



Departamento de  
Ingeniería Química y  
Tecnología Farmacéutica  
Universidad de La Laguna

# Tema 8: Tratamientos avanzados

Tecnologías de Tratamiento y de Gestión de las Aguas

Oliver Díaz López

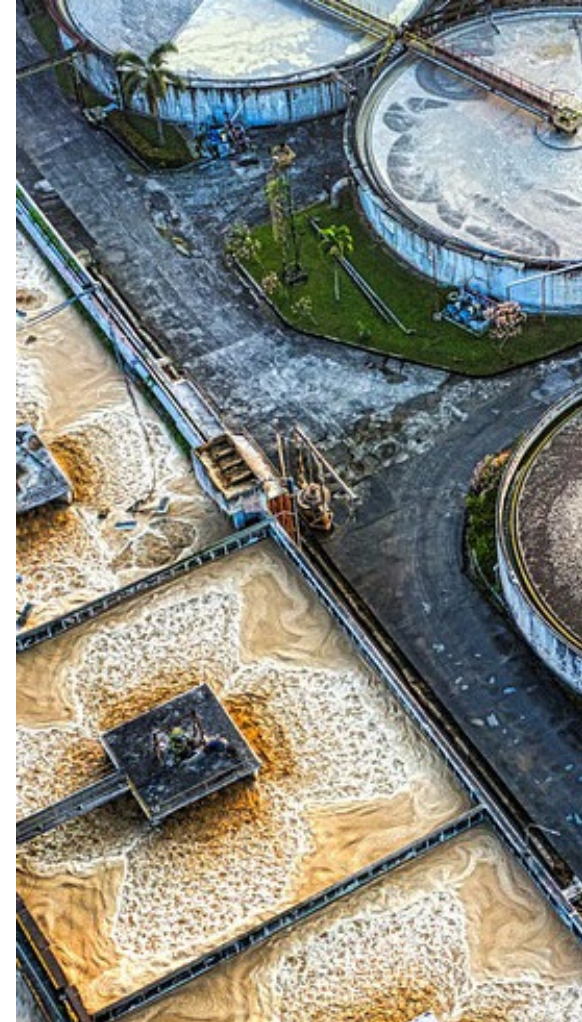
Elisabet Segredo Morales

Enrique González Cabrera

# ÍNDICE

---

1. [Desinfección química](#)
2. [Desinfección ultravioleta](#)
3. [Biorreactores de membrana](#)
4. [Eliminación/recuperación de nutrientes](#)





## Desinfección Química

# INDICADORES MICROBIOLÓGICOS

- Los patógenos son un grupo muy heterogéneo y numeroso
- Normalmente se utiliza el mismo patógeno para analizar:
  - El Grado de contaminación
  - Rendimiento del proceso

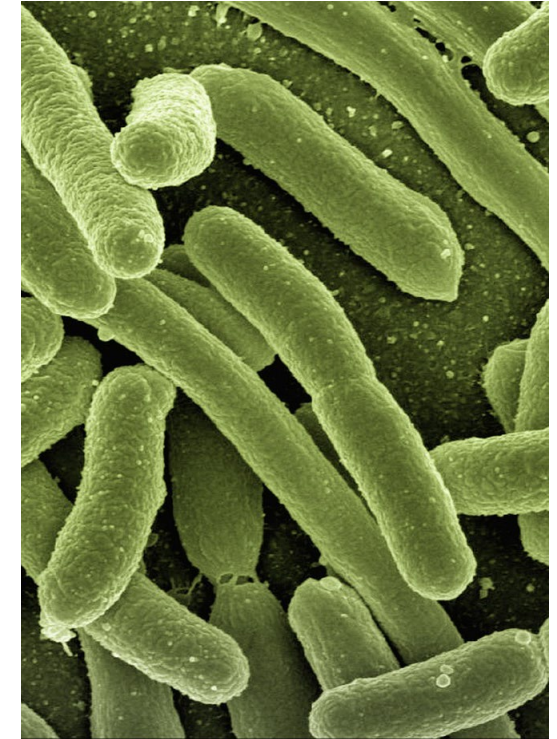
## Criterios de Bode

Criterios que permiten escoger el mejor patógeno para analizar nuestro proceso

1. Estar siempre presente cuando una muestra tiene contaminación biológica
2. Ser el patógeno que se presenta en mayores concentraciones
3. Ser resistente a los desinfectantes en ambiente acuoso
4. Reproducción rápida y sencilla en métodos de cultivo
5. Identificación sencilla
6. Crecimiento independiente a otros microorganismos

## Principales indicadores

- **Eschericia coli**
- **Giardia lamblia**
- Enterococos
- **Clostridium perfirgens**
- Legionella
- Salmonela



# AGENTES DESINFECTANTES

## Criterios de selección entre diferentes agentes desinfectantes

- Capacidad de destrucción de patógenos
- Posibilidad de seguimiento preciso
- Influencia sobre propiedades organolépticas
- Facilidad de uso
- Precio

## Químicos más empleados

- Hipoclorito y cloro gas
- Dióxido de cloro
- Ozono

Producto	Porcentaje de utilización	
	1998	2007
Cloro gas	70	61
Cloroaminas	11	30
Hipoclorito sódico	22	31
Hipoclorito sódico (in situ)	2	8
Hipoclorito cálcico	4	8
Dióxido de cloro	4	8
Ozono	2	9
UV	0	2

# HIPOCLORITO Y CLORO GAS

---

## Cloro gas

- El cloro es el principal agente desinfectado empleado en el tratamiento de aguas
- En condiciones normales de presión y temperatura se encuentra en forma de gas (tóxico, de color amarillo verdoso, con olor característico)
- Se encuentra en estado molecular como  $\text{Cl}_2$
- Posee un gran poder germinicida
- Reacciona con otras sustancias presentes en el agua:
  - Sulfuros
  - Hierro
  - Manganeso
  - Amonio
- Altera propiedades organolépticas del agua
- El Cloro comercialmente se presenta como un gas comprimido

## Hipoclorito

- Las condiciones de seguridad han impuesto el uso de hipoclorito sódico o cálcico frente al cloro gas
- El proceso de desinfección es el mismo modificando que el agente desinfectante es una solución

# HIPOCLORITO Y CLORO GAS

---

## ¿Cl<sub>2</sub> ó OCl<sup>-</sup>?

Son sustancias equivalentes ya que al disolver el cloro gas en el agua se produce reacciones de equilibrio obteniendo los mismos compuestos activos que realizan la desinfección



### El ácido hipocloroso

- Se produce por hidrolisis en un proceso casi instantáneo
- Es uno de los mejores germinicidas después del dióxido de cloro
- Partiendo de cloro gas se favorece la solubilidad desplazando el equilibrio:
  - Incrementando el pH
  - Incrementando el contenido salino
- Partiendo de hipoclorito
  - Se debe tener en cuenta el equilibrio para mantener pH de trabajo correcto
- Al contenido de cloro independiente del pH se denomina como **“Cloro libre activo”**

# HIPOCLORITO Y CLORO GAS

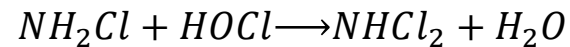
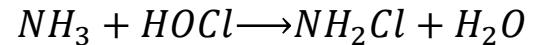
---

## Reacciones del cloro con el amonio

- En presencia de compuestos nitrogenados el cloro activo reacciona (HOCl)
- Se producen las cloraminas ( $\text{NH}_2\text{Cl}$  y  $\text{NHCl}_2$ )
- Las cloraminas se conocen como “**Cloro combinado**”

### Curva de ruptura

- Periodo I: Consumo inmediato del cloro
  - El cloro activo oxida a el  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Mn}^{2+}$ ,  $\text{H}_2\text{S}$  o la materia orgánica
  - El cloro libre pasa a ser ion cloruro
- Periodo II: Formación de las cloraminas
  - El cloro activo reacciona con el amoniaco



- Este proceso depende de la temperatura y el pH
- Si la relación molar entre cloro y amoniaco es inferior a 1 se producirán monocloramina y la dicloramina

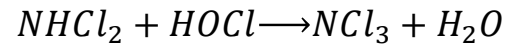


# HIPOCLORITO Y CLORO GAS

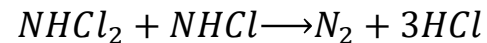
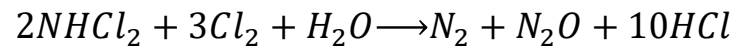
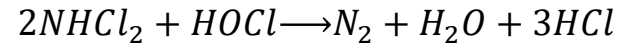
## Reacciones del cloro con el amonio

### Curva de ruptura

- Periodo III: Destrucción de las cloroaminas
  - Al aumentar la relación molar entre el cloro y el amonio
  - Se produce la formación de tricloruro de nitrógeno



- Algunas cloraminas se transformarán a ion cloruro

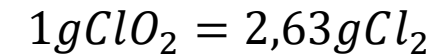
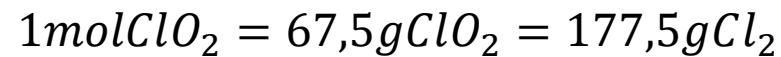


- Se alcanza el “**punto de ruptura**”
- Periodo IV: Formación del cloro residual y combinado
  - Después del punto de ruptura un aumento en la dosis implica un aumento proporcional del cloro residual
  - Dosificar por encima del punto de ruptura nos garantiza que se alcanzará la desinfección
  - Se define como demanda de cloro la cantidad de cloro que es necesario dosificar para alcanzar un nivel de cloro residual

# DIOXIDO DE CLORO

## Consideraciones químicas

- Es un gas verde amarillento, estable y muy soluble en agua
- Su eficacia biocida es alta para un amplio rango de pH (3-10)
- Es un químico explosivo y reacciona violentamente en presencia de agentes reductores
- Requiere su generación in situ en el punto de inyección
- La concentración de  $Cl_2O$  presente en el agua se expresa como: g/L de cloro



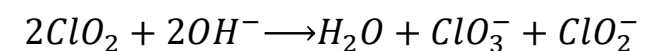
## Reacciones del dióxido de cloro con otras sustancias

1. Oxidación de aminas terciaras a aminas secundarias o aldehídos
2. Oxidación de cetonas, aldehídos o alcoholes
3. Oxidación de fenoles
4. Oxidación de amino ácidos

No se producen subproductos indeseables como los trihalometanos

## Degradación del $ClO_2$

En condiciones alcalinas el dióxido de cloro se desgrada y se puede formar clorato y clorito



# DIOXIDO DE CLORO

---

## Mecanismo de acción

- En el caso de las bacterias su poder desinfectante está asociado en la interrupción de la permeabilidad de las membranas celulares
- En el caso de los virus se atribuye a la inactivación de funciones vitales
- Una de sus principales ventajas frente al hipoclorito o cloro es que es activo a un amplio rango de pH

## Sistema industrial de dosificación $\text{Cl}_2\text{O}$

- Existen dos rutas:
  - Proceso clorhídrico-hipoclorito:  $2\text{NaClO}_2 + 4\text{HCl} \rightarrow 2\text{ClO}_2 + 5\text{NaCl} + 2\text{H}_2\text{O}$
  - Proceso cloro-hipoclorito:  $2\text{NaClO}_2 + \text{Cl}_2 \rightarrow 2\text{ClO}_2 + 2\text{NaCl}$

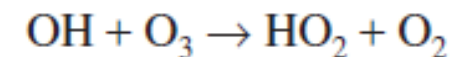
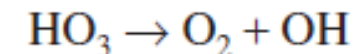
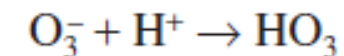
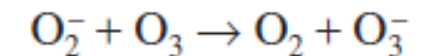
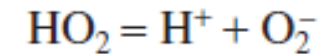
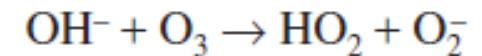
# OZONO

## Consideraciones químicas

- Es la forma alotrópica del oxígeno elemental
- De manera natural se encuentra a una altura de 20-25 km sobre la superficie terrestre en las zonas bajas de la estratosfera
- Naturalmente protege la biosfera de los rayos UV
- Es un gas ligeramente azulado y con un olor picante característico
- Es un gas inestable que se descompone rápidamente
- Se debe generar in situ y usarse inmediatamente
- Dosis típica en potabilización: 0,1-0,3 mg/L

## Reacción del Ozono en disoluciones acuosas

- El ozono reacciona con iones hidroxilo para producir radicales libres de hidroxilo y radicales orgánicos
- Es capaz de oxidar sustancias presentes en el agua que producen color y sabor
- La degradación del ozono se promueve en soluciones básicas siguiendo una cinética de segundo orden
- La vida media del ozono en una disolución acuosa es baja: de segundos a minutos



# OZONO

## Mecanismo de acción

- Entender el mecanismo de acción del ozono es complejo debido a las bajas dosis empleadas
- Se asume que el poder desinfectante se debe a su gran inestabilidad y a su poder oxidante
- El pH influye sobre el poder desinfectante del ozono

## Sistema industrial de dosificación de ozono

Se debe producir el ozono en la propia zona de dosificación a partir de oxígeno o aire seco



### Preparación del gas

- Se puede producir ozono partiendo de oxígeno puro o aire
- Se debe eliminar la humedad e impurezas
- Se debe incrementar la presión de la corriente de gas

Criterio	Aire	Oxígeno
CAPEX	Alto	Bajo
OPEX	Bajo	Alto
kWh/kg O <sub>3</sub>	14 - 18	5 - 6

# EXPOSICIÓN AL DESINFECTANTE PARÁMETRO C·t

## Cinética de Chick-Watson

La desinfección puede ser modelada como una reacción bimolecular

$$\frac{dN}{dt} = K_{cw}C^n t \longrightarrow \ln\left(\frac{N_0}{N}\right) = -K_{cw}C^n t$$

- N: número de microorganismos a un instante de tiempo t
- $K_{cw}$ : constante de inactivación o de letalidad
- C: es la concentración de desinfectante
- t: tiempo de contacto
- n: orden de la reacción (0,8 - 1,2): generalmente se toma 1

## Exposición del macroorganismo al agente desinfectante. Parámetro C·t

- La exposición del microorganismo al agente desinfectante se calcula como el área bajo la curva C(t) desde t hasta un tiempo genérico t
- Unidades: mg·min/L

$$C \cdot t = \int_0^t C(t)dt \xrightarrow{C=cte} C \cdot t = \frac{1}{K_{CW}} \ln\left(\frac{N}{N_0}\right)$$

- Conociendo la constante de inactivación y el grado de desinfección se puede determinar el valor de C·t
- Normalmente se asocia altas concentraciones con bajos tiempos de exposición y viceversa

# EXPOSICIÓN AL DESINFECTANTE PARÁMETRO C·t

## x-Log

- Mide la eficacia de la inactivación del agente desinfectante
- Normalmente se define en forma logarítmica
- Normalmente se establece como criterio de diseño:
  - 3-log para la G. lamblia
  - 4-log para todos los virus importantes
  - Normalmente se focaliza en el más resistente

$$x - \log = - \log \left( \frac{N}{N_0} \right)$$

X-log	% de eliminación
1-log	90,0%
2-log	99,0%
3-log	99,9%

## Tiempo de contacto

- Si el químico se introduce en régimen turbulento se reduce el tiempo necesario
- En tanques u otros dispositivos de mezcla es necesario introducir un factor de mezcla

$$t = F_m \cdot TRH$$

- Fm: es el factor de mezcla:
  - Tanques agitados: 0,1
  - Tanques compartimentados: 0,1·nº compartimentos
  - Conducciones turbulentas: 1
- TRH: es el tiempo de residencia hidráulico: V/Q



---

## Desinfección mediante Luz Ultravioleta

---



# DESINFECCIÓN ULTRAVIOLETA

## Luz ultravioleta

- Los efectos germinicidas de la energía radiante del sol fueron experimentados por primera vez por Downs y Blunt en 1878.
- En el S XX se comienza a experimentar con lámparas de luz ultravioleta para la acción germinicida
- El bajo coste de la cloración ha retardado la aplicación de la luz UV en la desinfección
- Su uso se ha estandarizado en el tratamiento de aguas residuales

VENTAJAS	INCONVENIENTES
Efectos sobre bacterias, virus y protozoos	No tiene efecto de desinfección residual
Es extrapolable los resultados entre diferentes patógenos	Es complicado analizar la dosis germinicida de la luz ultravioleta
No produce subproductos de desinfección	Las bacterias se pueden volver a reactivar
Ocupan poco espacio	Ensuciamiento en las lámparas
Corto tiempo de contacto	Mantenimiento especializado y frecuente
Compatible con otros desinfectantes	Es competitivo para pequeños caudales

# FUNDAMENTOS DE LA DESINFECCIÓN DE LA LUZ ULTRAVIOLETA

---

- Medio de desinfección físico
- La luz ultravioleta es transmitida a una columna de agua donde es absorbido por los ácidos nucleicos de un microorganismo
- Los fotones son absorbidos por el organismo causa daño al material genético
- La no destrucción permite que exista una posibilidad de reparación del microorganismo y, por tanto, se reactiven

## Mecanismo de inactivación microbiana

- El principal mecanismo es la formación de un dímero de bases de piridina entre bases de timina
- La formación de este dímero interfiere en la replicación del ADN celular
- Los macroorganismos son incapaces de replicarse y no producen infecciones
- Otros daños pueden ser:
  - Roturas de las cadenas de ADN
  - Enlaces cruzados de ADN-ADN
  - Enlaces cruzados entre proteínas-ADN

# FUNDAMENTOS DE LA DESINFECCIÓN DE LA LUZ ULTRAVIOLETA

## Reactivación del daño microbiano inducido con la luz ultravioleta

- El organismo puede recuperar el daño formado y restaurar su capacidad de replicarse
- La reactivación enzimática es insignificante cuando se aplica una dosis de UV adecuada
- Una dosis de 40 mJ/cm<sup>2</sup> es adecuada para evitar la reactivación
- Métodos de reparación:

### Reparación ligera

- Una enzima se une al dímero
- Con la exposición a la luz se repara el daño

### Reparación oscura

- Se produce sin aporte energético
- Ocurre por reparación enzimática

# DOSIS PARA DESINFECCIÓN

## Energía necesaria para la inactivación

- Se denomina dosis a la energía que es necesaria para la desinfección requerida
- Es el producto entre la tasa de incidencia por el tiempo de contacto
- Tasa de incidencia (E')

  - Depende del grado de reducción y del tipo de microorganismo
  - Por ejemplo:
    - 2-log de E. coli: 9mJ/cm<sup>2</sup>
    - 2-log de B. subtilis o C. perfringens: 45-95 mJ/cm<sup>2</sup>

- Las dosis deben ser superiores debido a factores operativos que reducen la efectividad del proceso
  - Sombra de partículas
  - Agregados microbianos
  - Capacidad de reactivación
  - Absorción de luz por otros compuestos como materia orgánica, algunos metales

$$D \left( \frac{Ws}{m^2} \right) = E' \left( \frac{W}{m^2} \right) \cdot t(s)$$

Dosis requerida	E. coli	Pseudomona	B. Subtiles	Giarda
99,9% (mW s/m <sup>2</sup> )	10	10	20	20-40

# DOSIS PARA DESINFECCIÓN

---

## Cinética de Hom

- La desactivación microbiana puede modelizarse mediante la cinética de Hom
- Expresiones similares a la cinética de Chick-Watson

$$\frac{dN}{dt} = -mk_{UV}(E')^n N t^{m-1} \longrightarrow \ln\left(\frac{N}{N_0}\right) = -k_{UV}(E')^n t^m$$

- N: número de microorganismos a un instante de tiempo t
  - $K_{UV}$ : constante de influencia de la radiación
  - E: es la tasa de incidencia
  - t: tiempo de contacto
  - n y m: orden de la reacción
- 
- Normalmente se emplea un factor de corrección sobre la tasa de incidencia para corregir las desviaciones
  - Normalmente se recomienda el desarrollo de experimentaciones piloto con el fin de determinar la mejor dosis

# INTEGRACION DE LA UV EN LA ETAP

## Ubicación de la desinfección dentro de la planta de potabilización

- Depende de la calidad del agua de origen
- En plantas de tratamiento de aguas superficiales se ubica después de la unidad de filtrado
- Las últimas recomendaciones indican de colocarlo como desinfectante primario y posteriormente aplicar una desinfección de cloro para la distribución residual
- Para una buena efectividad del proceso se recomienda

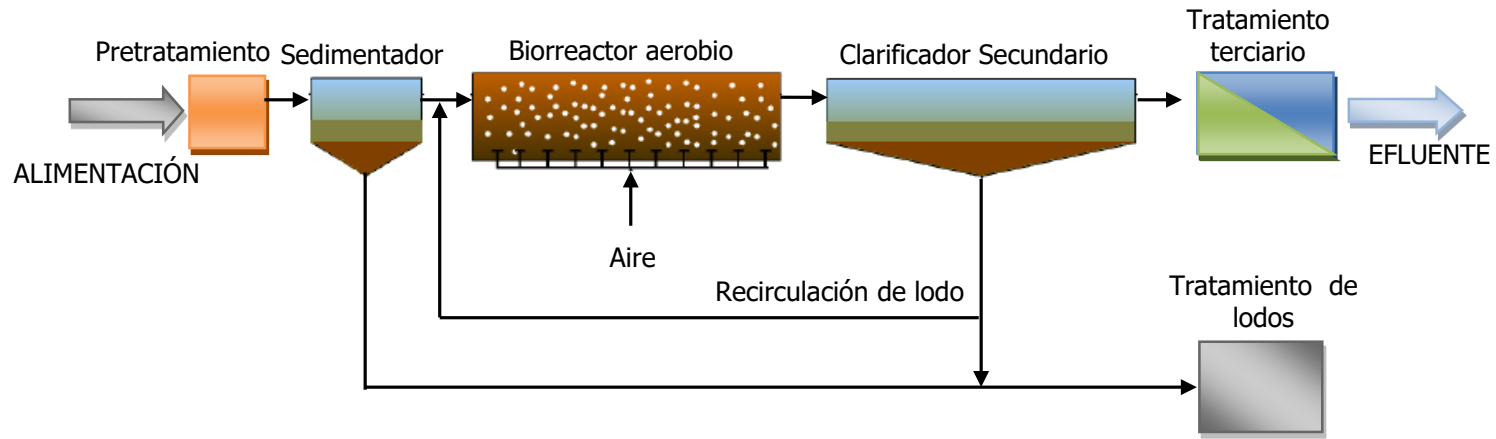
Parámetro	Valor
Turbidez	5 NTU
Sólidos suspendidos	< 10 mg/L
Color	No
Hierro	< 0,3 mg/L
Manganeso	< 0,05 mg/L
pH	6,5 – 9,5



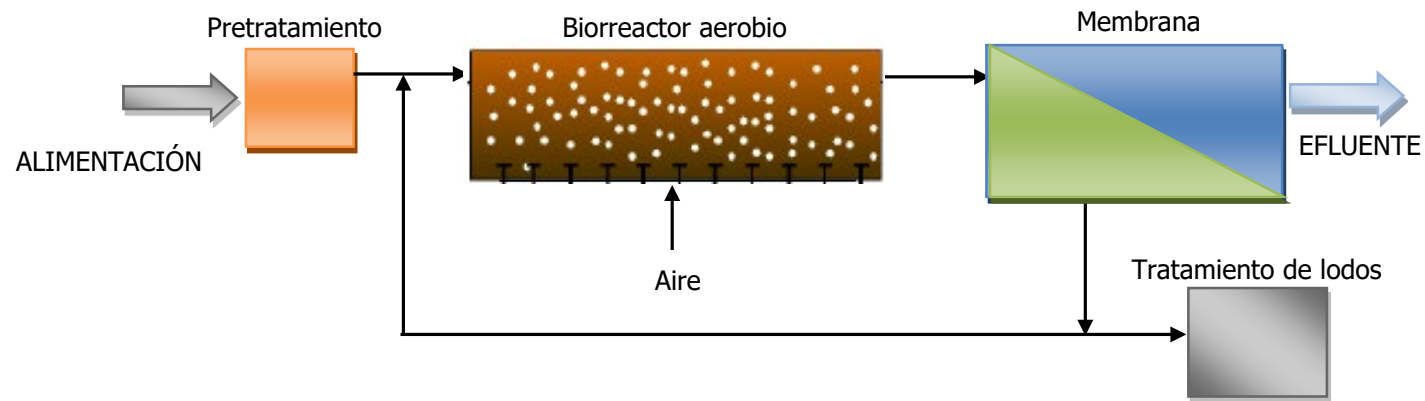
# Biorreactores de Membrana

# MBR vs TRATAMIENTO CONVENCIONAL

## Sistema convencional de lodos activos



## Biorreactores de membrana



Proceso de lodos  
activos  
Tratamiento  
biológico estable

**MBR**

Filtración con  
membranas  
Separación  
absoluta de sólidos



# MBR vs TRATAMIENTO CONVENCIONAL

---

## Tratamiento convencional de Lodos Activos

- La operación se ve comprometida a tener un flóculo de gran tamaño
- La correcta sedimentación es crucial
- La concentración de MLSS no debe superar los 3 – 5 g/L
- La calidad del efluente se ve altamente influenciada por la calidad de la alimentación

## Biorreactores de membrana

- No requiere un elevado tamaño de flóculo
- No importa las características de sedimentación
- La concentración de MLSS 8 – 12 g/L
- La calidad del efluente no se ve altamente influenciada por la calidad de la alimentación

# MBR vs TRATAMIENTO CONVENCIONAL

## Criterios para seleccionar un sistema MBR frente a un proceso convencional

- Disponibilidad de terreno
- Exigencias de tratamiento de olores, impacto visual
- Tratamiento de aguas industriales complejas, que necesiten un proceso biológico de alta edad de lodo
- Posibilidad de reutilizar el agua tratada, bien directamente o desalada (ED, OI)
- Ampliación de la capacidad de tratamiento en instalaciones existentes:
  - Aumento de la carga contaminante
  - Necesidad de eliminación de nutrientes
  - No disponer de terreno adicional

## COMPARATIVA DE CALIDADES DE LOS EFLUENTES DE UN SISTEMA CONVENCIONAL Y UN MBR

Parámetro	Influente	Convencional		MBR	
		Efluente	Rendimiento	Efluente	Rendimiento
DQO (mg/L)	520	75	85,6	10	98
SS (mg/L)	110	40	63,3	<2	100
Turbidez (NTU)	38	15	60,5	<0,5	100
Coliformes (UFC/100 mL)		10 <sup>4</sup>		<2,2	

# MBR vs TRATAMIENTO CONVENCIONAL

## Comparación de instalación de MBR y Convencional + terciario

En este caso las calidades son comparables gracias a los tratamientos terciarios

### Costes de instalación

Parámetro	MBR	Convencional + terciario
Construcción	46%	63%
Equipamiento eléctrico	31%	28%
Equipamiento mecánico	13%	9%
Membranas	10%	-

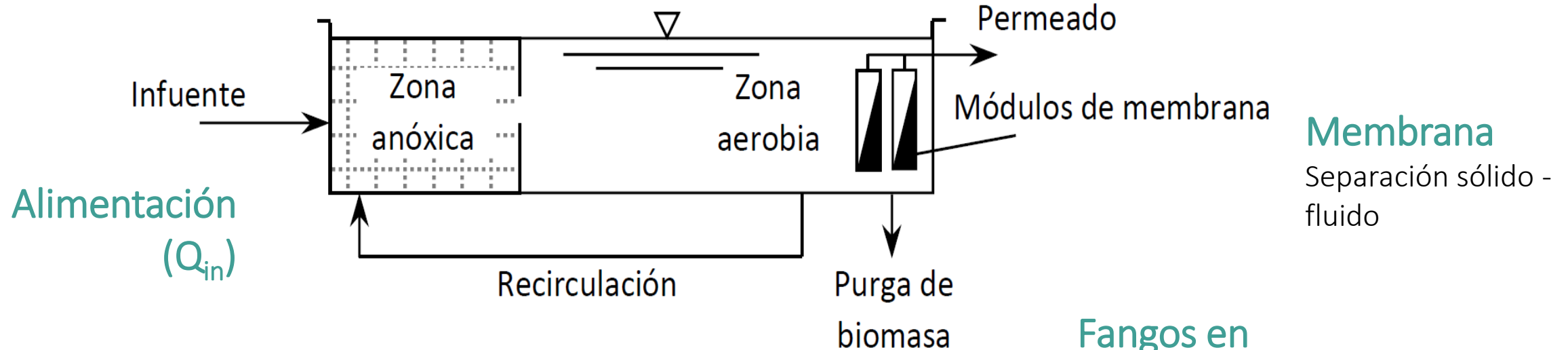
# PROCESO MBR

## Biológico

[MLSS]= 8 – 10 g/L  
Sistema compacto

## Producto ( $Q_0$ )

Alta calidad



## Membrana

Separación sólido - fluido

## Fangos en exceso

Tratamiento en la línea de fangos

## Recirculación ( $Q_r$ )

Fango concentrado, si no se controla la operación será inviable

$$Q_{in} = Q_{out}$$

$$Q_r = (3-4) \times Q_{in}$$

$$Area = Q_{out} / J_F$$

# CONTROL BÁSICO DEL PROCESO BIOLÓGICO

## Parámetros de control

Existen muchos parámetros a controlar en la operación de un reactor biológico, pero los más importantes:



**Aunque hagamos un mal seguimiento del biorreactor la calidad casi no se verá afectada puesto que la membrana es capaz de retener la mayor parte de materia orgánica y a los sólidos**



- Emporará sus propiedades de filtración
- Se incrementará el ensuciamiento
- Aumento de costes

# FILTRABILIDAD DE LA SUSPENSIÓN MICROBIANA

## Time To Filter (TTF)

- La filtrabilidad depende de las características del agua residual y de las condiciones del reactor biológico
- El método más rápido y económico para el seguimiento de la filtrabilidad es mediante la monitorización del Time to Filter (TTF)

## Procedimiento

Se mide el tiempo necesario para que 100 mL de muestra de lodo se filtre por un filtro estandarizado ( $d_p=1,5 \mu\text{m}$ ). La filtración se realiza mediante una bomba de vacío a presión constante

Filtrabilidad	Tiempo para 100 mL*
Excelente	< 99 s
Media	100 – 250 s
Baja	> 250 s

\* Los datos son para lodos con una concentración entre 6 – 10 g/L

# TIPOS DE MEMBRANA EMPLEADAS EN UN MBR

Parámetro	Huber	Mitsubishi	Veolia	Kubota	Pentair X-flow
Tipo de membrana	UF	MF	UF	MF	UF
Configuración	Plana giratoria	Fibra hueca	Fibra hueca	Plana vertical	Multitubular externa
Pretratamiento	≤3 mm	1 mm	1 mm	≤3 mm	1-2 mm
Diámetro de poro	0,036 μm	0,4 μm	0,035 μm	0,4 μm	0,03 μm
Funcionamiento	Vacío	Vacío	Vacío	Vacío	Vacío
Vida estimada	---	----	7-8 años	8-10 años	---
Aire de limpieza	Continuo	Continuo	Intermitente	Intermitente	Continuo
Retrolavado	No	Si	Si	No	Si
Flujo (l/h m <sup>2</sup> )	16-22	8,5-17	17-25	17-25	50-60
Pico < 6 h (l/h m <sup>2</sup> )	<55	<55	<37	<55	<75

# MÓDULO DE MEMBRANAS FIBRA HUECA

## Características generales

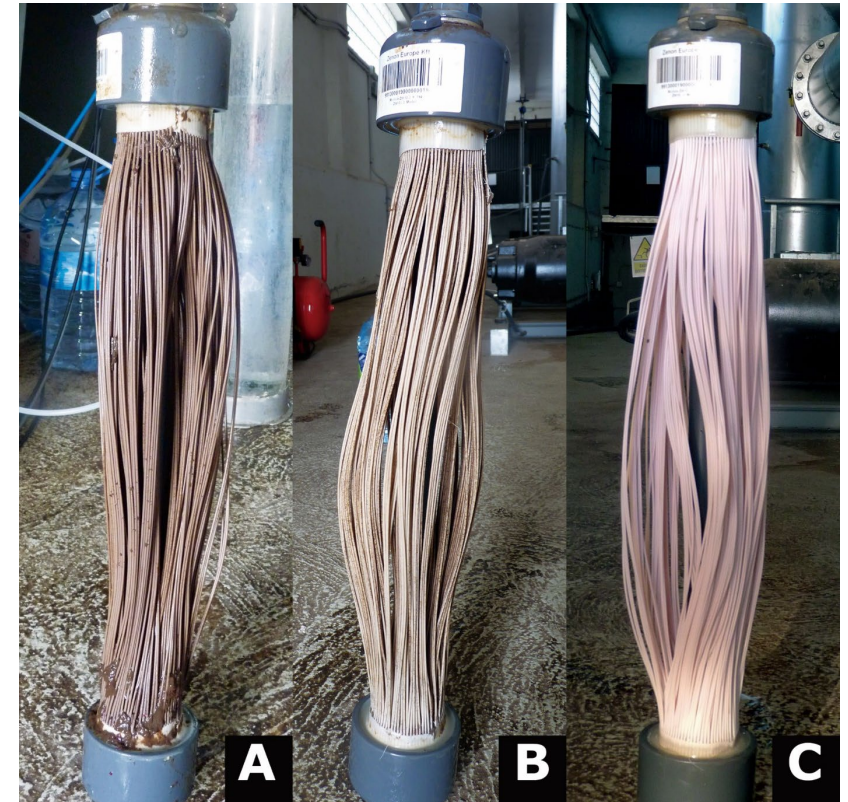
- Denominación comercial: ZW 500D
- Filtración de fuera hacia dentro
- Diámetro de poro : 0,04  $\mu\text{m}$
- Área total/ módulo: 31,6  $\text{m}^2$
- Salida al mercado: 2010
- Material: PVDF
- Aireación específica: 0,12  $\text{Nm}^3/\text{h m}^2$

## Principales ventajas

- Alto grado de implantación (50 -60 % de los MBR)
- Alta densidad de compactación (más superficie en menos volumen)
- Bajos consumos energéticos comparados con otros procesos

## Principales inconvenientes

- Exigente en el pretratamiento





# TRANSPORTE Y SEPARACIÓN DE LA MATERIA

## Ley de Darcy

La ley de Darcy describe la relación entre el flujo de filtrado obtenido en la membrana en función de la fuerza impulsora aplicada (presión)

$$J = \frac{\Delta P}{\mu R_m}$$

- $\Delta P$ : es la caída de presión aplicada (Presión Transmembrana, TMP)
- $\mu$ : viscosidad del fluido
- $R_m$ : es la resistencia hidráulica de la membrana limpia al paso de agua a través de ella
- En el caso de emplearse en soluciones con alta conductividad es necesario incorporar el efecto de la presión osmótica (Normalmente en los casos de depuración, no es aplicable)

## Ensuciamiento de las membranas

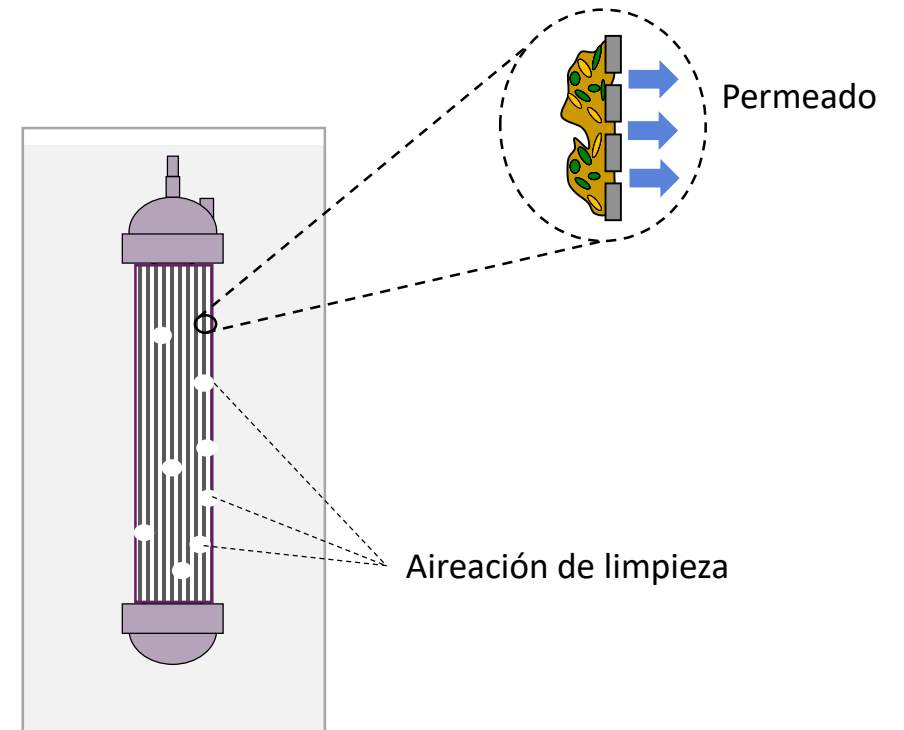
- Durante el proceso de filtración, los materiales retenidos producen un ensuciamiento que genera un incremento de la resistencia hidráulica del proceso de filtración.
- Si se asume un modelo de resistencias en serie, la ley de Darcy se modifica

$$J = \frac{\Delta P}{\mu R} = \frac{\Delta P}{\mu (R_m + R_f)}$$

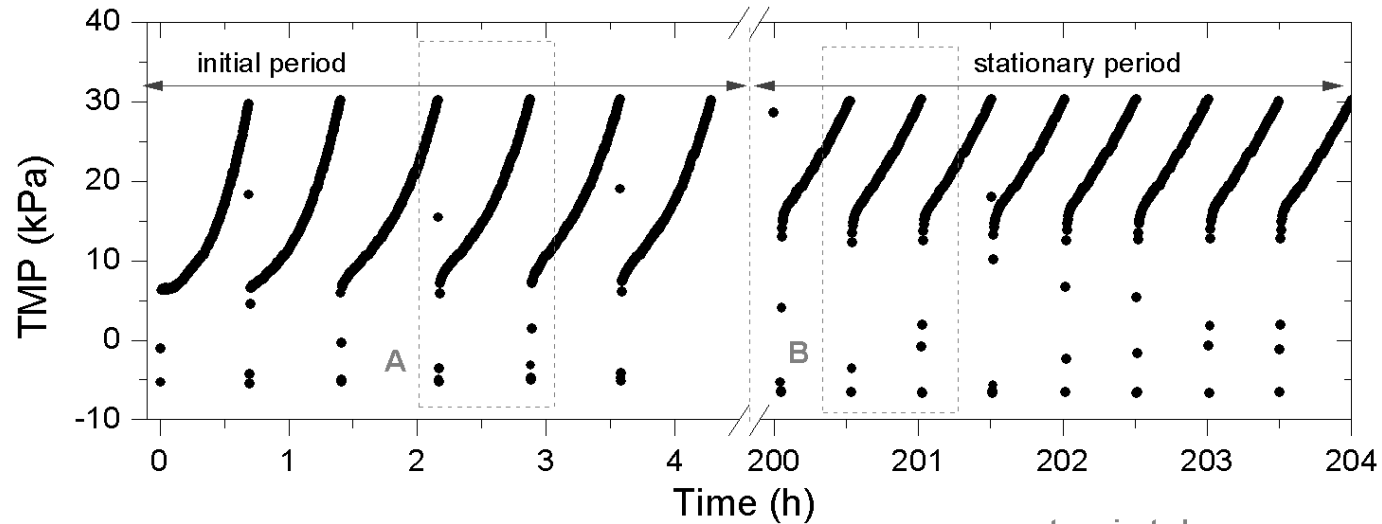
- $R$ : es la resistencia global del sistema
- $R_m$ : es la resistencia hidráulica de la membrana limpia al paso de agua a través de ella

# FUNCIONAMIENTO DE LA UNIDAD DE MEMBRANAS

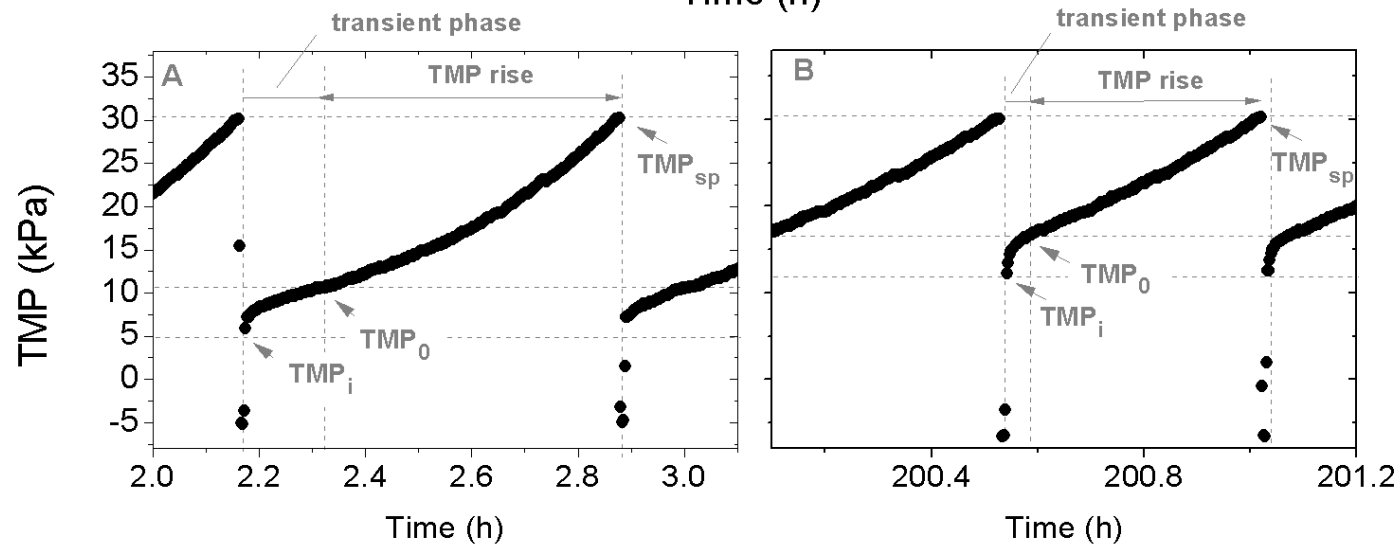
- El vacío generado genera una fuerza impulsora que cumpliendo con la Ley de Darcy permite obtener un flujo de permeado
- El aire se introduce para generar un esfuerzo cortante que ayuda a reducir el ensuciamiento y mezclar el tanque de membranas
- El problema es el **ensuciamiento**



# FUNCIONAMIENTO DE LA UNIDAD DE MEMBRANAS



$$J = \frac{\Delta P}{\mu R} = \frac{\Delta P}{\mu (R_m + R_f)}$$



# ENSUCIAMIENTO DE LA MEMBRANA

## Definición de ensuciamiento

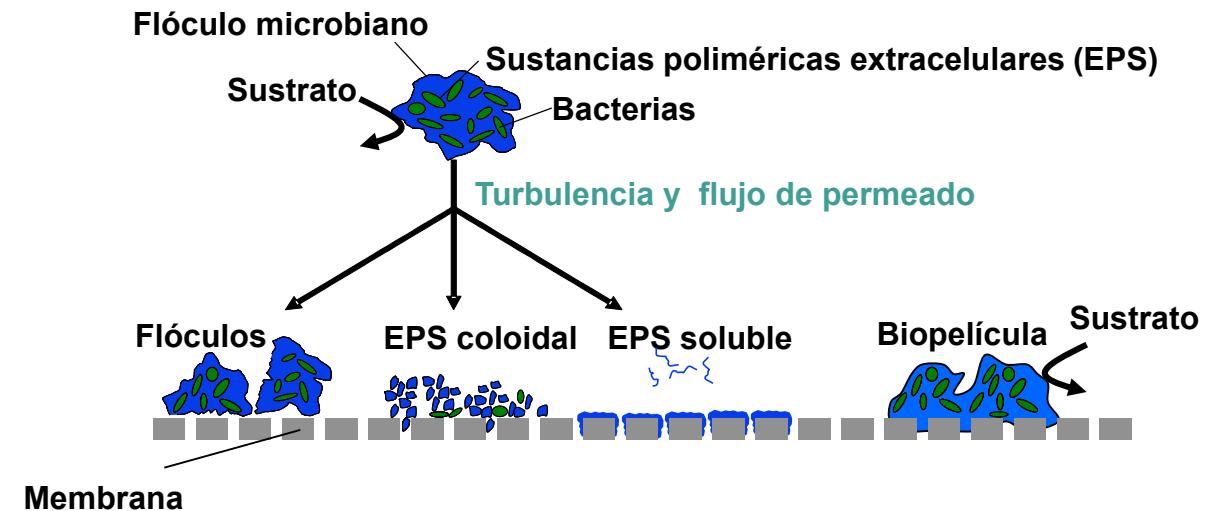
Acumulación de materiales sobre la superficie de la membrana que reducen su área efectiva, incrementando su resistencia al paso del fluido

## Problemas asociados al ensuciamiento

- **Incremento de la Presión de trabajo:** es necesario aplicar más vacío o presión para mantener la producción
- **Incremento en los costes:** las bombas de permeado consumen más energía
- **Reducción de la vida útil de las membranas:** el incremento de las limpiezas químicas reduce su vida

## Causas del ensuciamiento

- Formación de precipitados sobre la membrana
- Adsorción de materiales orgánicos
- Formación de biopelícula bacteriana
- Cambios en la composición de entrada
- Condiciones de operación más agresivas
- Dosificación de químicos errónea



# ENSUCIAMIENTO DE LA MEMBRANA

## Principal inconveniente en el desarrollo de los MBR

Incremento en los costes de operación (OPEX): aireación de la membrana, limpiezas y remplazo de membranas



# CLASIFICACIÓN DEL ENSUCIAMIENTO

## Clasificación atendiendo a la naturaleza del ensuciamiento

### Ensuciamiento Orgánico

- Es la más habitual en procesos de depuración
- Se incluyen sustancias como pesticidas, aceites
- Son sustancias que los microorganismos pueden consumir
- Favorecen la formación de biopelícula

### Ensuciamiento Biológico

- Es normal en procesos de depuración
- Cuando se produce una colonia sobre la membrana es complicado de retirar
- Su control se realiza con limpiezas periódicas de hipoclorito sódico

### Ensuciamiento Inorgánico

- Formación de precipitados inorgánicos como carbonatos o sulfatos
- En aguas con alto contenido en sales durante la potabilización puede producir incrustación
- No es habitual en el tratamiento de aguas residuales
- Se controlan mediante limpiezas de ácido cítrico y ajustes de pH



# CLASIFICACIÓN DEL ENSUCIAMIENTO

---

## Clasificación atendiendo a la relación entre el material y la membrana

### **Ensuciamiento Reversible**

Es aquel que se puede retirar mediante limpiezas físicas: como lavados o aireación

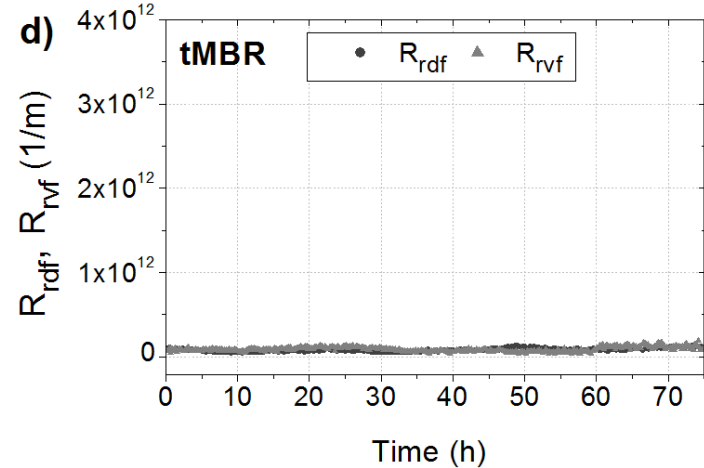
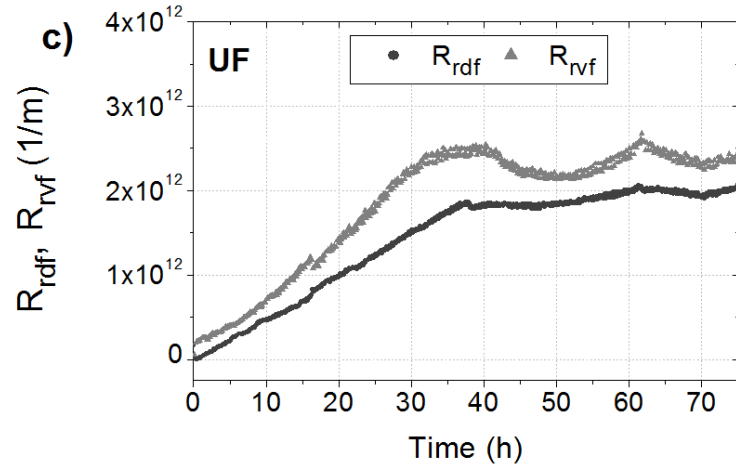
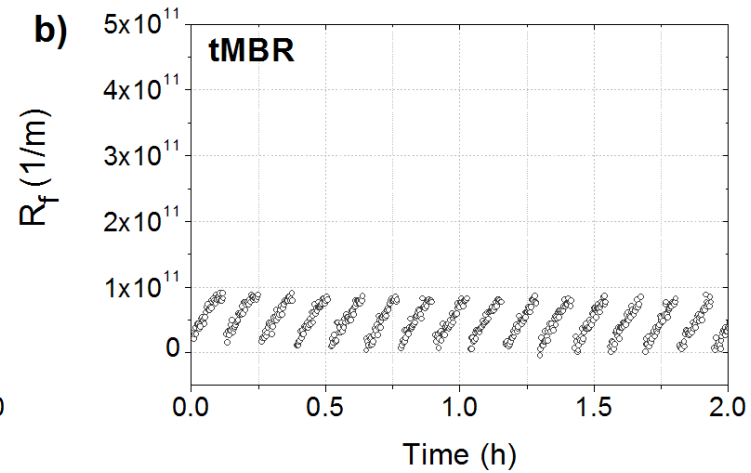
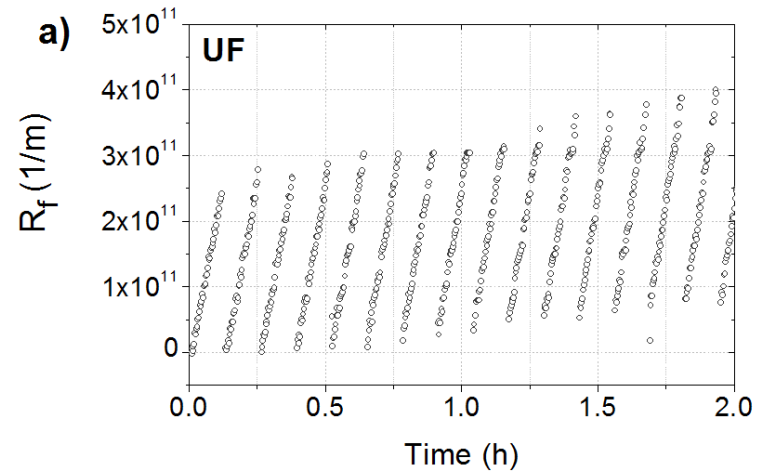
### **Ensuciamiento Residual**

Es aquel que se puede retirar mediante limpiezas empleando agentes químicos

### **Ensuciamiento Irrecuperable**

Es aquel que no se puede retirar de la membrana

# FUNCIONAMIENTO DE LA UNIDAD DE MEMBRANAS





# ENSUCIAMIENTO DE LA MEMBRANA

Principal ensuciamiento suele ser la formación de una torta y la acumulación de material fibroso en los cabezales de los módulos



El clogging se reduce con un pretratamiento adecuado, con un ajuste adecuado de las fibras de los módulos y adecuada aireación



Normalmente se recomienda instalar un pretratamiento de tamizado de 0,5 – 0,8 mm de paso

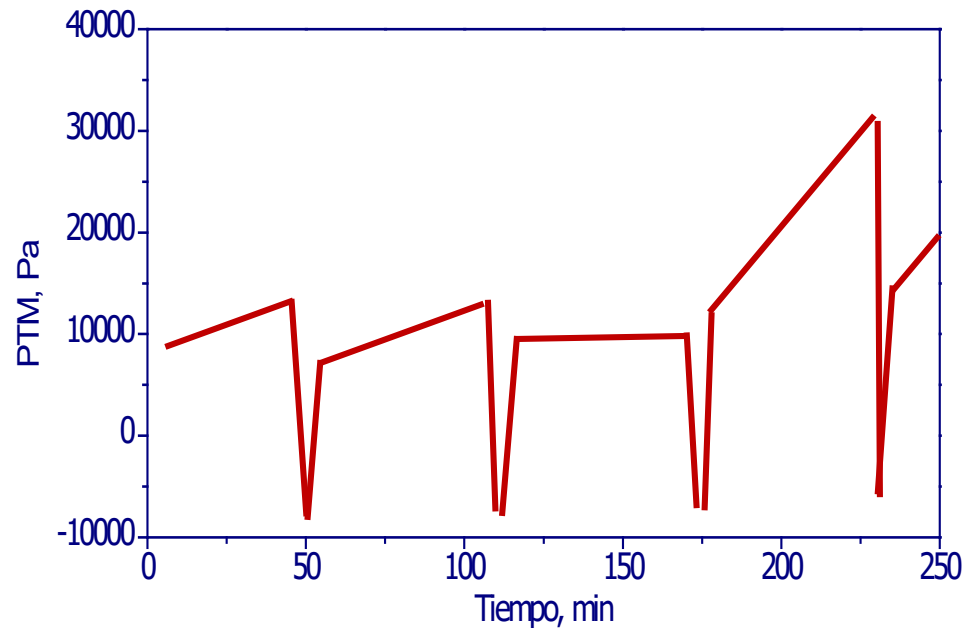
# MÉTODOS DE CONTROL DEL ENSUCIAMIENTO

## Relax

- La filtración se para y las membranas sufren agitación mediante aireación
- Intervalo entre relax: 12-15 minutos
- Duración: 30-45 segundos

## Retrolavado

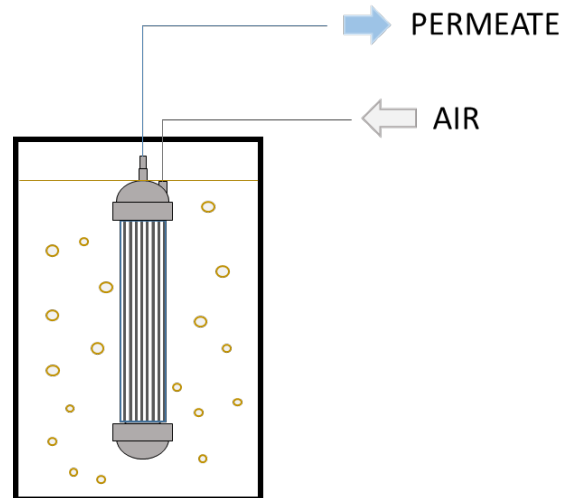
- La filtración se para y se invierte el sentido del flujo, normalmente se agitan con aire
- Intervalo entre retrolavados: 12-15 minutos
- Duración: 30-45 segundos
- Flujo: 1,5 el flujo de filtración
- En algunos casos se acompaña del drenaje del tanque



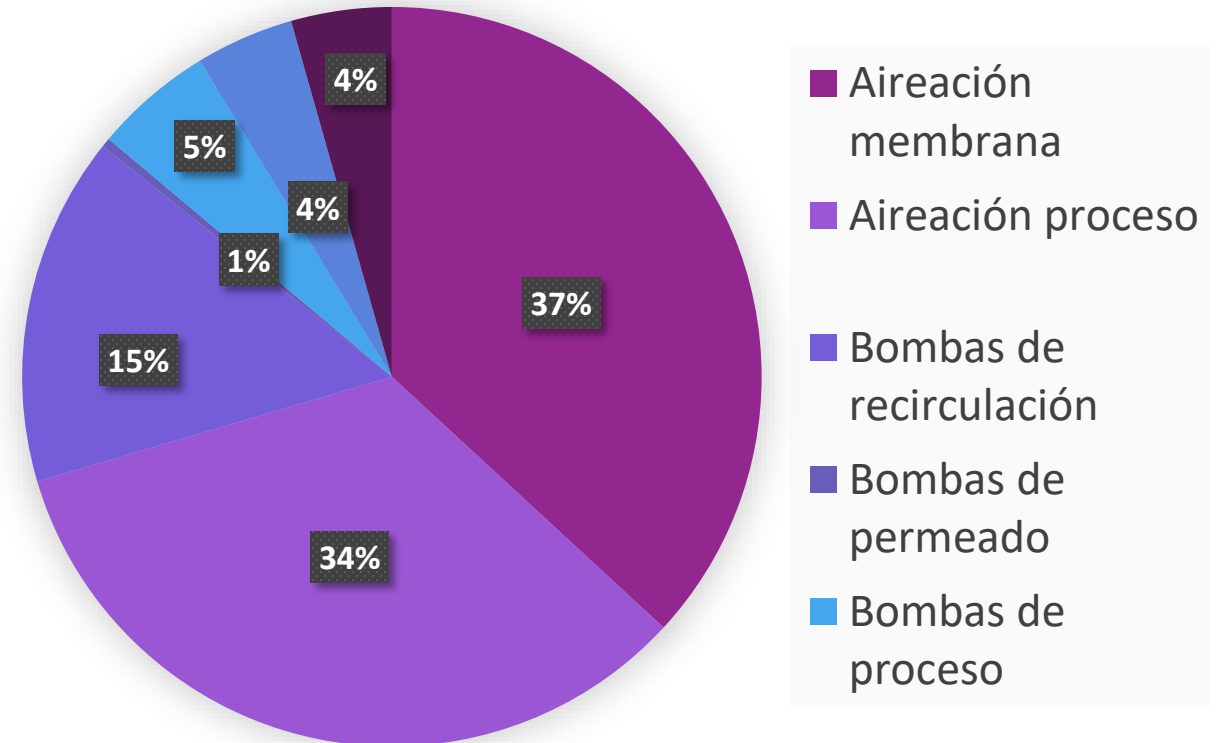
# MÉTODOS DE CONTROL DEL ENSUCIAMIENTO

## Aireación de las membranas

- Provoca un efecto de cizalladura que retira ensuciamiento
- Limita la deposición de especies colmatantes
- Promueve las turbulencias



## Consumo energético MBR



# MÉTODOS DE CONTROL DEL ENSUCIAMIENTO

---

## Limpieza química de mantenimiento

- Durante un retrolavado se inyecta químicos
- Químicos para ensuciamiento orgánico: hipoclorito, sosa, peróxido de hidrógeno
- Químicos para ensuciamiento inorgánico: cítrico, ácido fosfórico.
- Frecuencia: diaria
- Puede establecerse el drenado del tanque

## Limpieza química de Recuperación

- Las membranas se sumergen durante un largo periodo en contacto con un químico
- Se emplean los mismos químicos
- Tiempo de contactos entre 5 – 8 horas
- Frecuencia: anual o mensual depende del tipo de agua

# SECUENCIA DE LIMPIEZAS EFECTOS SOBRE EL SISTEMA

## Sucesión de limpiezas

- Para cada caso es necesario analizar la mejor secuencia de limpiezas. Normalmente se realiza mediante pilotajes
- En función del ensuciamiento se debe ajustar la secuencia que permita mantener el ensuciamiento controlado
- El seguimiento de las resistencias antes y después de cada limpieza permite analizar el tipo de ensuciamiento producido

## Flujo neto

- Parte del caudal producido en el sistema se pierde durante los retrolavados
- En el caso del relax, el tiempo de parada repercute en la cantidad de flujo producido
- El caudal que no se extrae del sistema se denomina como flujo neto
- El flujo de una membrana se define como el caudal que pasa la membrana por área de la misma
- El flujo neto se utiliza en el dimensionamiento del área total requerida en una unidad de filtración

$$J_{net} = \frac{J_F t_F - J_R t_R}{t_F + t_R}$$

# SEGUIMIENTO DEL ENSUCIAMIENTO DE LA MEMBRANA

## ¿TMP o resistencia?

### TMP

- Los sistemas de membranas pueden trabajar a presión constante o a flujo constante.
- Los sistemas empleados en potabilización a escala industrial trabajan a flujo constante
- A medida que las membranas se ensucian y al incrementarse la Resistencia es necesario aplicar cada vez más presión

$$J = \frac{\Delta P}{\mu R} = \frac{\Delta P}{\mu(R_m + R_f)} \longrightarrow \uparrow R_f \therefore J = cte \longrightarrow \uparrow TMP$$

- El seguimiento de la TMP permite monitorizar el ensuciamiento de la membrana

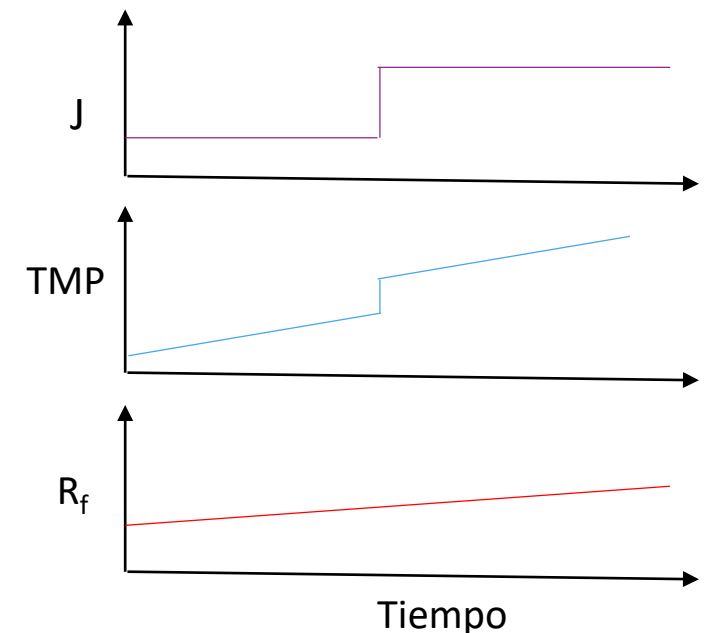
### Resistencia

- Permite hacer un seguimiento absoluto del ensuciamiento
- Permite comparar condiciones entre instalaciones
- Permite el análisis en situaciones de trabajo con flujo variable

### Permeabilidad ( $\Pi$ )

- Agrupa los términos de resistencia y viscosidad
- Permite un análisis más globalizado
- Sistema empelado en la industria

$$\Pi = \frac{1}{\mu R}$$



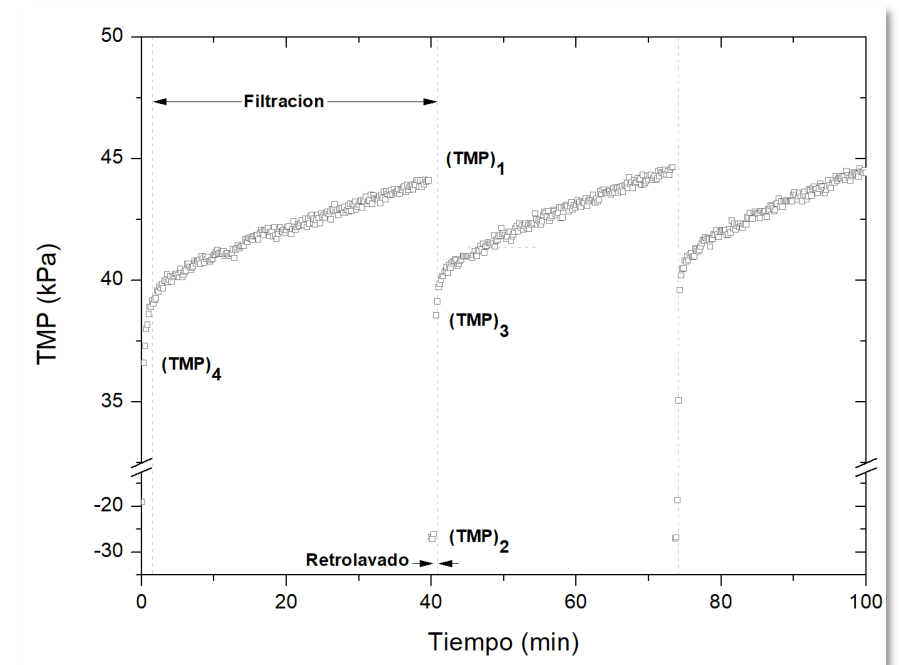
# Seguimiento del ensuciamiento

- En una instalación con condiciones muy estables se puede hacer un seguimiento de la TMP ya que los datos son directos
- En la operación normal se recomienda analizar la evolución de la TMP en diferentes momentos del ciclo de producción y durante al menos tres ciclos

## Analizamos diferentes momentos

La tabla contiene datos de TMP en kPa

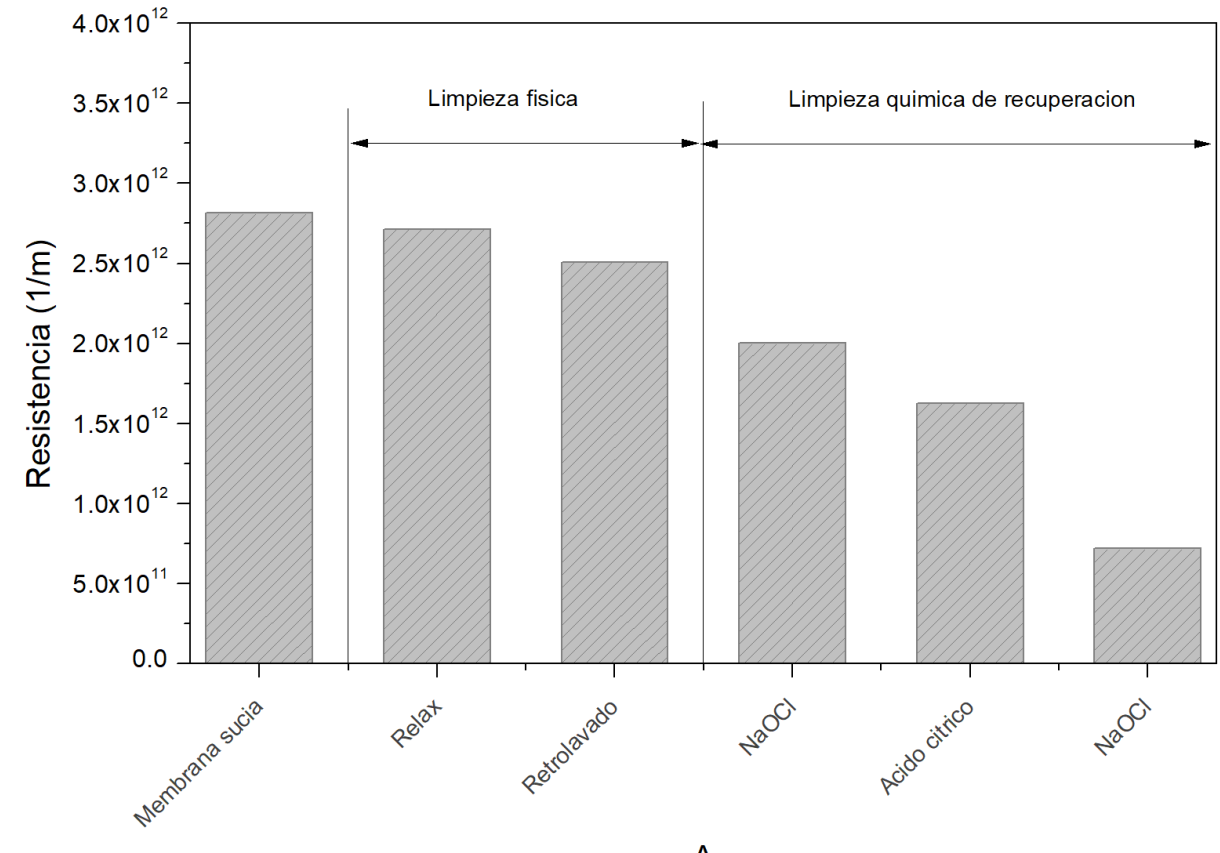
Punto del ciclo	Estacionario
1. Antes del retrolavado	44
2. Durante el retrolavado	-27
3. Después del retrolavado	38
4. Después del retrolavado previo	37



# Seguimiento del ensuciamiento

## Tipos de limpieza y rendimientos

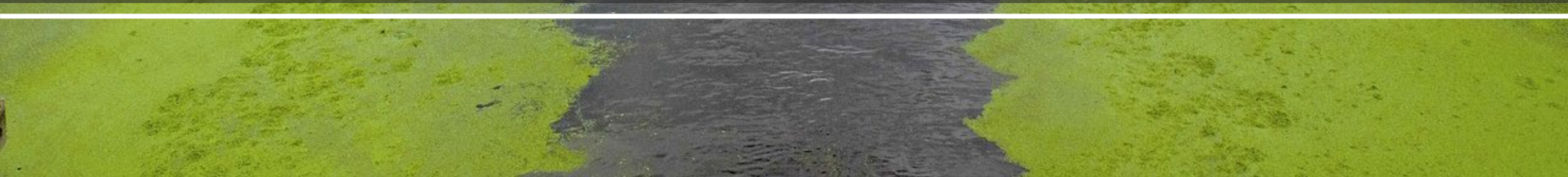
Aunque la eficacia de la limpieza depende del tipo de ensuciamiento, las limpiezas químicas con oxidantes o ácidos tienen un mayor efecto que las limpiezas físicas como son el relax o el retrolavado







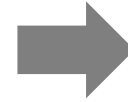
**Eliminación de nutrientes**



# CONCEPTOS GENERALES

## Nitrógeno presente en las aguas residuales

- Nitrógeno orgánico: proteínas y aminoácidos
- Nitrógeno amoniacal: amoniaco e ion amonio
- Nitratos
- Nitrito



El nitrógeno procede:

- Urea
- Fertilizantes
- Plantas químicas
- Producción en el metabolismo microbiano

## Formas de determinar el contenido en nitrógeno

- Nitrógeno amoniacal:  $NH_3 + NH_4^+$
- Nitrógeno Kjeldahl (TKN): N-orgánico +  $NH_3 + NH_4^+$
- Nitrógeno inorgánico:  $NO_3^- + NO_2^- + NH_3 + NH_4^+$
- Nitrógeno total: TKN +  $NO_3^- + NO_2^-$

## Efectos de los compuestos nitrogenados en el efluente

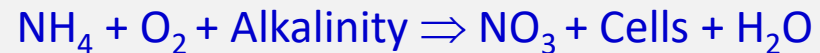
- Aumento del consumo de cloro en la desinfección
- Problemas de eutrofización del medio receptor en caso de vertido
- Problemas de exceso de fertilización en el caso de reutilización
- Vertidos con alto contenido en nitratos puede producir salinización del medio (Mar Menor)

# PROCESO DE ELIMINACIÓN DE NITRÓGENO

El proceso de eliminación de nitrógeno ocurre en dos etapas

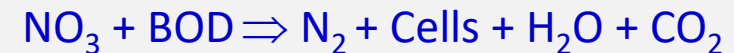
## Nitrificación

- El amonio es oxidado a Nitratos
- Requiere bacterias nitrosomas y Nitrobacter
- En muchos biorreactores diseñados solamente para la degradación carbonosa tiene lugar de manera espontánea siempre que exista unas condiciones adecuadas



## Desnitrificación

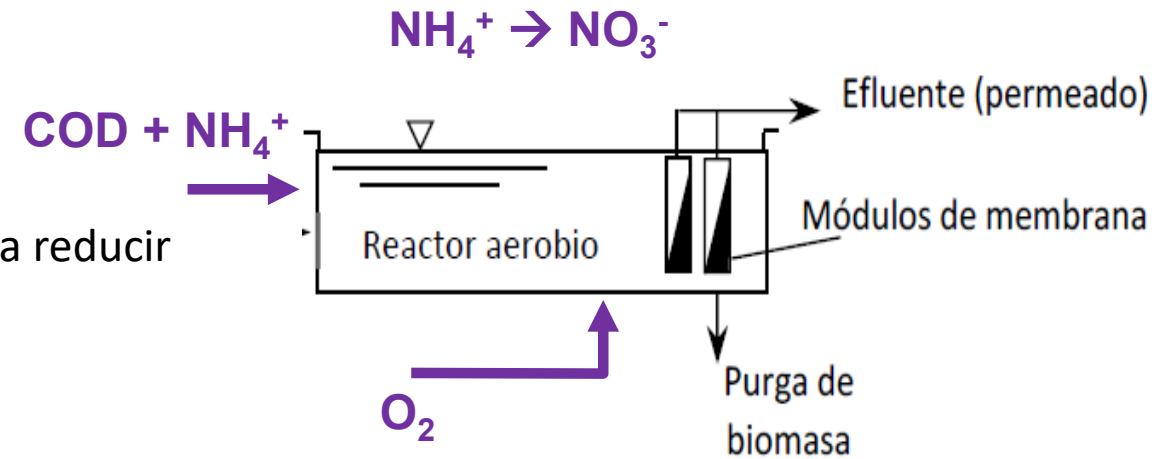
- El nitrato es reducido a nitrógeno gas
- Requiere la presencia de pseudomonas, bacilos y micrococos
- Esta etapa puede no ocurrir si no se dan las condiciones adecuadas



# PROCESO DE NITRIFICACIÓN BIOLÓGICA

## Conceptos generales

- Tiene lugar en el propio biorreactor para la degradación carbonosa
- Se elimina la totalidad del amonio
- El proceso consume alcalinidad por lo que puede llegar a reducir el valor del pH
- Necesidades carbonosas: DBO/ NKT < 5



## Concentración de oxígeno disuelto

- Requiere una concentración de oxígeno superior a la degradación carbonosa
- $\text{DO} > 2 \text{ mg/L}$
- Suele representar el principal consumidor de oxígeno de la EDAR

## Elevados valores de la Edad de lodo

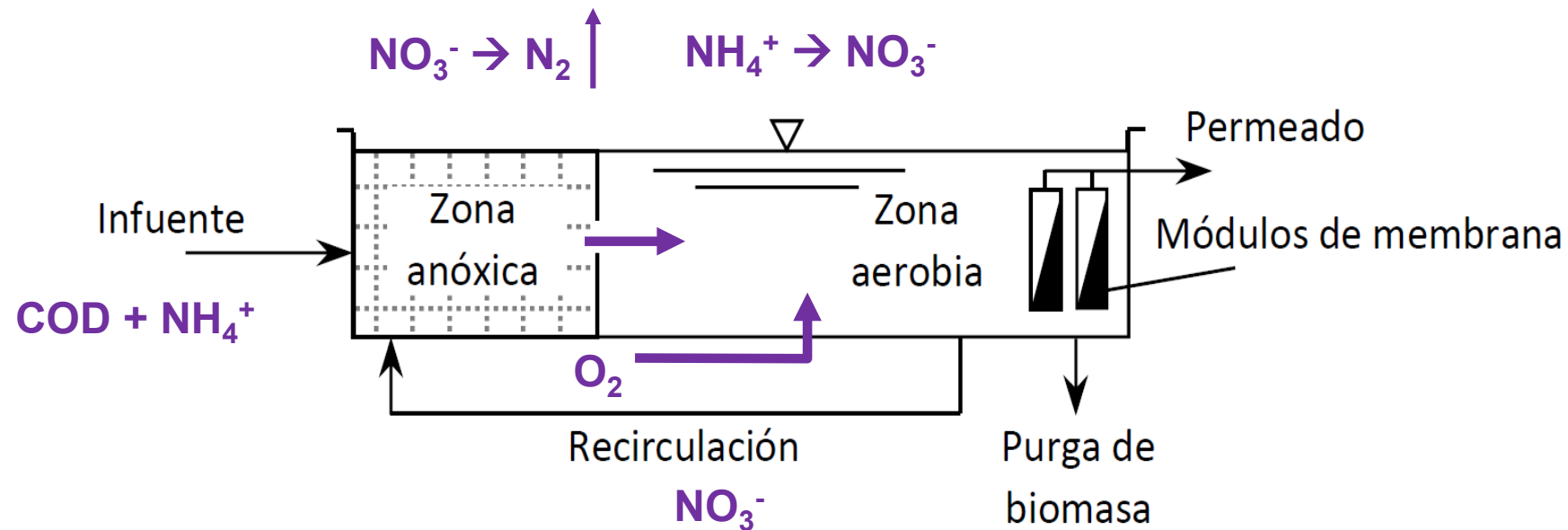
- Los valores de edad de lodo dependen de la temperatura de trabajo
- Los valores propuestos de trabajo son mínimos y dependen de las características del agua residual

Temperatura	SRT (d)
16 – 23 °C	5
11 – 13 °C	11
9 °C	19

# PROCESO DE DESNITRIFICACIÓN BIOLÓGICA

## Conceptos generales

- El nitrato se utiliza en vez del oxígeno para la oxidación de la materia carbonosa en condiciones anóxicas
- Condiciones anóxicas: DO < 0,5 mg/L
- Proceso capaz de eliminar todo el nitrógeno de la alimentación
- Recuperación parcial de la alcalinidad perdida durante la nitrificación
- La degradación carbonosa de la etapa anóxica permite recuperar el 20% del consumo total de oxígeno del reactor

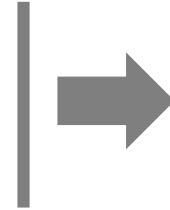


# CONCEPTOS GENERALES

---

## Fósforo presente en las aguas residuales

- Ortofosfato: Moléculas con un fosfato
- Polifosfatos: Moléculas con dos o más átomos de fósforo
- Fósforo orgánico: moléculas orgánicas



El fósforo procede:

- Efluentes de industrias metalúrgicas, lácteas
- Emulsiones
- Productos de limpieza
- Residuos humanos

## Formas de determinar el contenido en fósforo

- Ortofosfatos:  $\text{PO}_4^-$
- Fósforo total.

## Efectos de los compuestos nitrogenados en el efluente

- Problemas de eutrofización del medio receptor en caso de vertido
- Problemas de exceso de fertilización en el caso de reutilización
- Problemas de contaminación por espumas y exceso de fósforo

# ELIMINACIÓN QUÍMICA DEL FÓSFORO

## Precipitación mediante la dosificación de sales metálicas

- Cloruro férrico
- Sulfato de alúmina

Las sales dosificadas producen un precipitado de ortofosfato que se retira mediante la separación sólido- fluido que tiene lugar en el tratamiento secundario

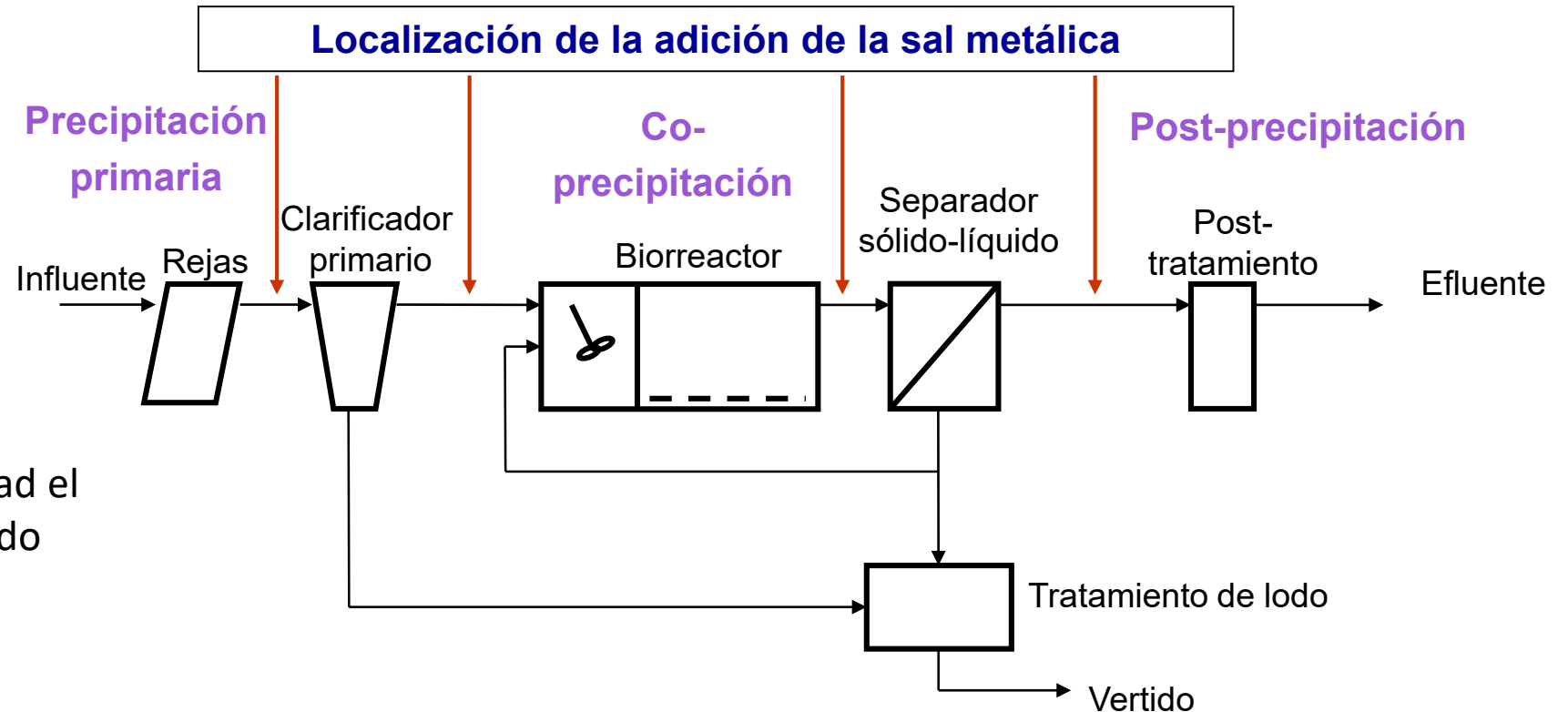
Cloruro Férrico



Sulfato de alúmina



Si es un agua con alta alcalinidad el las sales reaccionan produciendo hidróxidos



# ELIMINACIÓN BIOLÓGICA DEL FÓSFORO

## Ventajas

- El fósforo es asimilado por unas bacterias específicas (PAO)
- El nutriente se elimina con la propia corriente de fango
- No requiere la dosificación de químicos → se reduce los costes de operación

## Fundamentos

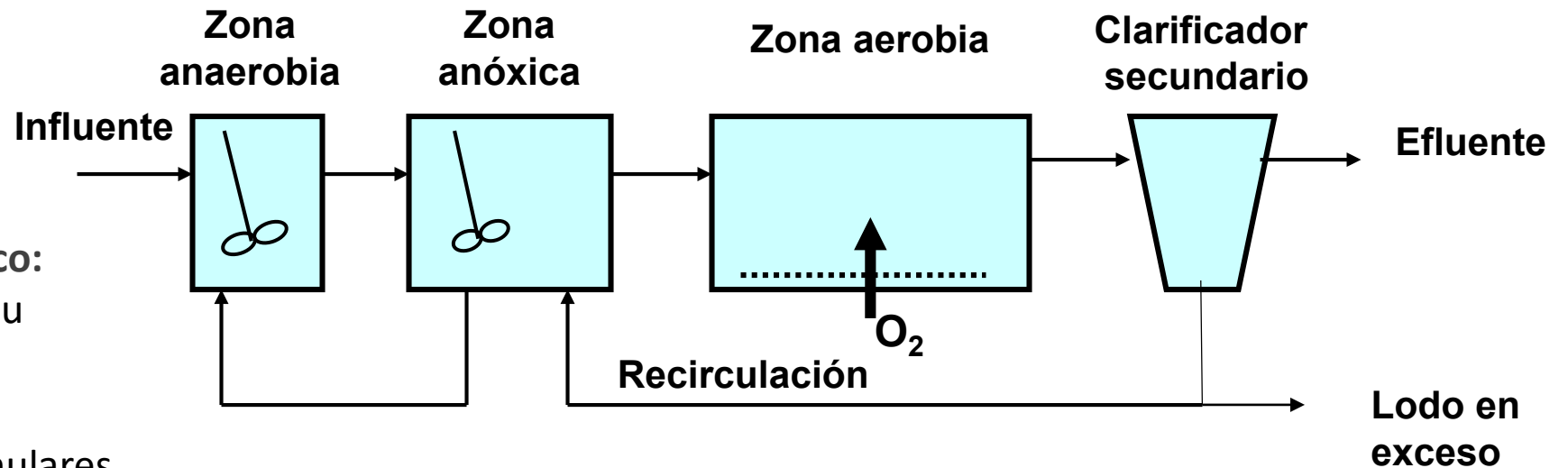
- Se deben desarrollar microorganismos acumuladores de polifosfatos en el interior celular
- El proceso biológico se baja en combinar regímenes de trabajo aerobio y anaerobias

### Régimen anaerobio:

toman energía de los polifosfatos celulares y se liberan como ortofosfatos

### Régimen aerobio y anóxico:

toman ortofosfatos para su transporte de energía y lo almacén en forma de polifosfatos celulares granulares que se eliminan con la biomasa



Con esta configuración se consigue la eliminación de nitrógeno