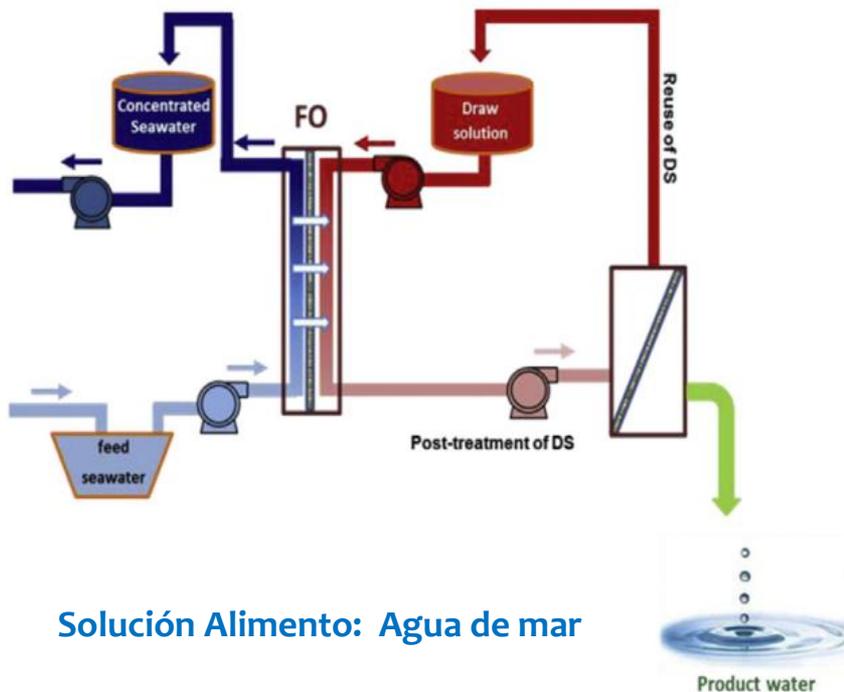
*Mi y Elimelech, J. Membr. Sci. (2010)*



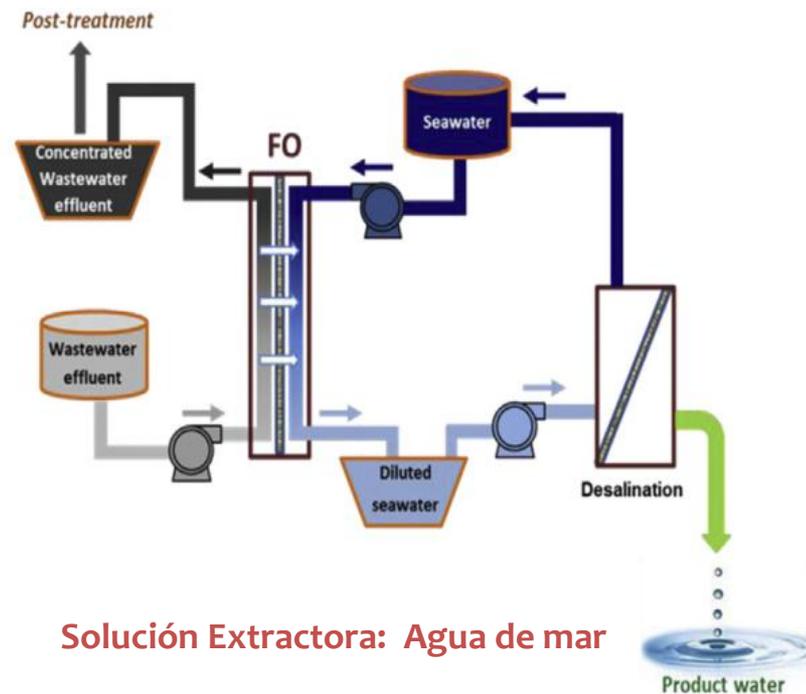
Zhao et al., *J. Membr. Sci.* (2012)

# Desalinización de agua - I

a) Desalinización directa



b) Desalinización indirecta



Valladares Linares et al. Water Research (2014)

## Ósmosis Inversa ó Ósmosis Directa (+ regeneración de la solución extractora)?

RO vs. FO

$NF_{MgSO_4}$   
 $UF_{nanoPAA}$   
 $Dest_{CO_2-NH_3}$

Consumo energético en kWh/m<sup>3</sup> (modelización con ASPEN):

- RO  $\approx$  FO +  $NF_{MgSO_4} \approx$  FO +  $UF_{nanoPAA} \rightarrow$  CAPEX...

- RO > FO +  $Dest_{CO_2-NH_3} \rightarrow$  NH<sub>3</sub> residual en el permeado...

Mazlan et al. Desalination (2016)

# Desalinización de agua - II



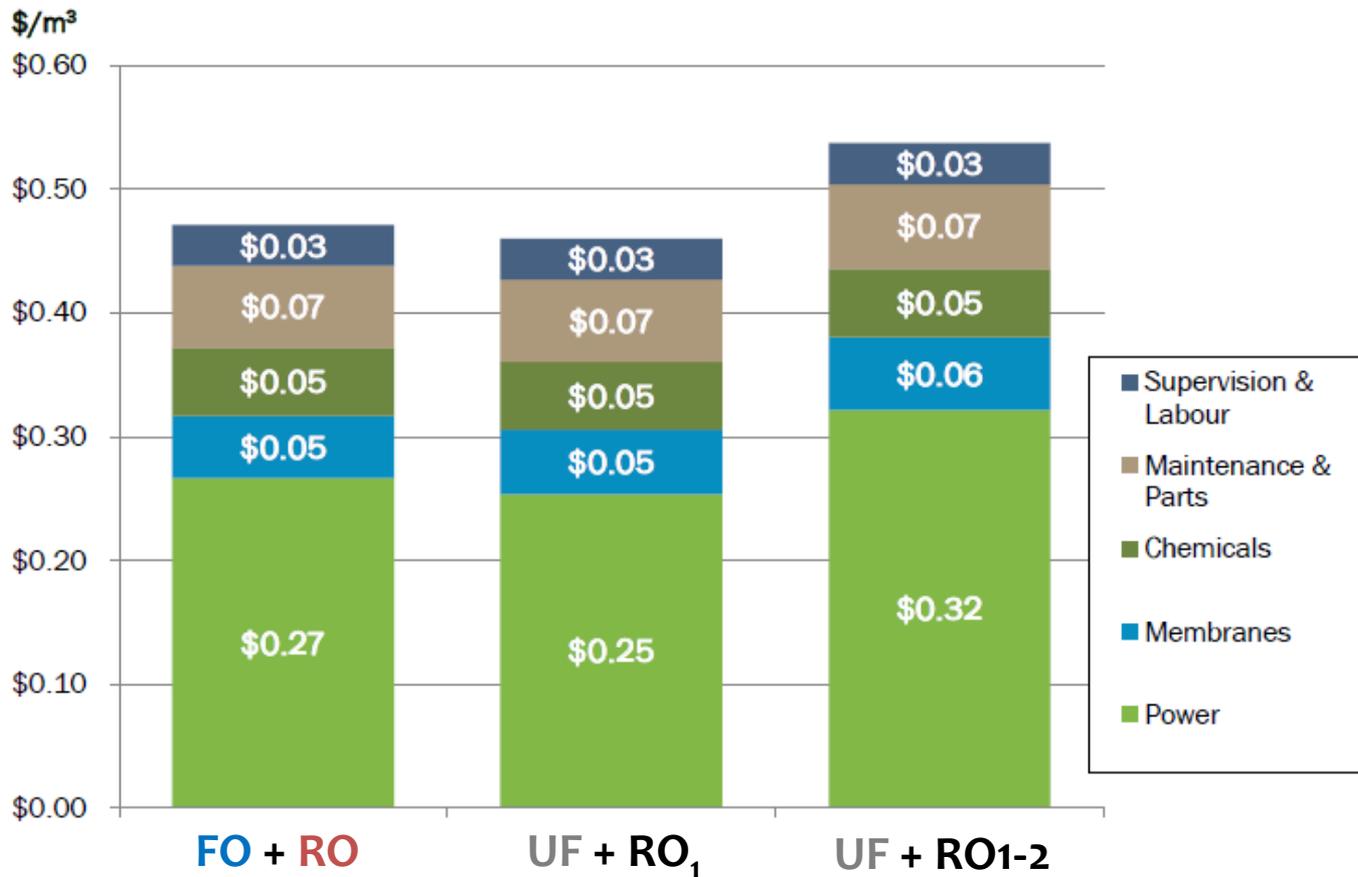
Gibraltar, Reino Unido  
25 m<sup>3</sup>/día

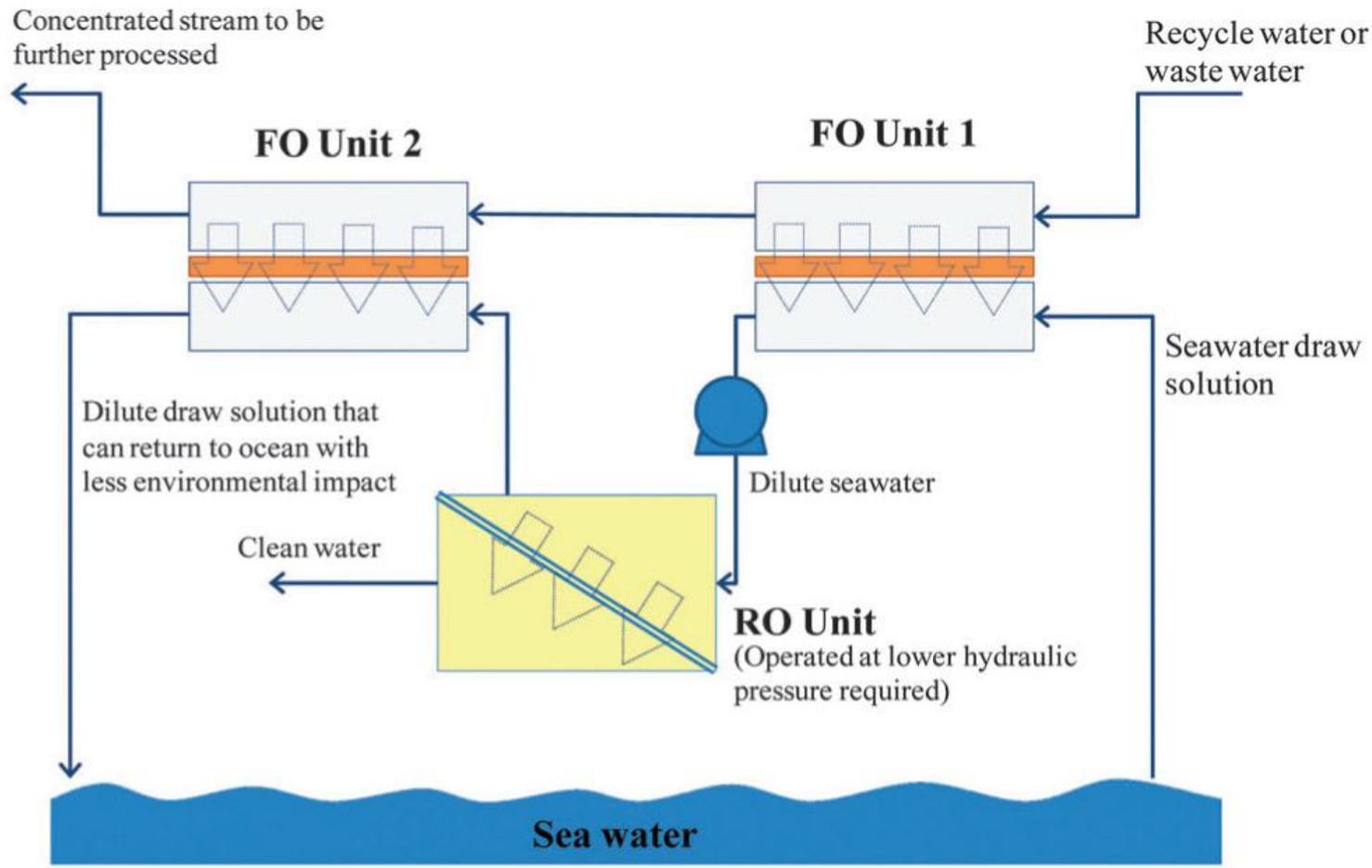


Al Khaluf, Omán  
100 m<sup>3</sup>/día



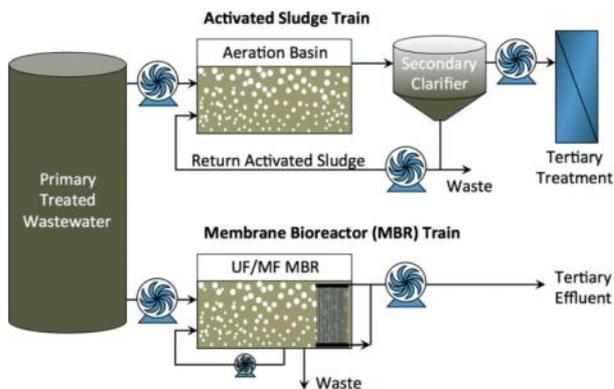
Al Najdah, Omán  
200 m<sup>3</sup>/día



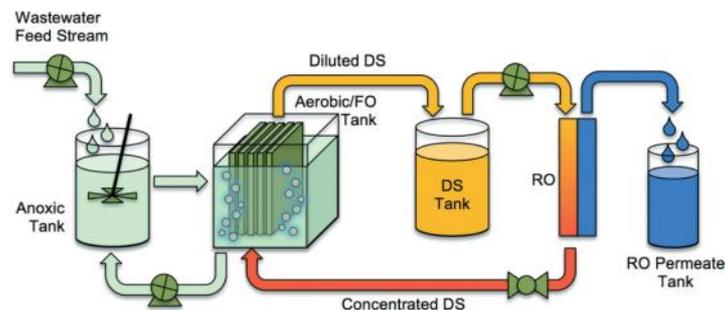


Cath et. al. J. Membr. Sci. (2010)

## MBR convencional con MF o UF



## El MBR osmótico utiliza una membrana de FO en vez de una MF o UF



*Coday et al. Water Res. Technol. (2015)*

### **VENTAJAS**

- Rechazos más altos de contaminantes
- Carga orgánica en el biorreactor ↑
- Menor propensión al fouling
- Doble barrera con membrana densa para reutilización

### **INCONVENIENTES**

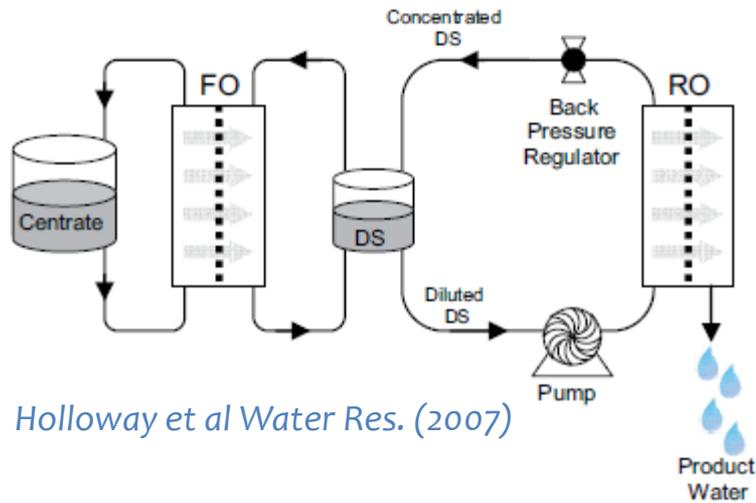
- Salinización del biorreactor
- Decrece la fuerza impulsora

*Blandin et al. Membranes (2016)*



*Coday et al. Desalination (2014)*

## Ecurridos de centrífuga



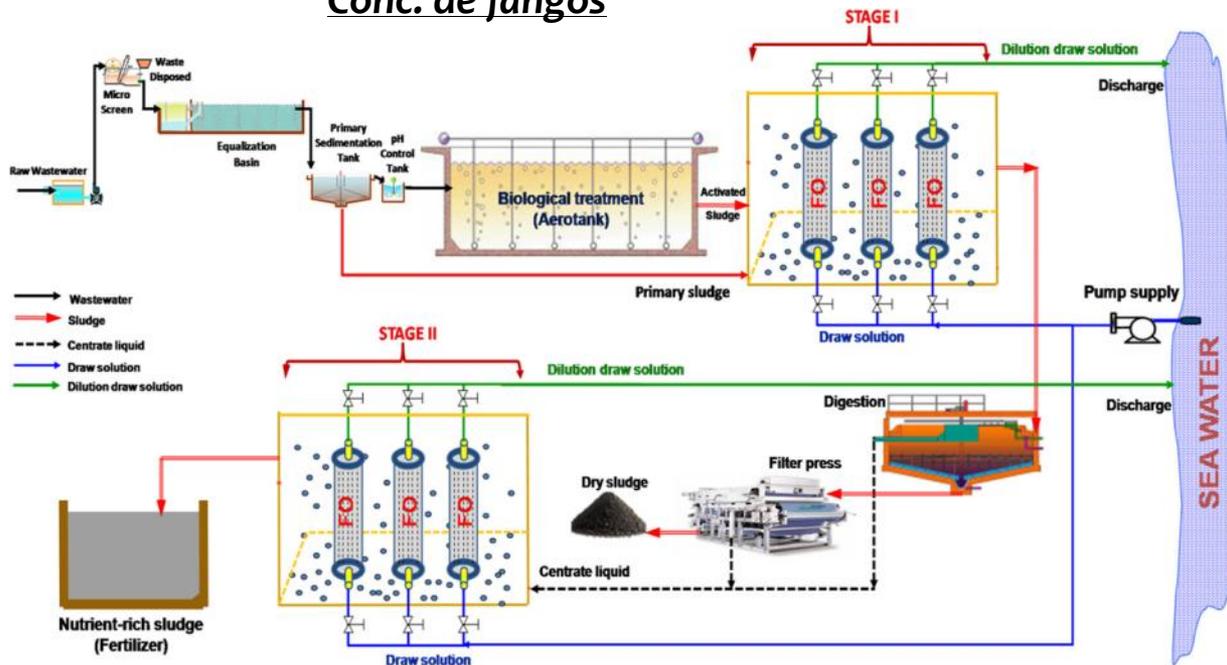
Holloway et al Water Res. (2007)

Recuperación de agua: 70%

	Alimento [mg/L]	Rechazo
NH3	1300	87%
TKN	1400	92%
Ortho-phosphate	240	99%



## Conc. de fangos



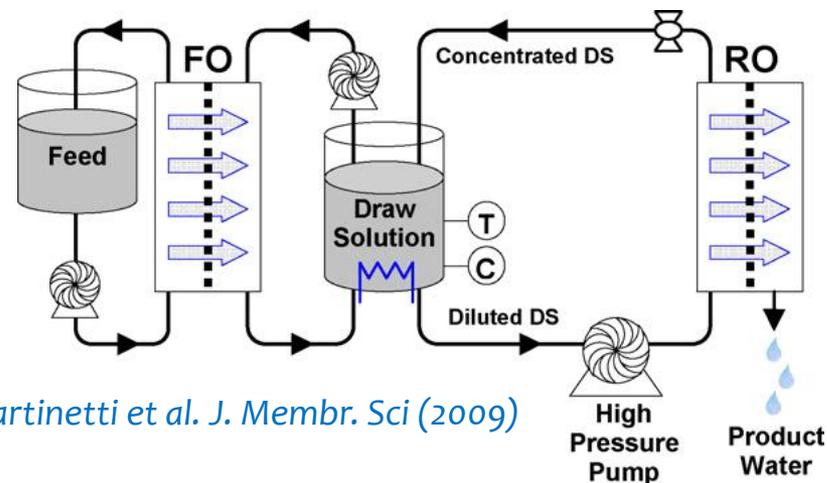
Concentración (4-7x) de licor mezcla de 3-8 g/L hasta 22-29 g/L en 28 h

Retención del 96% de amonio, 98% de fosfato y 99% de DOC

Nguyen et al. Bioresour. Technol. 2013

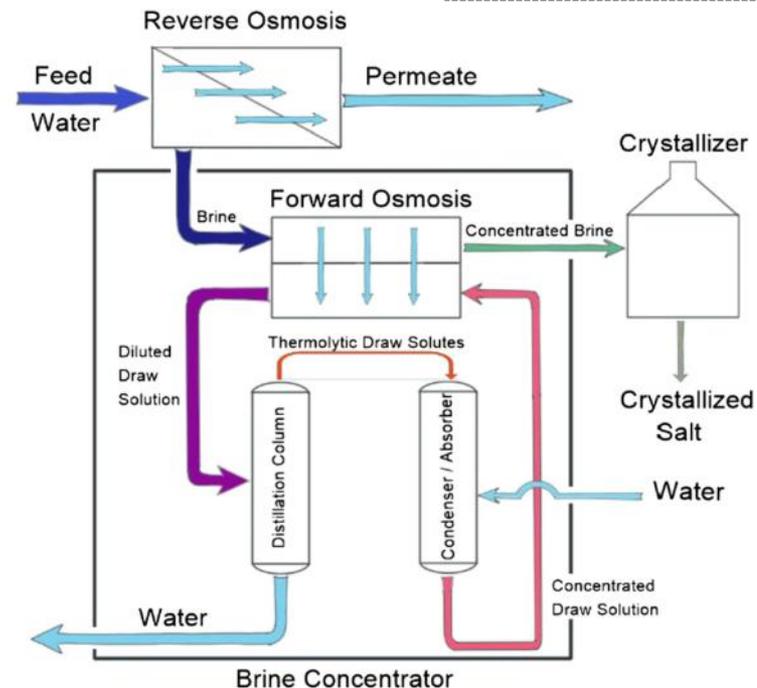
# Tratamiento de salmueras y ZLD

- Solución alimento: Rechazos de OI con TDS 7,5 g y 17,5 g/L
- Recuperación de agua del 90%
- Limitaciones debido a precipitaciones de sales en la membrana

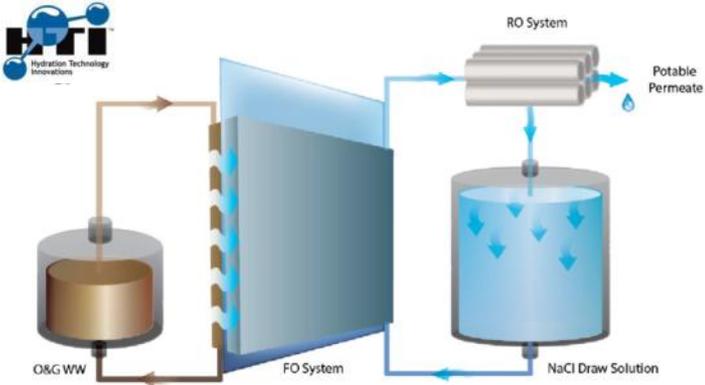
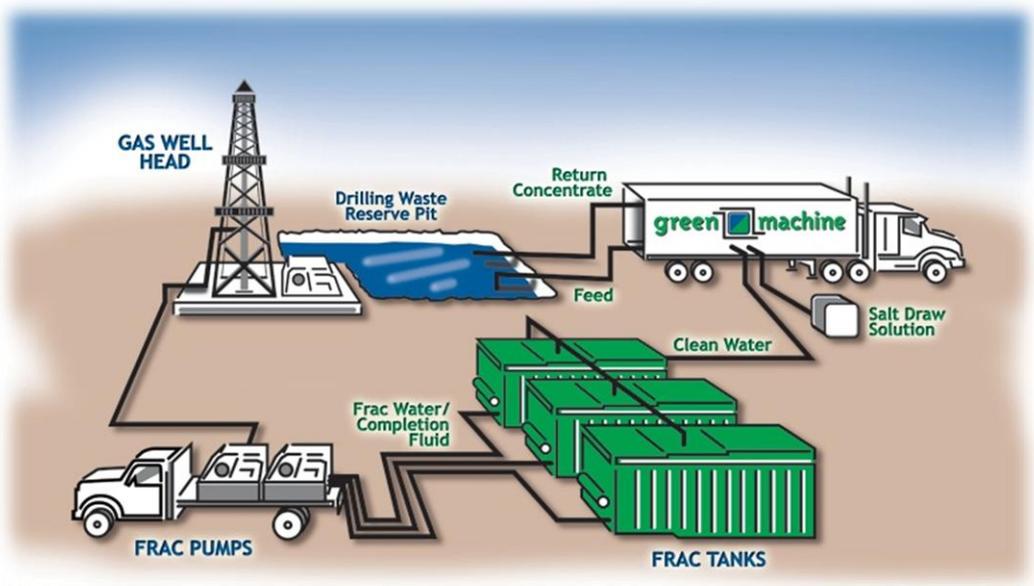


Extracción de agua de un rechazo salino aguas arriba de un cristalizador empleando una **solución extractora termolítica**

Shaffer et al., Desalination (2014)



# Tratamiento del agua del O&G



	Agua O&G	Agua producida	Reducción
Turb	1120	1,46	99,9%
TSS	517	15	97,1%
Alk	500	30,2	94,0%
pH	7,36	7,08	-
TOC	57,9	1,64	97,2%

*Coday et al. Desalination (2014)*

# Lixiviados de vertedero

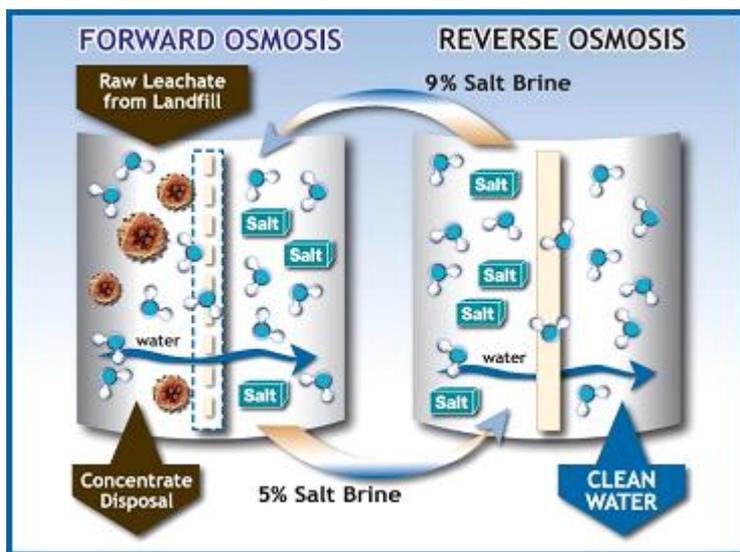
Al = 1320; As = 39; Ba = 305; Cd = ND; Ca = 91600; Cr = 146;  
Cu = 16; Pb = 8670; Mg = 73700; Mn = 1450; Ni = 81; P = 5740;  
K = 50000; Se = ND; Si = 35500; Ag = 7; Na = 1620000; Sr = 2370;  
Ti = 466; V = 132; Zn = 531

[µg/L]

Alc = 5000; BOD<sub>5</sub> = 472; COD = 3190; F = 1;  
N-NH<sub>3</sub> = 1110 mg/L; TKN = 780; pH = 8;  
TDS = 2380; SST = 100; Cond = 9940 µS/cm

[mg/L]

## Lixiviado de vertedero municipal



**Calidad**

ND: Al; As; Cd; Cr; Cu; Pb; Mn; Ni; P; Se;  
Si; Ag; Sr; Ti; V; Zn  
Ba = 1  
Ca = 150; Fe = 24; Mg = 33; K = 543;  
Na = 3990

[µg/L]

ND: F; COD; TKN; SST  
Alc = 4; BOD<sub>5</sub> = 2 N-NH<sub>3</sub> = 1; pH = 5.6;  
TDS = 48; Cond = 25 µS/cm

[mg/L]

- Caudal de tratamiento: 95.000 m<sup>3</sup>/día
- Superficie de membrana: 2.500 m<sup>2</sup>
- Reducción de volumen: 90%
- Eliminación de contaminantes: > 99%
- Solución extractora: NaCl 9%
- Regeneración mediante OI (75 bar)
- Post-tratamiento del lixiviado: Solidificado
- Limpieza de la OD: 1 vez/semana



Coday et al. Desalination (2014)

Cath et al., J. Membr. Science (2006) <http://www.htiwater.com/>

# Generación de energía (blue energy)

En un sistema PRO, la solución alimento con baja salinidad (ej. agua de un río) permea la membrana hacia una solución osmótica presurizada con elevada alta salinidad (ej. agua de mar).

La potencia se obtiene despresurizando una parte de la agua de mar diluida a través de una hidroturbina.



2,8 W/m<sup>2</sup> | Agua dulce y agua de mar (35 g/L)

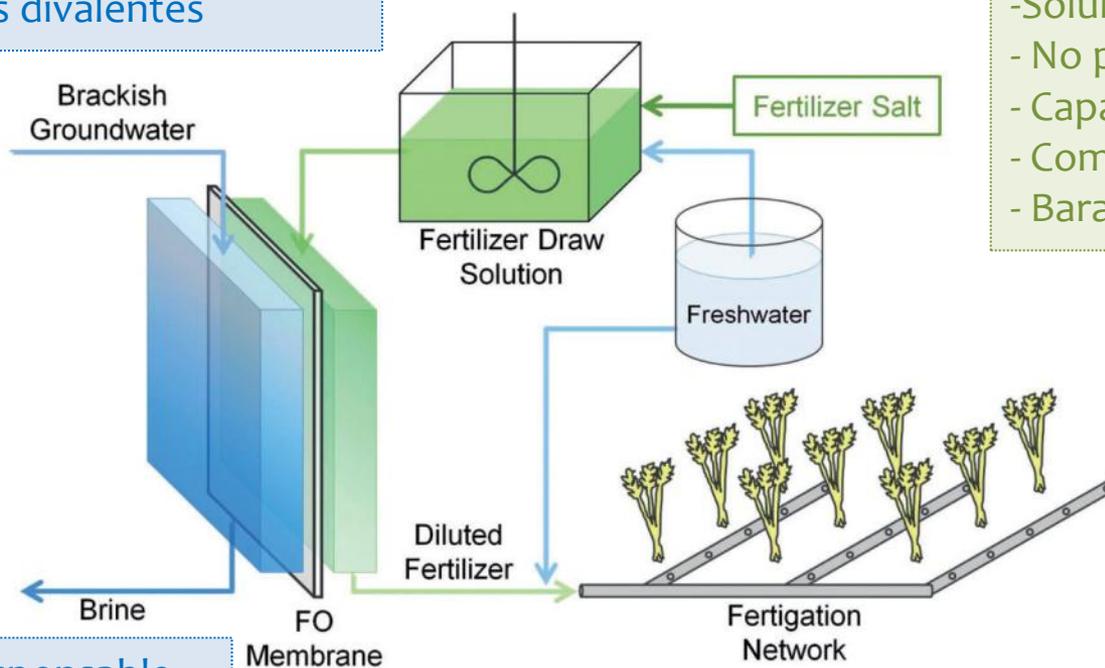
5.1 W/m<sup>2</sup> | Agua dulce y salmuera (60 g/L)

Achili et al. J. Mem. Sci. (2012)

# Fertirrigación

Se utiliza la solución de fertilizante (concentrada) como solución extractora para que una vez diluida a partir de una fuente impropia de agua se puede valorizar como fertilizante

NF para rechazar:  
50-80% iones monovalentes  
60-99% iones divalentes



- Soluble en agua
- No permeable a la mem.
- Capaz de generar  $\pi \uparrow$
- Compatible (ej. pH)
- Barata



Gestión responsable

Hoover et al., *Environ. Sci. Technol* (2011)

Phuntsho et al., *J. Membr. Sci.* (2011)    Phuntsho et al., *Environ. Sci. Technol.* (2012)

# Concentración de productos (ej. alimentos líquidos)

Alimento	Solución extractora	Flujo de agua kg/(m <sup>2</sup> ·h)	Parámetros de calidad evaluados	Referencia
zumo de uva	NaCl (8M)	2,5	organolépticos	Popper et al. (1966) <sup>1</sup>
zumo de naranja	Jarabe de azúcar (72° Brix)	4	n.m.	Beaudry and Lampi (1990) <sup>2</sup>
frambuesa	Jarabe de maíz- fructosa (69° Brix)	1,4	organoléptico, antocianina	Wrolstad et al. (1993)
zumo de naranja, café	Furctosa-glucosa (74° Brix)	4	organoléptico, sólidos solubles	Herron et al. (1994) <sup>4</sup>
zumo de tomate	NaCl (4M)	3,1	n.m.	Petrotos et al. (1998) <sup>3</sup>
rábano rojo	Jarabe de maíz (60° Brix)	1,2	antocianina, color, organoléptico	Rodriguez-Saona et al. (2001) <sup>6</sup>
sucrosa-glucosa	NaCl (4M)	4,5	n.m.	Dova et al. (2007) <sup>7</sup>
zumo de piña	NaCl (4M), NaCl - sucrosa (2,75M - 0,9M)	1,6 / 1,2	organoléptico, sólidos solubles	Babu et al. (2006) <sup>8</sup>
sacarosa	NaCl (4M)	5,8	sólidos solubles	Garcia-Castello et. al. (2010) <sup>9</sup>
extracto de karité	NaCl (6M)		antocianina, ácido hidroxidocítrico	Nayak and Rastogi (2010) <sup>10</sup>
zumo de tomate	NaCl (4M)	3,5	color, sólidos solubles	Petrotos et al. (2010) <sup>1</sup>
Licor de laranja	NaCl (4M)	8	sólidos solubles	Garcia-Castello et al. (2011) <sup>12</sup>
remolacha		7,5	sólidos solubles,	
piña	NaCl (6M)	6,5	betalina, antocianina,	Nayak et al. (2011) <sup>13</sup>
uva		4	color, pH, densidad, viscosidad	

OSMODIR



- Cloruro sódico
- Jarabe Gluc-Fruc
- Conc. de Manzana

- Técnicamente puede alcanzar los XX °Bx?
- Organolépticamente mejora el producto?

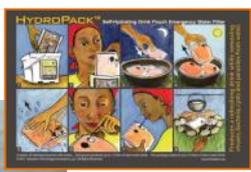


Fase I



Fase II

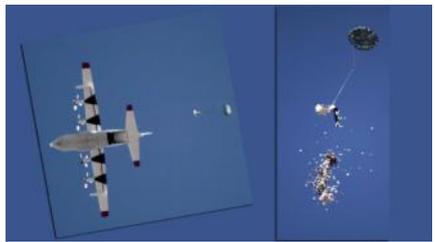
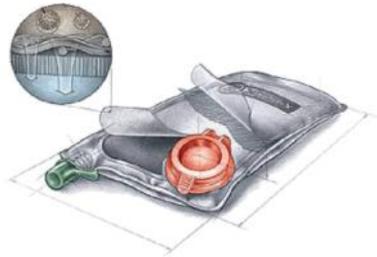




Agua NO potable  
-----  
Solución azucarada



Bebida azucarada



IFOA Summit (Lisbon; 2014)

- Identificación de **nuevas aplicaciones** y **nichos de mercado** que permitan realzar las ventajas de la osmosis directa frente a otras tecnologías competencia.
- La OD tiene por delante varios desafíos relacionados con la mejora de la eficiencia actual:
  - Nuevas **membranas** más productivas y con mejores prestaciones estables tanto mecánicamente como químicamente, alta hidrofiliidad y permeabilidad al agua, alto rechazo al soluto y con mínimo soporte para reducir la polarización interna.
  - Nuevas **soluciones osmóticas** (capaces de generar elevadas presiones osmóticas, bajo coste de regeneración y reconcentración, con baja toxicidad y químicamente no reactiva con la membrana)
- Realización de **pilotajes** que permitan asegurar el escalado y determinar la viabilidad tecnológica y económica de la OD para una aplicación determinada.

## Leitat

Acondicionamiento Tarrasense

Tel. (+34) 93 788 23 00

Fax. (+34) 93 789 19 06

www.leitat.org

Info@leitat.org

### Terrassa

C/de la Innovació, 2

08225 Terrassa (Barcelona)

### Barcelona

**Districte 22@**

C/Pallars, 179-185

08005 Barcelona

### Barcelona

**Parc Científic de Barcelona**

C/Baldri Reixac, 15-21

08028 Barcelona

### Vilanova del Camí

**Centre d'Innovació Anoia**

C. dels Impressors, 12

08788 Vilanova del Camí (Barcelona)

### VHIR - Vall d'Hebron Institut de Recerca

**Edificio Mediterránea, Hospital Vall d'Hebrón**

Passeig de la Vall d'Hebrón, 119-129

08035 Barcelona

### Biopolo La Fe

Hospital La Fe, Torre A, Planta Baja

Avenida Fernando Abril Martorell, 106

46026 Valencia

# GRACIAS POR SU ATENCIÓN

**LEITAT**  
managing technologies

[xsimon@leitat.org](mailto:xsimon@leitat.org)



SOCIAL NET:



Impulsio  
Ciudad de la Ciencia  
y la Innovación  
Terrassa  
Vilanova del Camí