

Tema 12 – Tratamiento de Aguas Servidas

CI4102 Ingeniería Ambiental
Profesora Ana Lucia Prieto



Qué son aguas residuales (A-Res)?

En la RM:

100% Agua potable consumida → 90% Aguas residuales o servidas (A-Res)

De las A-Res → 99,9% es agua
0,01%???



Origen de las ARes

- *Aguas residuales domésticas* (aguas servidas): Caudal y composición variable (pero dentro de ciertos rangos)
- *Aguas residuales industriales* (residuos industriales líquidos o RILES): Caudal y composición depende del tipo de actividad industrial
 - Mataderos, industria alimenticia: Alta DBO y DQO
 - Celulosa, curtiembre: Materia orgánica y productos químicos
 - Metalúrgicas, textiles, minería: Inorgánicas u orgánicas no biodegradables.
- *Aguas lluvias*
- *Aguas grises?*



Composición de ARes domésticas

- Partículas sólidas
- Materia orgánica
 - 90% carbohidratos, proteínas y lípidos
 - Provenientes de heces y orina humanas, restos de alimentos y detergentes
- Microorganismos: proliferan bajo condiciones adecuadas (incluyendo patógenos)
- Otros constituyentes: Cloruros y sulfatos, nitrógeno y fósforo, carbonatos, tóxicos (arsénico y metales pesados), cont. orgánico, cont. emergentes, etc.

Sólidos Totales (S.T.)

Sólidos Suspendedos Totales (SST ó SS)

Sólidos Suspendedos Fijos (SSF)

Sólidos Suspendedos Volátiles (SSV)

Sólidos Disueltos Totales (SDT)

Sólidos Disueltos Fijos (SSF)

Sólidos Disueltos Volátiles (SSV)



Composición Típica de una Agua Residual Doméstica

CONTAMINANTE O INDICADOR	CONCENTRACIÓN	Unidades
Sólidos Totales	350-1200	mg/L
Disueltos Totales (*)	250-850	mg/L
Fijos	145-525	mg/L
Volátiles	105-325	mg/L
Suspendidos Totales	100-350	mg/L
Fijos	20-75	mg/L
Volátiles	80-275	mg/L
Sólidos Sedimentables	5-20	ml/L
DBO ₅ (a 20°C)	110-400	Mg/L
Carbono Orgánico Total (COT)	80-290	mg/L
DQO	250-1000	mg/L
Nitrógeno Total (como N)	20-85	mg/L
Orgánico	8-35	mg/L
Amonio Libre	12-50	mg/L
Nitritos	0	mg/L
Nitratos	0	mg/L
Fósforo Total (como P)	4-15	mg/L
Orgánico	1-5	mg/L
Inorgánico	3-10	mg/L
Aceites y grasas	50-150	mg/L
Cloruros (*)	30-100	mg/L
Alcalinidad (como CaCO ₃) (*)	50-200	mg/L
Coliformes Totales	106-108	NMP/100 ml
Coliformes Fecales	105-106	NMP/100 ml

*Coliformes son indicadores de contaminación bacteriológica.



Requerimientos de calidad de efluentes

En Chile están definidos por la Norma de Emisión para la Regulación de Contaminantes Asociados a las Descargas de Residuos Líquidos a Aguas Marinas y Continentales Superficiales (DS N° 90/2000)

<https://www.leychile.cl/Navegar?idNorma=182637>

Apuntan a resguardar usos de las aguas y a la protección del medio ambiente

La Superintendencia del Medio Ambiente (SMA) fiscaliza el cumplimiento de las Normas de Emisión de residuos líquidos hacia cuerpos de agua superficiales, subterráneos y marinos.

<http://www.sma.gob.cl/index.php/normas-de-emision>



Decreto 90: Establecimiento Emisor

Contaminante	Valor Característico	Carga contaminante media diaria (equiv. 100 Hab/dia) *
PH **	6-8	---
Temperatura **	20°C	---
Sólidos Suspendedos Totales	220 mg/L	3520 g/d
Sólidos Sedimentables **	6 ml/L lh	---
Aceites y Grasas	60 mg/L	960 g/d
Hydrocarburos fijos	10 mg/L	160 g/d
Hydrocarburos totales	11 mg/L	176 g/d
Hydrocarburos volátiles	1 mg/L	16 g/d
DBO5	250 mg O2/L	4000 g/d
Aluminio	1 mg/L	16 g/d
Arsénico	0,05 mg/L	0,8 g/d
Boro	0,75 mg/L	12,8 g/d
Cadmio	0,01 mg/L	0,16 g/d
Cianuro	0,20 mg/L	3,2 g/d
Cloruros	400 mg/L	6400 g/d
Cobre	1 mg/L	16 g/d
Cromo Total	0,1 mg/L	1,6 g/d
Cromo Hexavalente	0,05 mg/L	0,8 g/d
Estafio	0,5 mg/L	8 g/d
Fluoruro	1,5 mg/L	24 g/d
Fósforo Total	10 mg/L	160 g/d
Hierro	1,0 mg/L	16 g/d
Manganeso	0,3 mg/L	4,8 g/d
Mercurio	0,001 mg/L	0,02 g/d
Molibdeno	0,07 mg/L	1,12 g/d
Niquel	0,1 mg/L	1,6 g/d
Nitrógeno total kjeldahl	50 mg/L	800 g/d
Nitrito más Nitrito (lagos)	15 mg/L	240 g/d
Pentaclorofenol	0,009 mg/L	0,144 g/d
Plomo	0,2 mg/L	3,2 g/d
Selenio	0,01 mg/L	0,16 g/d
Sulfato	300 mg/L	4800 g/d
Sulfuro	3 mg/L	48 g/d
Tetracloroetano	0,04 mg/L	0,64 g/d
Tolueno	0,7 mg/L	11,2 g/d
Triclorometano	0,2 mg/L	3,2 g/d
Xileno	0,5 mg/L	8 g/d
Zinc	1 mg/L	16 g/d
Indice de Fenol	0,05 mg/L	0,8 g/d
Poder espumógeno **	5 mm	5 mm
SAAM	10 mg/L	160 g/d
Coliformes Fecales o termotolerantes	107 NMP/100 ml	1,6x10 ¹² coli/d



Requerimientos de calidad de efluentes

LÍMITES MÁXIMOS PERMITIDOS PARA LA DESCARGA DE RESIDUOS LIQUIDOS A CUERPOS DE AGUA FLUVIALES				LÍMITES MÁXIMOS PERMITIDOS PARA LA DESCARGA DE RESIDUOS LIQUIDOS A CUERPOS DE AGUA FLUVIALES CONSIDERANDO LA CAPACIDAD DE DILUCION DEL RECEPTOR			
Contaminantes	Unidad	Expresión	Limite Máximo Permitido	Contaminantes	Unidad	Expresión	Limite Máximo Permitible
Aceites y Grasas	mg/L	A y G	20	Aceites y Grasas	mg/L	A y G	50
Aluminio	mg/L	Al	5	Aluminio	mg/L	Al	10
Arsénico	mg/L	As	0,5	Arsénico	mg/L	As	1
Boro	mg/L	B	0,75	Boro	mg/L	B	3
Cadmio	mg/L	Cd	0,01	Cadmio	mg/L	Cd	0,3
Cianuro	mg/L	CN-	0,20	Cianuro	mg/L	CN-	1
Cloruros	mg/L	Cl-	400	Cloruros	mg/L	Cl-	2000
Cobre Total	mg/L	Cu	1	Cobre Total	mg/L	Cu	3
Coliformes Fecales o Termotolerantes	NMP/100 ml	Coli/100 ml	1000	Coliformes Fecales o Termotolerantes	NMP/100 ml	Coli/100 ml	1000
Indice de Fenol	mg/L	Fenoles	0,5	Indice de Fenol	mg/L	Fenoles	1
Cromo Hexavalente	mg/L	Cr6+	0,05	Cromo Hexavalente	mg/L	Cr6+	0,2
DBO5	mg O2/L	DBO5	35 *	DBO5	mg O2/L	DBO5	300
Fósforo	mg/L	P	10	Fósforo	mg/L	P	5
Fluoruro	mg/L	F-	1,5	Fluoruro	mg/L	F-	15
Hydrocarburos Fijos	mg/L	HF	10	Hydrocarburos Fijos	mg/L	HF	50
Hierro Disuelto	mg/L	Fe	5	Hierro Disuelto	mg/L	Fe	10
Manganeso	mg/L	Mn	0,3	Manganeso	mg/L	Mn	3
Mercurio	mg/L	Hg	0,001	Mercurio	mg/L	Hg	0,01
Molibdeno	mg/L	Mo	1	Molibdeno	mg/L	Mo	2,5
Niquel	mg/L	Ni	0,2	Niquel	mg/L	Ni	3
Nitrógeno Total Kjeldahl	mg/L	NKT	50	Total Kjeldahl	mg/L	NKT	75
Pentaclorofenol	mg/L	C6HCl5	0,009	Pentaclorofenol	mg/L	C6HCl5	0,01
PH	Unidad	PH	6,0 - 8,5	PH	Unidad	PH	6,0 - 8,5
Plomo	mg/L	Pb	0,05	Plomo	mg/L	Pb	0,5
Poder Espumógeno	mm	PE	7	Poder Espumógeno	mm	PE	7
Selenio	mg/L	Se	0,01	Selenio	mg/L	Se	0,1
Sólidos Suspendedos Totales	mg/L	SS	80 *	Sólidos Suspendedos Totales	mg/L	SS	300
Sulfatos	mg/L	SO42	1000	Sulfatos	mg/L	SO42	2000
Sulfuros	mg/L	S2-	1	Sulfuros	mg/L	S2-	10
Temperatura	C	T	35	Temperatura	°C	T	40
Tetracloroetano	mg/L	C2Cl4	0,04	Tetracloroetano	mg/L	C2Cl4	0,4
Tolueno	mg/L	C6H5CH3	0,7	Tolueno	mg/L	C6H5CH3	7
Triclorometano	mg/L	CHCl3	0,2	Triclorometano	mg/L	CHCl3	0,5
Xileno	mg/L	C6H4C2H6	0,5	Xileno	mg/L	C6H4C2H6	5
Zinc	mg/L	Zn	3	Zinc	mg/L	Zn	20

* = Para los residuos líquidos provenientes de plantas de tratamientos de aguas servidas domésticas, no se considerará el contenido de algas, conforme a la metodología descrita en el punto 6.6.

<http://www.leychile.cl/Consulta/listaMasSolicitudesxmat?agr=1020&sub=492&tipCat=1>

Requerimientos de calidad de efluentes

Otros límites de descarga presentes en la norma 90 dependiendo del punto de vertimiento:

<http://www.leychile.cl/Consulta/listaMasSolicitudesxmat?agr=1020&sub=492&tipCat=1>

- Límites máximos permitidos para la descarga de residuos líquidos a **cuerpos de agua lacustres**
- Límites máximos permitidos para la descarga de residuos líquidos a **cuerpos de agua marinos dentro de la zona de protección litoral**
- Límites máximos de concentración para descarga de residuos líquidos a **cuerpos de agua marinos fuera de la zona de protección litoral**



Recolección y Tratamiento de ARes

- Sistemas de alcantarillado conducen residuos domésticos, industriales y de áreas de servicio. (+aportes no controlados de aguas lluvias)
- Ecurrimiento debe fluir sin presión, para recibir aportes durante el trayecto
- El caudal de diseño de un sistema de alcantarillado se obtiene por la fórmula de Harmon:

$$Q_{\text{máx. } h_{AS}} = M \times Q_{md_{AS}}$$

$$M = 1 + \frac{14}{4 + \sqrt{\frac{P}{1000}}}$$

M = coeficiente de Harmon;

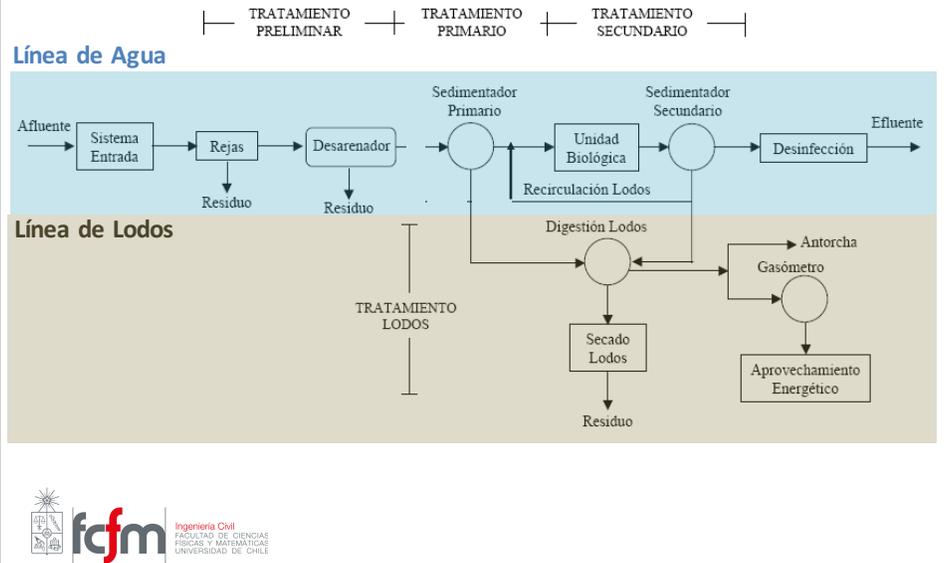
P = población servida ($P > 1\ 000$ habitantes);

$Q_{\text{máx. } h_{AS}}$ = caudal máximo horario de aguas servidas;

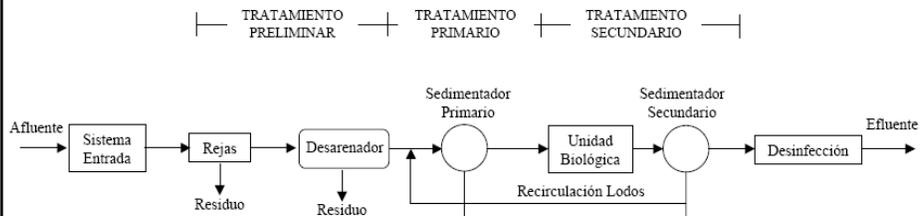
$Q_{md_{AS}}$ = caudal medio diario de aguas servidas.



Planta de Tratamiento (PTA) de ARes – Sistema convencional simplificado



Tratamiento de Ares – Línea de Aguas

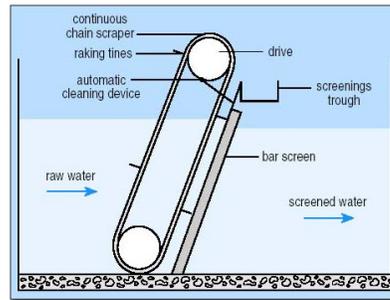


OBJETIVOS DE REMOCION:

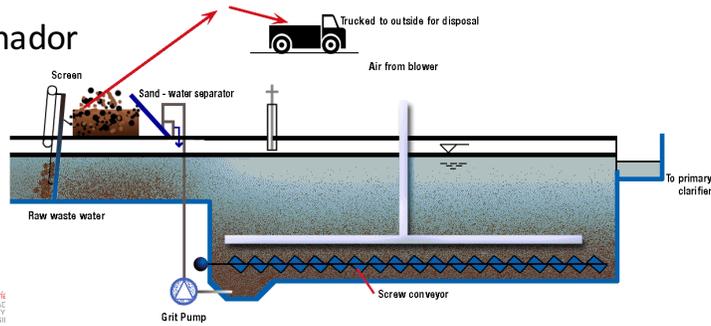
- Tratamiento Preliminar: Remoción de sólidos de gran tamaño
- Tratamiento Primario: Remoción de SS
- Tratamiento Secundario: Remoción de DBO
- Tratamiento Terciario: Remoción de Nutrientes y otros compuestos (e.g., metales). Depende de las características de afluente y objetivos de tratamiento y/o normativa vigente.
- Desinfección: Eliminación de patógenos. Garantizar la salubridad del agua tratada.

Tratamiento Preliminar

- Rejas



- Desarenador

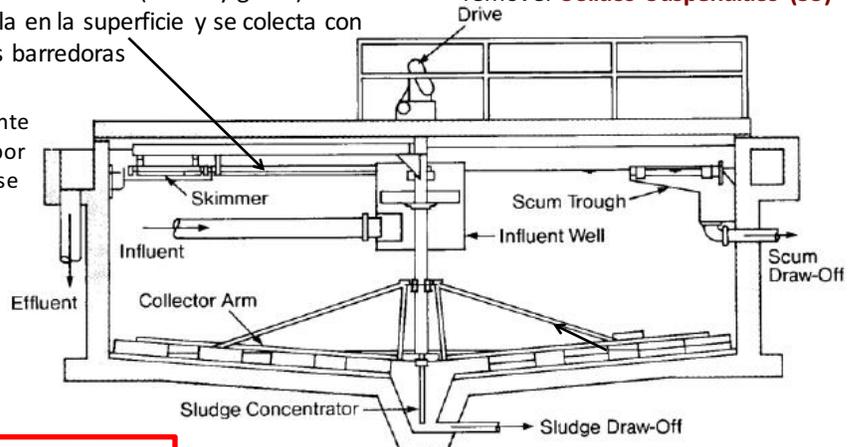


Tratamiento Primario - Sedimentadores

El material flotante (aceite y grasa) se acumula en la superficie y se colecta con bandas barreadoras

Objetivo: proceso físico para remover **Sólidos Suspendedos (SS)**

Efluente sale por rebalse

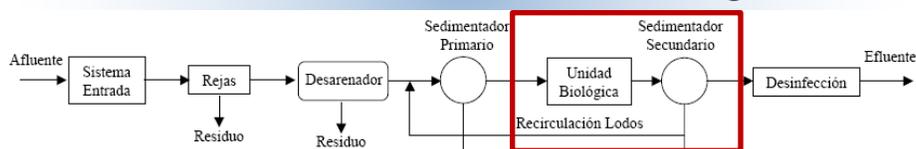


Remoción
 SS: 50-65%
 DBO₅: 30-45%
 Fósforo: 20%

El material sedimentado se llama **LODO PRIMARIO**



Tratamiento secundario o biológico



Objetivo: Remoción de demanda de oxígeno (DBO)

El tipo de tratamiento difiere en cómo se pone en contacto los microorganismos con el agua residual.

Ejemplos:

- 1) Lagunas de estabilización
- 2) Medio fijo (biofiltros)
- 3) Crecimiento suspendido (LODOS ACTIVADOS)

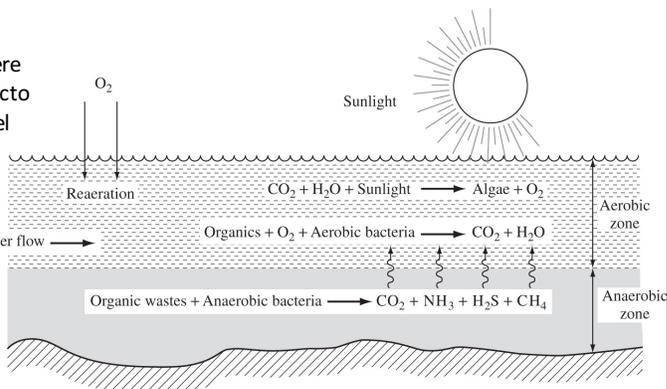
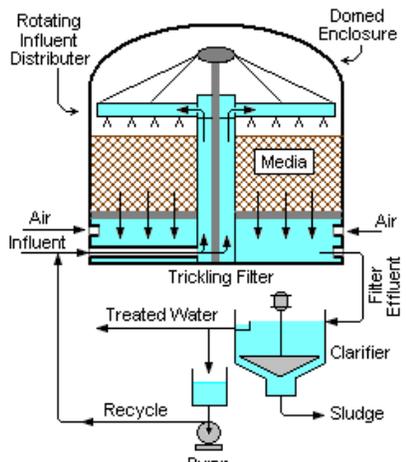


Figure: 06-17

Copyright © 2008 Pearson Prentice Hall, Inc.

Medio fijo

Filtro con rociadores (trickling filter)



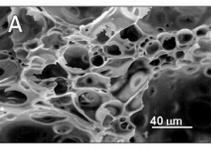
DESARROLLO DE BIOPELICULAS EN MEDIO POROSO
<https://microbialcellfactories.biomedcentral.com/articles/10.1186/1475-2859-4-4>



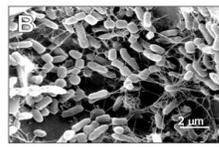
Medio de soporte con alta porosidad



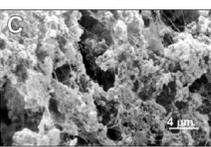
Ejemplo: piedra pome



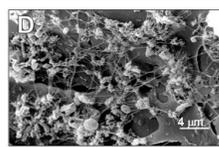
A



B



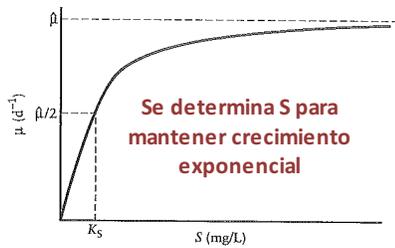
C



D



Curva de crecimiento vs Conc. de sustrato (S)



$$r_x = \mu X \quad (1)$$

$$\mu = \hat{\mu} \frac{S}{K_s + S} \quad (2)$$

$$r_x = -Y r_s \quad (3)$$

Modelo de Monod

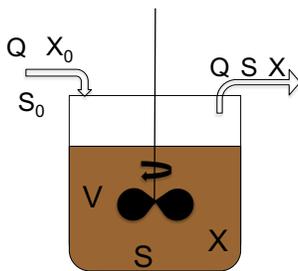
$$r_s = -\frac{X}{Y} \mu = -\frac{X}{Y} \left(\frac{\hat{\mu} S}{K_s + S} \right) \quad (4)$$

S = Conc. de sustrato (Ej.: DBO₅)
 μ̂ = Tasa de crecimiento máxima bajo condiciones de saturación de sustrato
 K_s = Constante de saturación o concentración de sustrato cuando la tasa de crecimiento es la mitad de la máxima
 Y = Yield, (kg SS per kg BOD)
 Masa de microorganismos producidos por masa de sustrato usado
 Y es la capacidad de crecimiento y corresponde a la "eficiencia" de la transformación de sustrato en biomasa

μ̂ y K_s deben evaluarse para cada sistema. Una vez se determinan, son constante como también lo son S y X

21

Crecimiento suspendido sin reciclaje



Balance de masa para sólidos (X)

$$d(XV)/dt = Entradas - Salidas \pm rV$$

$$V \frac{dX}{dt} = QX_0 - QX - Y(r_s)V$$

Asumiendo estado estacionario y X₀ = 0

$$-QX - Y(r_s)V = 0 \quad \text{o} \quad r_s = -\frac{X}{Y} \left(\frac{Q}{V} \right) = -\frac{X}{Y} \left(\frac{1}{\theta_c} \right) \quad (5)$$

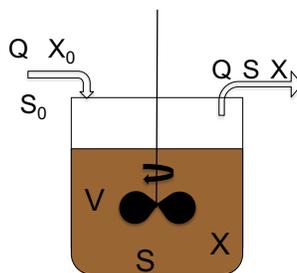
Tiempo de retención celular o Edad del lodo

θ_c = Masa de sólidos en el sistema / Masa de sólidos gastados / tiempo = tiempo

Cuando NO hay reciclaje → Edad de lodos = TRH

22

Crecimiento suspendido sin reciclaje



Usando el modelo de Monod para el sustrato $r_s = -\frac{X}{Y} \left(\frac{\hat{\mu} S}{K_s + S} \right)$ (4)

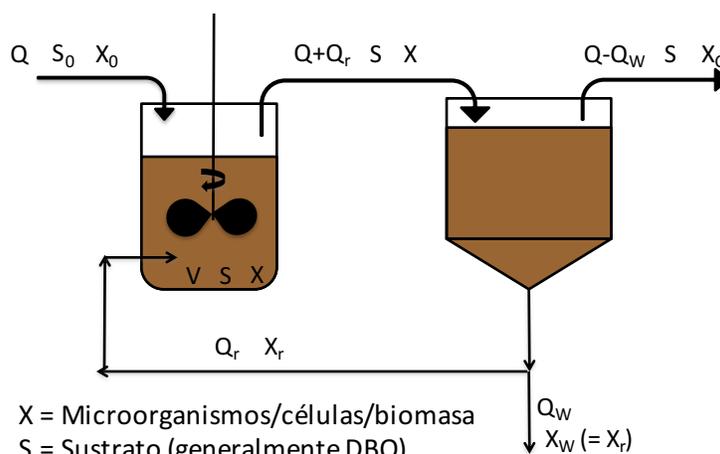
Del balance de masa $r_s = -\frac{X}{Y} \left(\frac{1}{\theta_c} \right)$ (5)

$$\frac{1}{\theta_c} = \frac{\hat{\mu} S}{K_s + S} = \mu$$
 (6)

Reorganizando $S = \frac{K_s}{\hat{\mu} \theta_c - 1}$ (7)

La concentración de S en el reactor (DBO degradada) es una función de las constantes cinéticas (NO se pueden controlar) y de la edad del lodo (SI podemos controlar)

Generalmente, los lodos (X) se reciclan para aumentar el tiempo de residencia dentro del sistema (y disminuir S aún más)

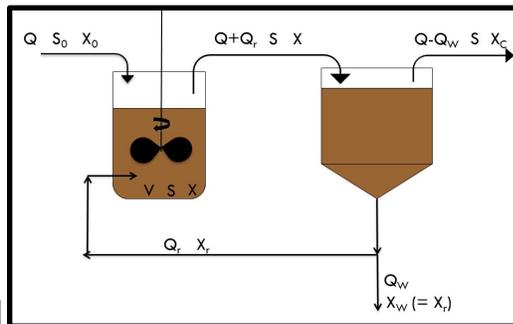


Diseño de sistemas de lodos activados

- Los sistemas de lodos activados se diseñan en base a la carga (cantidad de materia orgánica) relativa a los microorganismos disponibles. Esta fracción se conoce como F/M.
- Es difícil medir en forma precisa estas cantidades, y por lo tanto se aproximan como:

F → DBO en el tanque de aeración (masa/día)

M → Sólidos suspendidos (volátiles) en el tanque de aeración (masa)



$$\frac{F}{M} = \frac{QS_0}{VX} = \frac{S_0}{\bar{t}X}$$

$$\theta_c = \frac{XV}{Q_r X_r}$$

Si consideramos muerte celular:

$$S = \frac{K_s(1 + k_d \theta_c)}{\mu_{max} \theta_c - (1 + k_d \theta_c)}$$

Donde k_d es la constante cinética de decaimiento.

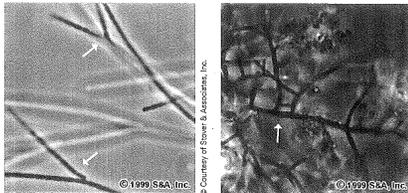


FCFM FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS UNIVERSIDAD DE CHILE

Diseño de sistemas de lodos activados

El contenido del tanque de aeración se denomina **licor mezclado**, y se asume que la fracción volátil de los sólidos suspendidos del licor mezclado corresponden a microorganismos activos (SSVLM)

$$SSVLM = X = \frac{Q_r X_r + Q X_0 + r_x V}{Q_r + Q}$$



SSVLM en lodos activados es ~2000 – 4000 mg/L

Es importante mantener la una masa de microorganismos robusta/constante sino...

Bulking sludge – Cuando los microorganismos no se aglomeran y flotan

Si los sólidos no se sedimentan bien en el clarificador secundario, entonces los lodos de reciclaje pierden concentración y X cae en el sistema.

Sludge Volume Index

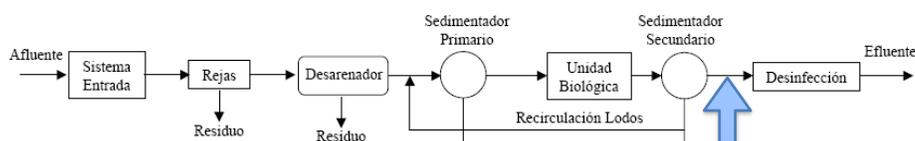
$$SVI = \frac{(V \text{ sludge after 30 min mL / L}) \times 1000 \text{ mg / g}}{\text{mg / L suspended solids}}$$

<100 acceptable
>200 alto "bulking"



fcfm Ingeniería Civil FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS UNIVERSIDAD DE CHILE

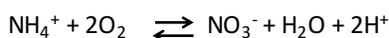
Tratamiento Terciario (Avanzado)



REMOCIÓN DE NITRÓGENO

Nitrificación

En lodos activados, ocurre con edades de lodo largas (>15-20 días)



Denitrificación



Proceso anóxico que requiere una fuente de carbon. Conversión de NO_3^- a N_2 (gas)

Después del tratamiento secundario, los niveles de SS y DBO_5 deben ser apropiados para la descarga. Otros componentes como **metales**, **compuestos orgánicos recalcitrantes**, **nitrógeno**, y **fósforo** pueden estar presentes en altas cantidades.

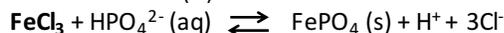
Remoción de P

Especies en ARes: ortofosfato (PO_4^{3-}), polifosfato (P_2O_7) o fósforo orgánico

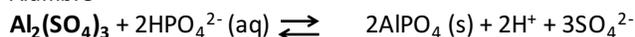
En tratamiento avanzado, se utilizan procesos para **precipitar el fósforo**. Estos procesos requieren tanques de reacción y sedimentación (generación de lodos).

Compuestos químicos usados:

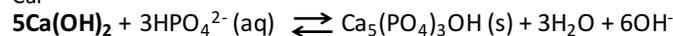
Cloruro de hierro (III)



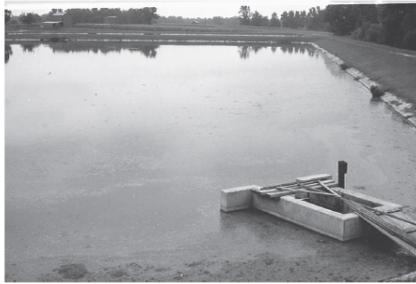
Alumbre



Cal



Tratamiento Terciario (Otros)



Otros métodos biológicos remueven el fósforo por inclusión del fósforo en las células de los microorganismos.

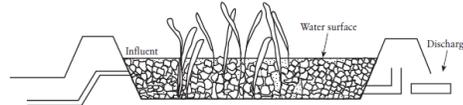


Figure 11.27 Subsurface flow wetland.

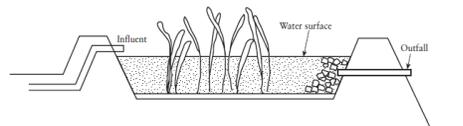
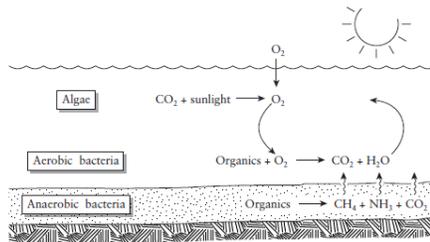


Figure 11.26 Surface flow wetland.

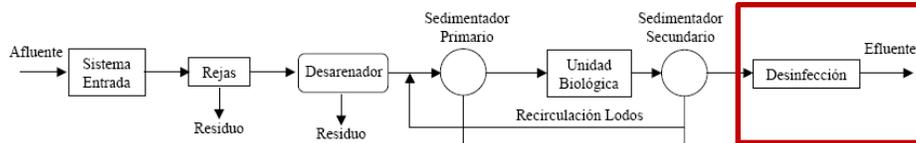


Lagunas de oxidación



Humedales construidos

Final del tratamiento de la línea de agua



Características del líquido después de tratamiento 2^{ario}:

~ DBO = 15 mg/L y SS = 20 mg/L

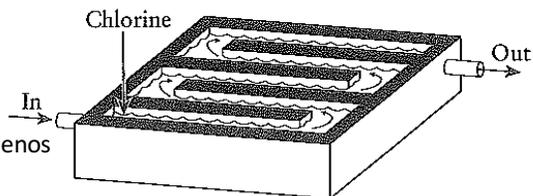
Dosis: Aguas Andinas usa aprox. 6 mg/L de cloro libre

Tiempo de contacto: ~30 min con cloro

Características del cuerpo de agua receptor:

~ DBO = 2 hasta >15 mg/L

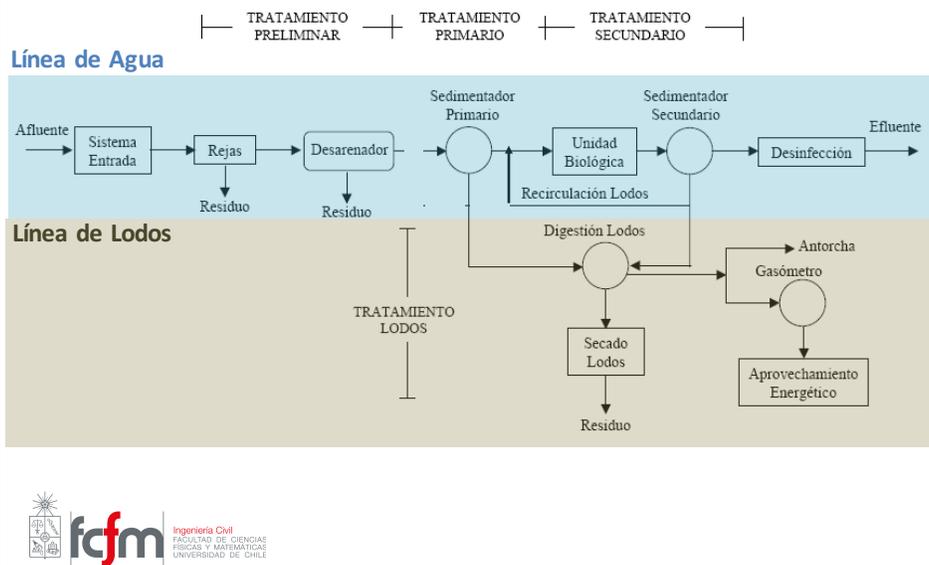
Desinfección: Eliminar cualquier posibilidad de ocurrencia de patógenos



Antes de la descarga se necesita **decloración**



Planta de Tratamiento (PTA) de ARes – Sistema convencional simplificado



Manejo de lodos

- Lodos son suspensiones muy concentradas de se extraen de los sedimentadores
- En general, constituyen menos del 1% del volumen de residuos tratado, pero requieren hasta 50% de los costos de capital y operación
- Lodo primario (crudo): desde el sedimentador primario
- Lodo secundario (biológico): desde el sedimentador secundario
- Cuando se convierte en producto se denomina *biosólidos*
- Estabilización puede ser *aeróbica* o *anaeróbica*
- Cantidad de lodo producido puede obtenerse por balance de masas



Estabilización: Digestión anaeróbica

El proceso ocurre en dos fases:

- Etapa I: Hidrólisis de orgánicos y conversión a ácidos orgánicos

Bacterias formadoras de ácidos
 Materia orgánica →

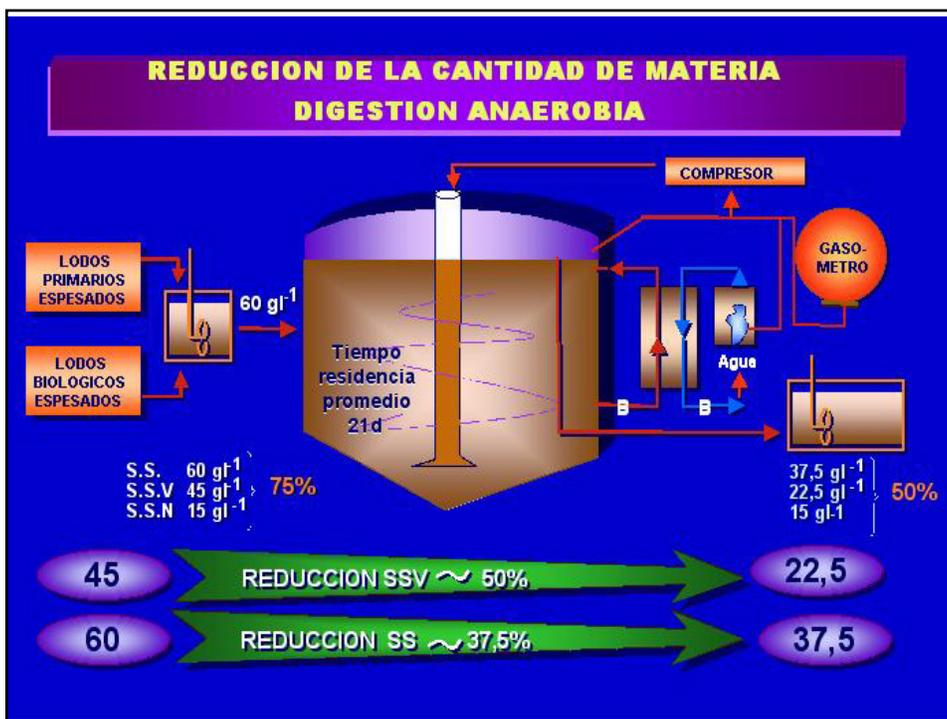
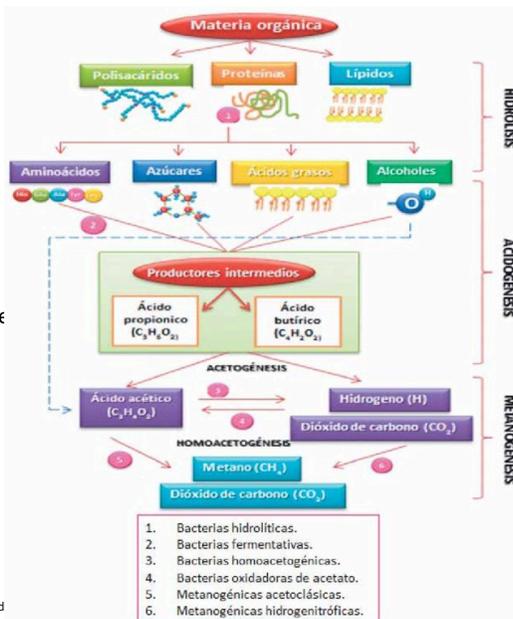
productos intermedios + CO₂ + H₂S + H₂O

- Etapa II: Conversión de ácidos orgánicos a metano (2/3) y dióxido de carbono (1/3)

Bacterias productoras de metano
 Ácidos orgánicos → CO₂ + CH₄

Etapa II es muy sensible a las condiciones de pH (7±0.3), temperatura (33±2C), exceso de ácidos, presencia de oxígeno o sustancias tóxicas

Bacterias anaerobias: procesos que realizan y contribuyen a la sostenibilidad de la vida en el planeta. DOI: [10.22490/24629448.1717](https://doi.org/10.22490/24629448.1717)

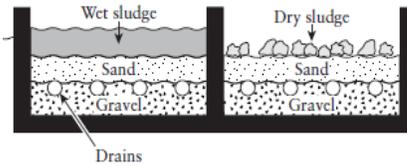


Espesamiento de lodos

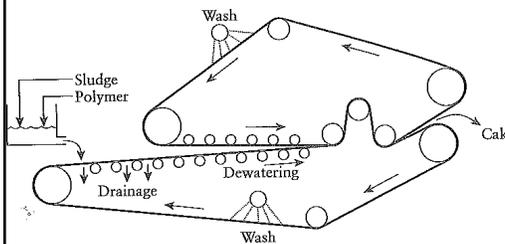
Propósito: disminuir el volumen de sólidos para disposición final



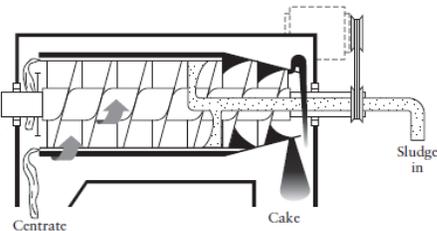
Camas de secado



Filtros de prensa



Centrífugas



Tratamiento de lodos y disposición

Disposición final

1. Incineración

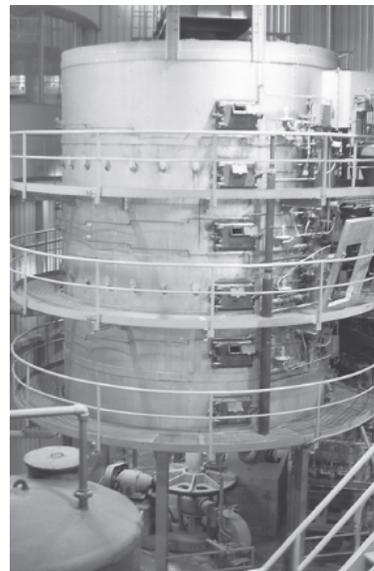
Se convierten en CO_2 , H_2O e inorgánicos

2. Acondicionamiento de suelos

Fertilizantes o biosólidos



3. Rellenos sanitarios



© Courtesy of F. Aarne Vesilind



Resumen de procesos en tratamiento de aguas residuales

Proceso	Propósito	Métodos comunes	Reducciones típicas (%)
Sedimentación primaria	Remover SS del agua servida cruda y concentrar lodos al 4-6%	Tpo. Retención ≤ 1 h Q/A ≥ 100 m/día (prim) Q/A ≥ 60 m/día (prim+act)	SS 50% DBO 30%
Sedimentación secundaria	Remover SS del licor mezclado y concentrar lodos al 0.5-2%	T.R. ≤ 2 h Q/A ≥ 40 m/día	SS 90% DBO 90% N 40% P 20%
Oxidación aeróbica	Convertir materia orgánica coloidal y disuelta en microorganismos	Aeración de agua residual y microorganismos por 6 h	DBO 90% (conversión)
Digestión anaeróbica	Estabilizar lodos primarios y secundarios y concentrar al 6-8%	Descomposición anaeróbica por 30 días a 35 C	VSS 50% Volumen 30%
Desinfección	Destruir patógenos	T.R. ≤ 15 min con 0.5 mg/l de cloro residual	Coliformes 99%