

La respirometría en la depuración biológica de aguas residuales

SURCIS S.L.

Procesos de fangos activos



Respirometría

Concepto general de la Respirometría

Es una tecnología basada en la velocidad de consumo de oxígeno que es capaz de controlar, diseñar y proteger el proceso de depuración biológica de las aguas residuales.



Introducción

Las medidas solamente relacionadas con la naturaleza del agua o comportamiento físico no combinan suficientes datos decisivos para una completa caracterización del proceso biológico de depuración por fangos activos.

Necesitamos tener en cuenta que el fango activo es un proceso vivo con respiración propia y una falta de información sobre esta bioactividad puede causar una seria confusión a la hora de establecer criterios coherentes de valoración, control y protección del proceso de depuración.

Necesitamos parámetros de la propia biomasa (fango activo) y del efecto que el agua residual provoca en la misma, y esto solo se consigue con la Bioindicación y Respirometría

Posibilidades de la respirometría

En general podemos decir que la respirometría permite valorar, controlar y optimizar un proceso de fangos activos.

Las aplicaciones de la respirometría más comunes se basan en lo siguiente:

1. Rápida valoración cualitativa de la salud de la biomasa y estado del proceso.
2. Optimización de la aeración y así fomentar el ahorro energético de la planta.
3. Caracterización del agua a tratar en función de su biodegradabilidad por el fango activo.
4. Detectar vertidos industriales con efectos inhibitorios o tóxicos sobre la biomasa.
5. Optimización de la nitrificación-desnitrificación.
6. Análisis de la relación de nutrientes.
7. Determinación de los parámetros cinéticos.
8. Determinación de los parámetros operativos límites.

Clasificación de los respirómetros

Clasificación de los respirómetros

La IWA (International Water Association) clasifica los respirómetros en función de tres parámetros básicos que se designan por las siguientes letras:

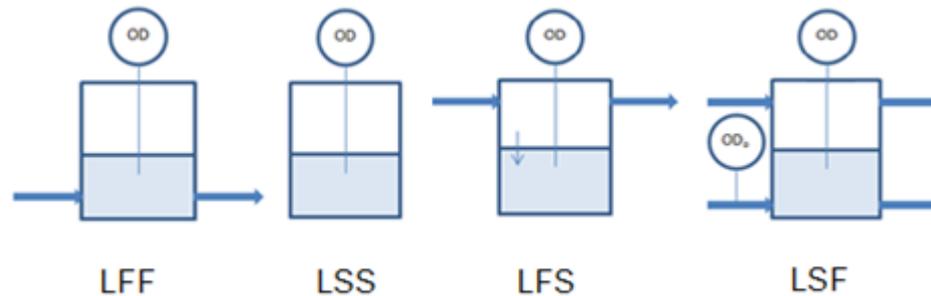
- **G**: en fase de gas (Gas)
- **L**: en fase líquida (Liquid)
- **S**: estático (Static)
- **F**: continuo (Flowing)

También, según el lugar donde se instalen, podríamos establecer la siguiente clasificación:

- de laboratorio
- de campo
- on-line

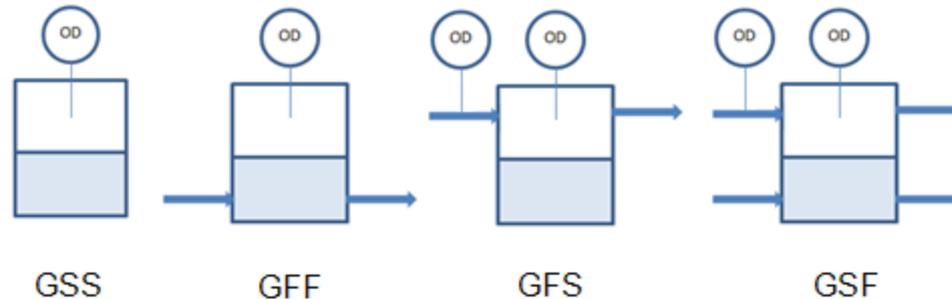
Respirómetros en fase líquida

La medida del oxígeno disuelto se lleva a cabo con un sensor sumergido en el líquido, el cual está en permanente agitación.



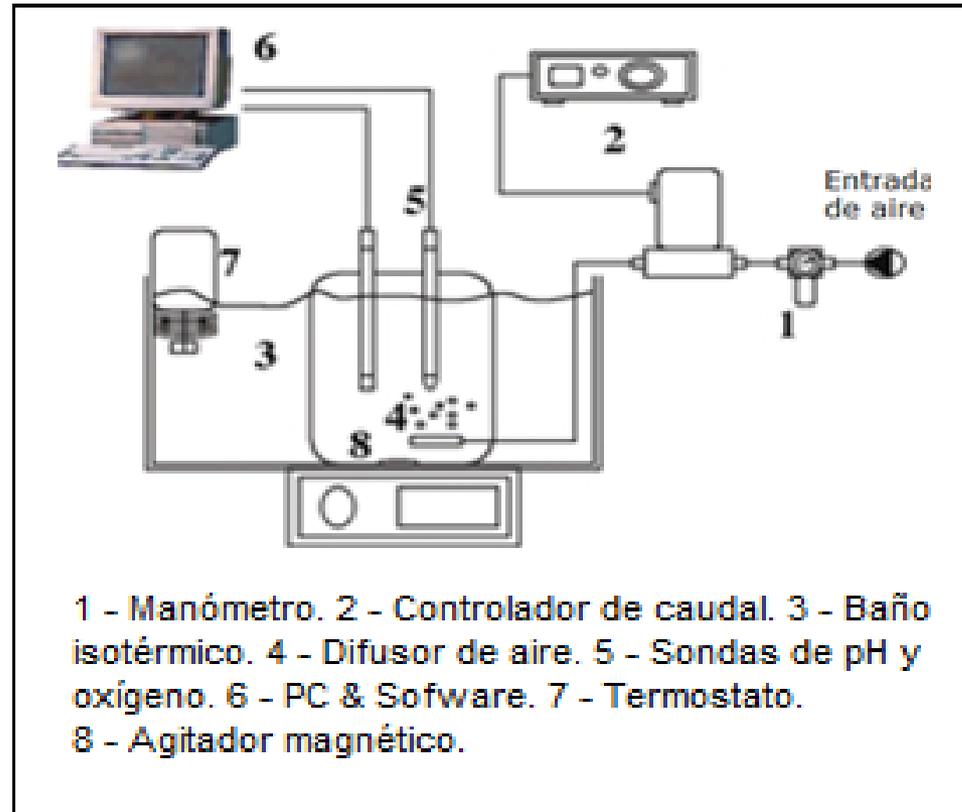
Respirómetros en fase gaseosa

El oxígeno medido es el de la cámara del reactor y puede medirse de forma directa por medio de un sensor de oxígeno al aire o de forma indirecta por cambio de presión en esta cámara o generación de oxígeno por electrolisis.



Ejemplos de respirómetros de laboratorio (I)

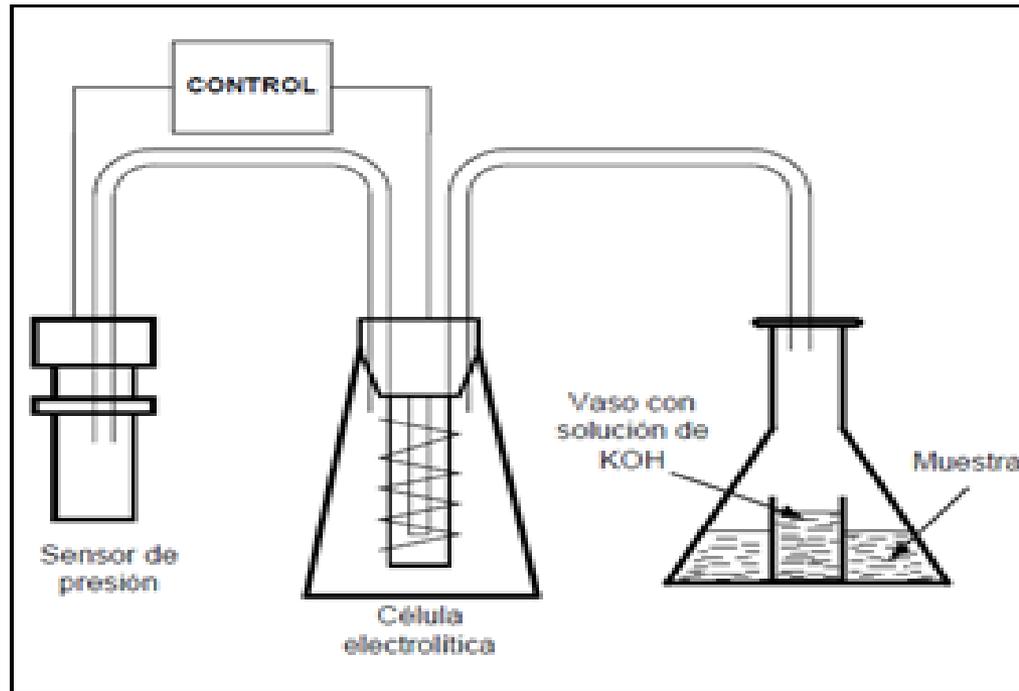
Respirómetro LFS



En este tipo de respirómetro se controla la entrada continua de aire para ajustar el OD.

Ejemplos de respirómetros de laboratorio (II)

Respirómetro GFS - Electrolítico

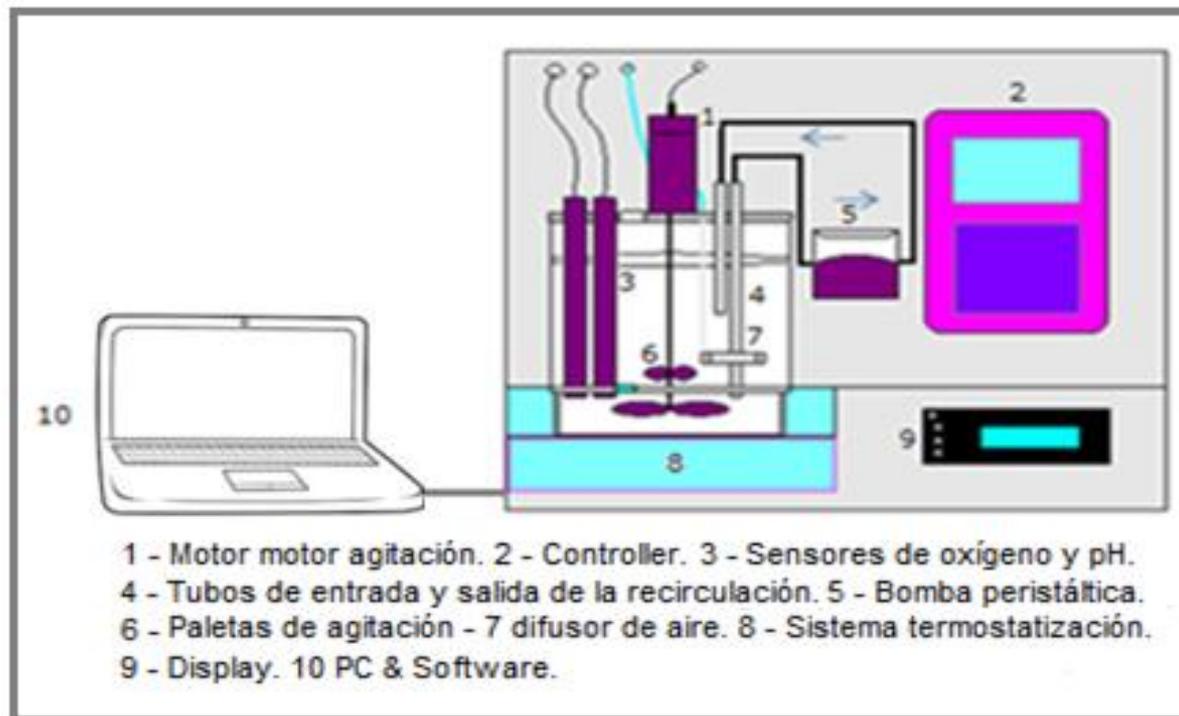


El sistema de medida de consumo de oxígeno se lleva a cabo mediante la combinación de un manómetro que mide la presión de y la generación de oxígeno por electrolisis.

La cantidad de oxígeno liberado es proporcional a la energía eléctrica consumida; por lo que, calibrando esta energía a valores de oxígeno, se conoce la cantidad de oxígeno consumido.

Ejemplos de respirómetros de laboratorio (III)

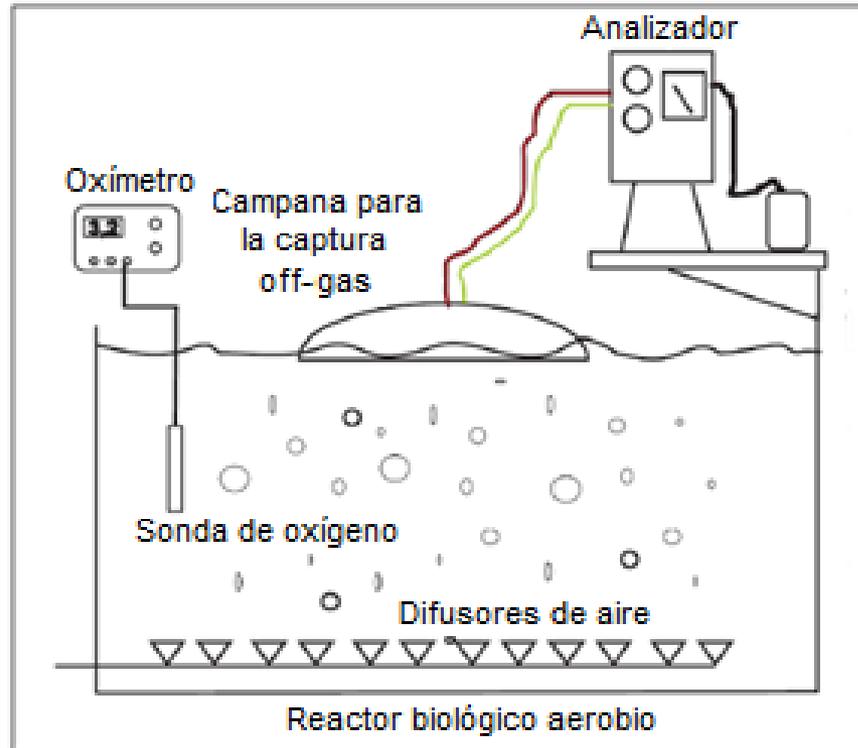
Respirómetro LSS – LFS (con recirculación)



El reactor está dividido en dos cámaras (de aireación y de medida) que le permite protegerse de la interferencia del aire atmosférico y trabajar indistintamente en modo LSS y LFS.

Ejemplo de respirómetro online (I)

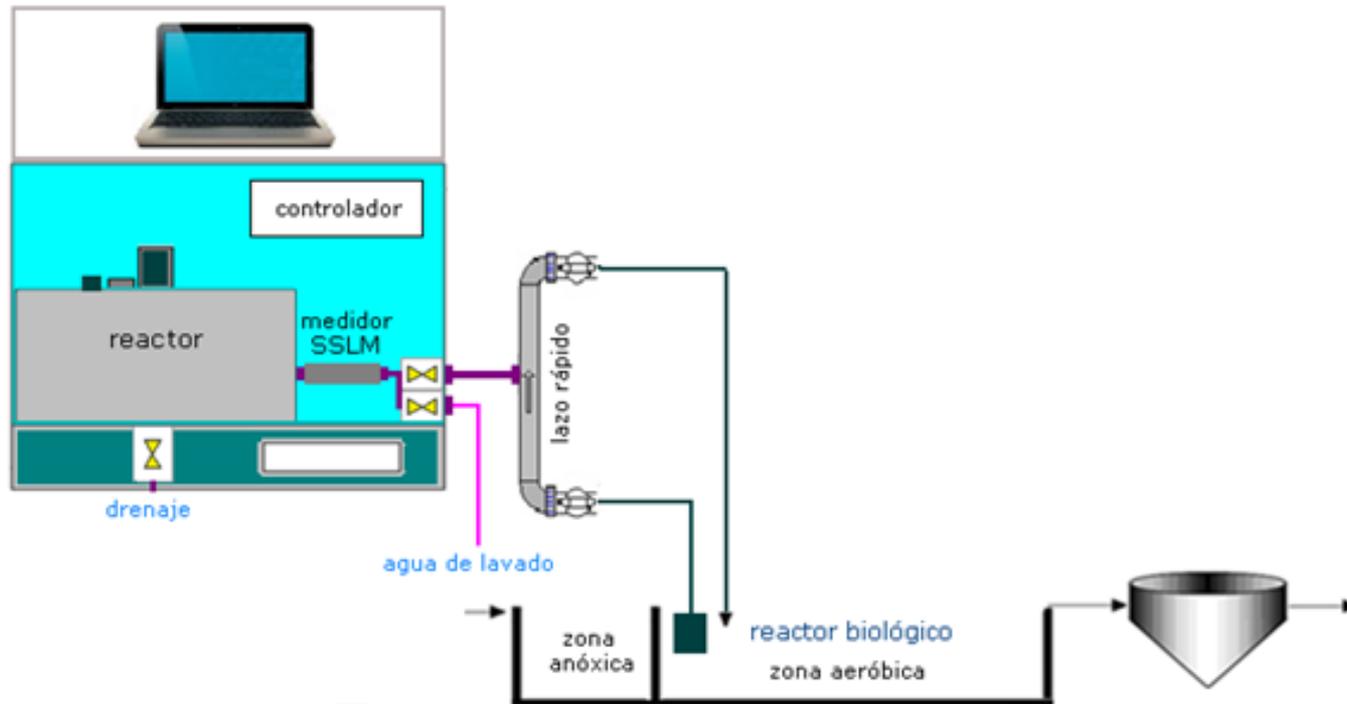
Respirómetro LFS + GFS – Off Gas



Se instala una campana flotante para captar el oxígeno emitido por el licor-mixto y el oxígeno consumido (OC) y OUR se mide al computar el oxígeno transferido con el emitido.

Ejemplo de respirómetro online (II)

Respirómetro LFS online



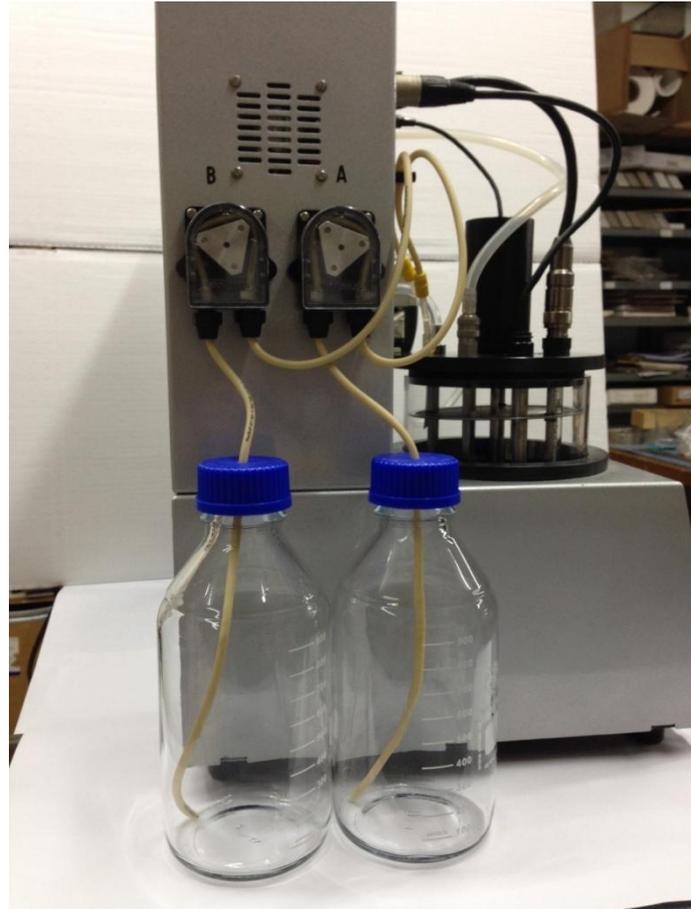
Recibe la muestra desde un lazo rápido y el sistema de medida desarrolla una serie de ciclos de medida continuados de la tasa de consumo de oxígeno.

Los respirómetros más avanzados pueden además ir dotados de un medidor de sólidos en suspensión del licor-mixto (SSLM) y relacionar ambas medidas.

Reactor de un respirómetro LSS + LFS

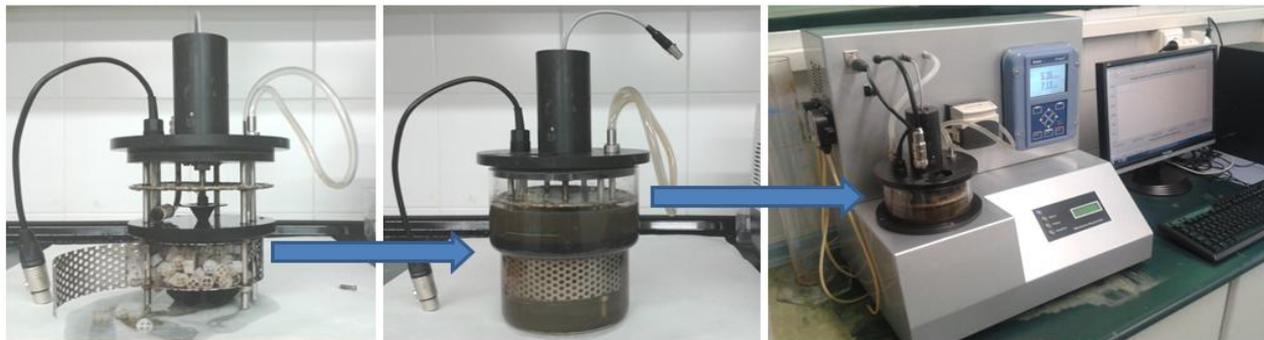


Control automático del pH en un sistema de respirometría LSS + LFS



Opción de reactor para lechos bacterianos (MBBR)

Los respirómetros avanzados ofrecen la posibilidad de hacer uso de un reactor especial (diseñado por Surcis) para llevar a cabo los ensayos de respirometría en procesos de lechos bacterianos móviles tipo MBBR o de biomasa granular.



Sistema de respirometría LSS + LFS



Sistema de respirometría BM-Advance (Surcis)

Unidad de trabajo de respirometría en laboratorio

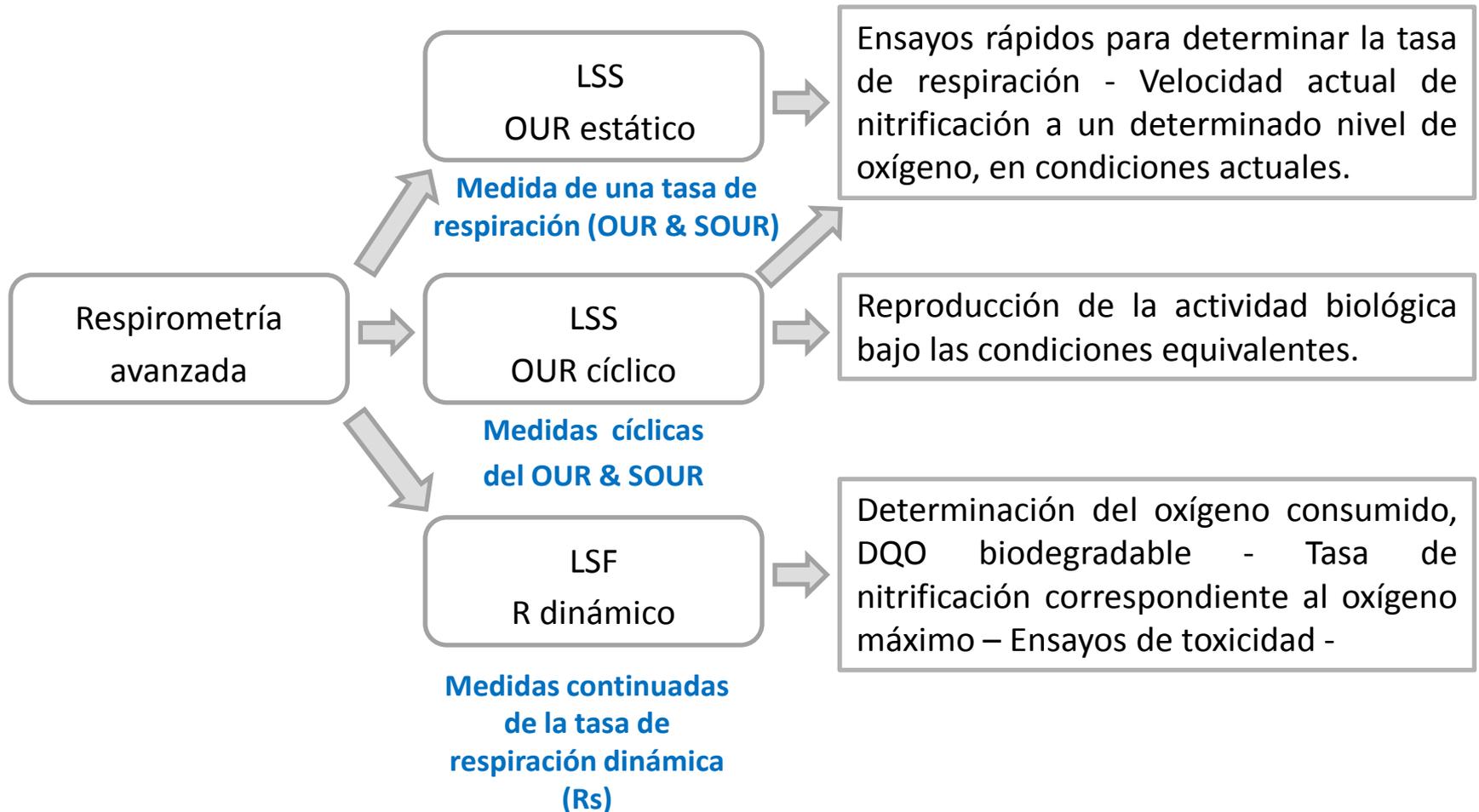


Unidad de trabajo de Respirometría BM en el CIEMAT
(Centro nacional de España de investigación sobre ciencias ambientales)

Modos de trabajo en sistemas de respirometría avanzada

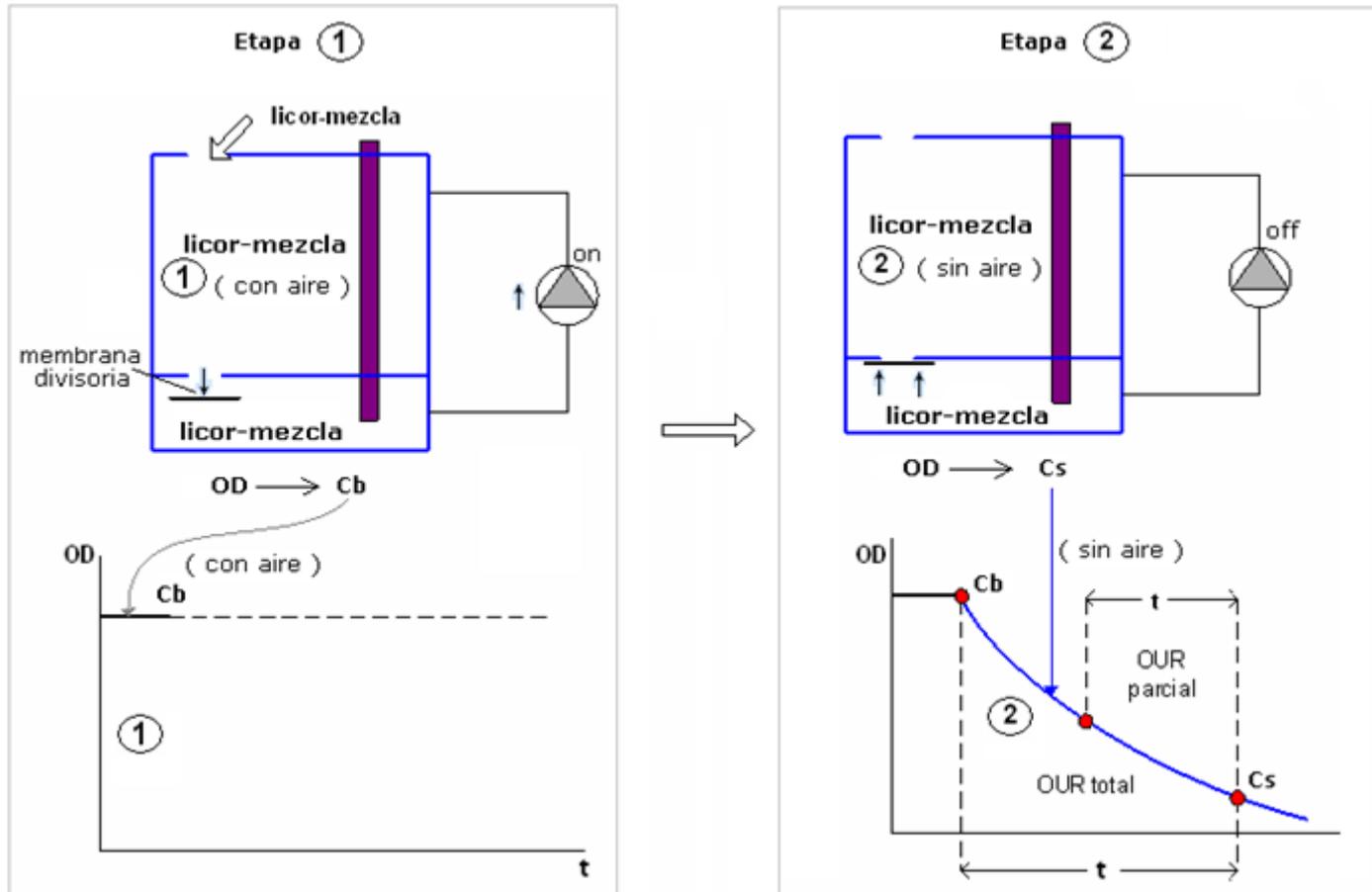
Modos de trabajo en respirometría avanzada

La respirometría debe operar bajo un software avanzado que le permite operar con diferentes tipos de modos de trabajo.



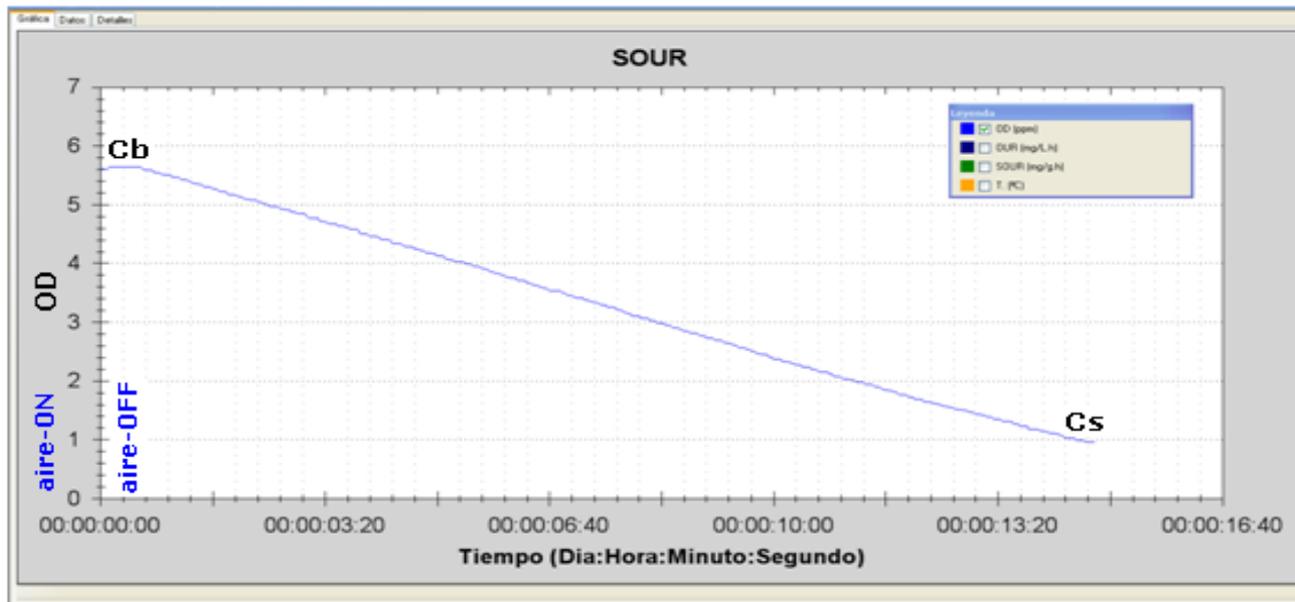
Funcionamiento LSS - OUR Estático

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

Tasa de respiración total estática

$$\text{OUR (mg/l.h)} = (C_b - C_s) / t$$

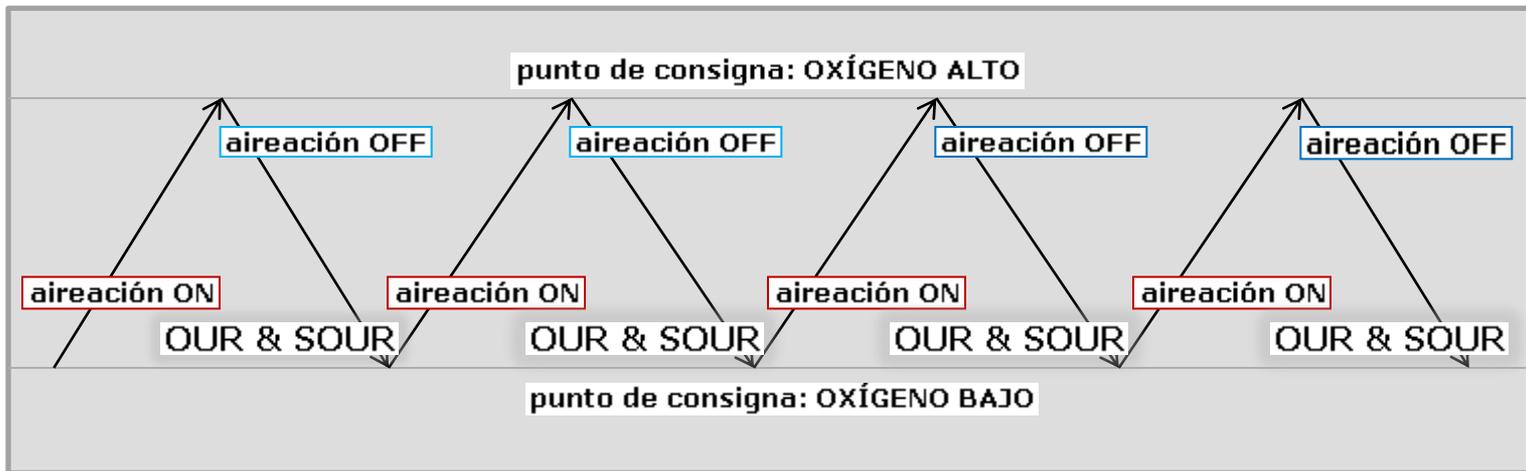
OUR específico

$$\text{SOUR (mg/g.h)} = \text{OUR} / \text{SSV}$$

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**.

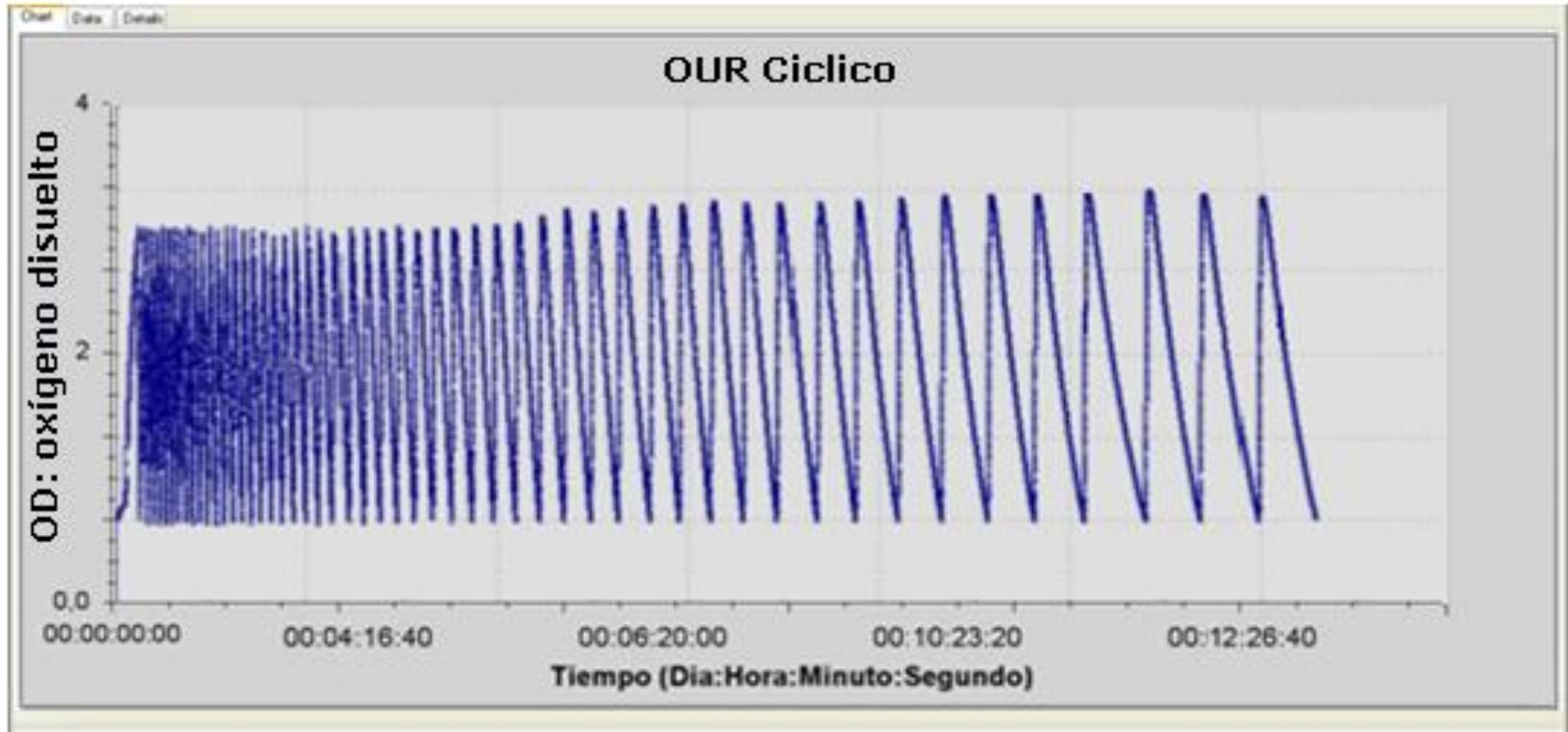
OD (ppm)



Trayectoria del oxígeno modo cíclico

Tiempo

Modo OUR cíclico (II)



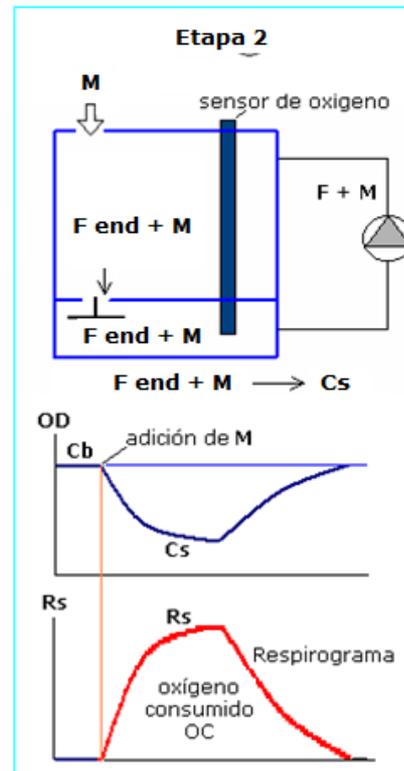
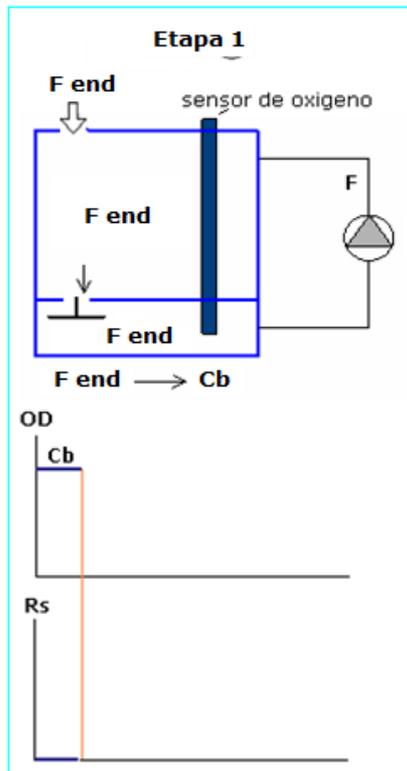
Respirograma del oxígeno disuelto

Funcionamiento LFS avanzado (modo R)

El ciclo de trabajo se compone de dos etapas:

1ª etapa: Se mide el oxígeno de la respiración endógena como referencia (línea base)

2ª etapa: Se añade un volumen de muestra de sustrato biodegradable a analizar. La oxigenación se mantiene de forma continuada (LF) pero debido a la respiración de los microorganismos que lo degradan, inicialmente el oxígeno disuelto baja y la tasa de respiración sube. Llega a un máximo para, a medida que el sustrato se va oxidando, ir bajando hasta la línea base.



F end: Fango en respiración endógena

M: Muestra de sustrato degradable

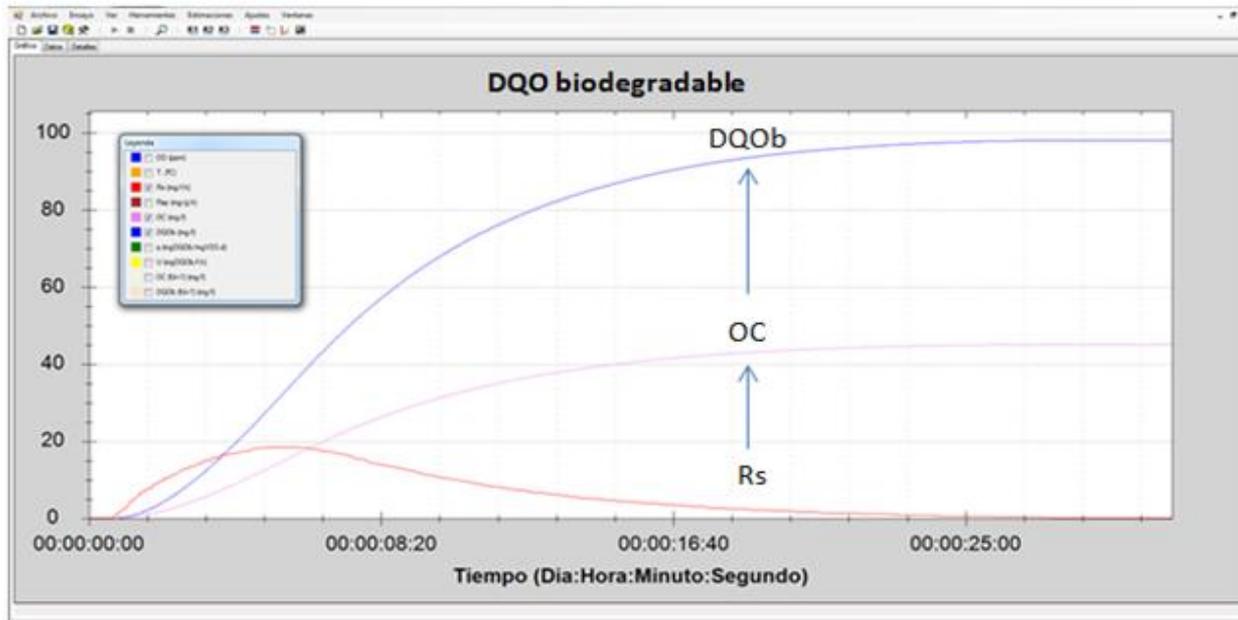
Cb: Oxígeno disuelto de referencia (saturación al nivel de aireación actual)

Cs: Oxígeno disuelto una vez añadido la muestra de sustrato degradable

OC: Oxígeno consumido

Medidas en R dinámico

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



Respirogramas superpuestos de **Rs**, **OC** y **DQOb**

Tasa de respiración exógena	$R_s \text{ (mg/l.h)} = f (C_b - C_s)$
Oxígeno consumido acumulado	$OC \text{ (mg/l)} = f d \int R_s . dt$
Fracción biodegradable de la DQO	$DQOb \text{ (mg/l)} = OC_b / (1 - Y_H)$
Fracción soluble biodegradable de la DQO	$DQOrb \text{ (mg/L)} = OC_{rb} / (1 - Y_H)$

Aplicaciones

Reactivos y fangos activos utilizados en respirometría

Reactivo	Aplicaciones	Comentarios
Acetato sódico	Estándar orgánico de referencia Determinación del coeficiente de rendimiento de oxígeno en el crecimiento de la biomasa heterótrofa (Y_H)	Puede haber otras aplicaciones.
Sulfato de Zinc	Floculación del agua residual, 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, algunas veces no es necesaria la utilización del sulfato de zinc.
Alil Tiourea (ATU)	Inhibición de la nitrificación	Solo es necesario cuando hay nitrificación.
Cloruro de amonio	Estándar de nitrógeno amoniacal en ensayos de nitrificación [1 mg NH_4Cl = 0.26 mg $\text{NH}_4\text{-N}$]	Solo es necesario cuando hay nitrificación.
Fango activo	Aplicaciones	Comentarios
Fango endógeno	Determinación del coeficiente de crecimiento de la biomasa heterótrofa (Y_H) Medida de la DQOrb	Es interesante hacer el OUR endógeno (ver manual)
Fango efluente fresco	UNFED SOUR	Pulso al estado del fango y del proceso
Fango de cabecera fresco	FED SOUR SOUR Cíclico	Estado del proceso Análisis del proceso

Valoración primaria del proceso y salud del fango activo

Respiración endógena: OUR_{end}

Se refiere a un OUR en respiración endógena que se consigue después de que el fango efluente haya sido sometido a una aireación prolongada para eliminar restos de sustrato. El tiempo de aireación puede estar entre las 12 y 24 horas; pero en los procesos de aireación prolongada, con rendimiento suficiente, el tiempo de aireación puede ser tan solo de 2 a 4 horas.

Tabla de referencia

SSVLM (mg/L)	OUR_{end} (mg/L.h)
1000	2 – 3.5
1500	3.2 – 5
2000	4.2 – 6.8
2500	5.3 – 8.5
3000	6.3 - 10
3500	7.3 - 12
4000	8.5 – 13.5
4500	9,5 – 15.3

Cuando el OUR_{end} queda sensiblemente por debajo del rango normal es que existe una baja concentración de biomasa activa y la remoción del sustrato se realiza muy lentamente.

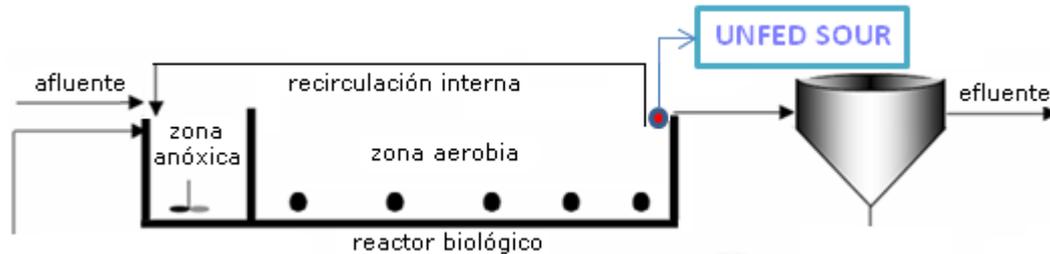
Causas más comunes:

1. El proceso esté operando con una carga másica excesivamente baja (a la biomasa le falta alimento)
2. 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.
3. Déficit de nutrientes.
4. Algún tóxico pudo haber liquidado un porcentaje importante de biomasa activa (o la está liquidando)

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.

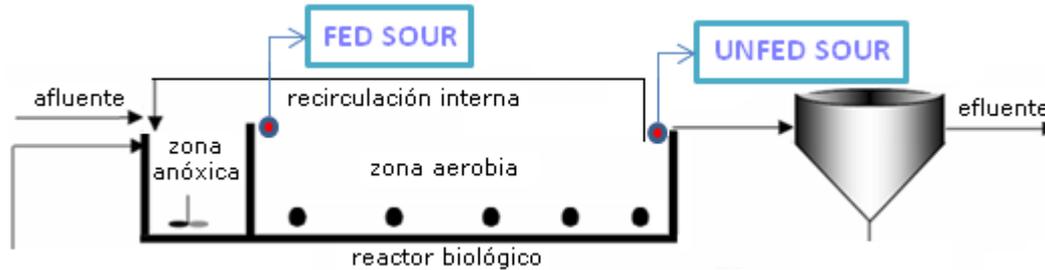


Valoración	UNFED SOUR actual vs. referencia	UNFED SOUR Referencia (mgO ₂ /g.h)	Carga Másica F/M (DBO/SS.d)	TRC (d)
Sobrecarga	>> referencia	6 - 18	> 0.4	2 - 4
Buen rendimiento	En rango	4 - 15	0.2 < F/M < 0.4	4 - 10
Buen rendimiento Baja carga	< referencia	3 - 12	0.07 < F/M < 0.2	10 - 30
Muy baja carga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

COMPARACIÓN

Factor de carga

Esta valoración se lleva a cabo mediante dos SOUR tests: uno con fango del inicio (FED SOUR) y otro con fango del final del proceso (UNFED SOUR)



Factor de Carga (FC) is la relación entre FED SOUR y UNFED SOUR.

$$FC = \text{FED SOUR} / \text{UNFED SOUR}$$

FC	Diagnóstico
$FC \leq 1$	Carga inhibitoria o tóxica
$1 < FC < 2$	Bajo rendimiento o muy baja carga
$2 < FC < 5$	Buen rendimiento & Carga normal
$FC > 5$	Sobrecarga

Requerimiento actual de oxígeno: AOR

Se refiere a los kg de oxígeno / día que el proceso global necesita.

$$\text{AOR} = \text{OUR}_m * V$$

AOR: Requerimiento actual de oxígeno (kg O₂/d)

OUR_m: OUR medio (kg O₂/m³.d) = (FED OUR + UNFED OUR) / 2

V: Volumen del reactor biológico aerobio (m³)

Valoración del sistema actual de aireación

$\text{AOR} > Y_R * Q_{A.\text{max}}$: Aireación deficiente.

$\text{AOR} < Y_R * Q_{A.\text{max}}$: Aireación suficiente para una carga normal.

$\text{AOR} \ll Y_R * Q_{A.\text{max}}$: Sobre-aireación – se está desperdiciando energía.

Y_R : Concentración de oxígeno en aire (kg O₂ /m³) ≈ 0,3 kg O₂ /m³

Q_A : Caudal de aire medio en el sistema de aireación (m³/d)

$Y_R * Q_A = (\text{kg O}_2/\text{m}^3) * (\text{m}^3/\text{d}) = \text{kg O}_2/\text{d}$

Y_R y Q_A deben provenir del sistema de aireación instalado en la planta

**Aplicaciones
para la remoción de la
materia orgánica**

Parámetros clave en la biomasa heterótrofa & remoción del sustrato orgánico

Coeficiente del rendimiento de la biomasa heterótrofa: Y_H

Concentración de biomasa heterótrofa activa: X_H

Tasa máxima de crecimiento de la biomasa heterótrofa: μ_{\max}

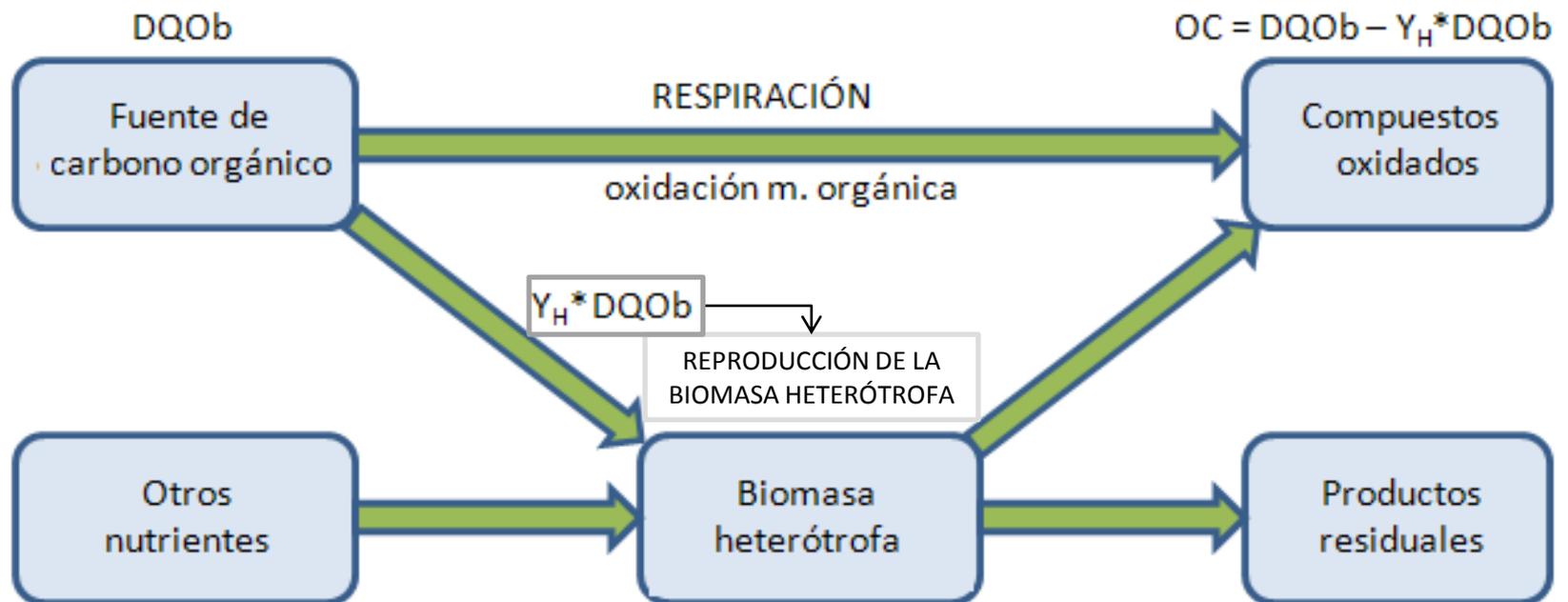
Edad del fango mínima para la remoción de la materia orgánica: TRC_{\min}

Fracciones de la DQO: DQO_{rb} , DQO_b , DQO_{lb} , DQO_i

Coeficientes estequiométricos de la bioamasa heterótrofa

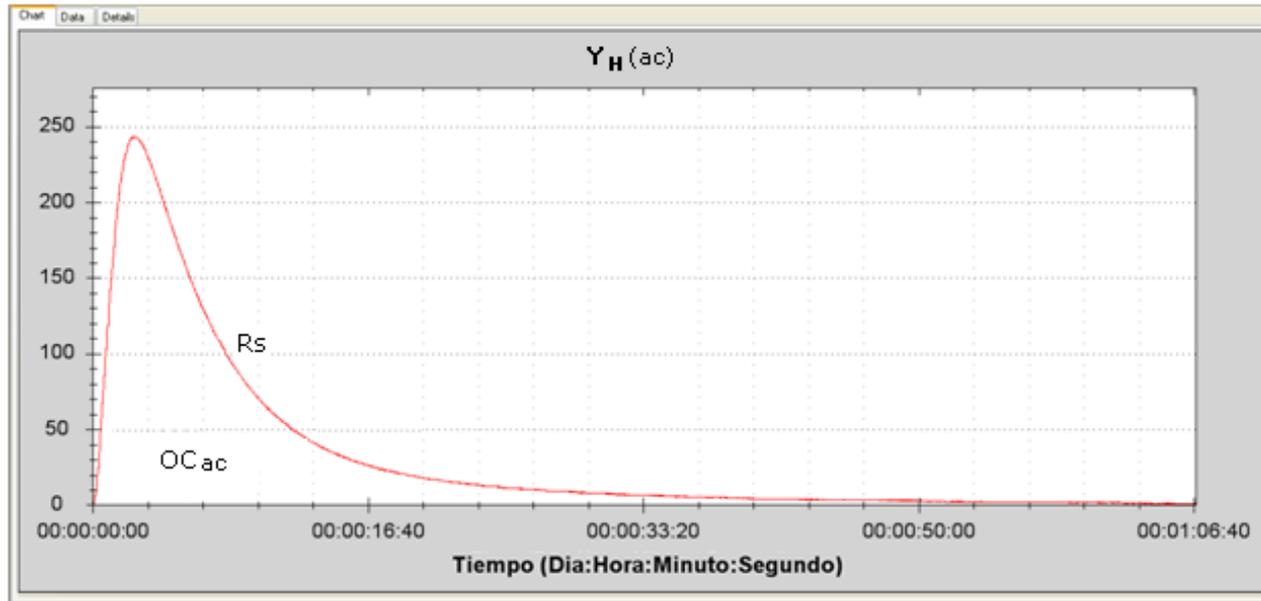
Diagrama del significado del coeficiente Y_H de rendimiento de biomasa heterótrofa

Y_H representa el porcentaje de oxígeno de la DQO biodegradable utilizado en el crecimiento de la biomasa heterótrofa



Determinación del Y_H referido al consumo de oxígeno ($Y_{H.O_2}$)

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.



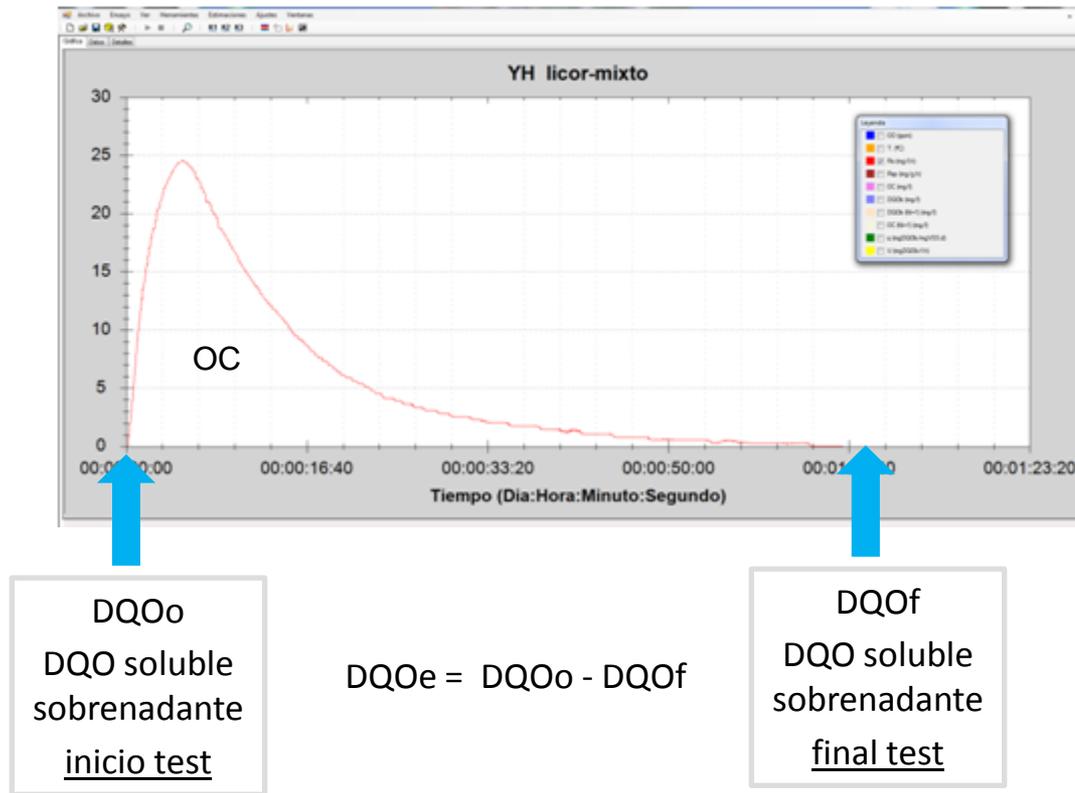
Respirograma

$$Y_{H.O_2} (OC/DQO) = 1 - OC / DQO_{ac}$$

DQO_{ac} : DQO del acetato sódico añadido

Determinación del Y_H desde la DQO soluble eliminada en un ensayo de respirometría

Aprovechamos la DQO eliminada en el licor-mixto de un ensayo de respirometría en donde se determina automáticamente el valor OC.



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

Variantes de la Y_H

Y_H referida al consumo de oxígeno: $Y_{H,02} \text{ (OC/DQO)} = Y_{H,02} / 1.42$

Se utiliza en el cálculo de la DQOrb & DQOb y la valoración del estado del fango activo

Y_H referida a los SSVLM: $Y_{H,SSV} \text{ (SSVLM/DQO)} = Y_{H,02} / 1.42$

Se utiliza en el cálculo de parámetros biocinéticos

Y_H observada: $Y_{obs} \text{ (SSVLM/DQO)} = [Y_{H,VSS} * U_{(DQO)} + K_d * SSVLM] / U_{(DQO)}$

Se utiliza en el cálculo de la producción de fango (P_X)

Tasa de decaimiento de la biomasa habitual: $K_d \approx 0.05 \text{ (d}^{-1}\text{)}$

Tasa de eliminación actual de la DQO: $U_{(DQO)} = DQOe / TRH_{(días)}$

Producción de fango

$$P_X = Y_{obs} * Q_i * DQOe$$

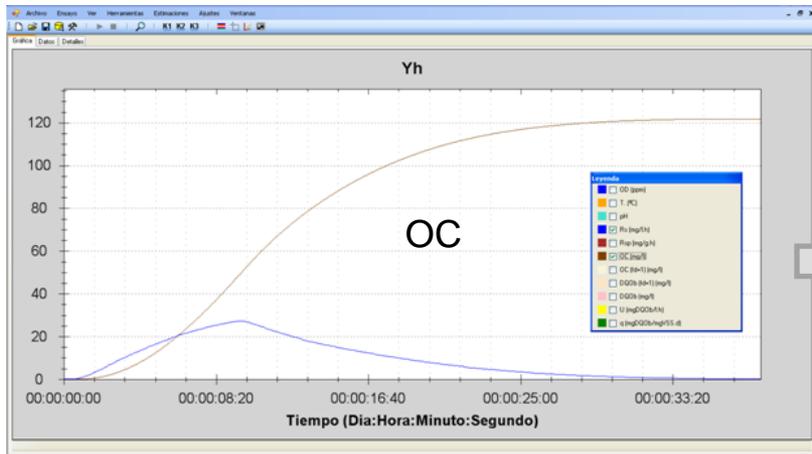
Producción de fango: $P_X \text{ (Kg/d)}$

Caudal influente a biológico: $Q_i \text{ (m}^3\text{/d)}$

DQO eliminada: $DQOe \text{ (kg/m}^3\text{)}$

Pulso al proceso desde la Y_{H,O_2}

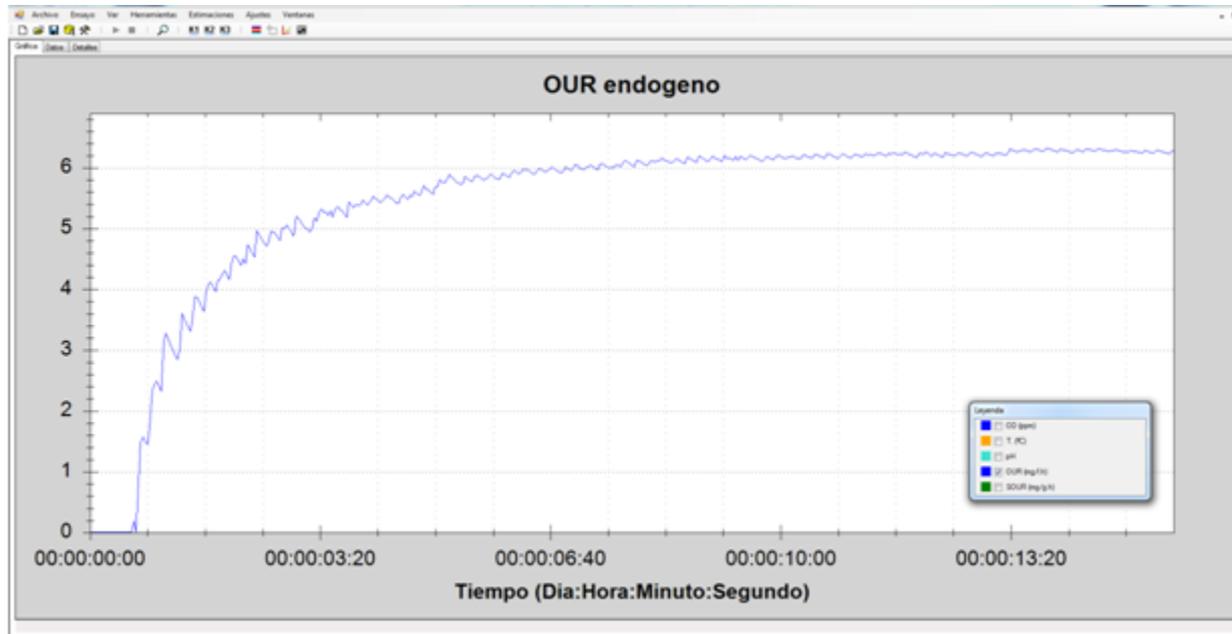
La determinación de la Y_H por respirometría, además de formar parte del cálculo de la DQOb, complementa la toma del pulso al proceso valorando la salud de la biomasa heterótrofa.



Y_{H,O_2}	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

**Concentración
de biomasa activa
heterótrofa**

Cálculo de la concentración de la biomasa heterótrofa activa (X_H)



$$X_H = \text{OUR}_{\text{end}} / (f_{\text{cv}} * b)$$

OUR_{end} (mg/l.d) = OUR endógeno por día

$f_{\text{cv}}(\text{O}_2/\text{X})$: Demanda de oxígeno por unidad de biomasa = 1,42

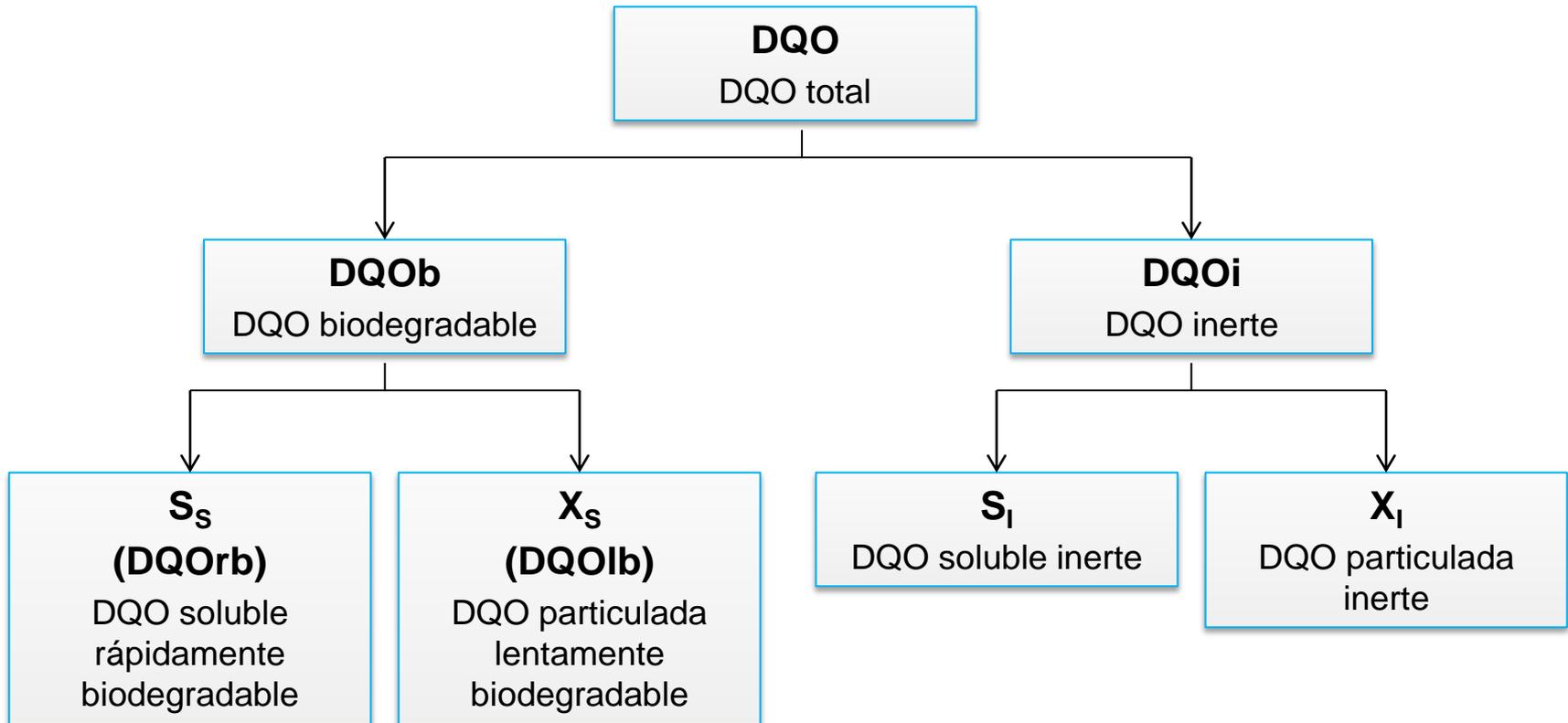
b_H (d^{-1}): Tasa de decaimiento = 0,24. $1,04^{(T-20)}$

Valoración: Rango de valores habituales de X_H : entre 14 y 25 % de MLVSS

Fuente: *Respirometry for Environmental Science and Engineering* – James G. Young & Robert M. Cowan. 2004

Fracciones de la DQO

Fraccionamiento de la DQO (I)



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

1. Para calcular la biodegradabilidad específica a ese proceso:

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

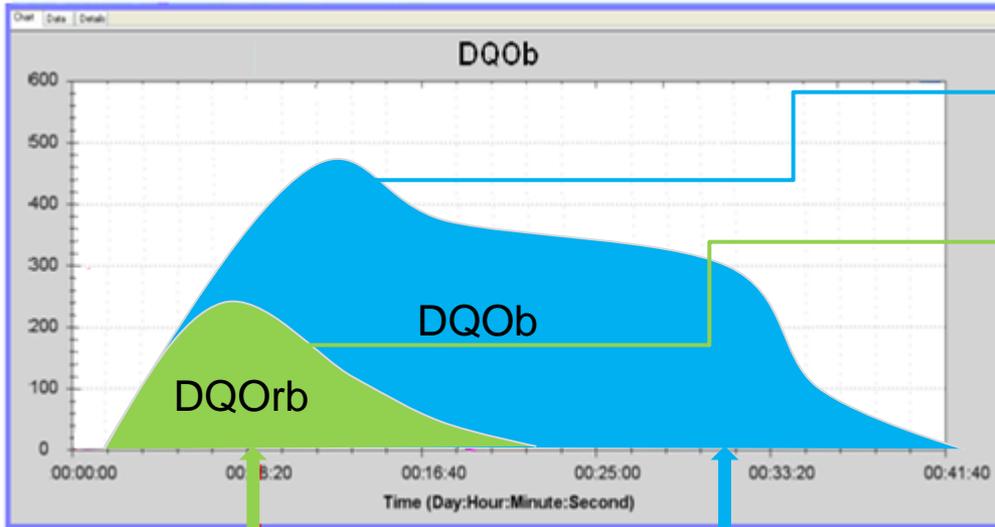
$$\text{Biodegradabilidad DQOrb (\%)} = 100 * \text{DQOrb} / \text{DQO}$$

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 (DQOl_b) y ver si existe una bajo rendimiento de la DQO como consecuencia de un valor alto de esta fracción.

Un valor elevado de DQOl_b implica un valor excesivamente bajo de la DQOrb, que puede representar un desequilibrio en la relación de nutrientes en cuanto a la parte del Carbono (C) como material orgánico fácilmente asimilable.

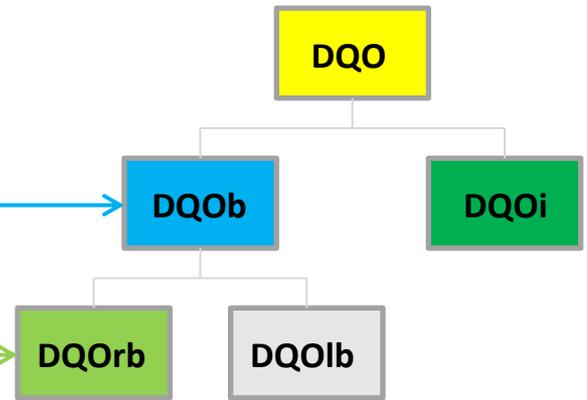
Fraccionamiento de la DQO (II)



fango activo
(endógeno)
+
agua r. filtrada

fango activo
(endógeno)
+
agua r. sin filtrar

Ensayos R de Respirometría



DQOb: DQO biodegradable total

DQOi: DQO inerte (refractaria)

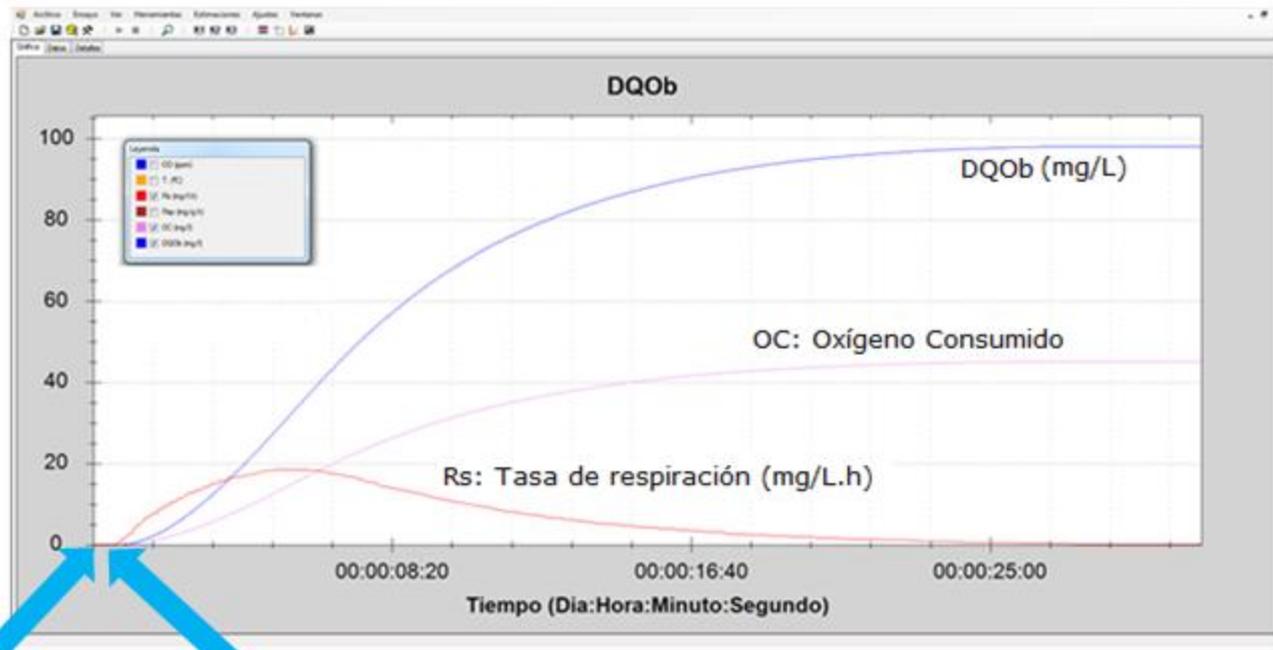
DQOrb: DQO rápidamente biodegradable

DQOIb: DQO lentamente biodegradable

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

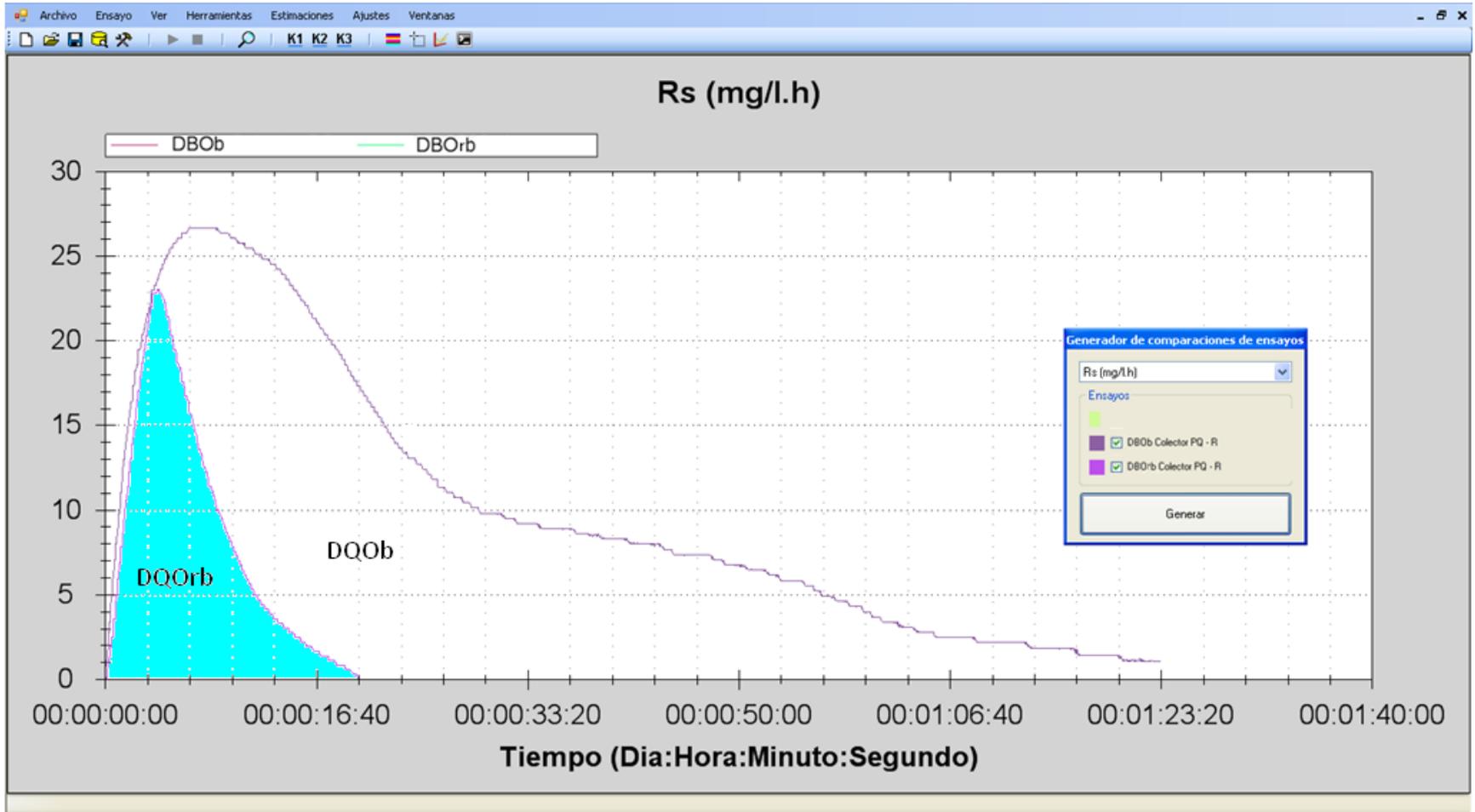
$$\text{DQOb} - \text{DQOrb} = \text{DQOIb}$$

Fraccionamiento de la DQO – DQOb (I)



Fraccionamiento de la DQO

Superposición de Rs de DQOb con Rs de DQOrb (II)



Respirogramas de las Rs de las DQOb & DQOrb superpuestos

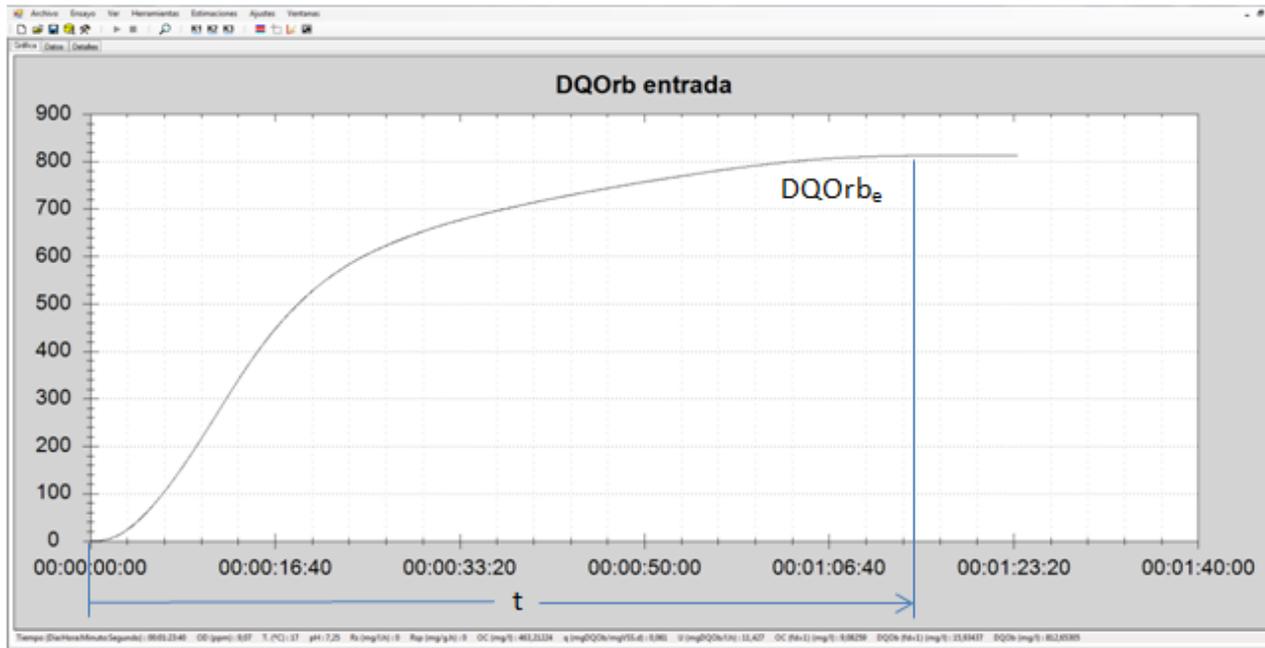
Biodegradabilidad del sustrato en el fango activo

DQOb / DQO	Carácter
> 0,8 (> 80%)	Muy biodegradable
0,7 – 0,8 (70 – 80%)	Biodegradable
0,3 – 0,7 (30 – 70%)	Poco biodegradable
< 0,3 (< 30%)	No biodegradable

Parámetros cinéticos de la biomasa heterótrofa

Tasa de utilización del sustrato orgánico (U)

Para la determinación de utilización de sustrato (U) llevamos a cabo un ensayo R con una muestra integrada soluble recogida del afluente al reactor biológico (añadiendo ATU, en caso de nitrificación) para calcular la velocidad de remoción de la DQO soluble biodegradable.



$$U_{(final)} = DQOrb_e / t$$

$$U = U_{(final)} * [OD / (K_{OD} + OD)]$$

$K_{DO} \approx 0,2 \rightarrow$ cuando OD medio en el reactor del proceso es < 2 ppm

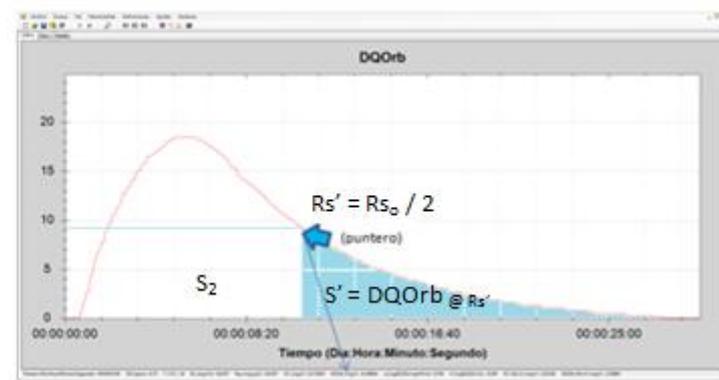
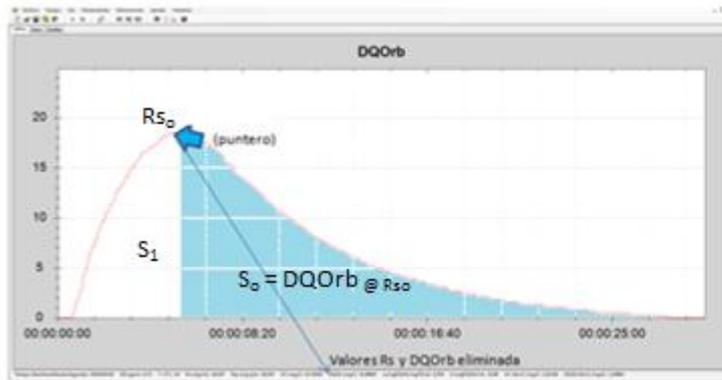
$K_{OD} = 0 \rightarrow$ cuando OD > 2 ppm

OD = Valor medio del oxígeno disuelto en el proceso.

Constante de semisaturación (K_s) desde un solo ensayo de sustrato soluble

La constante de semisaturación por sustrato se define como la concentración del sustrato orgánico soluble a la cual la velocidad de crecimiento de los microorganismos heterótrofos es igual a la mitad de la máxima.

Procedimiento Surcis



$$K_s = (R_{S_0} - R_{S'}) / [(R_{S'} / S') - (R_{S_0} / S_0)]$$

K_s (mg/l): Constante de semisaturación por sustrato soluble biodegradable

[Valores habituales de K_s : 12 – 120 (mg/L)]

Tasa de crecimiento actual y máxima de la biomasa heterótrofa

Tasa de crecimiento actual

$$\mu_H = Y_{H.VSS} * 24 * (U / X_H)$$

μ_H : Tasa de crecimiento actual de la biomasa heterótrofa (d⁻¹)

U_{act} : Tasa actual de utilización del sustrato (mg DQOs/h)

Tasa de crecimiento máxima (ecuación de Monod)

$$\mu_{H.max} = \mu_H * (K_S + S) / S$$

$\mu_{H.max}$: Tasa de crecimiento máxima de la biomasa heterótrofa (d⁻¹)

S: DQO soluble media con que el proceso está operando (mg/L)

Parámetros operativos en la remoción de la materia orgánica

Parámetros operativos límites en la degradación de la materia orgánica

Edad del fango mínima

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

TRC_{\min} : Edad del fango mínima para la remoción del sustrato orgánico (d)

Relación Edad del fango mínima con Carga Másica máxima

$$TRC_{\min} = 1 / (0,2 * F/M_{\max} + F/M_{\max}^{1,5})$$

Fuente: Degremont

F/M_{\max} : Carga másica máxima que corresponde a la TRC mínima.

Relación de Nutrientes

Cálculo de la relación de nutrientes

Para una remoción total de la DQO biodegradable, podemos asumir que el contenido de N en la biomasa es del 12,3% y el contenido de P es del 20%, el valor de la Y_{obs} es de 0,41 (41%)

$$C : N : P = 41 / (E * Y_{obs}) : 5 : 1$$

C: DQO eliminada = DQO_e

41: Valor de la Y_{obs} teórico para un 12,3% de N y 20 de P en la remoción de la DQO biodegradable

E (%): Eficiencia actual del proceso en la remoción de la DQO

Desde aquí, podemos realizar el siguiente desglose:

$$N = DQO_e (E * Y_{obs}) / 5 * 41$$

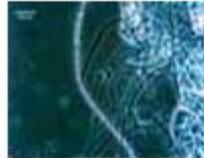
$$P = DQO_e (E * Y_{obs}) / 41$$

Indicadores de deficiencia de nutrientes

1. Concentración de nitrógeno inorgánico total ($\text{NH}_4 + \text{NO}_3 + \text{NO}_2$) soluble en el efluente por debajo de 1 mg/l.
2. Concentración de orto-fósforo ($\text{PO}_4\text{-P}$) en el efluente por debajo de 0,5 mg/l
3. Bulking -Fango filamentoso: Un fango activo con un índice volumétrico de fango (IVF) mayor que 150 ml/g puede ser clasificado como que se encuentra bajo el efecto “bulking”
4. La presencia de bacterias filamentosas se hace evidente en la deficiencia de nutrientes. En este caso, como filamentosas representativas podemos citar la proliferación del tipo Thiothrix I y II, tipo O21N y N. Limicola



Thiothrix I



Thiothrix II



O21N

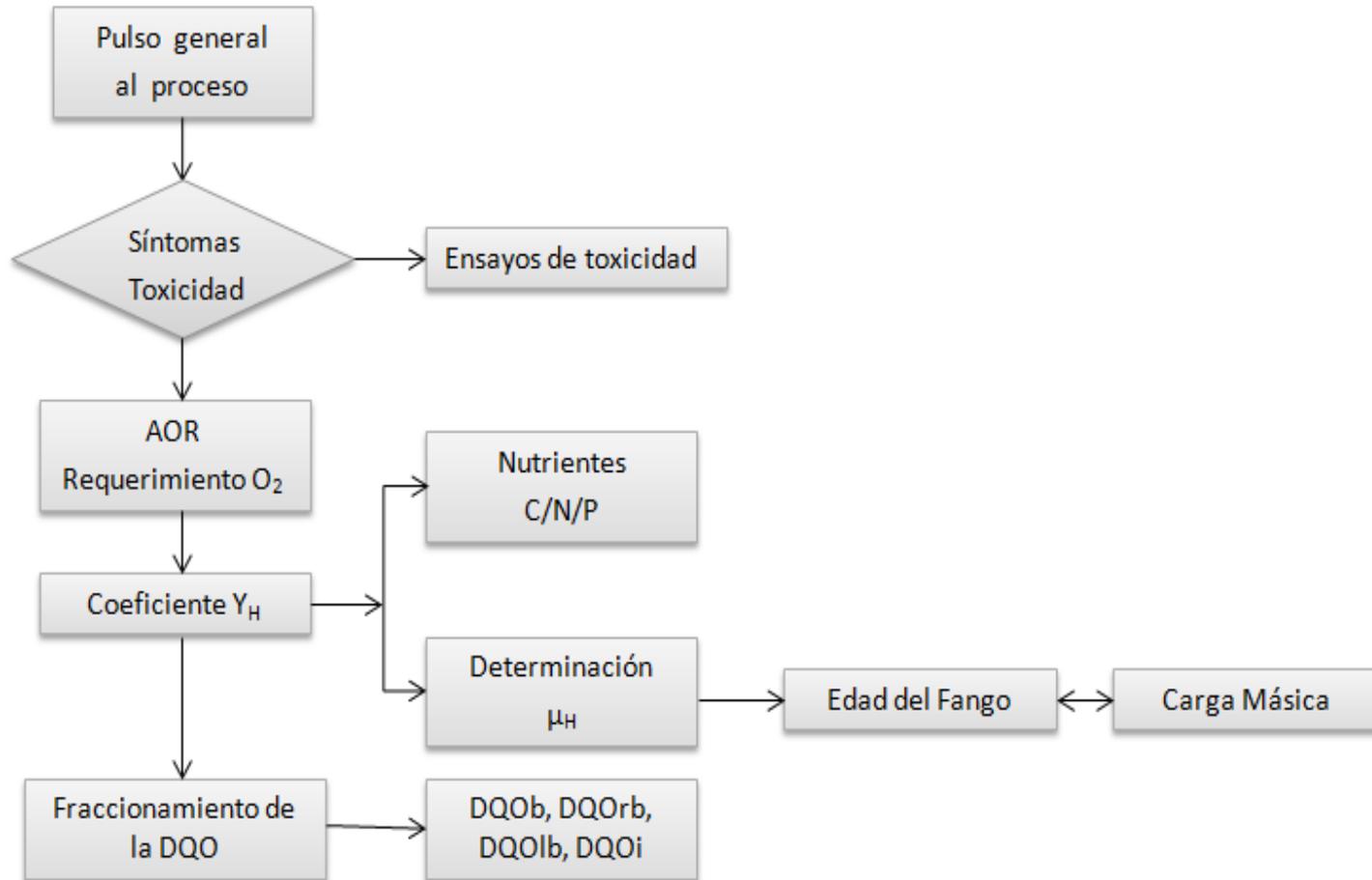


N. Limicola

5. Fangos viscosos y/o con espumas: con contenido de polímero extracelular.

Protocolo de respirometría en un proceso sin nitrificación

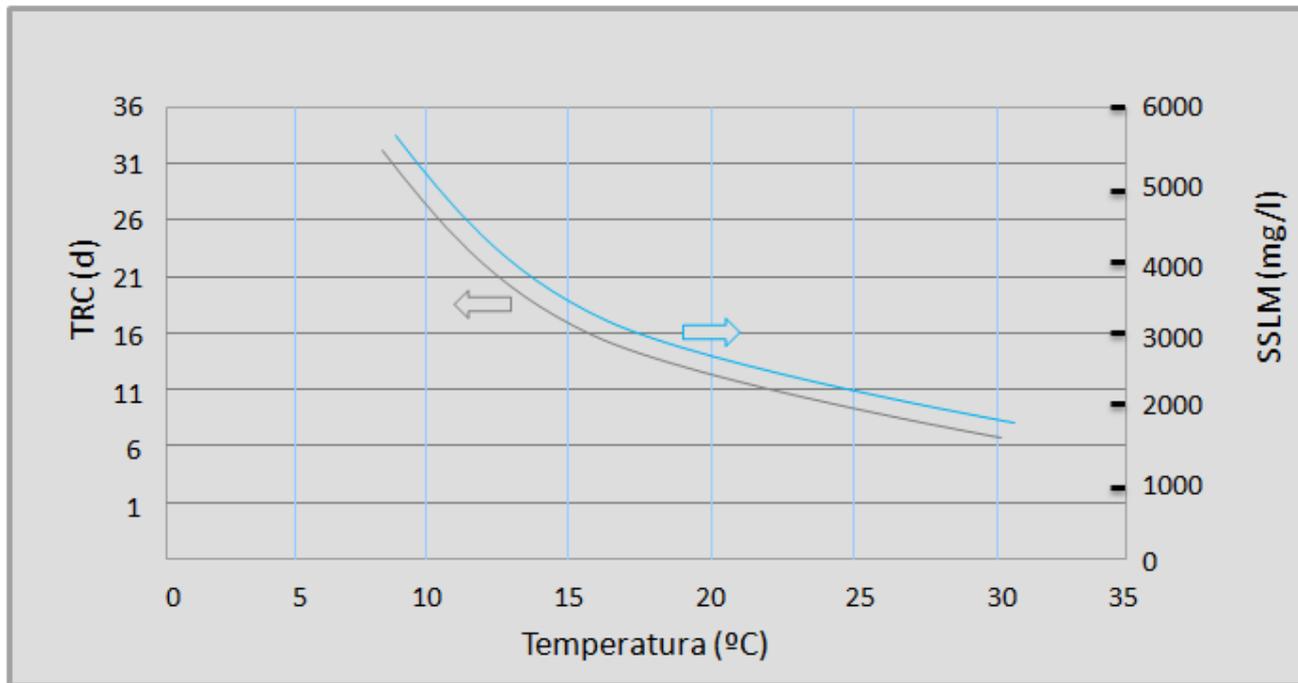
Protocolo de respirometría para un proceso sin nitrificación.



Aplicaciones para la remoción del amonio y nitrato

Condiciones iniciales para la nitrificación

Condiciones	
pH	7.5 a 8 (óptimo)
T	> 15 a 28 °C
OD	1 a 3 ppm
Reactor con suficiente capacidad de nitrificación	
Sin inhibidores ni compuestos tóxicos	



Parámetros clave en la biomasa autótrofa & nitrificación

Concentración de amonio a nitrificar (S_N) y tasa de nitrificación media actual (AUR)

Concentración de la biomasa autótrofa activa (X_A)

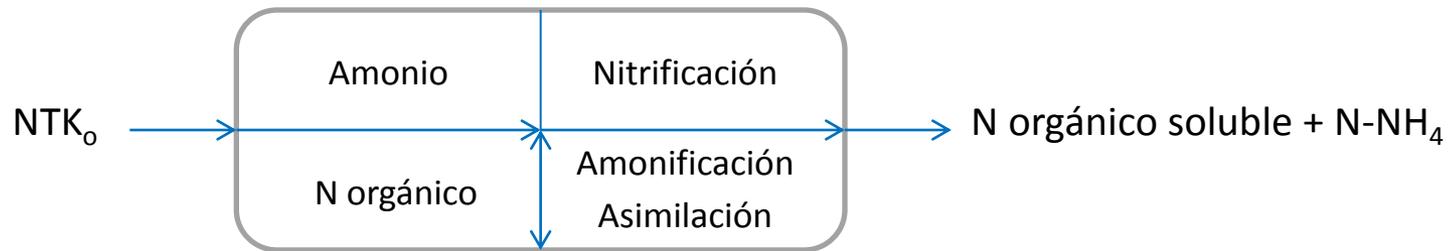
Coefficiente de semi-saturación de oxígeno (K_{OD})

Valores de la tasa de nitrificación (AUR_{OD}) y edad del fango (TRC_{OD})

OD para un determinado rendimiento de la nitrificación

Concentración de amonio a nitrificar (S_N)

Debido al proceso de la amonificación, la mayor parte del nitrógeno orgánico biodegradable pasa a la forma de nitrógeno amoniacal y el no-degradable sale por el efluente. Por otro lado, parte del amonio se utiliza en la síntesis celular (Asimilación) El resultado final es que en el efluente debe haber parte del amonio remanente y nitrógeno orgánico soluble.



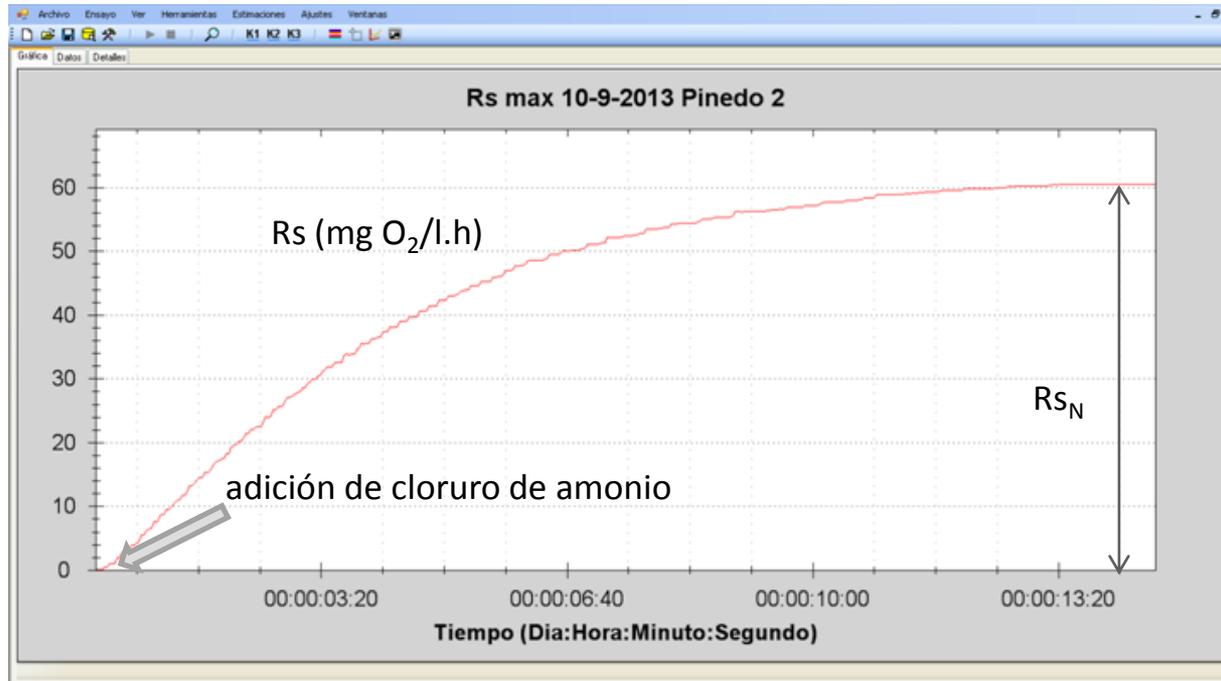
$$S_N = [NTK_o] \text{ (afluente)} - [\text{N orgánico soluble} + \text{N-NH}_4] \text{ (efluente)}$$

NTK_o : NTK afluente a biológico (mg N/L)

S_N : Concentración de amonio típica a nitrificar (mg N-NH₄/L)

Tasa de nitrificación a oxígeno máximo

Se determina mediante un ensayo R de respirometría, utilizando cloruro de amonio con una concentración de amonio equivalente y a las mismas condiciones medias de temperatura y pH que las del proceso real.



Respirograma R por adición de cloruro de amonio

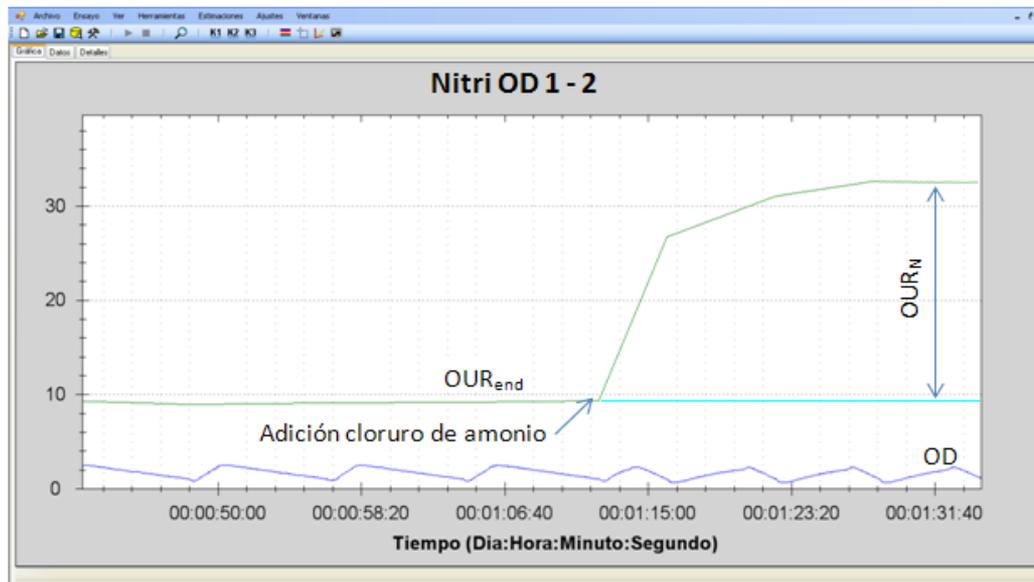
$$AUR_{(OD \geq 3)} = R_{S_N} / 4.57$$

$AUR_{(OD \geq 3)}$: Tasa de nitrificación para un $OD \geq 3$ mg/L (mg/L.h NH_4 -N)

4.57: mg O₂ que necesita cada mg de N-NH₄ para su nitrificación

Determinación de la tasa de nitrificación actual (AUR) por respirometría

Se lleva a cabo mediante un ensayo en modo OUR cíclico, desde respiración endógena entre valores OD del proceso, añadiendo una dosis de cloruro de amonio con una concentración de nitrógeno amoniacal equivalente ($1 \text{ mg ClNH}_4 = 0.26 \text{ mg N-NH}_4$)



Respirograma del OUR cíclico para la tasa de nitrificación

$$\text{AUR (mg N-NH}_4\text{/l.h)} = \text{OUR}_N / 4.57$$

4.57: mg O₂ que necesita 1 mg de amonio para su nitrificación

Concentración de la biomasa nitrificante actual (X_A)

$$X_A = \text{TRC} * 0.1 * \text{AUR} * 24$$

X_A : Concentración de biomasa nitrificante(mg/L)

TRC: Edad del fango actual en el proceso (d)

Para un TRC que se encuentre dentro del rango normal, el valor de la concentración de biomasa autótrofa actual (X_A) debe ser coherente con el calculado según la tabla de referencia ($X_{A.ref}$)

$$X_{A.ref} = F_N * [\text{SSVLM}]$$

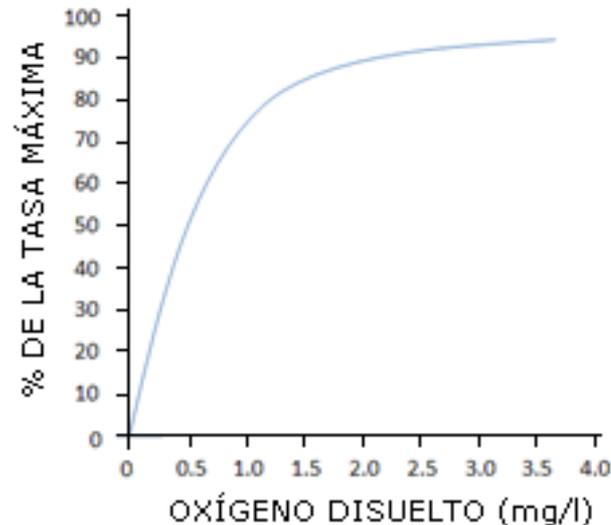
Tabla de referencia

BOD/TKN	0.5	1	2	3	4	5	6	7	8	9
F_N	0.35	0.21	0.12	0.083	0.064	0.054	0.043	0.037	0.033	0.029

En el caso de que X_A sea sensiblemente inferior a $X_{A.ref}$, es muy probable que la biomasa autótrofa tenga una concentración inferior a la normal o que se encuentre con síntomas de inhibición.

Tasa de nitrificación según nivel de oxígeno

Se puede asumir que, a partir de 3 mg/l de oxígeno, la tasa de la tasa de respiración máxima por nitrificación y tasa de nitrificación máxima se mantienen prácticamente sin variaciones significativas y se pueden considerar como constantes.



Puesto que el modo R trabaja bajo condiciones de oxígeno máximas, el mejor modo de obtener esta tasa de respiración y nitrificación máximas es por medio de un ensayo de este tipo.

Para llevar a cabo este ensayo R, haremos uso de 1 litro de fango activo en fase endógena y cloruro de amonio con una concentración de amonio equivalente a la que se quiere nitrificar.

El uso de la respirometría BM en el cálculo de la constante de semi-saturación de oxígeno (K_{OD})

El oxígeno disuelto en el que se desarrolla la nitrificación, depende en gran medida del oxígeno disuelto y, según bibliografía y programas de simulación, su cinética ésta ligada a la constante de semi-saturación del oxígeno disuelto: K_{OD}

El inconveniente está en que el valor de K_{OD} varía según la fuente:

Fuente	K_{OD} (mg/l)	Fuente	K_{OD} (mg/l)
EPA	1.3	ASM1	0.4
IAW	0.4	ASM2/3	0.5
BioWin	0.25	LISS	1
GPS-X	0.5	Otros	0.3 - 2



Con la respirometría BM solucionamos el problema de la ambigüedad de K_{OD} al calcularla de forma específica al proceso, y trabajar directamente con las condiciones actuales.

Coeficiente de semi-saturación (K_{OD})

Para determinar la tasa de nitrificación para un determinado nivel de oxígeno en el proceso, se necesita previamente calcular el coeficiente de saturación K_{OA} .

$$K_{OD} = OD (R_{S_N} - OUR_N) / OUR_N$$

OD: Valor medio del oxígeno disuelto con que el proceso está operando (mg/l)

Cálculo teórico de la tasa de nitrificación para un determinado nivel de OD inferior a 3 mg/l

Una vez obtenido el valor del coeficiente K_{OD} , con el ensayo para el R_{S_N} , podemos calcular el valor del AUR para cualquier oxígeno que se sitúe por debajo de 3 mg/L..

$$AUR_{(OD)} = (R_{S_N} / 4,57) * OD / (K_{OD} + OD)$$

Tasa de nitrificación máxima (AUR_{max}) y Capacidad máxima estimada de Nitrificación ($C_{N.max}$)

$$AUR_{max} \text{ (mg N-NH}_4\text{/l.h)} = AUR_{(OD)} * [S_N / (K_N + S_N)]$$

OD: Nivel de oxígeno disuelto para el que se quiere calcular la tasa de nitrificación (mg/l)

Temperatura °C	K_N (mg/l NH ₄ -N)
10	0.45
15	0.59
20	0.77
25	1.0

Fuente: EPA - Long Island - Soun Study. NY - 2000

$$C_{N.max} \text{ (mg N-NH}_4\text{)} = AUR_{max} * TRH_N$$

TRH_N : Tiempo de residencia hidráulica teórico disponible para la nitrificación (h)

Parámetros cinéticos de la biomasa autótrofa

Tasa de utilización máxima de amonio ($q_{N.max}$) y tasa de crecimiento máxima ($\mu_{A.max}$) de la biomasa autótrofa

Tasa de utilización específica máxima de amonio

$$q_{N.max} = AUR_{max} * 24 / X_A$$

$q_{N.max}$ = Tasa de utilización específica máxima de amonio (mg N-MH₄/SSV_A.d)

Tasa de crecimiento máxima de la biomasa autótrofa

$$\mu_{A.max} = Y_A * q_{N.max}$$

$\mu_{A.max}$: Tasa de crecimiento máxima de la biomasa autótrofa (d⁻¹)

$$Y_A \approx 0,1$$

Parámetros operativos en la remoción del amonio (nitrificación)

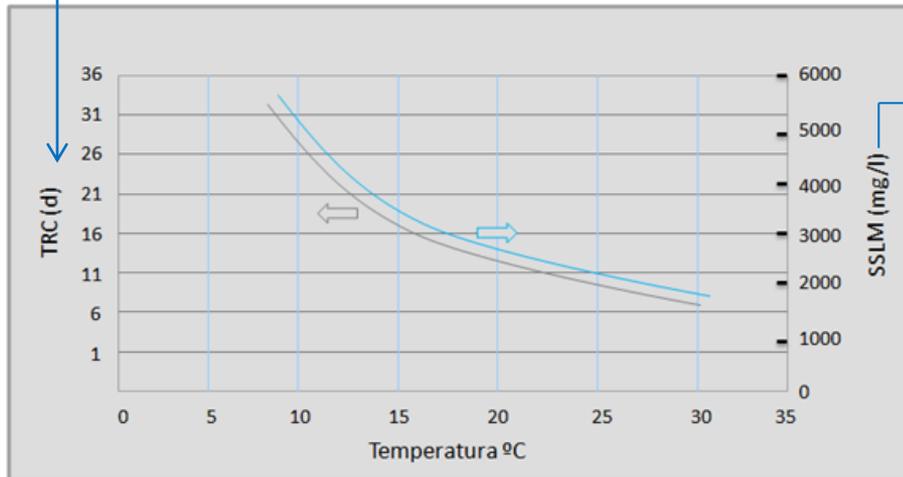
Parámetros operativos límites en la remoción del amonio (nitrificación)

Edad del fango mínima

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

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

Carga másica máxima



$$F/M_{\max} = DBO_{\max} / (X_v \times TRH)$$

X_v: Concentración de SSLM (mg/L)

Optimización energética en la nitrificación

Optimización energética en la nitrificación

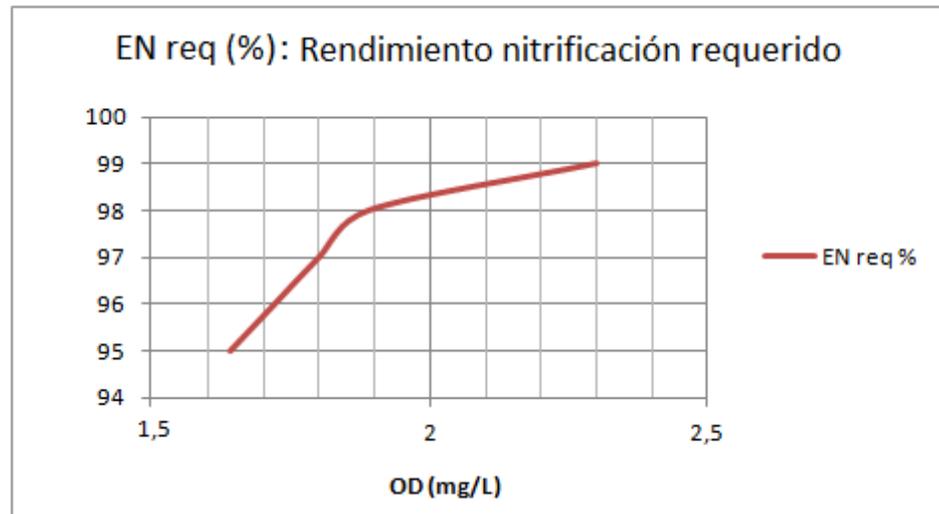
Partiendo de la base de que el AUR es proporcional al rendimiento, para un mismo TRC y condiciones, podríamos calcular el valor del OD para conseguir un determinado rendimiento. Para ello haremos uso de las siguientes ecuaciones:

$$\mathbf{AUR'} = (E_N \text{ requerido} / E_N \text{ actual}) * \text{AUR actual}$$

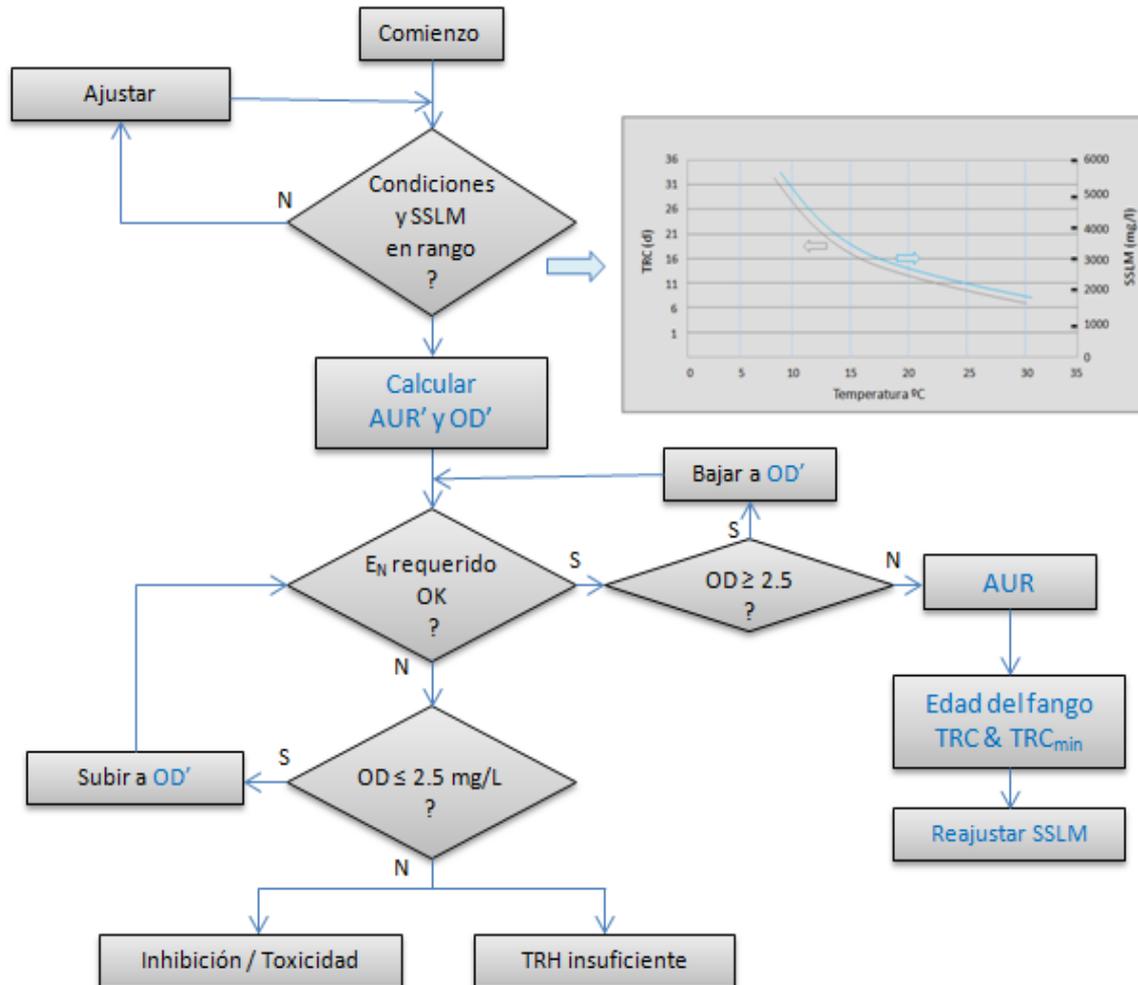
$$\mathbf{OD'} = \text{AUR'} * K_{OD} / [(R_{SN}/4.57) - \text{AUR}]$$

AUR': Valor de la tasa de nitrificación para el rendimiento requerido

OD': Oxígeno disuelto mínimo estimado para conseguir el rendimiento requerido (E_N requerido)



Protocolo de la nitrificación para una optimización energética



Desnitrificación

Parámetros clave en en proceso de desnitrificación

DQO soluble necesario para el proceso: $S_{S, DN}$

Tasa de desnitrificación: **NUR**

Capacidad de desnitrificación: C_{DN}

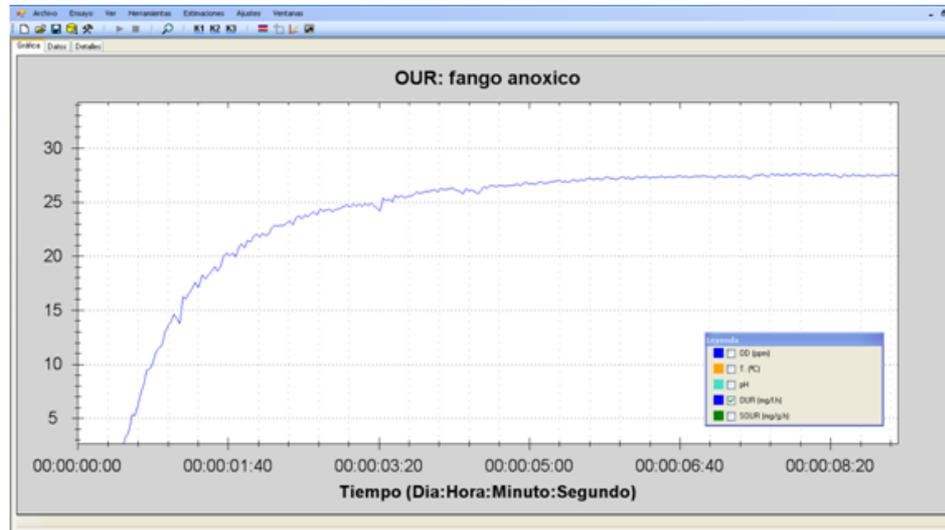
Volumen necesario para la desnitrificación en zona anóxica: V_{DN}

Condiciones iniciales para la desnitrificación

Condiciones	
pH	6.5 a 8 (óptimo)
DBO/NTK	2.5 a 5
$DBO_S / N-NO_{3.DN}$	≥ 2.83
OD	< 0.3 ppm
Reactor con suficiente capacidad de desnitrificación	
Sin inhibidores ni compuestos tóxicos	

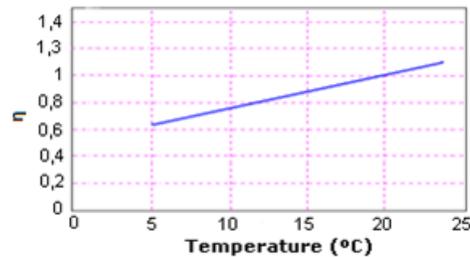
Tasa estimada de desnitrificación (NUR)

Realizamos un ensayo OUR con el fango procedente de la zona anóxica de desnitrificación.



Respirograma OUR con fango anóxico

$$\text{NUR} [\text{mg N-NO}_3/(\text{l.h})] = \eta * \text{OUR}_{\text{DN}} / 2,86$$



Fuente1: E.CHOI and R.DAEHWAN. 2000. Korea University - Fuente2: W.W. Eckenfekder & J.L. Musterman – 1995

Tasa específica de la desnitrificación

Desde el valor de NUR calculamos el valor de la tasa específica de nitrificación (SDNR)

$$\text{SDNR [mg N-NO}_3\text{/(gSSV.d)]} = 0.024 * \text{NUR} / \text{SSVLM}$$

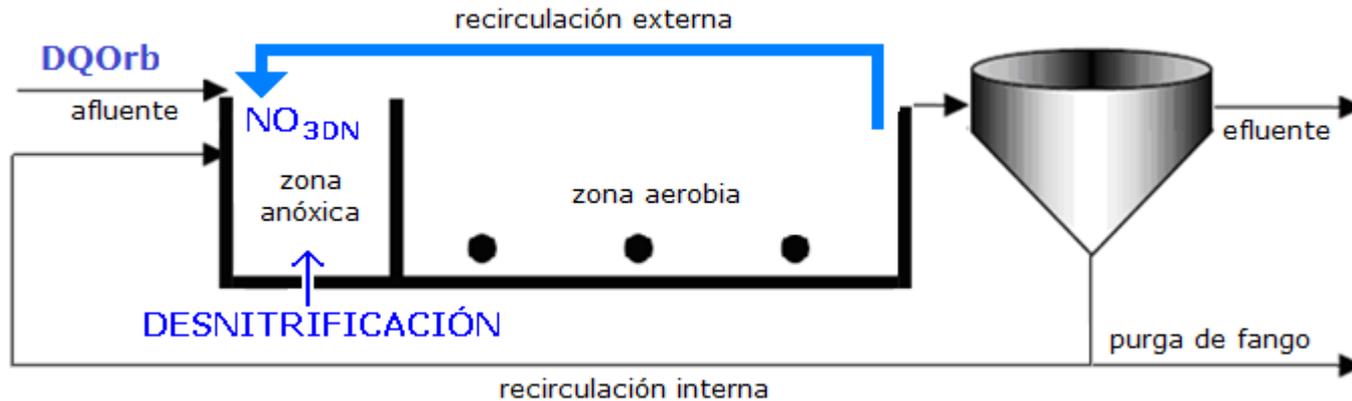
Valoramos la coherencia de los resultados por medio de una tabla de referencia

Estimated Specific Denitrification Rates

Temp ° C	Estimated SDNR	Temp ° C	Estimated SDNR
10	0.035	18	0.076
12	0.042	20	0.091
14	0.052	22	0.110
16	0.063	24	0.132

Fuente: EPA

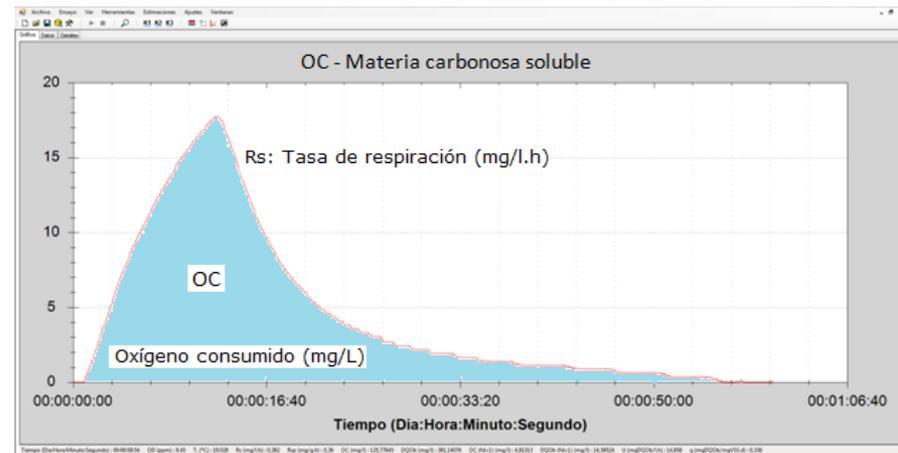
DQO soluble biodegradable (DQOrb) para la desnitrificación



$$OC = 2,86 * N-NO_{3,DN}$$

OC: Consumo de oxígeno de la DQO soluble (mg/L)
 $N-NO_{3,DN}$: Nitrato a desnitrificar (mg N- NO_3 /l)

$$DQOrb_{,DN} = 0,9 * OC / (1 - Y_H)$$



Cálculo de la capacidad (C_{DN}) y volumen necesario (V_{DN}) para desnitrificación

Capacidad de desnitrificación

$$C_{DN} \text{ (mg N-NO}_3\text{/l)} = NUR * TRH_{DN}$$

TRH_{DN} (h): Tiempo de residencia hidráulica para la desnitrificación

Volumen necesario para la desnitrificación

$$V \text{ (m}^3\text{)} = Q_{in} * [N\text{-NO}_{3.DN}] / NUR$$

Q_{in} (m³/h): Caudal de entrada a zona anóxica de desnitrificación

$N\text{-NO}_{3.DN}$: Nitrato a desnitrificar

Toxicidad

Podemos contemplar dos tipos de toxicidad

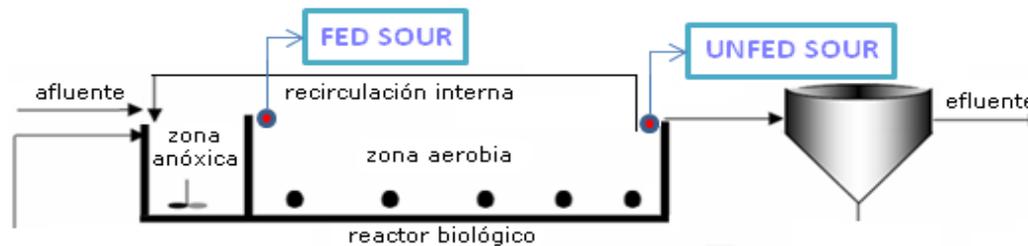
1. Toxicidad que ya está presente en el proceso de fangos activos



2. Toxicidad en agua residual o compuesto que hay que analizar con fango de referencia

Síntomas de toxicidad ya presente en el proceso de fangos activos

1. Factor de carga ($FC = \text{FED OUR}/\text{UNFED OUR}$) por debajo de 1,3.



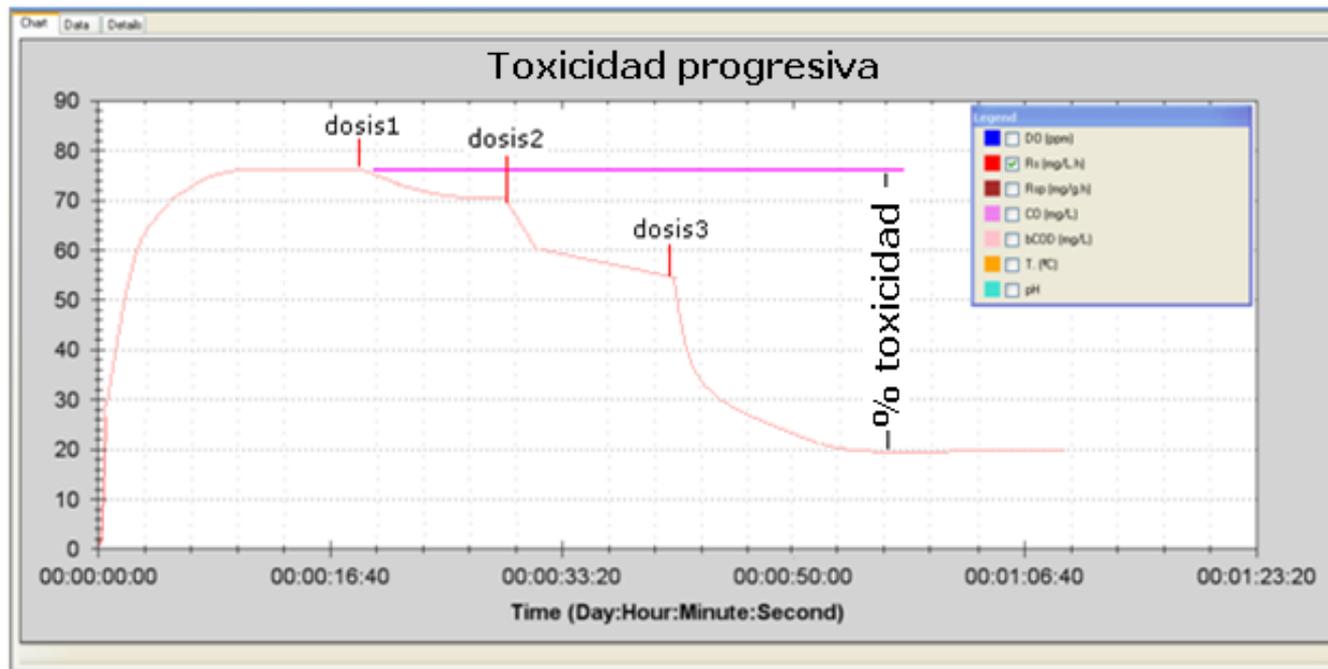
2. $Y_{H.O_2}$ inferior a 0,4

3. OUR endógeno por debajo de su rango habitual.

4. El fango pierde su color habitual (se vuelve más claro) y en algunos casos puede formar más espumas.

Análisis de toxicidad de efecto rápido por 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)



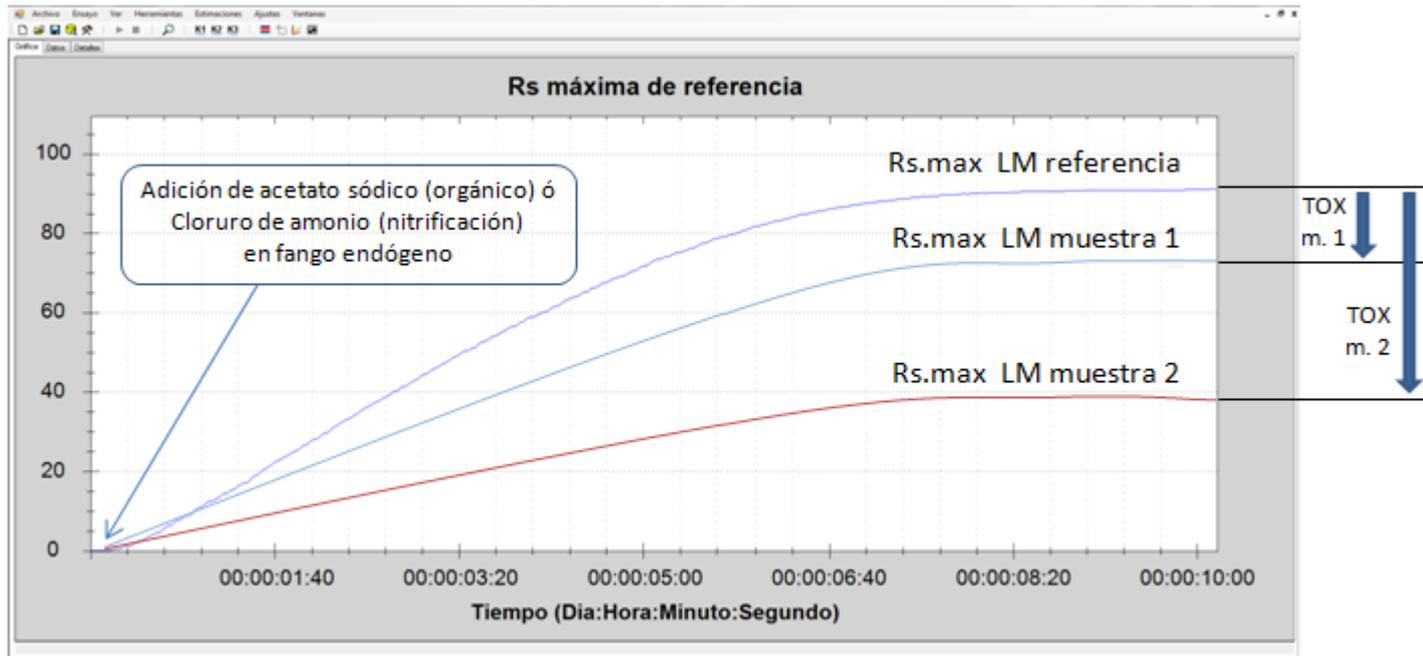
Respirograma por dosis periódica de sustrato

Análisis de toxicidad por comparación con referencia

Comparamos la actividad de un compuesto estándar de referencia en dos fangos en fase de respiración endógena: Uno de referencia y otro con la/s mezcla/s de agua/s problema.

LM referencia: Agua destilada + [acetato sódico ó CINH_4] + Fango  Fango endógeno

LM muestra/s: Agua r. problema + Fango  Fango endógeno

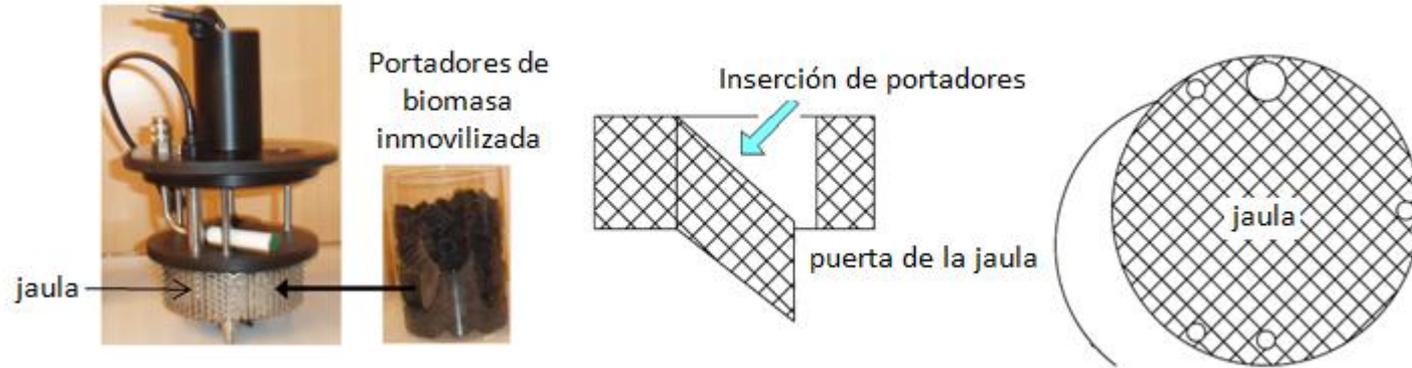


$$I (\%) = 100 * (1 - \text{Rs.max LM m.} / \text{Rs.max LM ref.})$$

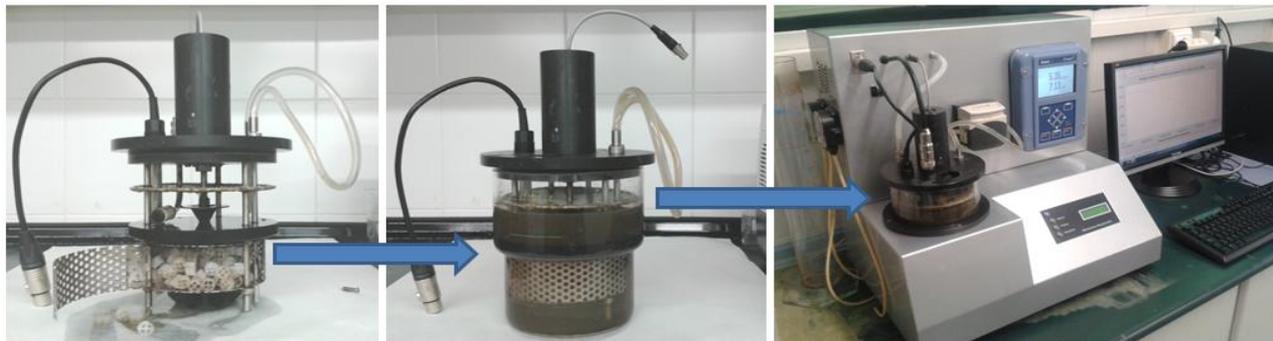
Reactor de respirómetro para procesos MBBR

Reactor de respirometría para MBBR

Los sistemas avanzados de respirometría pueden estar dotados de un reactor especialmente diseñado para contener estos portadores (biomass-carrieres) en donde se pueden desarrollar las mismas aplicaciones que con un reactor normal.

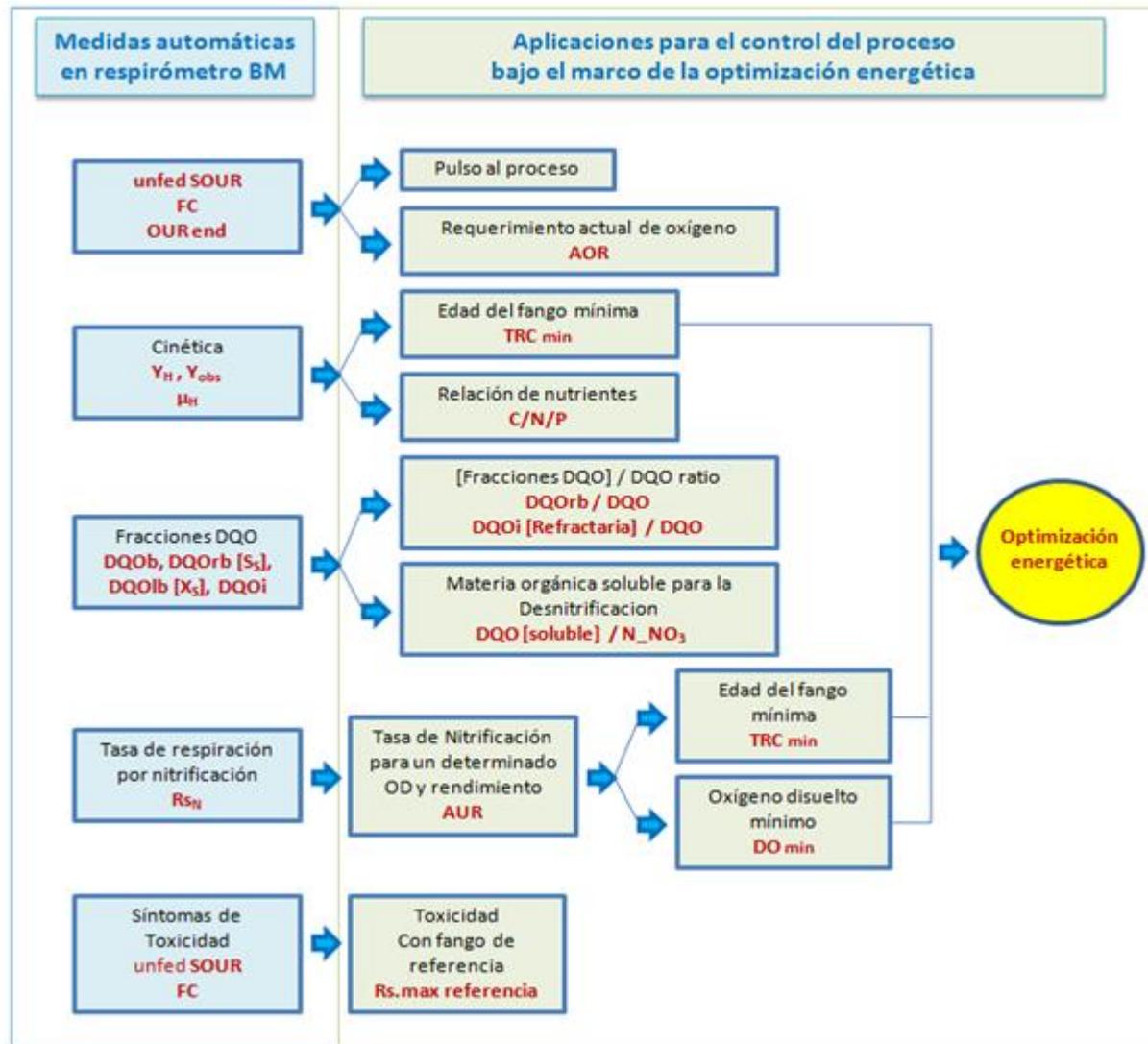


El modo de trabajo consistiría en cargar los portadores en la jaula del reactor, cerrar la jaula e instalar el reactor en el sistema de respirometría.



Protocolo general en el marco de la optimización energética

Diagrama de ensayos y aplicaciones



**La Respirometría
es mucho MÁS ...**

Gracias por su atención

SURCIS

Encarnación, 125 – Barcelona (España)

Tel. +34 932 194 595 Fax. +34 932 104 30

E-mail: surcis@surcis.com Internet: www.surcis.com