

**Protocolo de trabajo en la aplicación  
de la Respirometría BM  
para  
procesos de fangos activos  
con nitrificación**

***SURCIS S.L***

# **Reactivos y accesorios**

***SURCIS S.L***

# Reactivos para la respirometría BM

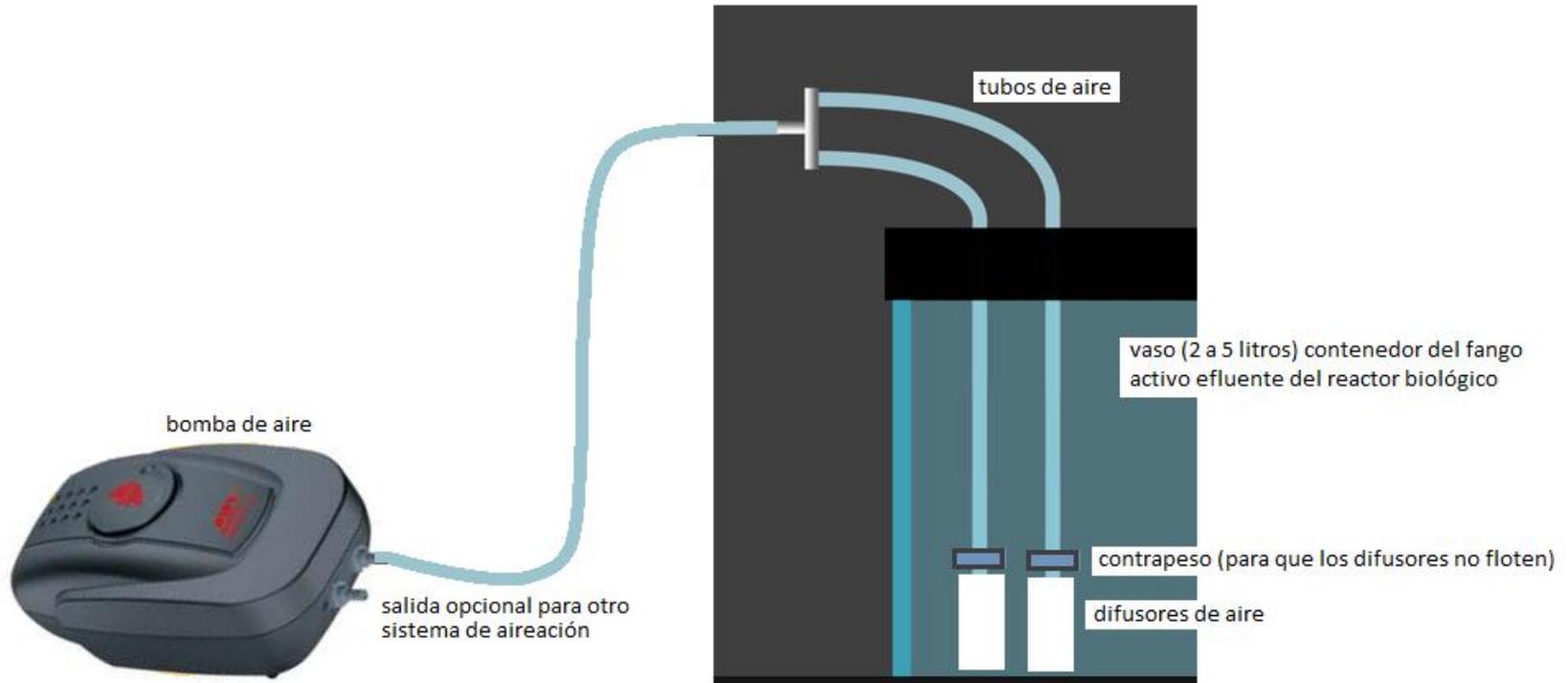
La respirometría BM puede necesitar algunos reactivos para la realización de algunas aplicaciones y calibraciones.

Reactivo	Aplicaciones	Comentarios
<b>Acetato sódico</b>	Estándar orgánico de referencia  Determinación del coeficiente de crecimiento de la biomasa heterótrofa ( $Y_H$ )	Pueden haber otras aplicaciones.
<b>Sulfato de Zinc</b>	Floculación del agua residual (con control a pH neutro), como primer paso para conseguir una muestra realmente soluble (el 2º paso sería la filtración a $0,45 \mu\text{m}$ ) para la determinación de la DQO rápidamente biodegradable (DQOrb)	Cuando el agua residual proviene de la salida de una primera decantación con un elevado grado de decantabilidad, muchas veces no es necesaria la utilización del sulfato de zinc.  También se puede filtrar a $0,1 - 0,2 \mu\text{m}$
<b>Alil Tiourea (ATU)</b>	Inhibición de la nitrificación	Solo es necesario cuando hay nitrificación.
<b>Cloruro de amonio</b>	Estándar de nitrógeno amoniacal en ensayos de nitrificación [ $1 \text{ mg NH}_4\text{Cl} = 0.26 \text{ mg NH}_4\text{-N}$ ]	Solo es necesario cuando hay nitrificación .
<b>Sulfito sódico</b>	Estándar para la calibración del modo R.	Esta calibración ya se realiza en fábrica (Surcis), y no será necesaria hasta pasados varios meses (normalmente: 6 – 8 meses) Seguir el procedimiento del Manual de funcionamiento.
<b>Cloruro de cobalto</b>	Catalizador para el ensayo realizado con el sulfito sódico en la calibración del modo R.	Seguir el procedimiento del Manual de funcionamiento.

# Aireador para pasar el fango activo a respiración endógena

Varios ensayos de respirometría necesitan el fango activo en fase de respiración endógena (sin sustrato pendiente de depurar) y para ello es necesario airear el fango activo más descargado del reactor (fango efluente o final del reactor) durante el tiempo necesario para ello (normalmente se deja el fango aireándose de un día para otro)

El sistema de aireación puede ser perfectamente el normalmente utilizado en acuarios domésticos .



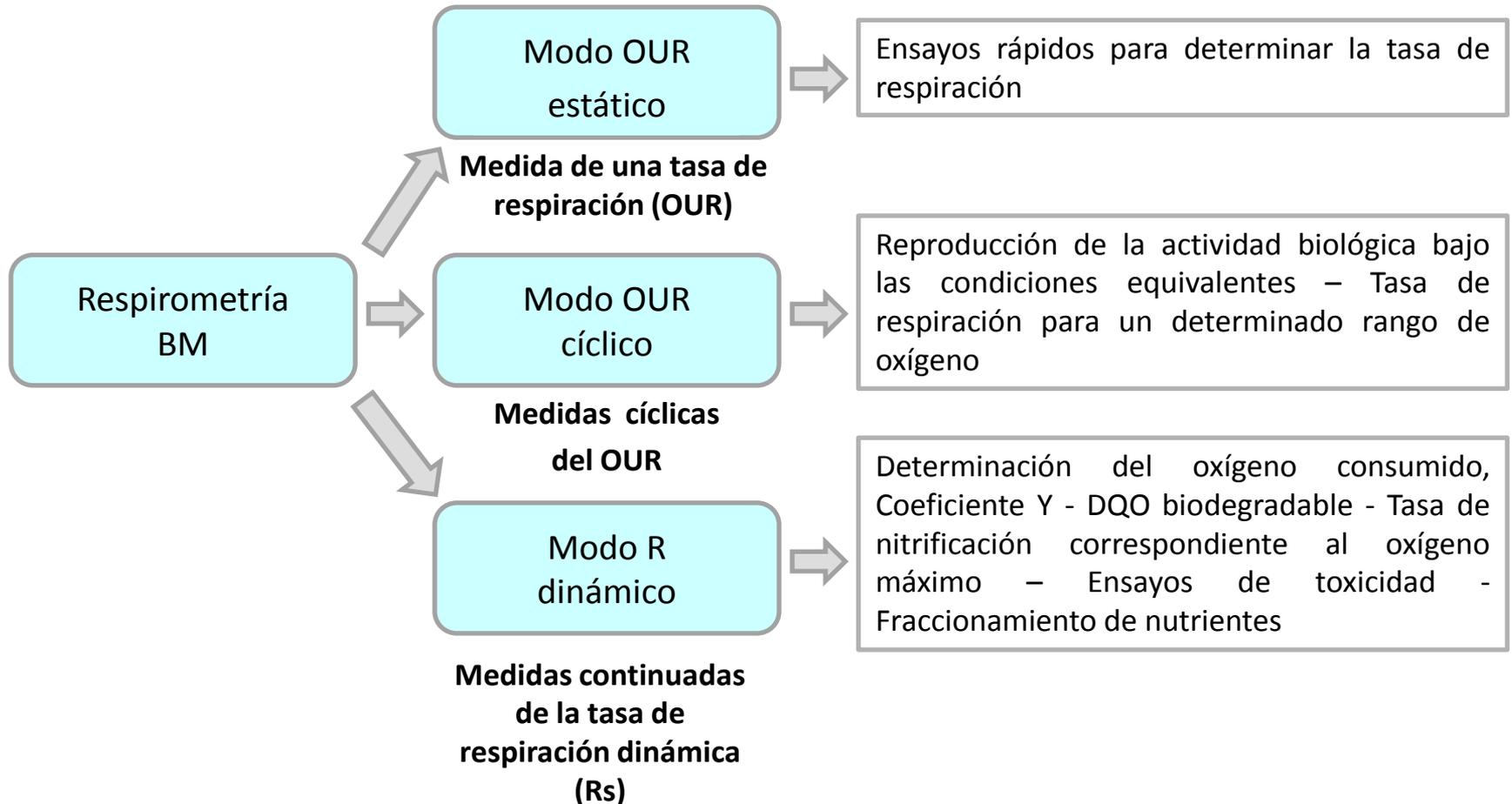
# **Respirómetría**

## **BM**

***SURCIS S.L***

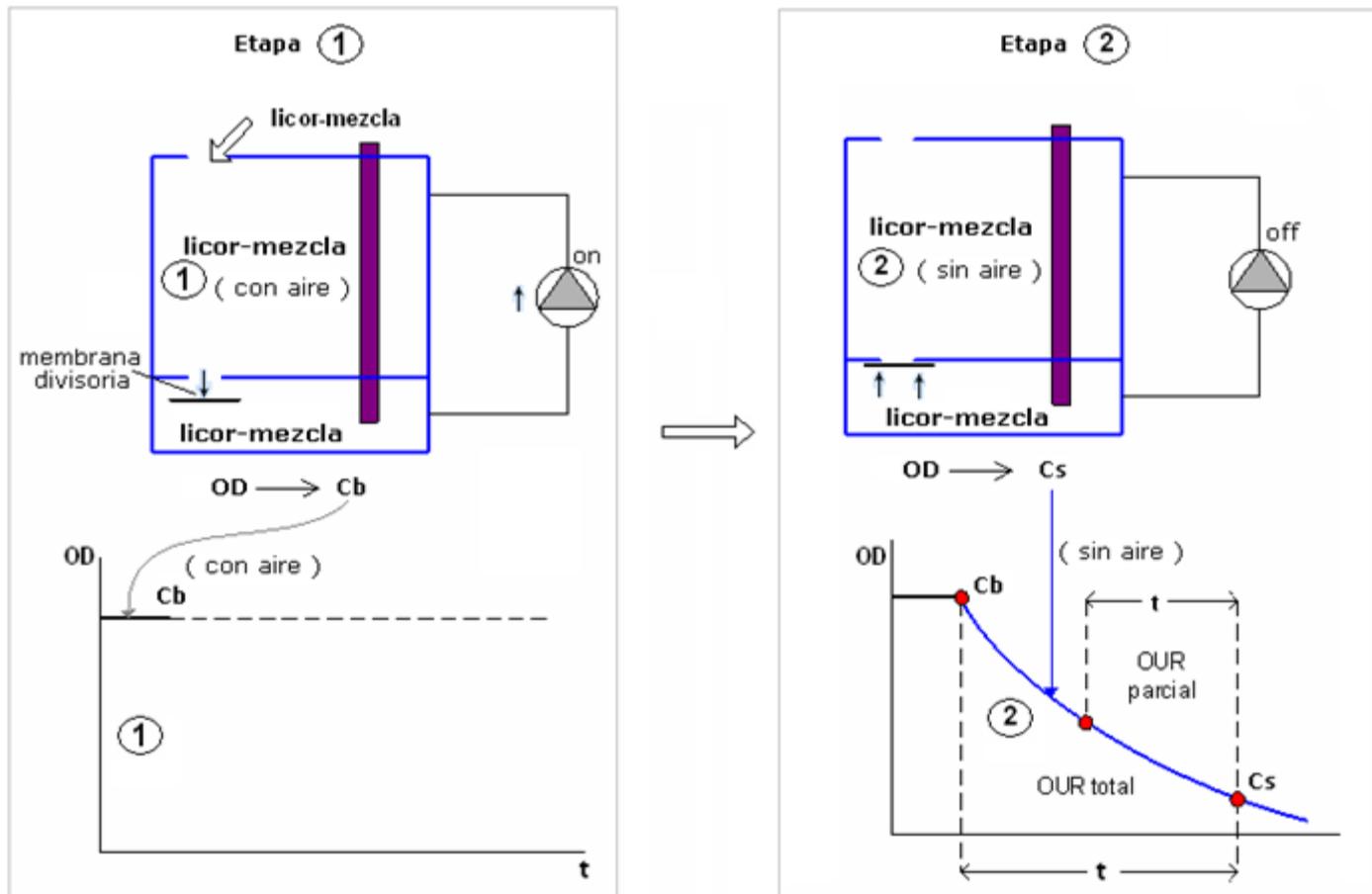
# Modos de trabajo de la Respirometría BM?

La respirometría BM opera bajo un potente software que le permite operar con diferentes tipos de modos de trabajo.



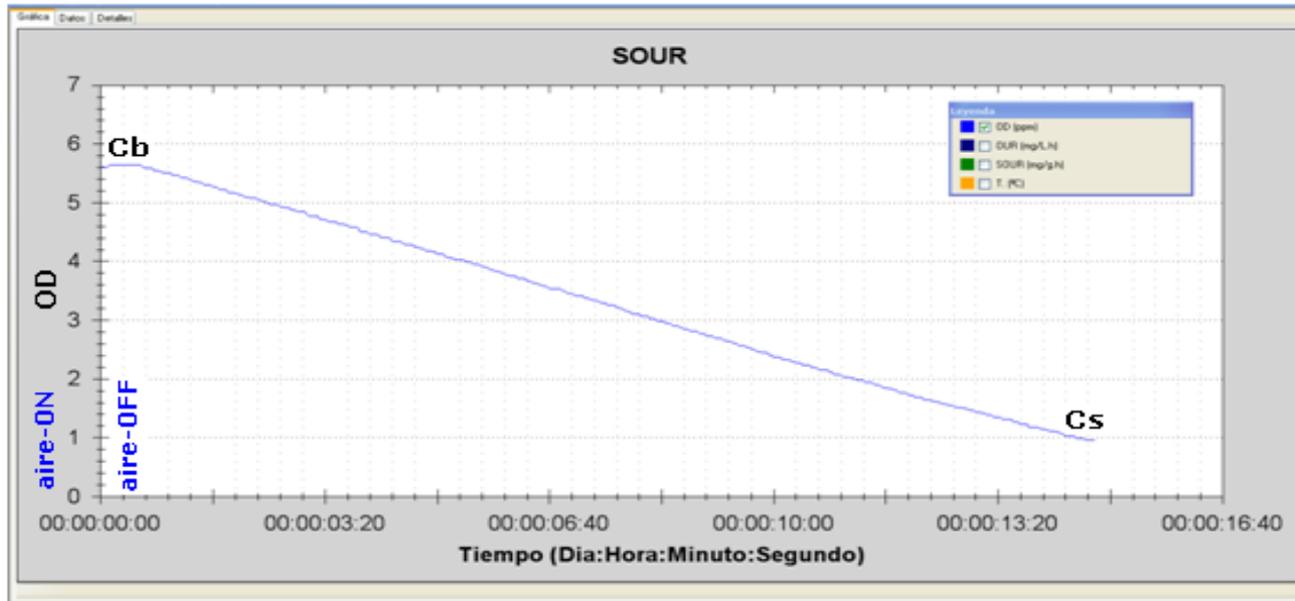
# Funcionamiento OUR Estático

Se trata de una respirometría batch tradicional, optimizada por un perfecto aislamiento de la atmósfera, y con la capacidad para calcular valores parciales a distintos niveles de oxígeno disuelto.



# Medidas en OUR estático

Desde el licor mezcla del reactor biológico se determinan los parámetros OUR & SOUR en el tiempo y sección que hayamos seleccionado en el Respirograma.



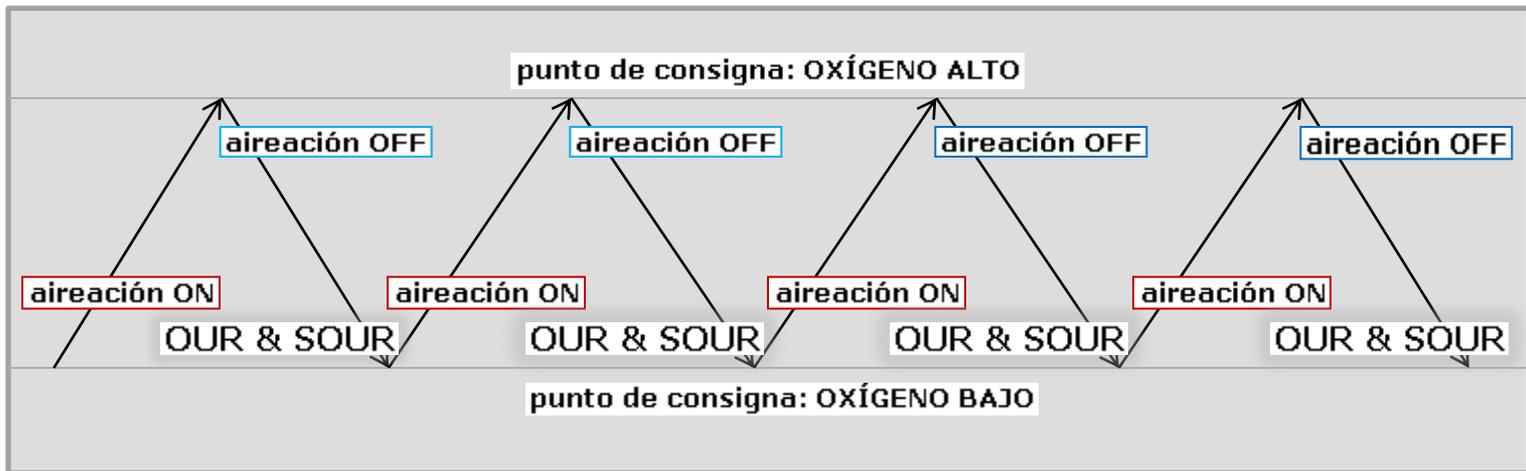
Respirograma del oxígeno disuelto

Descripción	Parámetro
Tasa de respiración total estática (mg /l.h)	$OUR = (C_b - C_s) / t$
OUR específico (mg /g VSS.h)	$SOUR = OUR / VSS$

# Modo OUR cíclico (I)

En este modo, el analizador lleva a cabo un respirograma dentro de la ventana de trabajo establecida por dos puntos de consigna en el oxímetro, determinando de forma automática y secuencial una serie continuada de medidas **OUR** & **SOUR**.

OD (ppm)

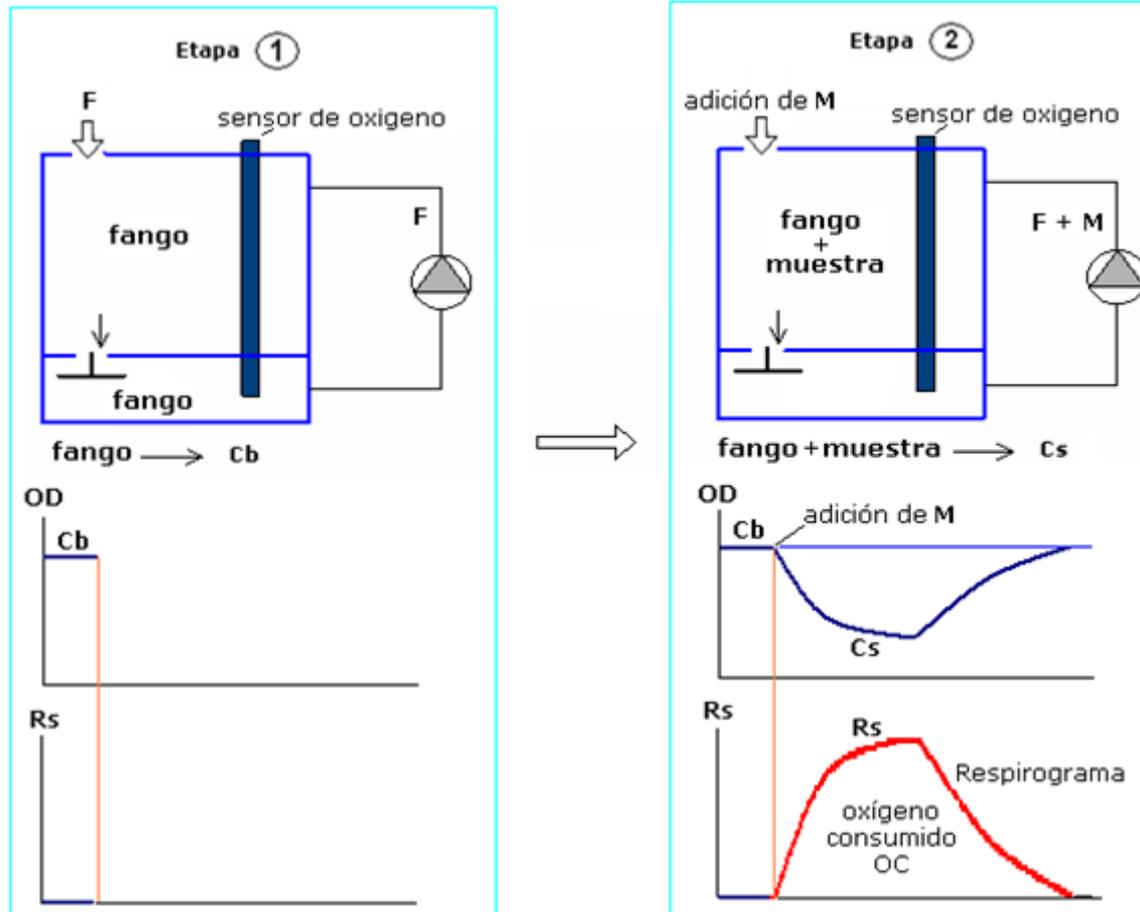


Trayectoria del oxígeno modo cíclico

Tiempo

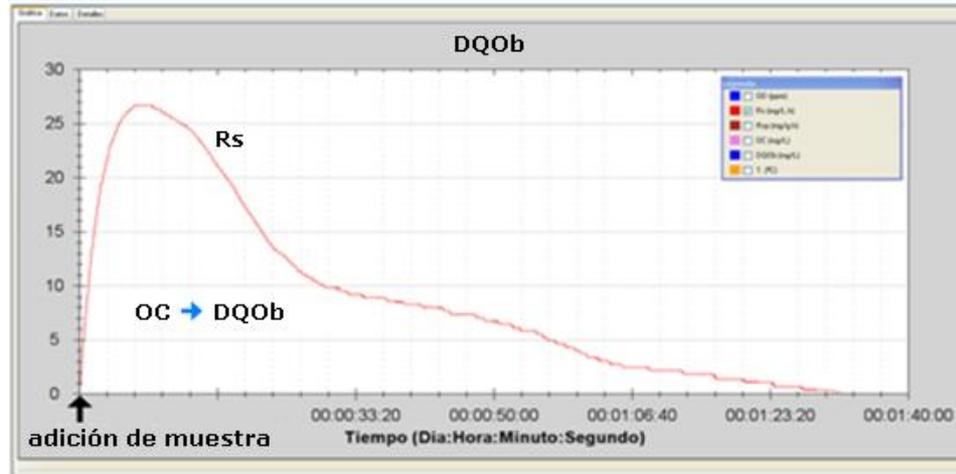
# Funcionamiento R dinámico

Sistema batch de mezcla completa en donde la aireación y recirculación están activas en todo el ensayo. De este modo se crea un oxígeno resultante en el conjunto global.



# Medidas en R dinámico

El programa genera un respirograma formado por medidas de **Rs** para, por integración de medidas, ir calculando **OC** y **DQOb**.



Respirograma Rs

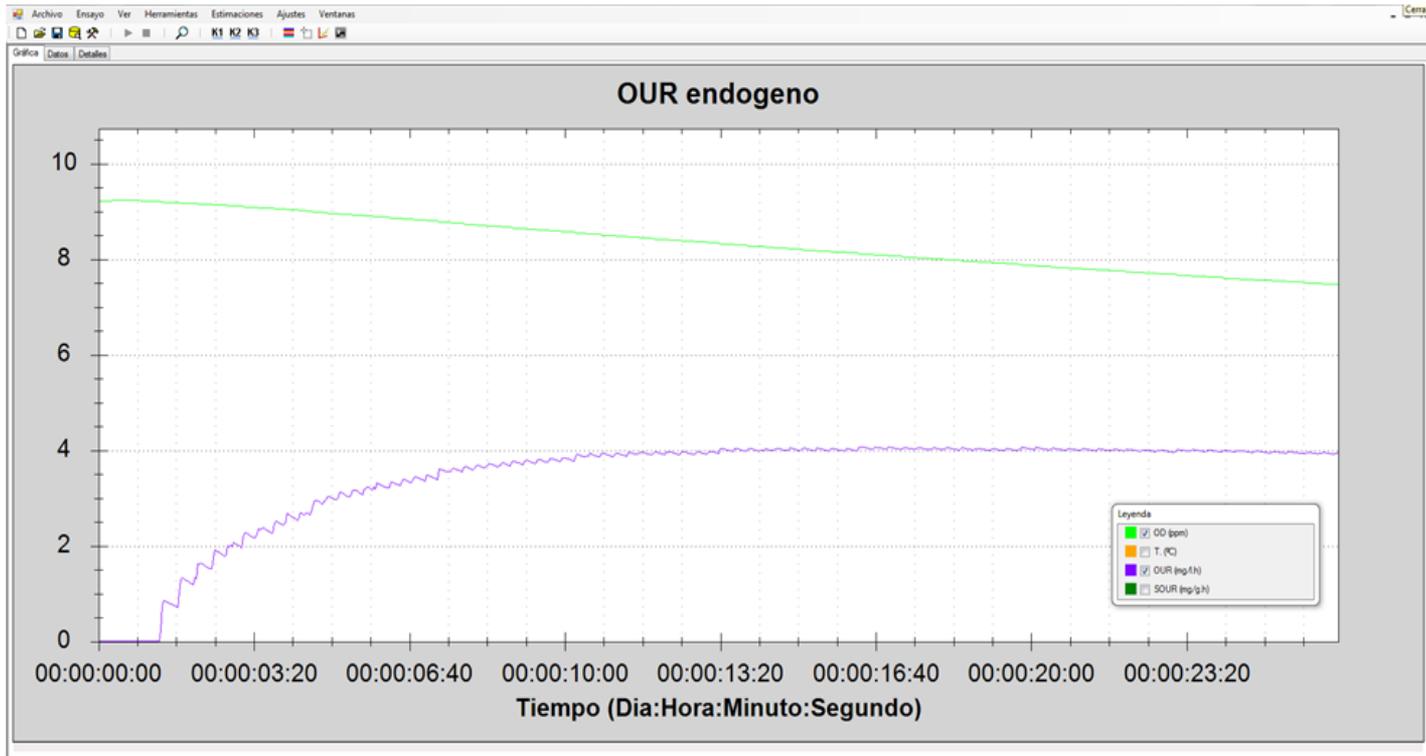
<b>Tasa de respiración dinámica (mg/l.h)</b>	$R_s = f (C_b - C_s)$
<b>Oxígeno consumido acumulado (mg/l)</b>	$OC = \int R_s dt$
<b>Fracción rápidamente o biodegradable total de la DQO (mg/l)</b>	$DQOb = OC / (1 - Y_H)$
<b>Tasa de utilización de la DQO (mg DQO/l.h)</b>	$U = DQO/t$
<b>Tasa específica de utilización de la DQO (mg DQO/mgVSS.d)</b>	$q = 24 * U / VSS$

# **Valoración primaria del proceso y salud del fango activo**

***SURCIS S.L***

# Respiración endógena

Se refiere a un OUR en respiración endógena que se consigue después de que el fango haya sido sometido a una aireación prolongada para eliminar restos de sustrato. En cualquier caso, es importante reconocer la respiración endógena, cuando el valor del oxígeno se mantiene estable con el fango aireándose en el reactor del respirómetro.



Respirogramas OD y OUR endógeno

Se debe tomar el valor estable del OUR (normalmente forma una meseta)

# Valoración de la respiración endógena

Tabla guía de valores habituales

<b>SSVLM (mg/l)</b>	<b>OUR<sub>end</sub> (mg/l.h)</b>
1000	2 – 3.5
1500	3 - 5
2000	4 - 7
2500	5 – 8.5
3000	6 - 10
3500	7 - 12
4000	8 – 13.5
4500	9 – 15.5

Si el valor del OUR end da sensiblemente por debajo del rango de la tabla de referencia puede ser debido a que existe una baja concentración de biomasa activa.

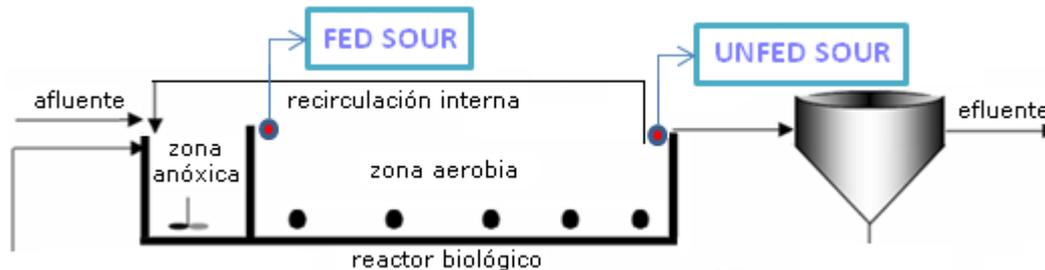
# Posibles causas de un valor bajo de la respiración endógena

1. Carga másica excesivamente baja.
2. DQO rápidamente biodegradable muy baja (< 15% de la DQO) y/o DQO lentamente biodegradable muy elevada (> 75 % de la DQO)
  1. Las condiciones actuales (T, OD, pH) del proceso no permiten el desarrollo de su plena actividad, pudiendo repercutir en la reproducción normal de la biomasa.
  2. Déficit de nutrientes.
  3. Algún tóxico pudo haber liquidado un porcentaje importante de biomasa activa (o la está liquidando)

# Pulso al proceso: UNFED SOUR

Para ello, se colecta fango fresco del efluente del reactor biológico, desde un mismo punto de muestreo y a la misma hora, y se realiza un test SOUR.

También se puede confeccionar un licor-mixto con una muestra compuesta de efluente y fango de recirculación en proporción equivalente.



Valoración	UNFED SOUR actual vs. referencia	UNFED SOUR Referencia (mgO <sub>2</sub> /g.h)	Carga Másica F/M (DBO/SS.d)	TRC (d)
Sobrecarga	>> referencia	6 - 18	> 0.4	2 - 4
Buen rendimiento	En rango	4 - 15	0.2 < F/M < 0.4	4 - 10
Buen rendimiento Baja carga	< referencia	3 - 12	0.07 < F/M < 0.2	10 - 30
Muy baja carga Síntoma de toxicidad	<< referencia	2 - 6	< 0.7	10 - 35

COMPARACIÓN

# Nitrificación

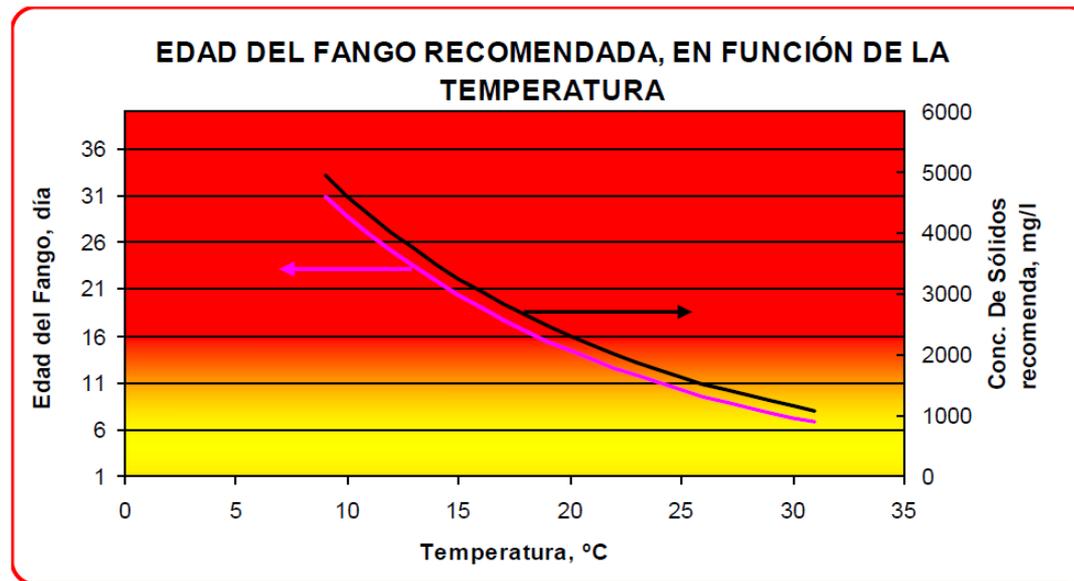
***SURCIS S.L***

# Condiciones iniciales para la nitrificación

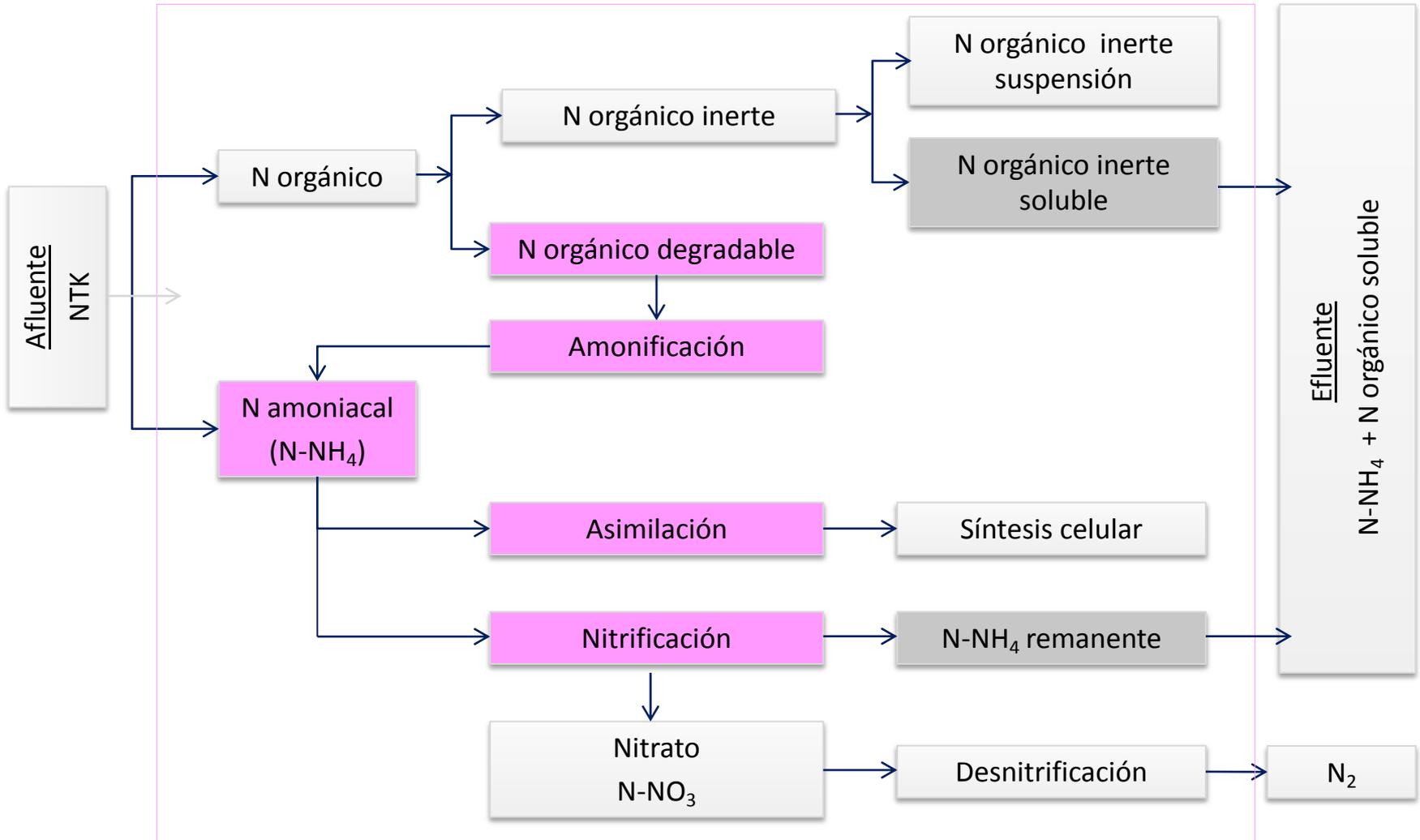
1.

Condiciones	
pH	7.3 a 8 (óptimo)
T	> 15 a 28 °C
OD	1 a 3 ppm
DBO/NTK	< 5
Reactor con suficiente capacidad de nitrificación	
Sin inhibidores ni compuestos tóxicos	

2.



# Eliminación del NTK

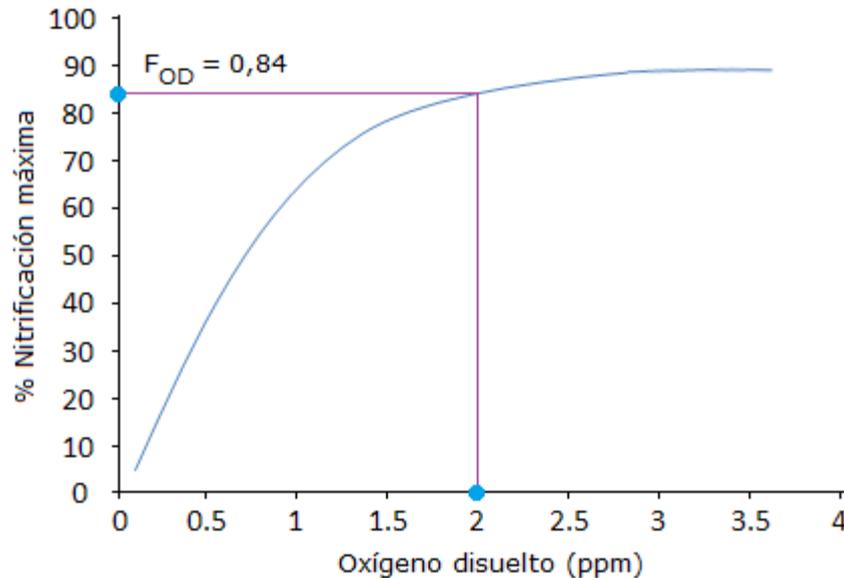


Nitrógeno amoniacal eliminado:  $S_N = [NTK] \text{ (afluente)} - [N \text{ orgánico soluble} + N-NH_4] \text{ (efluente)}$

# Constante de semisaturación por oxígeno

El nivel de oxígeno con que se desarrolla la nitrificación ejerce un importante efecto en este proceso y para su análisis utilizamos la constante de semisaturación como factor de corrección por oxígeno ( $F_{OD}$ ) de la tasa de nitrificación.

Para su determinación, nos basamos en una curva de referencia.



$F_{OD}$ : Factor de corrección por OD = correspondencia del OD con el % Nitrificación máxima / 100

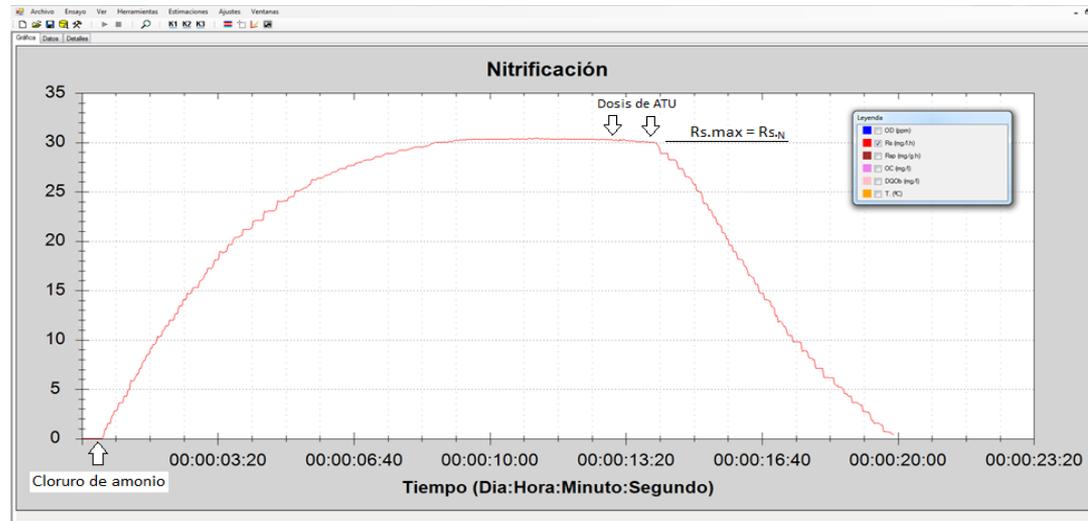
$$K_{OD} = OD (1 - F_{OD}) / F_{OD}$$

$K_{OD}$ : Coeficiente de semisaturación por oxígeno

# Tasa de nitrificación (AUR) y parámetros derivados

Utilizamos cloruro de amonio con una concentración de amonio equivalente ( $CINH_4 = N-NH_4 / 0,26$ ) en un ensayo R, en condiciones equivalentes de temperatura y pH hasta alcanzar el valor máximo ( $Rs_N$ )

Un vez alcanzado el valor máximo se le adicionan dosis sucesivas de ATU hasta inhibir la biomasa nitrificante. De este modo, este fango nos va a servir para la determinación de la DQOb y DQOrb.



Respirograma de Rs por nitrificación

Tasa de respiración por nitrificación (mg/l.h)	$Rs_N$
Tasa de nitrificación actual (mg N-NH <sub>4</sub> /l.h)	$AUR = [Rs_N / 4.57] * OD / (K_{OD} + OD)$ OD : Oxígeno disuelto medio en el proceso (mg/l)
Tasa de nitrificación máxima (mg N-NH <sub>4</sub> /l.h)	$AUR_{max} = [Rs_{N,max} / 4.57] * OD / (K_{OD} + OD)$ $Rs_{N,max}$ : $Rs_N$ obtenida con una concentración de amonio equivalente a la máxima del proceso real.

# Valoración del proceso de nitrificación

1. Valoración de la tasa de nitrificación
2. Valoración de la concentración de la biomasa nitrificante
3. Valoración de la edad del fango

# Valoración de la tasa de nitrificación actual

<p><b>Amonio que se está nitrificando</b> <b><math>S_N</math> (mg N-NH<sub>4</sub>/l)</b></p>	$S_N = NTK_{O(afluente)} - NO_e - N-NH_{4,e} (efluente)$ <p><math>N-NH_{4,e}</math>: Concentración de amonio actual en efluente  <math>NO_e</math>: Nitrógeno orgánico soluble en efluente <math>\approx 1 \sim 2</math> (mg N/L)</p>
<p><b>Amonio a nitrificar</b> <b><math>S'_N</math> (mg N-NH<sub>4</sub>/l)</b></p>	$S'_N = NTK_{O(afluente)} - NO_e - N-NH_{4,e}' (requerido en efluente)$ <p><math>N-NH_{4,e}'</math>: Concentración de amonio requerido en efluente</p>
<p><b>Tasa de nitrificación actual</b> <b>AUR (mg N-NH<sub>4</sub>/l.h)</b></p>	<p>Respirometría <math>\rightarrow</math> <b>AUR</b> = <math>[R_{S_N} / 4.57] * OD / (K_{OD} + OD)</math></p>
<p><b>Tasa de nitrificación requerida</b> <b>AUR' (mg N-NH<sub>4</sub>/l.h)</b></p>	$AUR' \approx (E_N' / E_N) * AUR$ <p><math>E_N'</math>: Rendimiento requerido en la nitrificación  <math>E_N</math>: Rendimiento actual en la nitrificación</p>

Condición para buen rendimiento de la nitrificación



**AUR  $\geq$  AUR'**

# Posibles causas por las que AUR actual (AUR) puede ser inferior al AUR requerido (AUR')

1. El proceso no está operando en condiciones adecuadas de OD, pH, Temperatura. (normalmente suele ser por bajos valores del OD o Temperatura)
2. La edad del fango (TRC) es inferior al que debería estar operando el proceso.
3. La carga másica (F/M) es superior a la que debería estar operando el proceso.
4. La concentración de biomasa nitrificante es muy pequeña  
Puede ser por
  - . Relación DBO/NTK > 5
  - . Condiciones fuera de rango
  - . Inhibidor
5. Toxicidad
6. Otras

# Valoración de la concentración de biomasa nitrificante

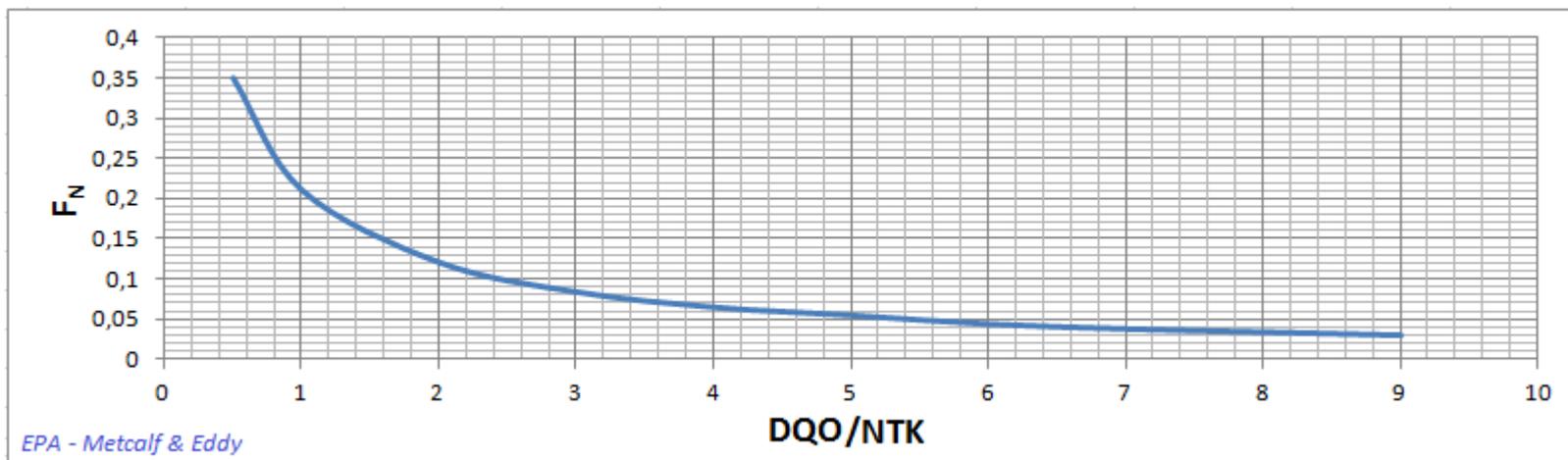
$$X_{A.\text{actual}} = 2,4 * \text{TRC} * \text{AUR}$$

2,4 = 24 (para pasar AUR a días) \*  $Y_A$

$X_A$ : Concentración de biomasa nitrificante (mg/l)

TRC: Edad del fango actual del proceso (d)

Referencia



Condición para la biomasa nitrificante



$$X_{A.\text{actual}} \geq F_N * X_V$$

$X_V$ : MLVSS (mg/l)

Para que el TRC se sitúe en el rango normal, el valor de la  $X_A$  desde el proceso actual debe ser coherente ( $\geq$ ) con los valores de referencia.

# Posibles causas por las que $X_A$ es inferior al que corresponde en la tabla de referencia

1. El proceso está operando con un OD medio muy bajo ( $< 1$  ppm)  
*(Normalmente suele ser por OD bajo + resto de condiciones muy ajustadas )*
2. Relación DBO/NTK  $> 5$
3. Relación DBO/NTK  $\geq 5$  + Baja temperatura ( $< 15^\circ\text{C}$ ) en tiempo prolongado
3. Baja temperatura ( $< 15^\circ\text{C}$ ) en tiempo prolongado
4. Presencia de algún inhibidor o tóxico.
5. Otras

# Valoración de la edad del fango para la nitrificación

## Tasa de crecimiento máximo de la biomasa autótrofa

$$\mu_{A.\max} = 2,4 * AUR_{\max} / X_A$$

$\mu_{A.\max}$  : Tasa de crecimiento máximo de la biomasa autótrofa (d<sup>-1</sup>)

## Edad del fango mínima para la nitrificación

$$TRC_{\min} = 1 / \mu_{A.\max}$$

$TRC_{\min}$ : Edad del fango mínima para la nitrificación (d)

Condición para la edad del fango



$TRC \geq TRC_{\min}$

# Capacidad de nitrificación

Aquí definimos la capacidad de nitrificación como la concentración máxima de nitrógeno amoniacal estimada que el proceso es capaz de nitrificar en las condiciones actuales.

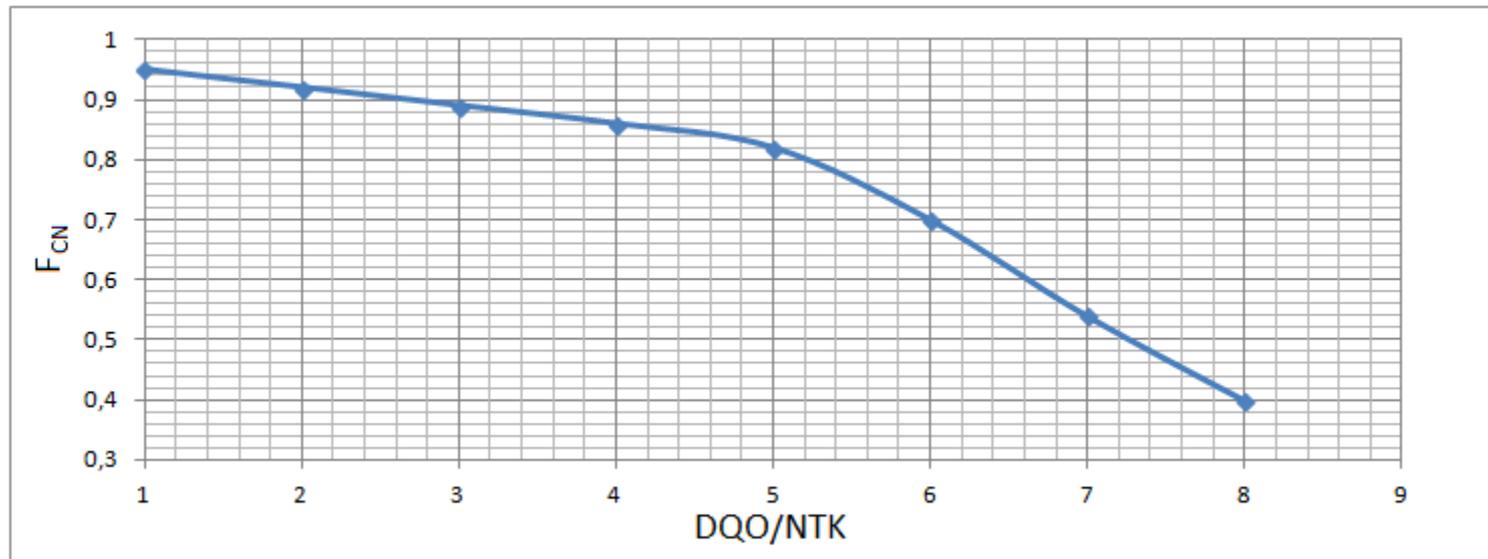
$$C_N = F_{CN} * AUR_{max} * TRH$$

$C_N$ : Capacidad máxima de nitrificación (mg N-NH<sub>4</sub>/l)

$F_{CN}$ : Factor de corrección de la  $C_N$  por efecto de la relación DQO/NTK ( ver gráfica )

TRH: Tiempo de residencia hidráulica en el proceso aerobio (h)

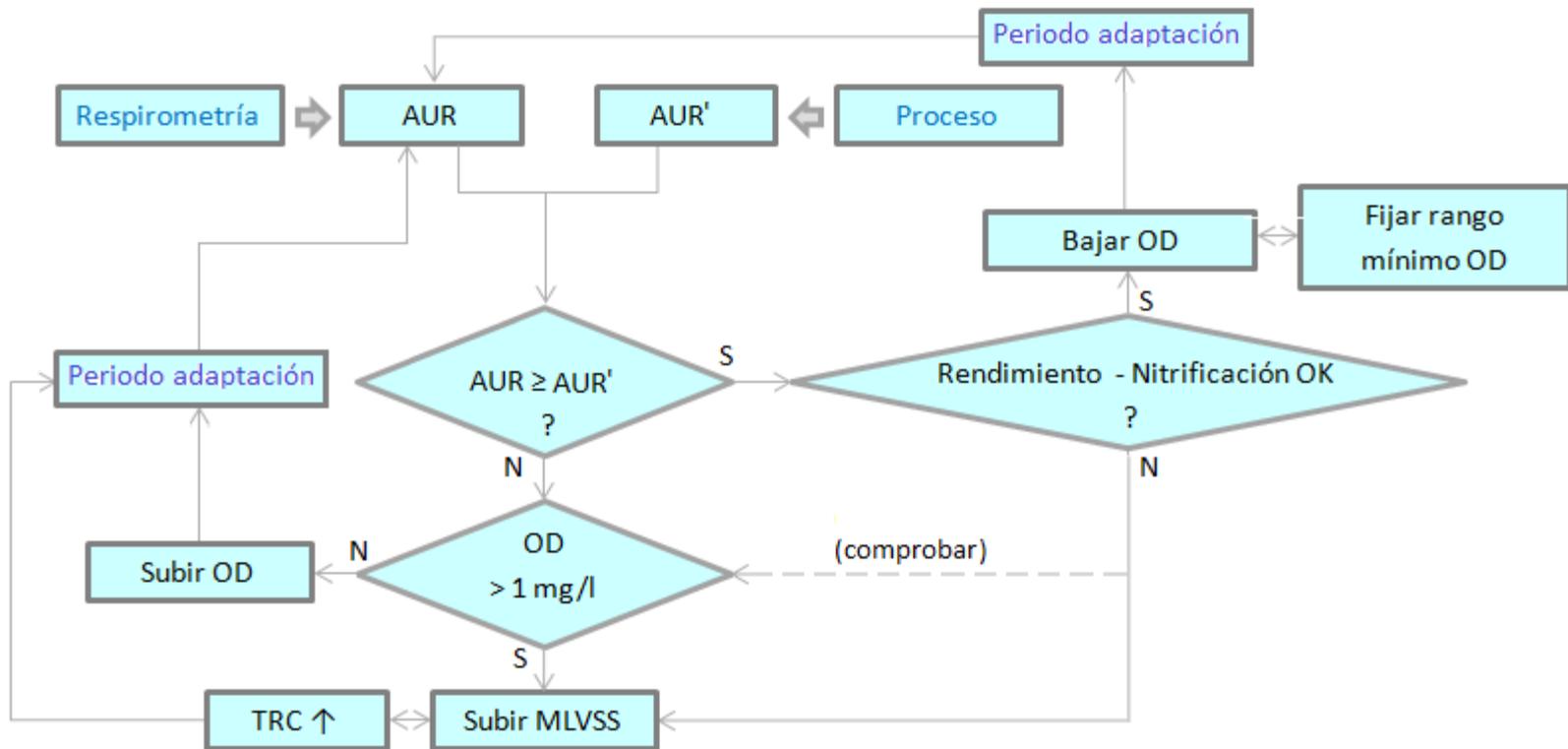
Gráfica de valores  $F_{CN}$  vs DQO/NTK



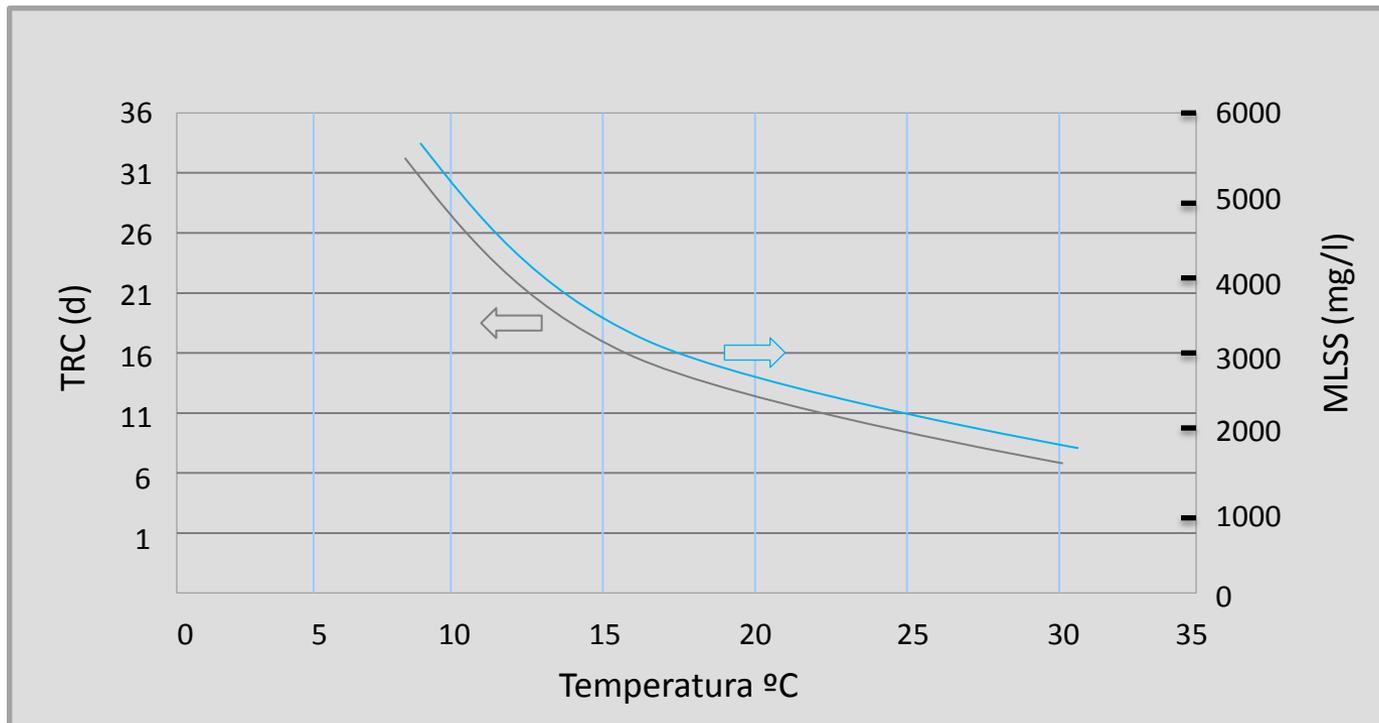
*Para que la gráfica  $F_{CN}$  vs DQO/NTK sea efectiva, el proceso debe estar operando en condiciones adecuadas y las fracciones de la DQO deben estar en rango. En cualquier caso, esta gráfica se puede tomar como base orientativa.*

# Protocolo práctico en la nitrificación bajo el marco de la optimización energética

En este protocolo se asume que las condiciones de temperatura y pH están en rango y que existe la posibilidad de poder bajar y subir suficientemente el nivel de oxígeno hasta encontrar el rango mínimo adecuado para el desarrollo del proceso sin detrimento alguno de su eficiencia.



# TRC & MLSS recomendados en un proceso con nitrificación dependiendo de la Temperatura



# Fraccionamiento de la DQO del afluente al reactor biológico

***SURCIS S.L***

# ¿Para que sirve el fraccionamiento de la DQO en un proceso de fangos activos?

1. Para calcular la biodegradabilidad específica a ese proceso:

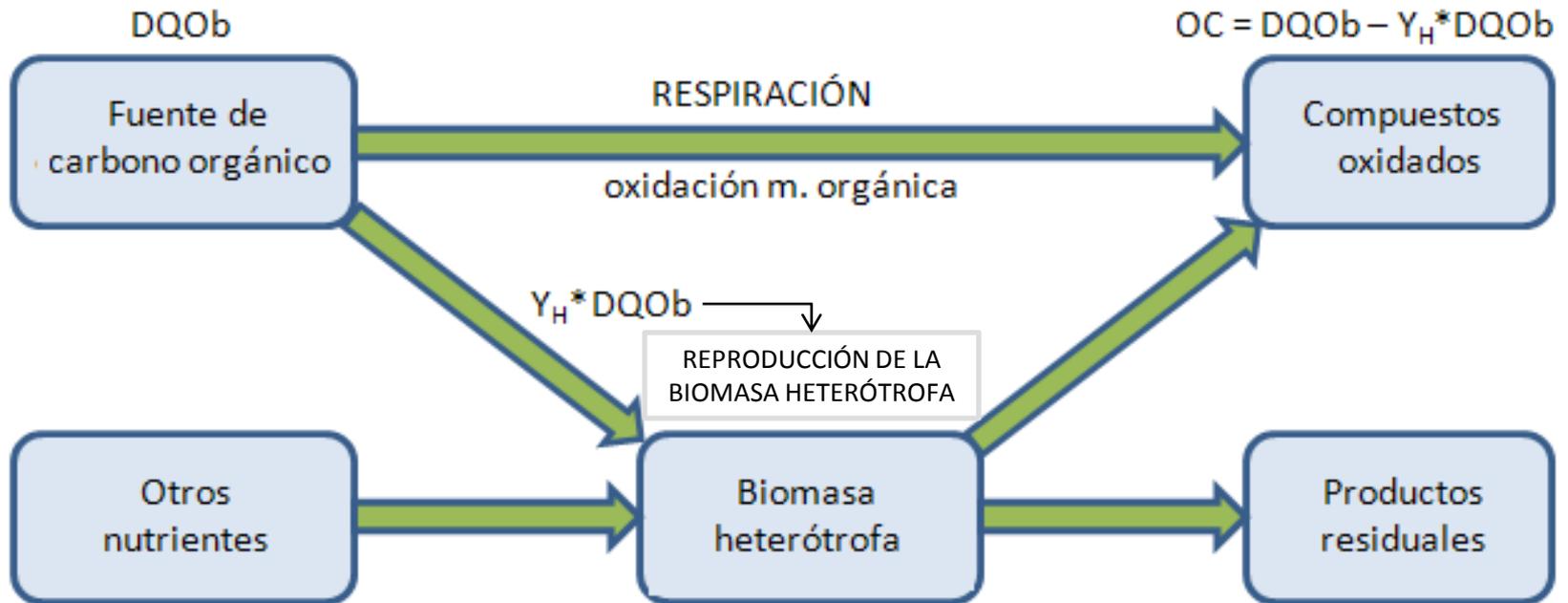
$$\text{Biodegradabilidad DQOb (\%)} = 100 * \text{DQOb} / \text{DQO}$$

$$\text{Biodegradabilidad DQOrb (\%)} = 100 * \text{DQOrb} / \text{DQO}$$

2. Para calcular la fracción DQO inerte (refractaria, no degradable) y ver si existe una bajo rendimiento de la DQO como consecuencia de un valor alto de la DQO inerte (DQOi)
2. Para calcular la fracción DQO lentamente biodegradable (DQOIb) y ver si existe una bajo rendimiento de la DQO como consecuencia de un valor alto de esta fracción.

Un valor elevado de DQOIb también implica un valor excesivamente bajo de la DQOrb, que puede representar un desequilibrio en el alimento fácilmente asimilable por los microorganismos.

# Coeficiente de rendimiento de biomasa heterótrofa ( $Y_H$ ) (I)

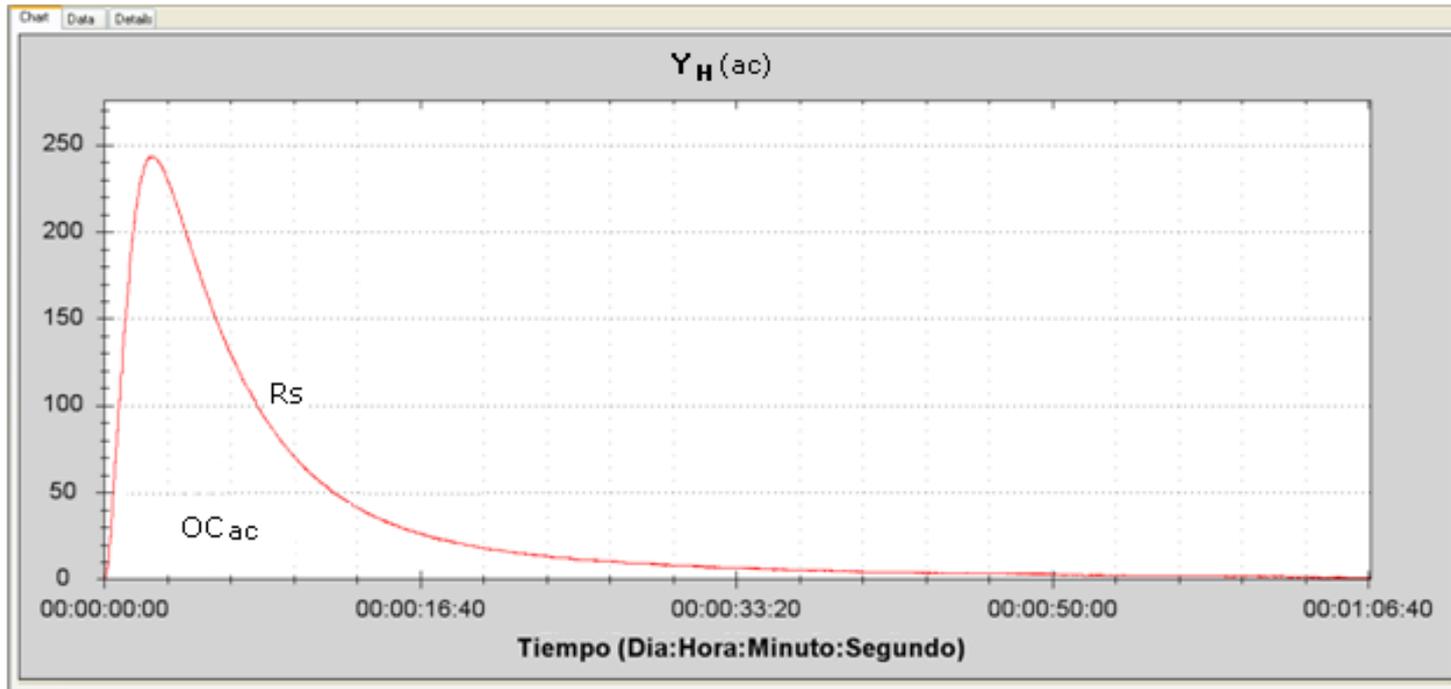


$$Y_{H.02} (OC/DQO) = 1 - OC / DQO_{ac}$$

$DQO_{ac}$ : DQO del acetato sódico añadido

# Coeficiente de rendimiento de biomasa heterótrofa ( $Y_H$ ) (II)

Se hace uso de una solución estándar de acetato sódico de DQO conocida ( $DQO_{ac}$ ) y se determina el oxígeno consumido (OC) correspondiente a la remoción del mismo por el fango activo.



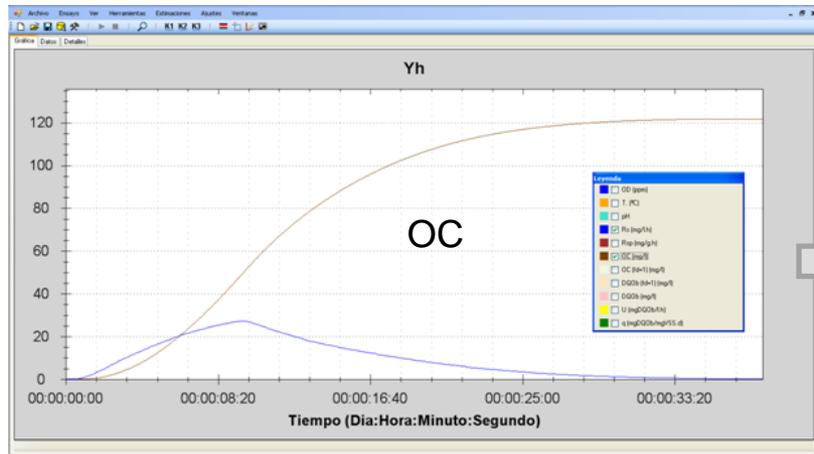
Respirograma Rs

$$Y_{H.02} (OC/DQO) = 1 - OC / DQO_{ac}$$

$DQO_{ac}$ : DQO del acetato sódico añadido = normalmente entre 270 y 320 mg/L

# Pulso al proceso: $Y_H$

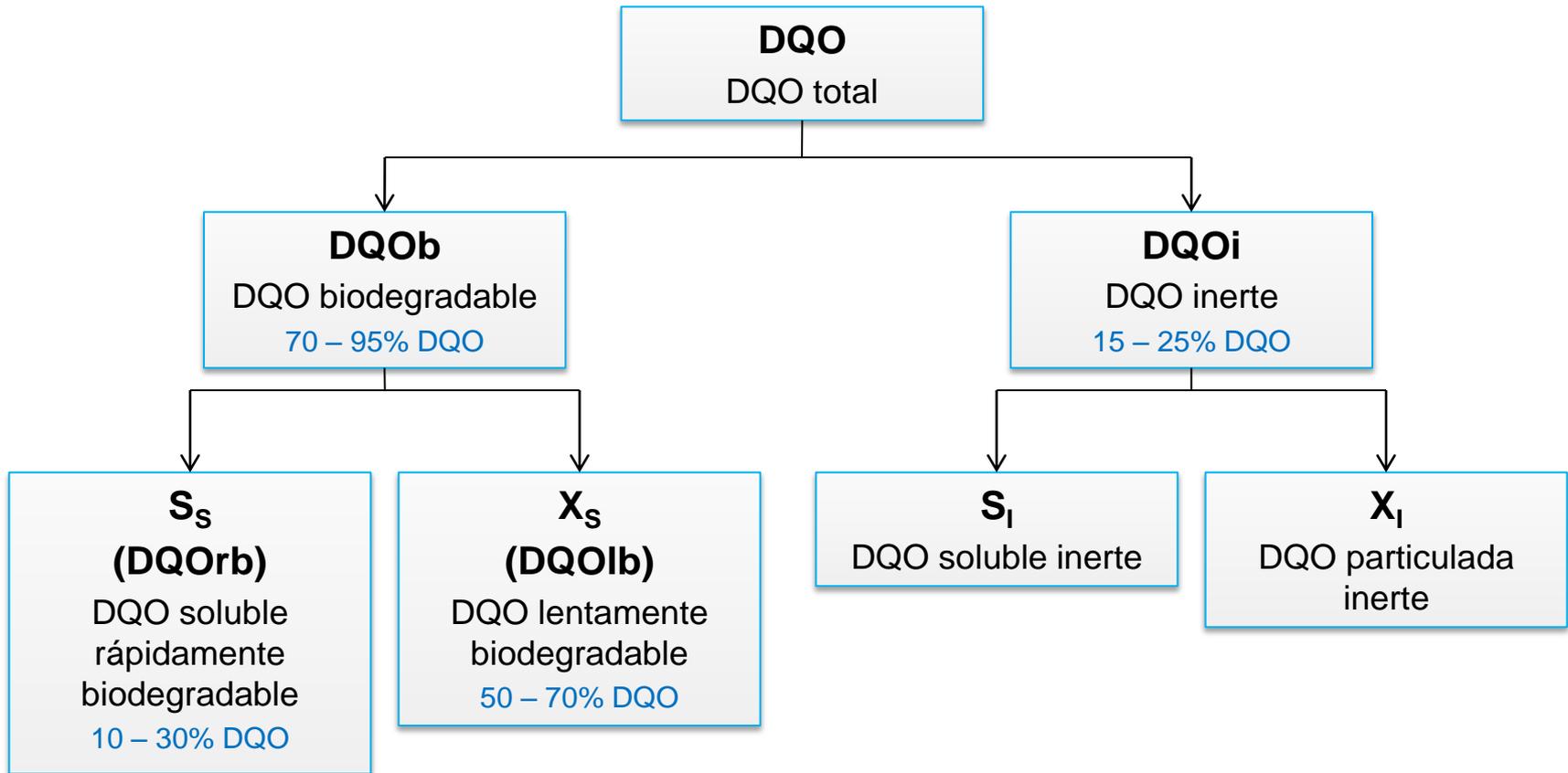
La determinación de la  $Y_H$  por respirometría, además de formar parte del cálculo de la DQOb, complementa la toma del pulso al proceso valorando la salud de la biomasa heterótrofa.



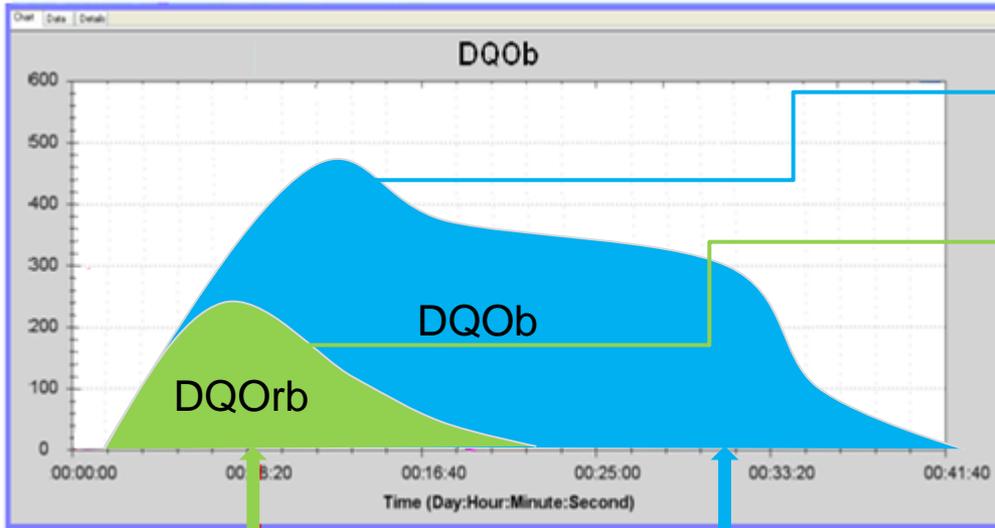
$$Y_{H,O_2} = 1 - OC / DQO_{ac}$$

$Y_{H,O_2}$	Valoración
$Y_H > 0.8$	Elevado % de DQOrb Elevada producción de fango
En rango	Crecimiento normal
$0.4 < Y_H < 0.6$	Elevado % de DQOlb  Baja biodegradabilidad del agua residual  Bajo crecimiento por falta de DQO soluble
$Y_H < 0.4$	Muy bajo crecimiento Posible inhibición / toxicidad

# Fraccionamiento de la DQO (I)



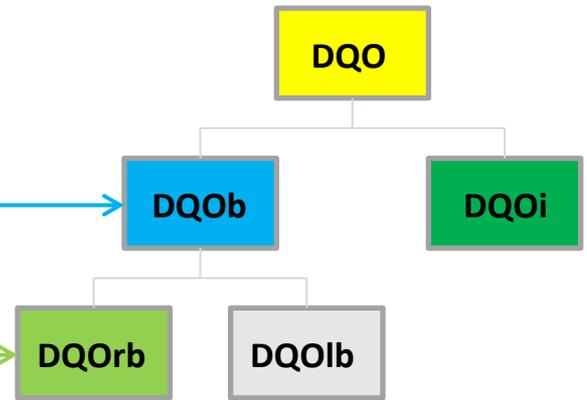
# Fraccionamiento de la DQO (II)



fango activo  
(endógeno)  
+  
agua r. filtrada

fango activo  
(endógeno)  
+  
agua r. sin filtrar

Ensayos R de Respirimetría



**DQOb:** DQO biodegradable total

**DQOi:** DQO inerte (refractaria)

**DQOrb:** DQO rápidamente biodegradable

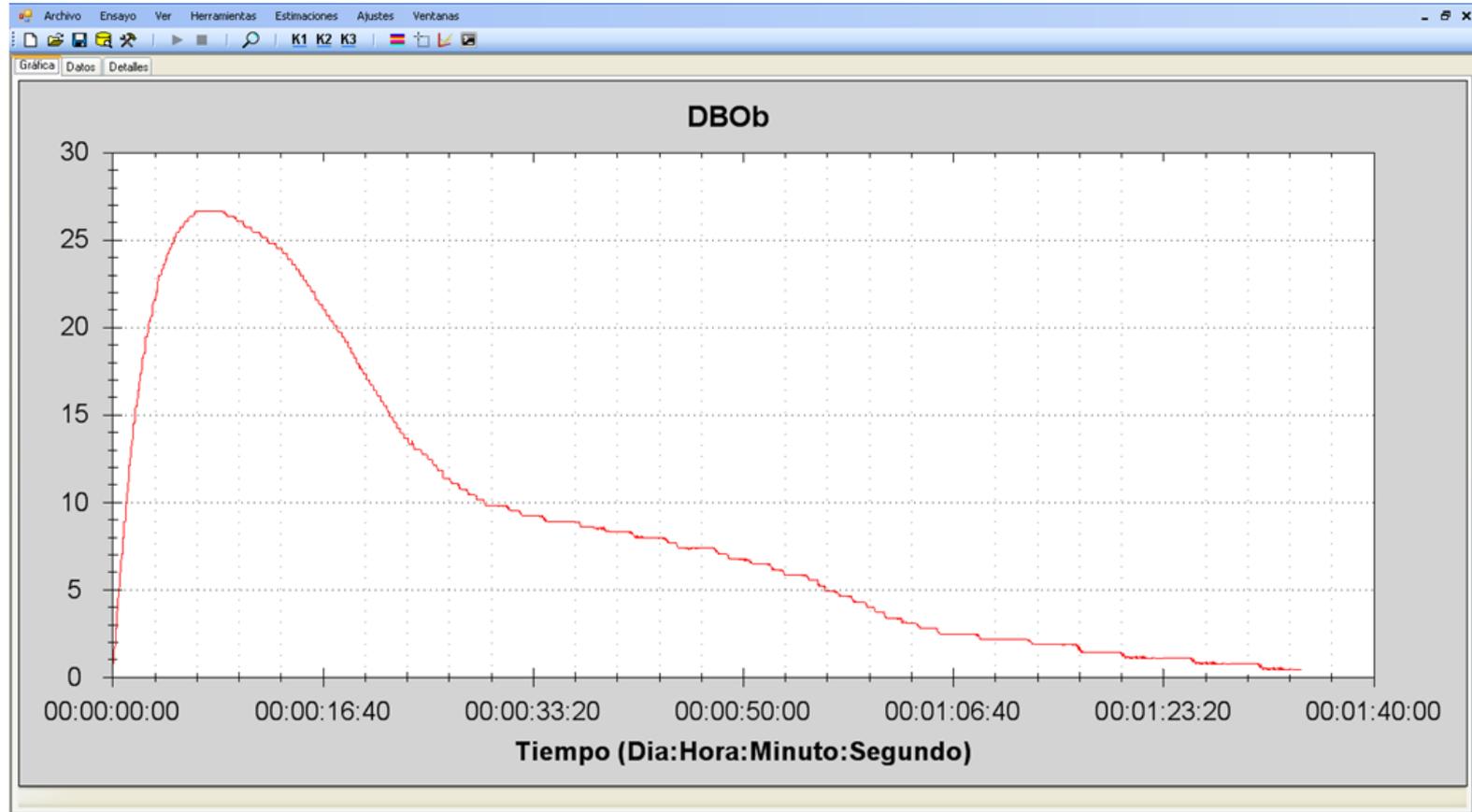
**DQOIb:** DQO lentamente biodegradable

$$\text{DQO} - \text{DQOb} = \text{DQOi}$$

$$\text{DQOb} - \text{DQOrb} = \text{DQOIb}$$

# DQO biodegradable

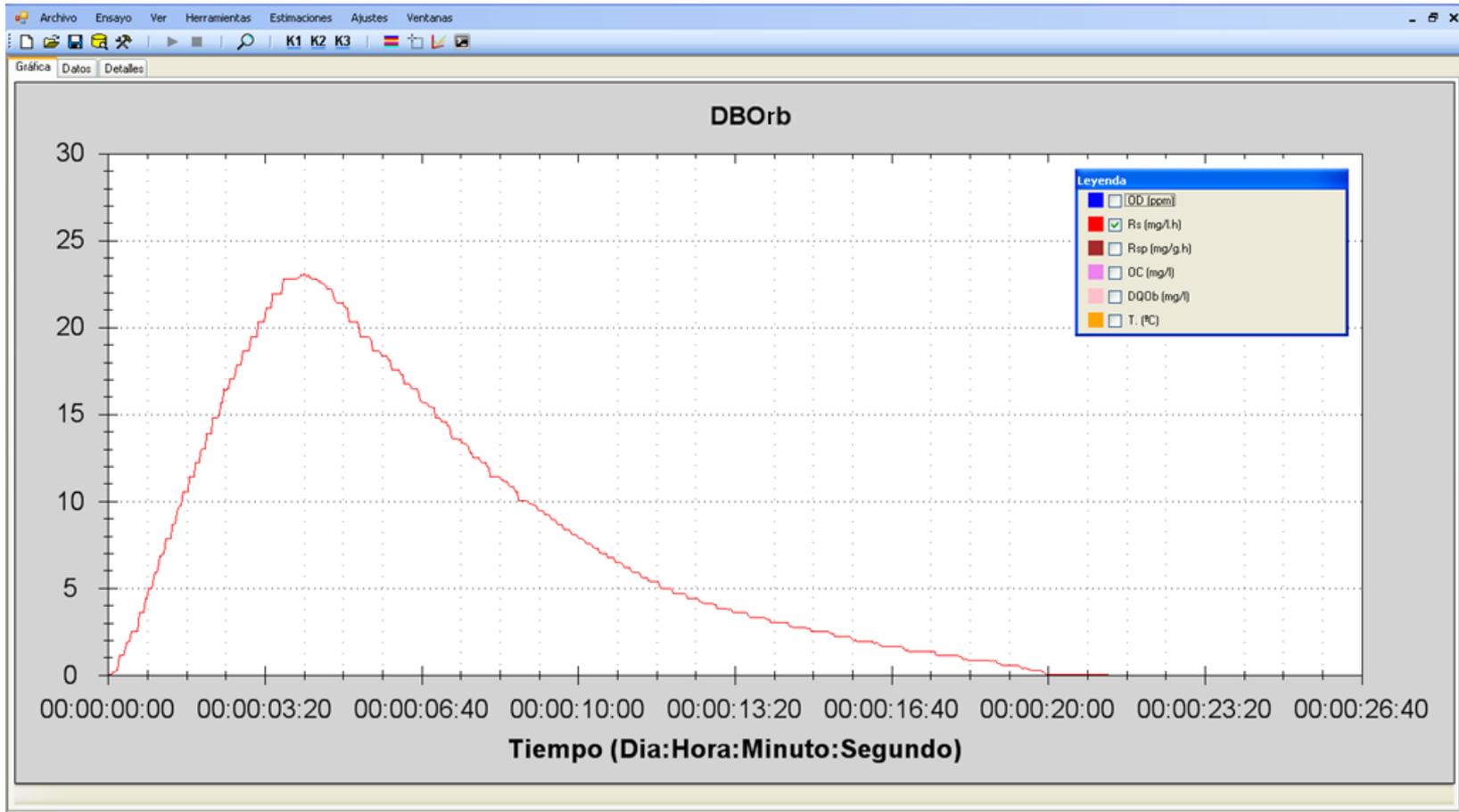
La DQO biodegradable total (DQOb) se determina automáticamente mediante un test R a partir de una muestra de agua residual afluyente al reactor biológico y fango endógeno en donde la biomasa nitrificante ha sido previamente inhibida (con ATU)



Respirograma Rs de la DQOb

# Fraccionamiento de la DQO - DQOrb

La DQO rápidamente biodegradable se determina automáticamente mediante un test R, a partir de una muestra soluble real (floculada y sobrenadante filtrado a 0.45  $\mu\text{m}$ )

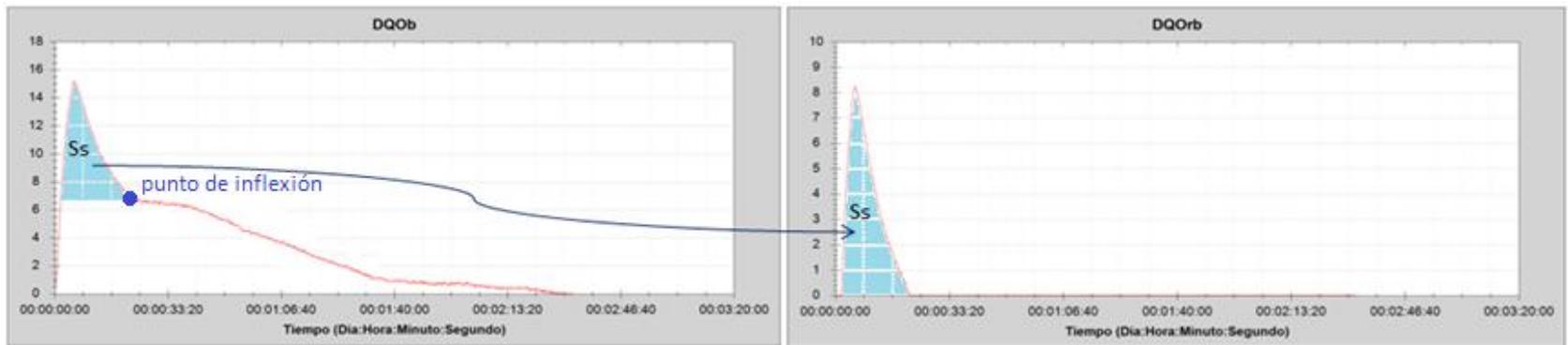


Respirograma  $R_s$  de la DQOrb

# Estimación de la DQOrb desde el respirograma de la DQOb

Desde el propio respirograma de la Rs en la determinación de la DQOb, podemos obtener directamente el valor estimado de la DQOrb

Para ello, seleccionamos el tramo de respirograma determinado por el primer punto de inflexión en la pendiente de los valores de Rs y el software del respirómetro calcula de forma automática la  $S_s$ .



Fuente: Influent fractionation using a respirometric method for the characterization of primary sedimentation  
Ellen Vanassche, 2014 - Faculty of Bioscience Engineering – UNIVERSITY OF GENT (Belgium)

## Procedimiento

1) Abrimos el respirograma Rs del ensayo y clickeamos en el punto de inflexión - 2) Anotamos el oxígeno de este punto (que aparece en la barra de abajo) - 3) **Ensayo** → **Modificar** → Marcar “**Forzar Cb**” y cambiar el valor de **Cb** por el del oxígeno del punto de inflexión → **Aceptar** → Mensaje → **Sí**

Una vez modificado el respirograma podemos ir al valor de la DQOb, que en este caso será el de la DQOrb

# Optimización de la desnitrificación

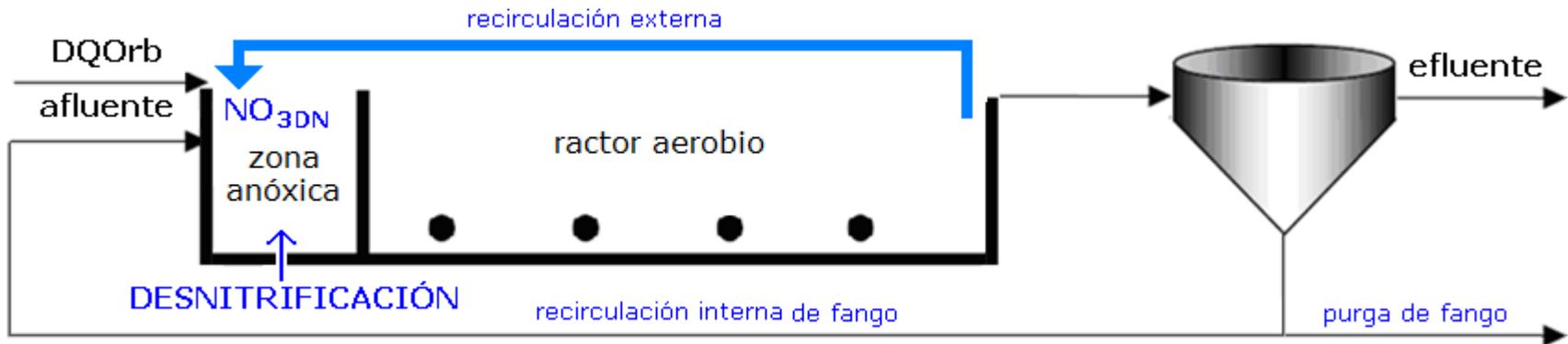
***SURCIS S.L***

# Pasos para optimización de la desnitrificación

1.

Condiciones	
pH	6.5 a 8 (óptimo)
DBO/NTK	2.5 a 5
DQO soluble biodegradable /N-NO <sub>3.DN</sub>	≥ 2.83 
OD	< 0.3 ppm 
Reactor con suficiente capacidad de desnitrificación	
Sin inhibidores ni compuestos tóxicos	

# Demanda de oxígeno por materia orgánica utilizada en la desnitrificación



Relación oxígeno consumido (OC) / Nitrato a desnitrificar	$OC / [NO_3] \geq 2,86$ [NO <sub>3</sub> ]: Nitrato a desnitrificar (mg N-NO <sub>3</sub> /l)
DQOrb necesaria para la desnitrificación	$DQOrb_{DN} \geq 2.86 * [NO_3] * (1 - Y_H)$
DQO necesaria para la desnitrificación	$DQO_{DN} \geq (DQO/DQOrb) * DQOrb_{DN}$

# Toxicidad

***SURCIS S.L***

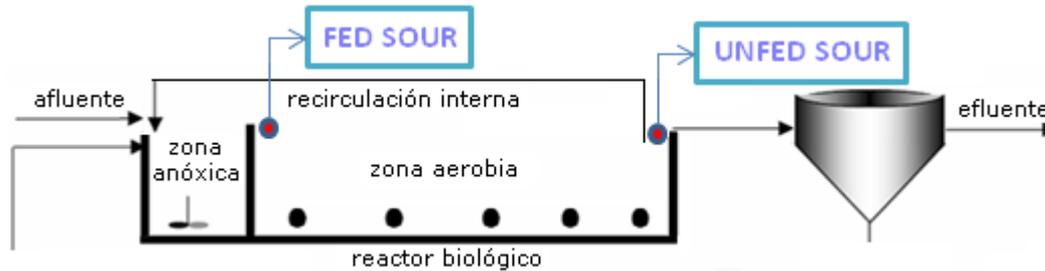
# Podemos contemplar dos tipos de toxicidad

1. Toxicidad que ya está presente en el proceso de fangos activos



2. Toxicidad en agua residual o compuesto que hay que analizar

# Síntomas de toxicidad ya presente en el proceso de fangos activos



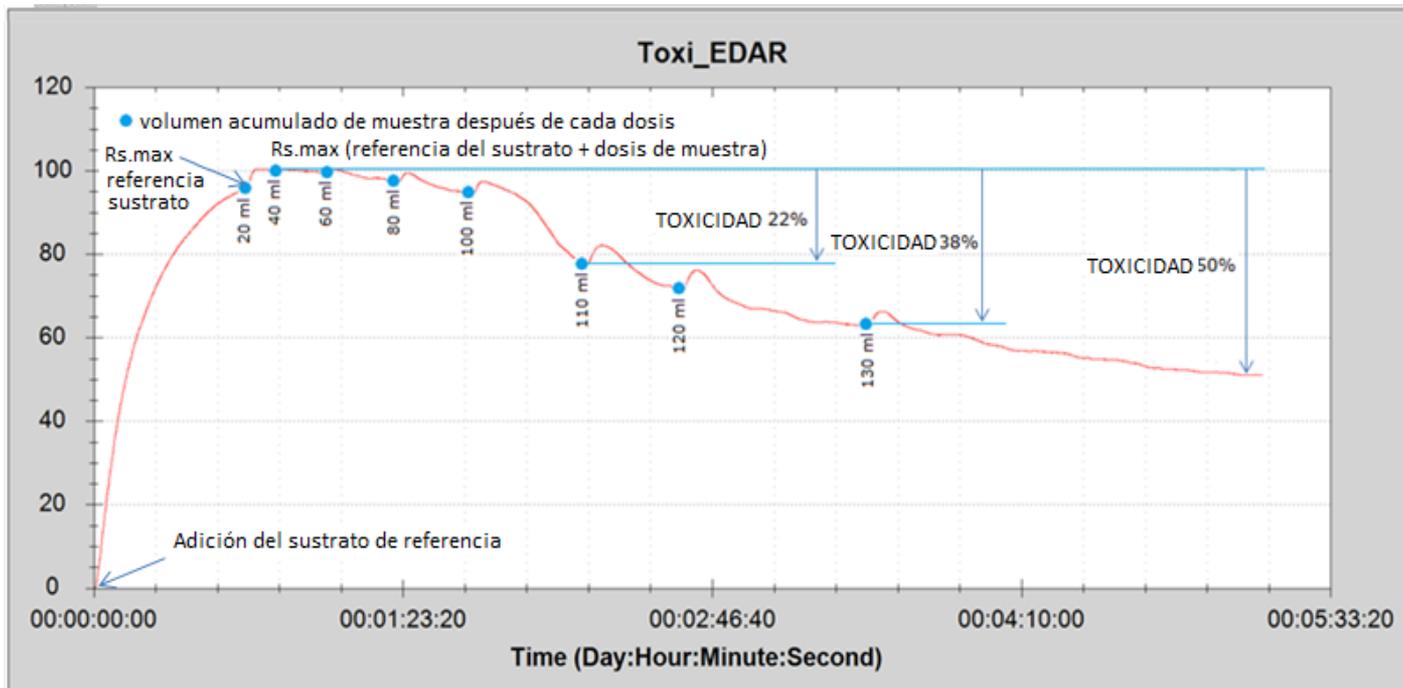
Parámetros	Síntomas
UNFED SOUR	<< Valor tabla de referencia
FED SOUR / UNFED SOUR	< 1.3
$Y_{H,O_2}$	< 0.5

UNFED SOUR Referencia ( $mgO_2/g.h$ )	TRC (d)
6 - 18	2 - 4
4 - 15	4 - 10
3 - 12	10 - 30
2 - 6	10 - 35

# Toxicidad de efecto rápido

## Método: dosis progresiva

El objetivo es analizar un efecto tóxico que se pudiera producir en el fango activo mediante la adición progresiva de dosis de muestra de agua residual sobre una tasa de respiración máxima provocada por la adición de un sustrato de referencia (acetato sódico, cloruro de amonio, o ambos)



Respirograma por dosis periódica de sustrato

# Toxicidad de un agua residual o compuesto

## Método: comparación con Referencia

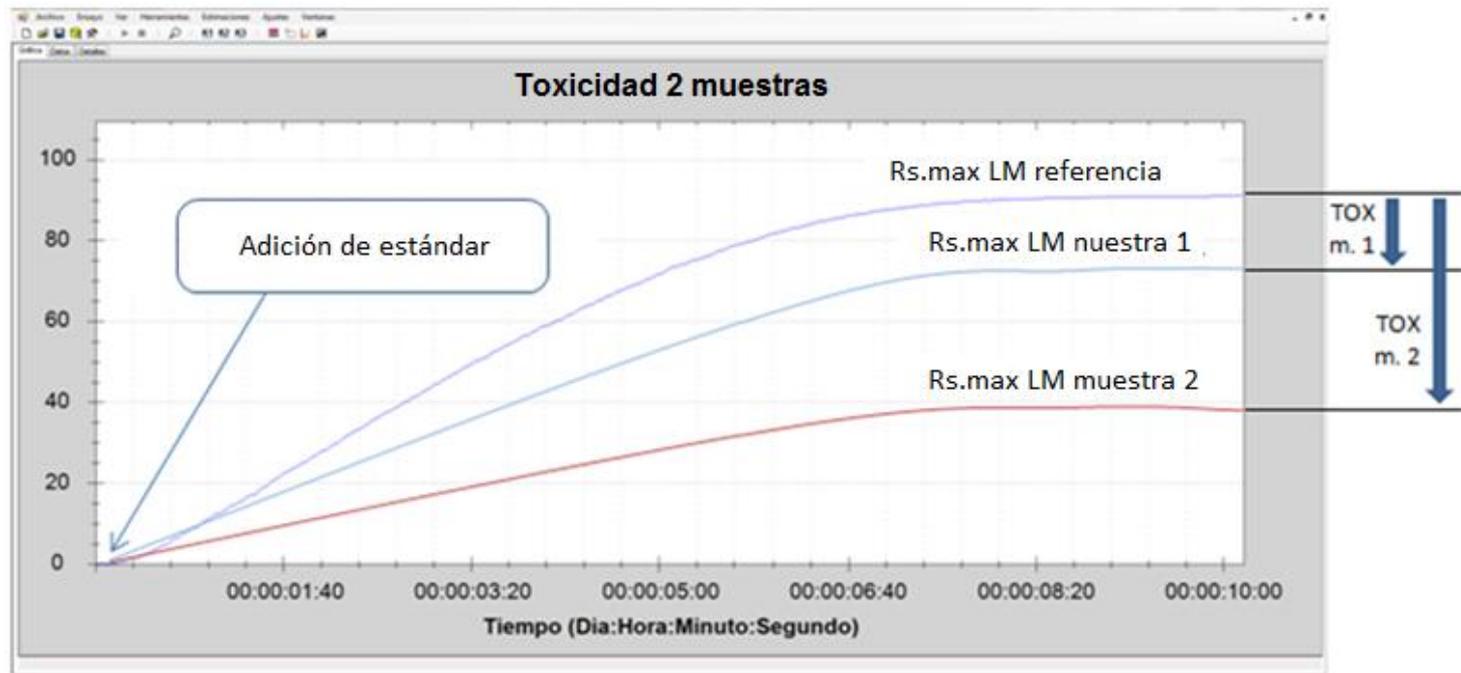
Comparamos la actividad de un compuesto **estándar** de referencia (acetato sódico o cloruro de amonio) en dos licor-mixtos en fase de respiración endógena: Uno de referencia (con agua destilada) y otro con muestra.

Agua destilada (con algo de acetato y amonio) + Fangos recirculación → aireación → LM referencia (endógeno)

Muestra problema + Fangos recirculación → aireación → LM muestra (endógeno)

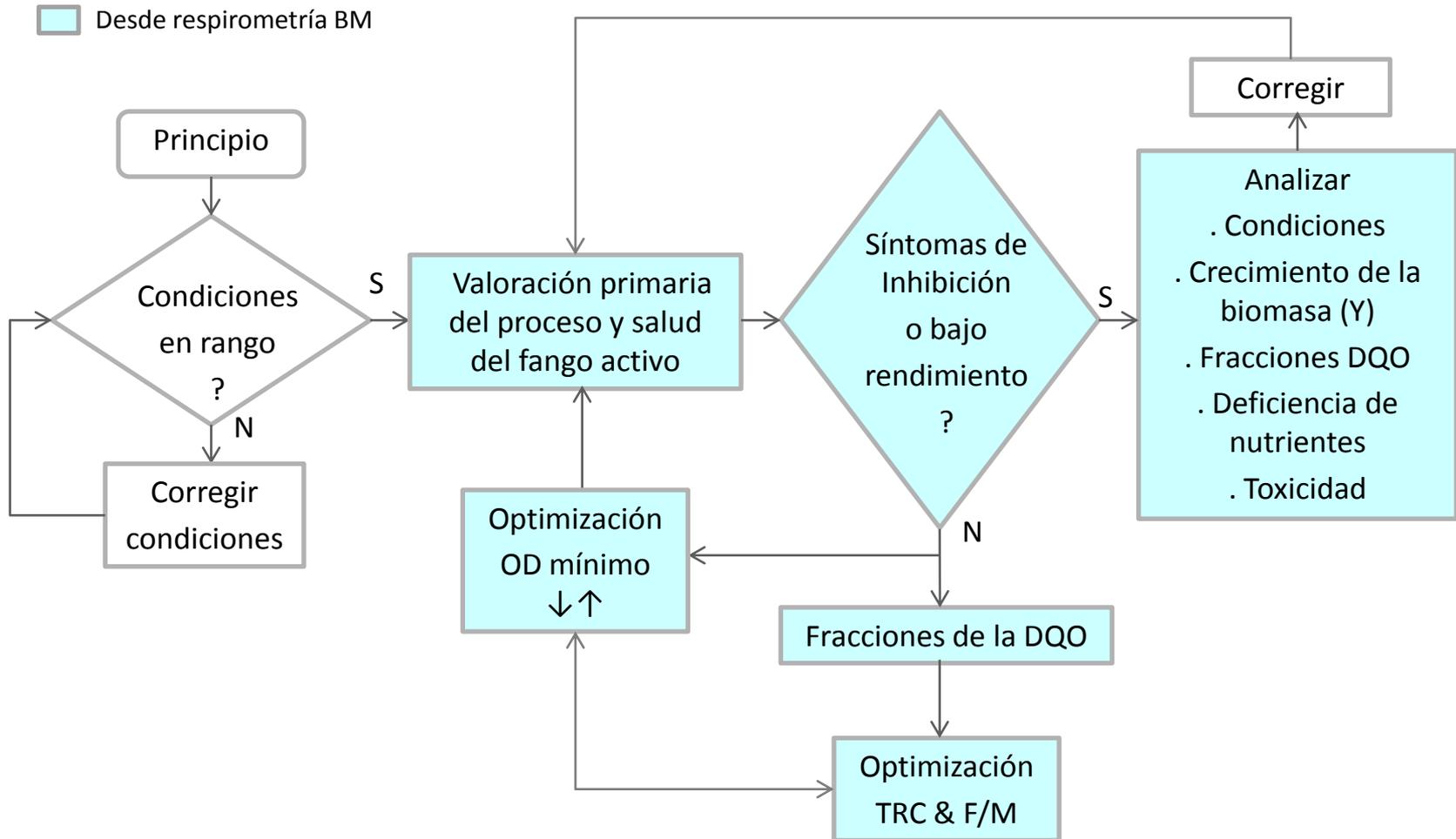
Relación entre volumen muestra o agua destilada / volumen fango de recirculación =  $V_m / V_r = Q_i / Q_r$

$Q_i$  = Caudal de entrada al reactor biológico,  $Q_r$ : Caudal del fango de recirculación



Respirograma combinado para la toxicidad de muestras

# Protocolo de respirometría para procesos sin nitrificación



**SURCIS, S.L.**

Teléfono: 932 194 595 / 652 803 255

E-mail: [surcis@surcis.com](mailto:surcis@surcis.com) / [eserrano@surcis.com](mailto:eserrano@surcis.com)

Internet: [www.surcis.com](http://www.surcis.com)