



Departamento de  
Ingeniería Química y  
Tecnología Farmacéutica  
Universidad de La Laguna

# Tema 5: Procesos Biológicos para el tratamiento del agua

Tecnologías de Tratamiento y de Gestión de las Aguas

Oliver Díaz López

Elisabet Segredo Morales

Enrique González Cabrera





# Tratamiento Secundario convencional

# CONCEPTOS GENERALES

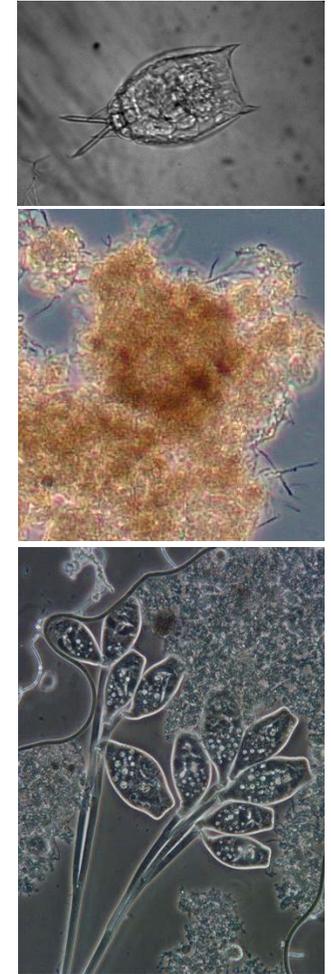
## Objetivo

- Estabilización de la materia orgánica
- Reducción de la materia orgánica presente
- Podría producirse una eliminación de nutrientes

## Rendimientos de depuración esperados del tratamiento secundario

- Sólidos en suspensión: 90%
- Materia Orgánica: 70 - 75%
- Otros procesos pueden alcanzar el mismo rendimiento, pero no son rentables
- El proceso biológico imita lo que ocurriría en la propia naturaleza

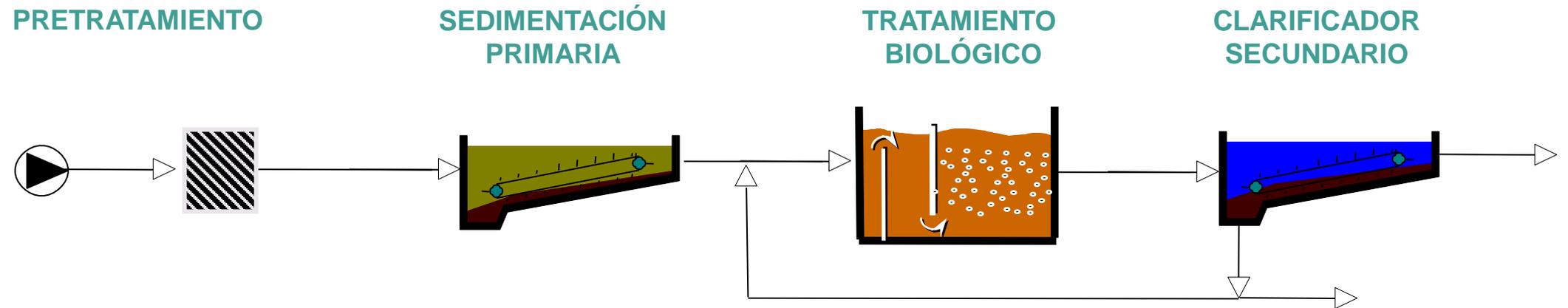
**El tratamiento secundario centra toda la atención en un proceso de tratamiento es el corazón de la Estación de Tratamiento de Aguas Residuales**



# VISIÓN GLOBAL DEL TRATAMIENTO SECUNDARIO

## Sistema Convencional de Lodos Activos

Para entender y comprender el tratamiento secundario analizaremos el sistema convencional de Lodos Activos



### Pretratamiento (1)

Rejas → eliminación de gruesos

Desarenador/desengrasador → eliminación de grasa/aceites y arenas

### Sedimentación primaria (2)

Sedimentador → eliminación de sólidos sedimentables

### Tratamiento Biológico (3)

Reactor → eliminación materia orgánica. Los procesos son:

- En suspensión: requieren de la separación
- Fijos: no requiere de separación

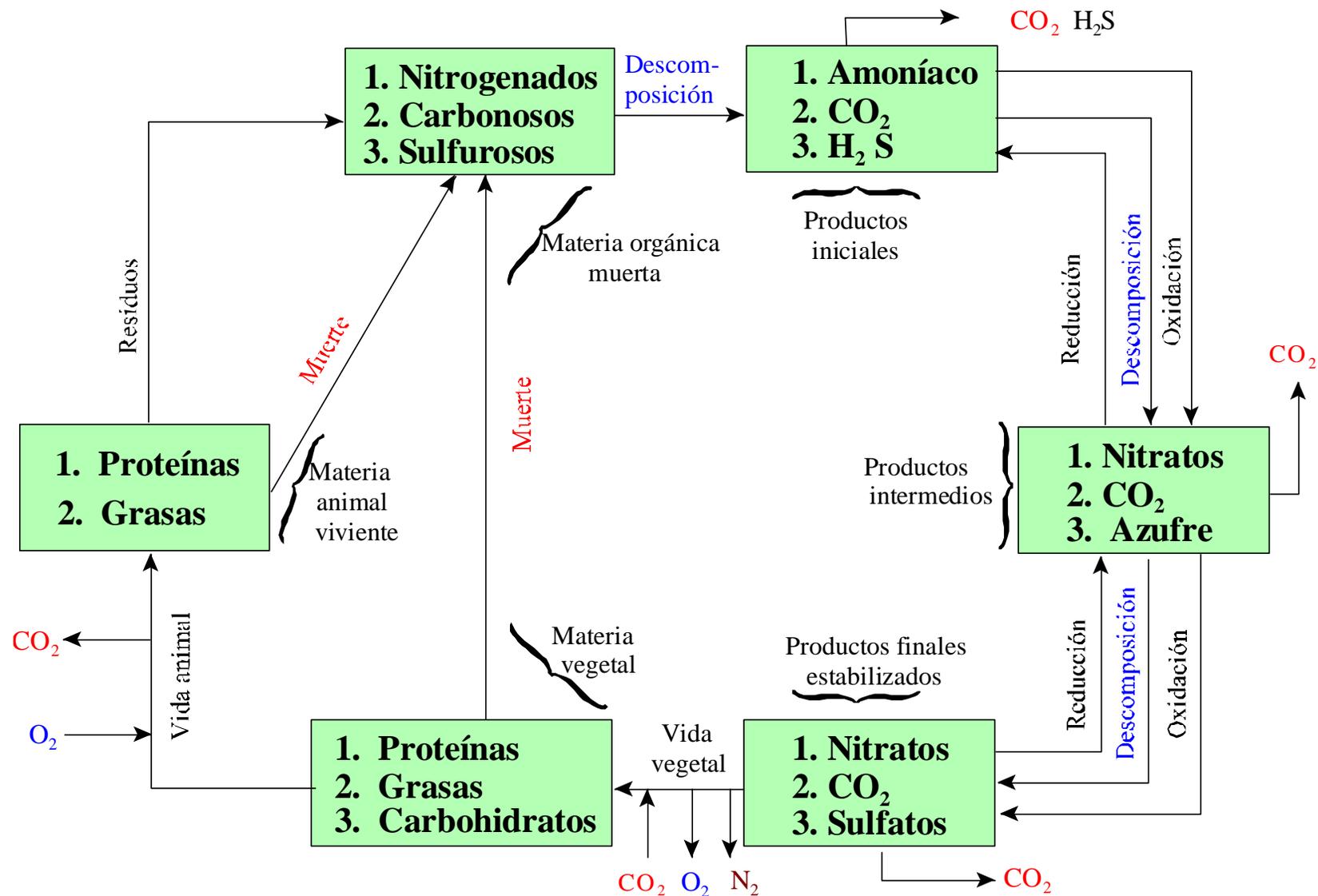
### Clarificador secundario (4)

- Sedimentador → Lodos activados

# PROCESO BIOLÓGICO

## Degradación Carbonosa

En este tema no analizaremos la degradación de nutrientes, aunque esta pueda ocurrir parcialmente en un reactor únicamente concebido para la degradación carbonosa



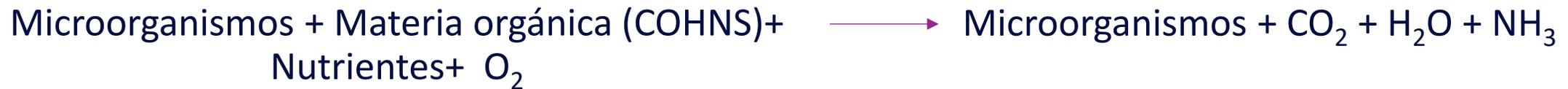
# PROCESO BIOLÓGICO

---

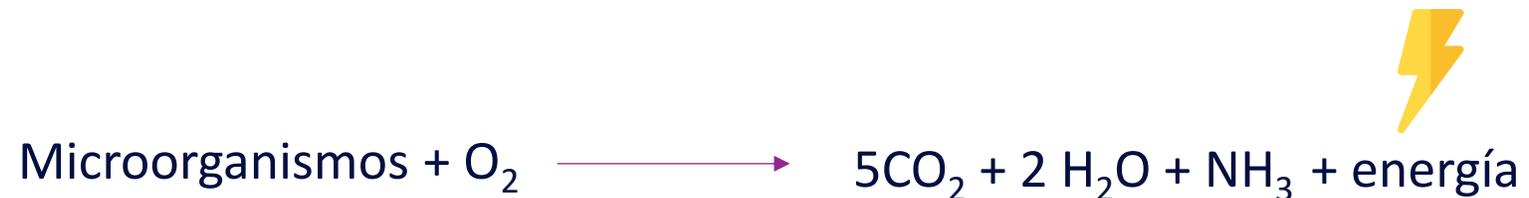
## Simplificación del proceso biológico

Se aprovecha la actividad de los microorganismos para que se alimenten de la materia orgánica permitiendo la depuración y aumentar su población

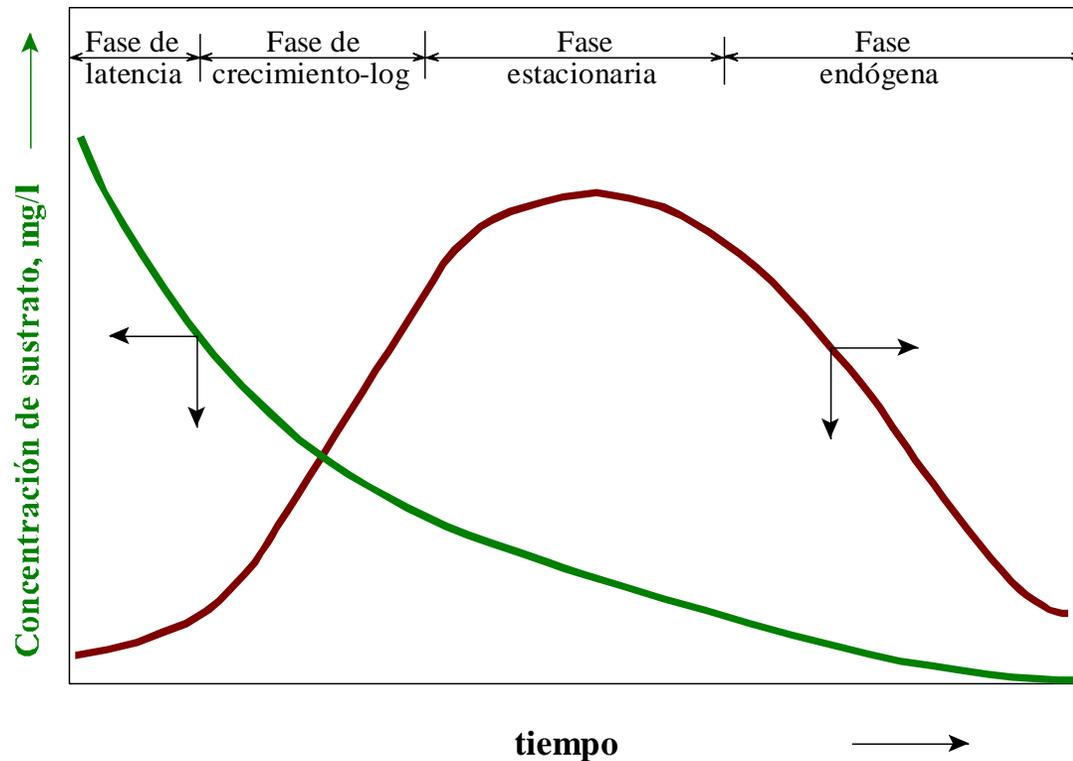
### Oxidación y Síntesis



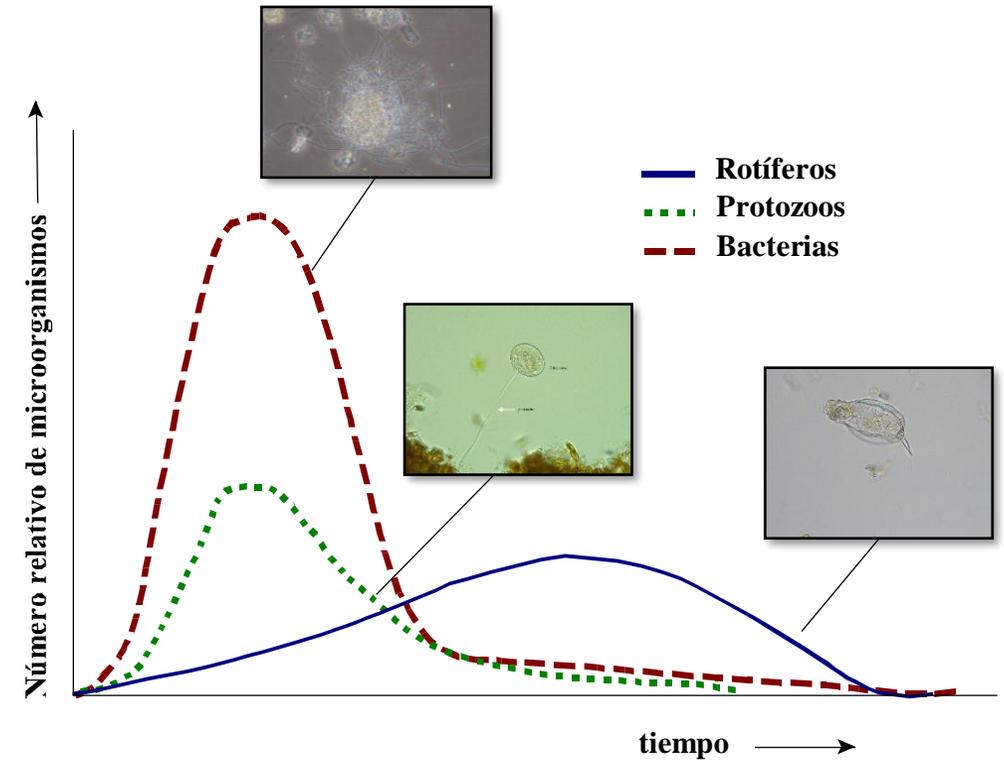
### Respiración Endógena



# CRECIMIENTO MICROBIANO Y CONSUMO DE SUSTRATO



Curva típica de crecimiento microbiano



Crecimiento relativo de los microorganismos durante la estabilización de la materia orgánica

# CRECIMIENTO MICROBIANO Y CONSUMO DE SUSTRATO

## Velocidad de crecimiento celular

La ecuación cinética de crecimiento microbiano puede asumirse a una reacción de primer orden

$$r_g = \frac{dX}{dt} = \mu X$$

- $r_g$ : tasa de crecimiento bacteriano (masa/volumen·t)
- $\mu$ : velocidad de crecimiento microbiana (tiempo<sup>-1</sup>)
- X: concentración de microorganismos

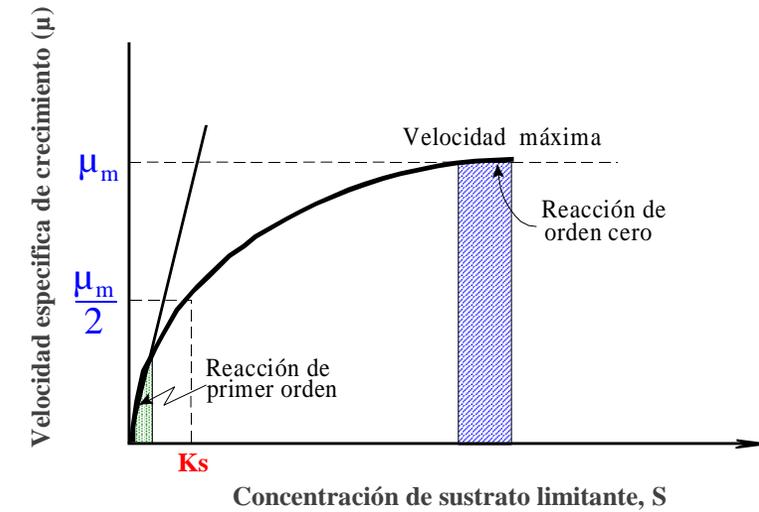
## Tasa de crecimiento o velocidad específica de crecimiento ( $\mu$ )

No se puede determinar para suspensiones orgánicas complejas → **CINÉTICA DE MONOD**

- $\mu_m$ : velocidad de crecimiento microbiana máxima (tiempo<sup>-1</sup>)
- S: concentración de sustrato limitante
- $K_s$ : Es la constante de velocidad media, es la concentración de sustrato a la mitad de la tasa de crecimiento (masa/volumen)

$$\mu = \mu_m \frac{S}{K_S + S} \quad \therefore S \gg K_S \rightarrow \mu = \mu_m$$

Se considera que la producción de biomasa está condicionada por la velocidad de consumo de sustrato y que éste es limitante



# CRECIMIENTO MICROBIANO Y CONSUMO DE SUSTRATO

## Velocidad de utilización de sustrato

Una parte del sustrato se transforma en células nuevas y otra parte se oxida.

Para un mismo sustrato la cantidad de nuevas células formadas es la misma y, por tanto;

$$r_g = -Y r_{su}$$

- $r_g$ : tasa de crecimiento bacteriano (masa/volumen·t)
- $r_{su}$ : tasa de utilización de sustrato (masa/volumen·t)
- Y: Rendimiento o coeficiente celular que se define como la cantidad de células formadas por sustrato consumido

Teniendo en cuenta el valor de la velocidad de crecimiento microbiano

$$r_{su} = -\frac{\mu_m SX}{Y(K_s + S)} \xrightarrow{k = \mu_m / Y} r_{su} = -\frac{KSX}{(K_s + S)}$$

El parámetro K se define como la tasa máxima de utilización del sustrato por unidad de masa de microorganismo

# CRECIMIENTO MICROBIANO Y CONSUMO DE SUSTRATO

## Metabolismo endógeno

Hay algunos microorganismos que se encuentran en fase de muerte o tienen una actividad depredadora

Se produce una disminución de la masa celular y es proporcional a la concentración de microorganismos presentes

$$r_d = K_d X$$

- $r_d$ : tasa de metabolismo endógeno (masa/volumen·t)
- $K_d$ : coeficiente de descomposición endógena (tiempo<sup>-1</sup>)
- $X$ : concentración de microorganismos

La velocidad de crecimiento neto de biomasa queda así

$$r'_g = r_g - r_d \longrightarrow r'_g = \mu_m \frac{XS}{K_S + S} - k_d X = \left[ \frac{\mu_m S}{K_S + S} - k_d \right] = \mu' X$$

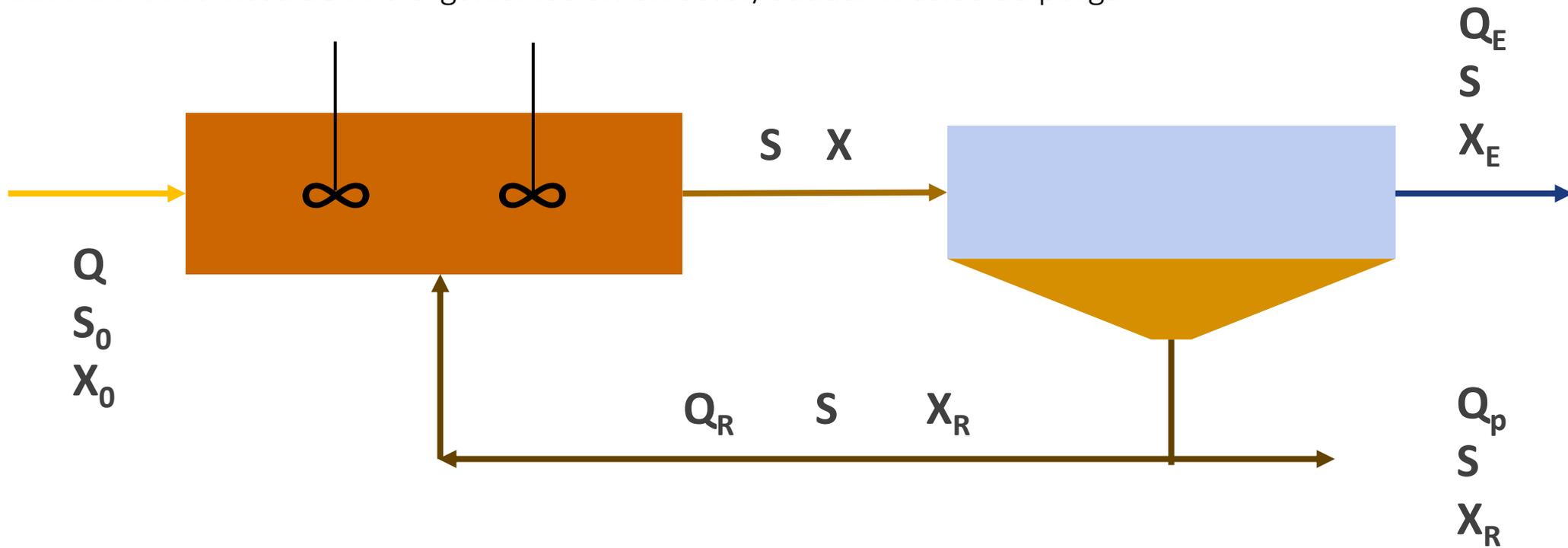
- El parámetro  $\mu'$  representa la tasa o velocidad específica neta de crecimiento (tiempo<sup>-1</sup>)
- Los efectos de la respiración endógena sobre la producción neta permiten definir el  $Y_{obs}$ :

$$Y_{obs} = - \frac{r'_g}{r_{su}}$$

# DIMENSIONAMIENTO PRELIMINAR DE UN BIORREACTOR

## Consideraciones

- Se asume un modelo de **Mezcla Perfecta**: La composición de la corriente de salida es igual a la composición de cualquier punto del reactor.
- La degradación biológica solo ocurre en el reactor.
- Definición del tiempo de residencia celular.
- **Edad de lodo**: masa de microorganismos en el reactor/Caudal másico de purga



# DIMENSIONAMIENTO PRELIMINAR DE UN BIORREACTOR

## Grado específico de utilización (U)

Se define como la masa total de sustrato asimilado por masa de microorganismo en el reactor

$$U = \frac{\text{masa total sustrato asimilado}}{\text{masa microorganismo en reactor}} = \frac{Q(S_0 - S)}{V \cdot X}$$

## Rendimiento del sistema (Y Y<sub>obs</sub>)

- Y: Se define como la masa total de biomasa producida por masa de sustrato consumida
- Y<sub>obs</sub>: tiene en cuenta el crecimiento neto de biomasa

$$Y_{obs} = \frac{Y}{1 + \theta_c \cdot K_d}$$

## Edad de lodo (SRT o $\theta_c$ )

- Se define como el tiempo que pasa en el reactor una unidad de masa de microorganismo

$$SRT = \theta_c = \frac{V \cdot X}{Q_p \cdot X_R + (Q - Q_p) \cdot X_E}$$

# DIMENSIONAMIENTO PRELIMINAR DE UN BIORREACTOR

## Concentración de microorganismos en el reactor (X)

Depende de la Edad de lodo y el rendimiento de depuración que se desee:

$$X = \frac{\theta_c \cdot Y \cdot (S_0 - S)}{TRH \cdot (1 + \theta_c \cdot k_d)}$$

## Producción de microorganismos ( $P_X$ )

$$P_X = Y_{obs} \cdot Q \cdot (S_0 - S)$$

## Caudal de Purga

$$Q_P = \frac{V \cdot X}{\theta_c \cdot X_R}$$

## Necesidades de oxígeno (SOUR)

Se define como las necesidades de oxígeno necesarias para la degradación de la materia carbonosa y la producción de lodos. En la práctica esta cantidad se sobredimensiona teniendo factores empíricos

$$SOUR = \frac{\text{masa } O_2}{\text{tiempo}} = \frac{Q \cdot (S_0 - S)}{0,68} - 1,42 \cdot P_X$$

# CONTROL BÁSICO DEL PROCESO

---

## Parámetros de control

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

Oxígeno disuelto

Concentración  
de Biomasa  
MLSS  
MLVSS

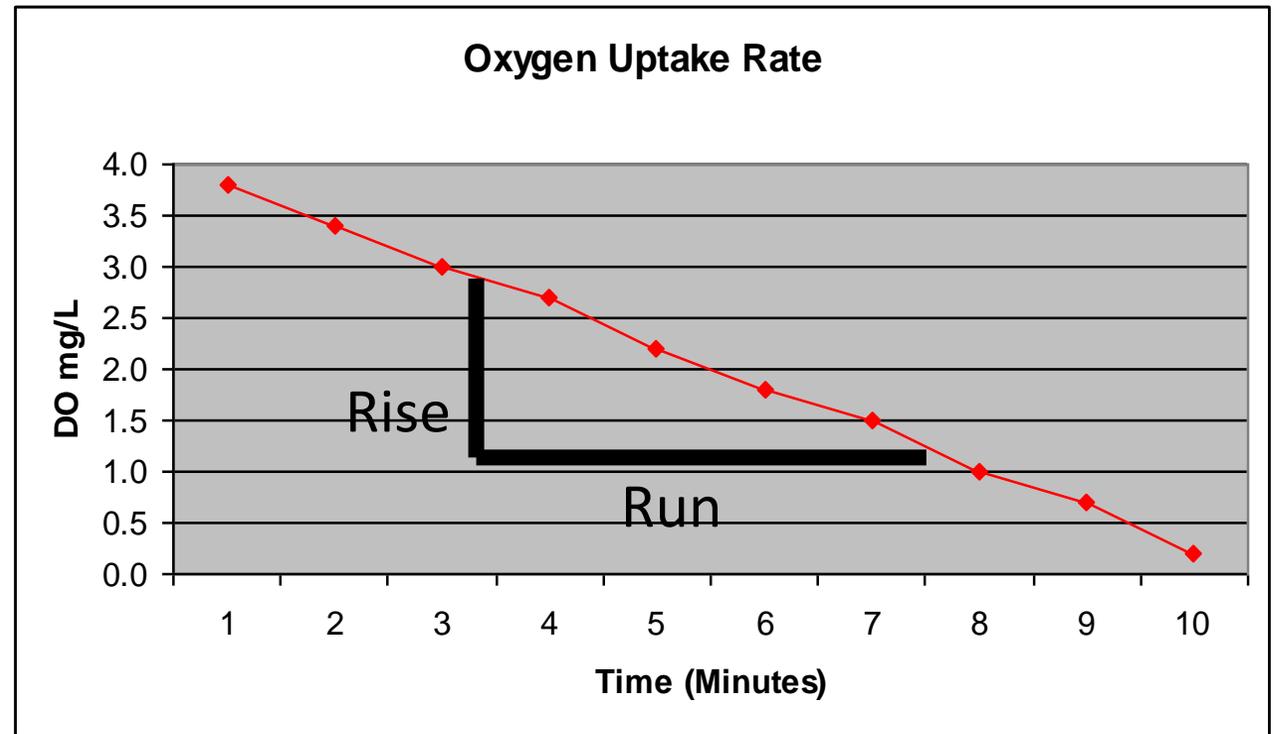
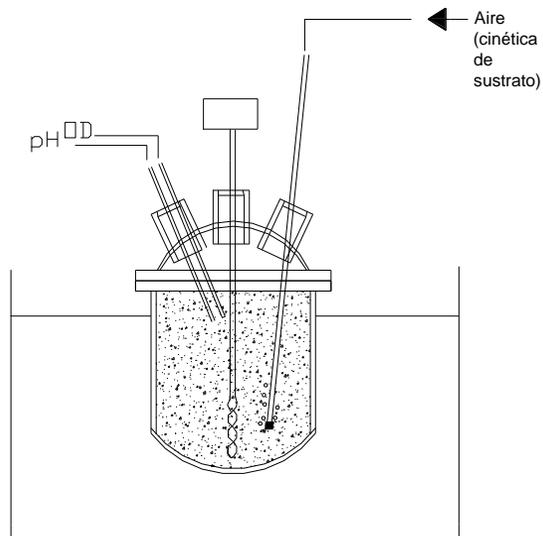
Edad del Fango  
SRT

Relación F/M

# OXÍGENO DISUELTO

## Métodos Respirométricos

- En la práctica se puede evaluar la actividad biológica de la suspensión, así como sus necesidades de aireación mediante ensayos Respirométricos
- Se basan en la medición en continuo del oxígeno de una suspensión biológica frente:
  - Aporte de sustrato
  - Respiración endógena



# CONCENTRACIÓN DE BIOMASA

## Concentración de microorganismos

Para el tratamiento de las aguas residuales se selecciona la concentración de sólidos suspendidos totales o volátiles como medida de la concentración de biomasa

**Sólidos Suspendidos en el Licor Mezcla  
MLSS**  
Determinación rápida y sencilla

**Sólidos Suspendidos Volátiles en el Licor Mezcla  
MLVSS**  
Permite establecer un valor más certero de biomasa

## Índice Volumétrico del Fango o Índice Molhman

En el caso del sistema de Lodos Activados es crítico puesto que permite analizar la capacidad de la suspensión a sedimentar

### Definición:

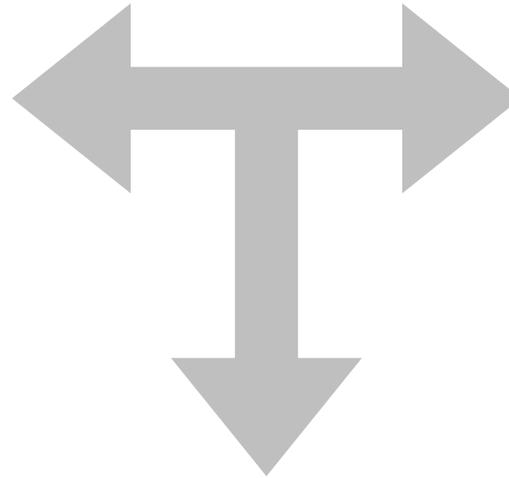
Relación entre el volumen (mL) de lodos sedimentados en 30 min de una muestra de un 1L y la concentración de MLSS en g/L

IVF (mL/g)	Sedimentabilidad
< 80	Excelente
80 – 150	Moderada
> 150	Pobre

# RELACIÓN ALIMENTACIÓN-MICROORGANISMOS F/M

## DBO, DQO, TOC

Mide la cantidad de materia orgánica que sirve de alimento a los microorganismos



## Sólidos suspendidos en la suspensión (MLSS, MLVSS)

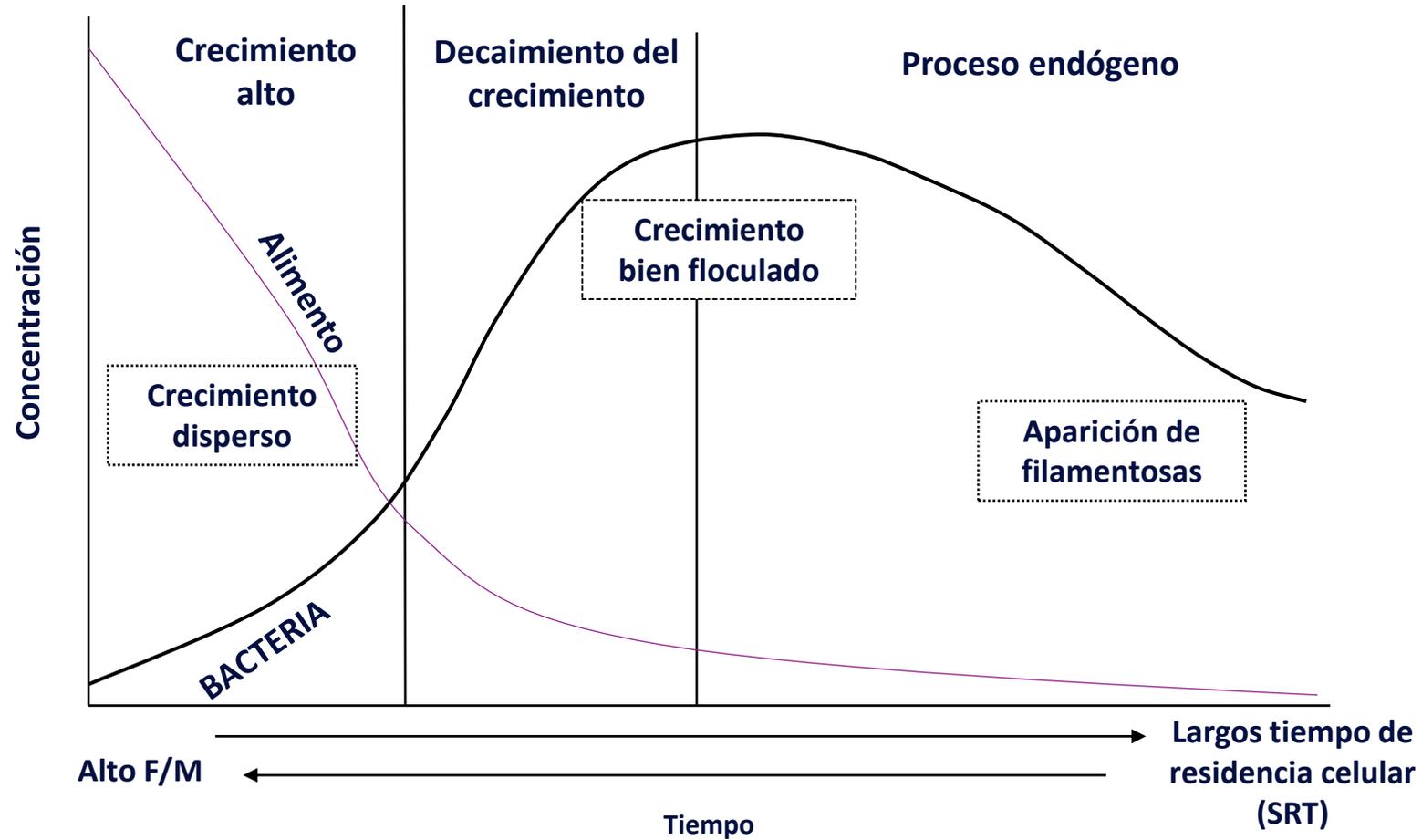
Mide la concentración de microorganismo en la suspensión

## Ratio F/M

Establece el balance entre la cantidad de alimento disponible por masa de microorganismos en la suspensión

$$F/M = \frac{S_0 \text{ (mg/L)} \cdot Q \text{ (m}^3\text{/d)}}{X \text{ (mg/L)} \cdot V \text{ (m}^3\text{)}} \xrightarrow{TRH = \frac{\text{Volumen}}{Q}} F/M = \frac{DQO \text{ (mg/L)}}{MLSS \text{ (mg/L)} \cdot TRH \text{ (d)}}$$

# RELACIÓN ALIMENTACIÓN-MICROORGANISMOS F/M



# EDAD DE LODO

## ¿Qué ocurrirá si reducimos el caudal de purga?

- Se incrementa la edad de lodo
- Se incrementa la concentración de sólidos
- Alteran las propiedades de sedimentación
- Se reduce el valor de F/M
- El crecimiento microbiano se ve afectado
- Aumentará la respiración endógena
- Mayores necesidades de aireación para mantener la misma concentración



$$Y_{obs} = \frac{Y}{1 + \theta_c \cdot K_d}$$

$$P_X = Y_{obs} \cdot Q \cdot (S_0 - S)$$

$$X = \frac{\theta_c \cdot Y \cdot (S_0 - S)}{TRH \cdot (1 + \theta_c \cdot k_d)}$$

$$F/M = \frac{S_0 \text{ (mg/L)} \cdot Q \text{ (m}^3\text{/d)}}{X \text{ (mg/L)} \cdot V \text{ (m}^3\text{)}}$$

$$SOUR = \frac{\text{masa } O_2}{\text{tiempo}} = \frac{Q \cdot (S_0 - S)}{0,68} - 1,42 \cdot P_X$$

**El seguimiento y control de la EDAD de Lodo es clave para poder hacer un control del biorreactor.**

Además, los caudales de recirculación al reactor son claves para mantener un buen equilibrio en el sedimentador.

# RANGO DE VALORES DE OPERACIÓN ESTABLES

## Parámetros de operación proceso biológico aerobio

Parámetro	Rango ideal	Rango aceptable
Temperatura	20 – 30 °C	15 – 38 °C
pH	7 – 8	6 – 9
Oxígeno Disuelto	2 – 4 mg/L	1 – 6 mg/L
Sustancias Tóxicas	Ninguna	Constantes
Nutrientes (DBO:N:P)	100 : 5 : 1	Mantener valores residuales de N & P
Edad de Lodo	2 – 20 d	5 – 50 d
F/M	0,3 – 0,6 kgDBO <sub>5</sub> /Kg MLVSS · d	0,3 – 0,6 kgDBO <sub>5</sub> /Kg MLVSS · d

# PROBLEMAS COMUNES EN UNIDADES DE LODOS ACTIVADOS

---

RECUERDA: es fácil solo tienes que mantenerlos felices de lo contrario.....

Espuma

Concentraciones  
altas de MLSS

Altura de lecho  
alta en el  
clarificador

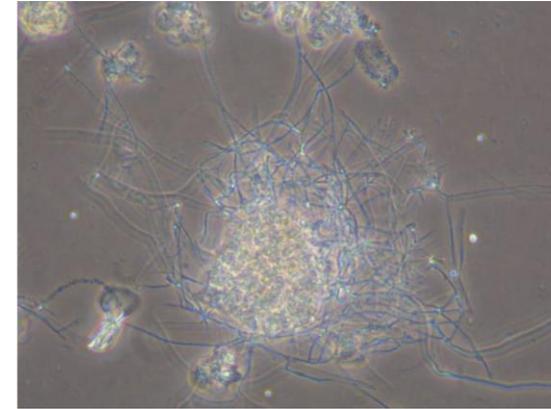
Mala  
Sedimentación

Tratamiento incompleto – DBO, DQO, NH<sub>3</sub>

# PROBLEMAS COMUNES EN UNIDADES DE LODOS ACTIVADOS

## Espumas y baja sedimentabilidad

Causa Común	Acción correctiva
Crecimiento excesivo de microorganismos filamentosos: <i>Nocardia</i> , <i>Microthrix parvicella</i> , etc.	Control biológico (edad de lodo y F/M)
Excesiva aireación	Control aireación
Presencia de gas (metano, nitrógeno...)	Desgasificación previa al sedimentador
Presencia de jabones y detergentes	Añadir un antiespumante
Presencia de aceites y grasas	Control en el pretratamiento



# PROBLEMAS COMUNES EN UNIDADES DE LODOS ACTIVADOS

## Elevada concentración de MLSS y baja sedimentabilidad

Causa Común	Acción correctiva
Excesiva carga másica o volumétrica	Ajuste de carga
Excesiva concentración de biomasa	Reducir la edad de lodo
Flóculos pequeños (<20 micras)	Control biológico (edad de lodo y F/M)
Crecimiento excesivo de filamentosas	Control biológico, aireación y pretratamiento
Crecimiento disperso	Analizar entrada de compuestos tóxicos, control biológico

# PROBLEMAS COMUNES EN UNIDADES DE LODOS ACTIVADOS

## Problemas de biodegradación

Causa Común	Acción correctiva
Inhibición	Analizar entrada de compuestos tóxicos
Excesiva carga másica o volumétrica	Control biológico (edad de lodo y F/M)
Baja concentración de biomasa	Aumentar edad de lodo