

ESTUDIO DE RESPIROMETRÍA

**Para analizar el fraccionamiento de la DQO,
relación de nutrientes y nitrificación
en un proceso de fangos activos
de una planta industrial**



SURCIS

ÍNDICE

página

1. Objetivo del estudio	3
2. Sistema de Respirimetría BM utilizado en el estudio	3
2.1. Características principales del analizador de respirometría BM-Advance	3
2.2. Modos de trabajo y parámetros de la Respirimetría BM	4
2.3. Descripción de los principales parámetros utilizados en el estudio	4, 5
3. Datos y resultados	5. 6
3.1. Resumen de resultados	6
4. Actividad del fango	7
4.1. OUR endógeno: OUR_{end}	7
4.2. Coeficiente estequiométrico de la biomasa heterótrofa: Y_H	8
5. Fracciones esenciales de la DQO – Biodegradabilidad	8, 9
5.1. DQO biodegradable: $DQOb$	9
5.2. DQO inerte: $DQOi$	9, 10
5.3. DQO rápidamente biodegradable: S_s	10
5.4. DQO lentamente biodegradable: X_s	10
5.5. Esquema del porcentaje de las fracciones de la DQO	11
6. Relación de nutrientes	11
6.1. Carbono: C	11
6.2. Relación de nutrientes actual en el proceso de depuración	12
6.3. Valores mínimos de las relaciones C/N y C/P que el proceso debería tener	12
6.4. Cálculo de los valores N y P en la relación de nutrientes con que el proceso debería operar	12
7. Nitrificación	12
7.1. Tasa de nitrificación	12, 13
8. Anexos	14
8.1. Indicadores de una deficiencia de nutrientes	14
8.2. Fuentes externas de nutrientes	14
8.3. Condiciones para la nitrificación	15
8.4. Biomasa nitrificante activa: X_N	15
8.5. Video	15

1. Objetivo del estudio

Este estudio tiene como finalidad el análisis y obtención de parámetros de tres partes fundamentales en un proceso de depuración biológica industrial:

- Fracciones esenciales de la DQO
- Relación actual de nutrientes
- Nitrificación.

De este modo se hace una fotografía del estado actual del proceso de depuración y, con ello, se puede participar en la obtención de parámetros fundamentales para la posible calibración del sistema.

2. Sistema de Respirometría BM utilizado en el estudio

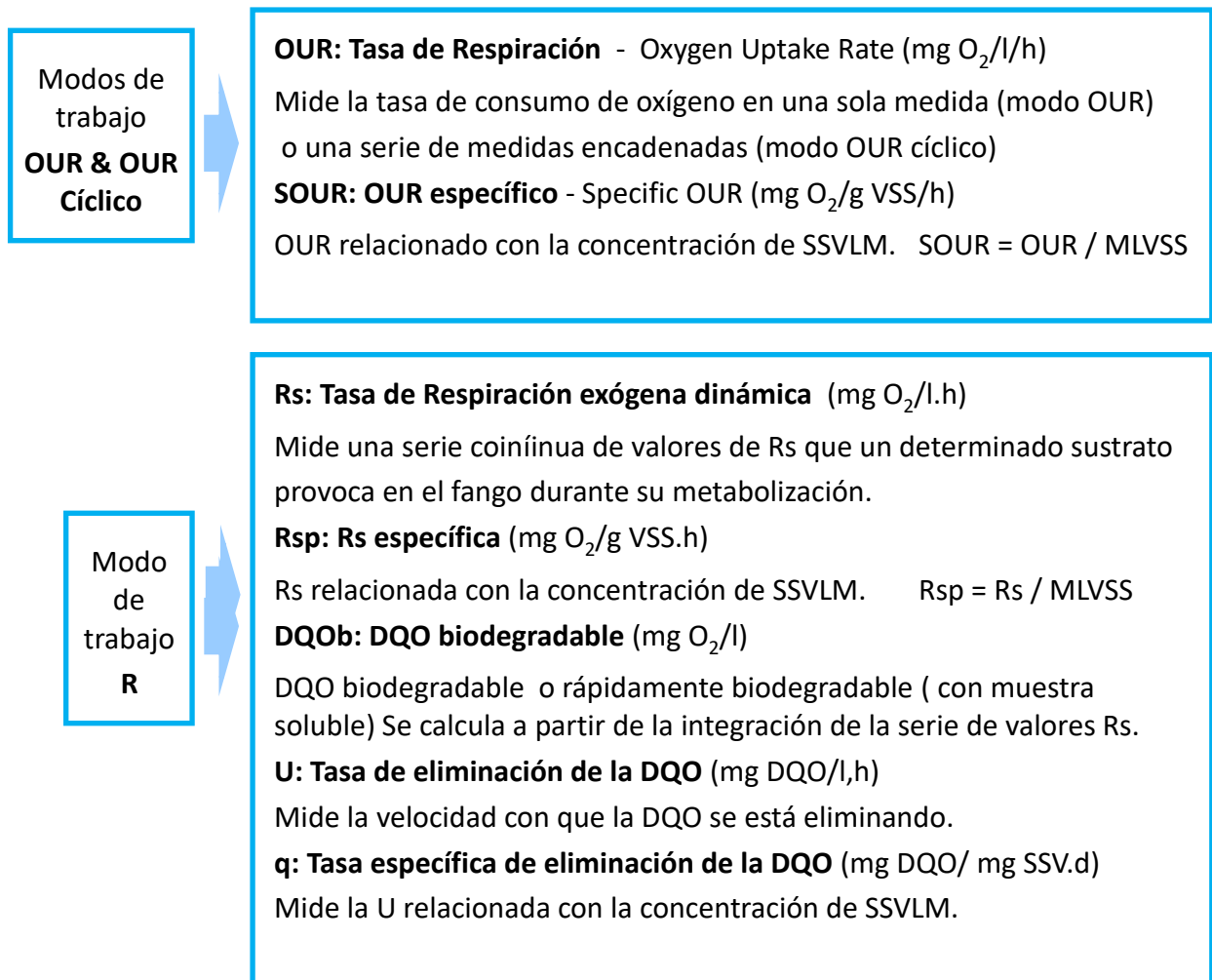
2.1. Características principales del analizador de respirometría BM-Advance

Fig. 1. Sistema de respirometría BM, modelo BM-Advance



- Analizador compacto de muy bajo mantenimiento y fácil manejo
- Medida directa del oxígeno disuelto desde un sensor de oxígeno sin mantenimiento.
- Sin restricciones de oxigenación ni tiempo en la ejecución de cualquiera de los ensayos.
- Control completo del funcionamiento y resultados por medio de potente software cargado en ordenador del sistema.
- Actualización automática del software en curso desde Internet.
- Capacidad para la programación de las condiciones del ensayo y su posible modificación durante su ejecución.
- Último, mínimo, máximo y media móvil de cada medida siempre que se desee.
- Presentación de todos los resultados seleccionados durante la ejecución del ensayo, en cualquier momento, de forma tabular o gráfica.

2.2. Modos de trabajo y parámetros de la Respirometría BM



2.3. Descripción de los principales parámetros utilizados en el estudio

OUR endógeno: OUR_{end} ($\text{mg O}_2/\text{l.h}$)

El OUR endógeno de la biomasa nos permite valorar la actividad de los SSVLM activos en estado de respiración endógena (sin sustrato alguno)

Coefficiente estequiométrico de crecimiento de la biomasa heterótrofa: Y_H

Representa la parte de la DQOb que pasa a ser nutriente de la biomasa heterótrofa, y se determina por respirometría utilizando como muestra un compuesto estándar fácilmente asimilable (acetato sódico)

DQO biodegradable: DQOb (mg/l)

La DQOb representa la fracción de la DQO afluente que es biodegradable.

Con el respirómetro BM, la DQOb se determina de forma automática a partir de la integración de las tasas de respiración Rs ($\text{mg O}_2/\text{l.h}$) obtenidas de un ensayo de respirometría, en donde se añaden muestra de agua residual al fango en respiración endógena, y la participación del coeficiente estequiométrico Y_H .

DQO rápidamente biodegradable (DQOrb: Ss)

Está asociada a la DQO soluble biodegradable.

Se obtiene de forma automática mediante un ensayo R desde una muestra de agua residual soluble del influente al reactor (*)

DQO inerte – no biodegradable (DQOi)

Se trata de la DQO refractaria no eliminable biológicamente por el fango activo.

Se obtiene por la diferencia entre la DQO total (DQO) y la DQO biodegradable (DQOb)

DQO lentamente biodegradable (DQOIb: Xs)

Se trata de la DQO que se elimina lentamente.

En ocasiones esta DQO se convierte en recalcitrante.

Se obtiene por la diferencia entre la DQOb y DQOrb

Tasa de respiración por nitrificación: Rn (mg O₂/l.h)

Con este parámetro se con firma la actividad nitrificante y se obtiene la base de cálculo de la tasa de nitrificación.

Tasa de nitrificación: AUR (mg N/l.h)

El parámetro AUR representa la velocidad de eliminación del nitrógeno amoniacal en las condiciones actuales del proceso.

3. Datos y resultados

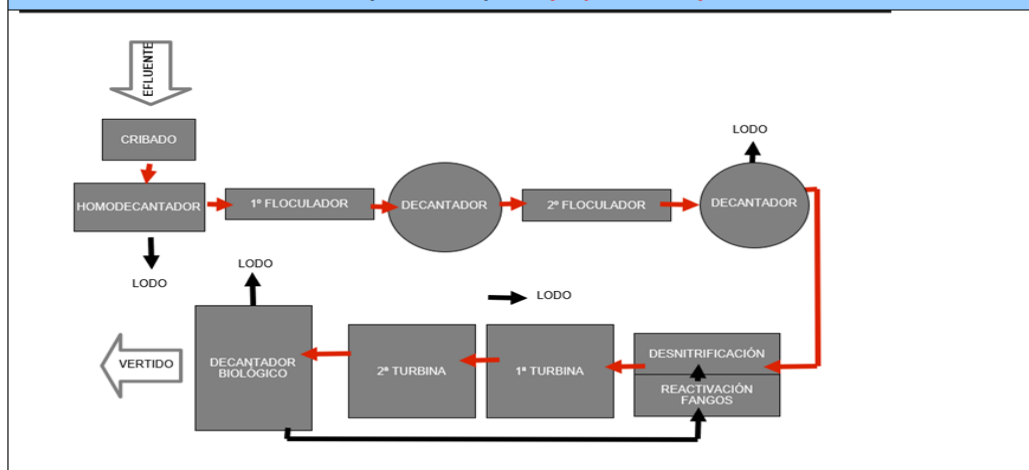
Tabla 1. Ficha Técnica de datos del proceso a estudiar aportados por el cliente

Parámetro	Modo/Valor
Tipo de proceso	Fangos activos
Nitrificación/Desnitrificación	☒ Sí ☐ No
pH medio en zona Nitrificación/Desnitrificación	Inicio:7.72 Final:7.8
Temperatura actual media en el biológico	Día:25.04 Noche:
DQO media de agua de entrada a biológico (mg/l)	5800
DBO ₅ media de la entrada a reactor biológico (mg/l)	3000
DQO media en efluente(mg/l)	727
Nitrogeno amoniacal (mg N/l)	Mínimo:5 Máximo:100
Caudal Q de entrada (m ³ /h)	Mínimo:125 Máximo:586
MLVSS del fango (mg/l)	3600

Descripción del problema (Imprescindible)

Comentarios a las respuestas anteriores:
MLSS del fango, sería medido en el fango activo y no en el fango de la purga, igual que el MLVSS

Esquema de la planta (Imprescindible)



Datos adicionales aportados por el cliente

NTK entrada = **56** mg N/l

P total entrada = **1,4** mg P/l

Caudal medio = **346** m³/d

Datos obtenidos en Surcis

DQO muestra = **5800** mg/l (analizada en Surcis)

DQOs: muestra filtrada = **5200** mg/l (analizada en Surcis)

Xp: DQO particulada = DQO - DQOs = 5800 - 5200 = 600 mg/L

DQO estándar orgánico (Acetato sódico) = 300 mg/l (Surcis)

Relación C/N actual por DQO / NTK = 5073 / 56 = 90

3.1. Resumen de resultados

Tabla 2. Resumen de resultados obtenidos

Descripción	Parámetro	Resultado	Valoración
Estado del fango – biomasa heterótrofa			
Tasa de respiración endógena	OUR (mg O ₂ /l.h)	8,41	Bajo
Coeficiente estequiométrico de crecimiento de la biomasa heterótrofa	Y _H (O ₂ /DQO)	0,53	Algo bajo Rango: 0,6 – 0,8
Fracciones de la DQO – Biodegradabilidad			
DQO	DQO (mg/l)	5.800	Analizada por Surcis
DQO biodegradable DQO biodegradable en DQO	DQOb (mg/l) Pb (%)	5.759 99	Alta biodegradabilidad
DQO inerte	DQOi (mg/l) Pi (%)	41 1	Muy bajo
DQO rápidamente biodegradable_ Ss DQO rápidamente biodegradable en DQO	Ss = DQOrb (mg/l) Prb (%)	4.650 80	Elevada
DQO lentamente biodegradable: Xs DQO lentamente biodegradable en DQO	Xs = DQOl _b (mg/l) Pl _b (%)	1.109 19	Bajo
Relación de Nutrientes actual			
C/N/P actual	DQOb/NTK/P	100/0,97/ 0,024	Deficiencia de nutrientes
Nutrientes mínimos			
Relación de nutrientes recomendada	DQOb/NTK/P	100/5/1	Según bibliografía
N mínimo recomendado: NTK	NTK (mg N/l)	287	En base a C/N = 100/5
P mínimo recomendado: P	P (mg P/l)	57	En base a 100/1
Nitrificación			
Tasa de nitrificación: AUR	AUR (mg N/l.h)	2,81	Muy baja
Tasa de nitrificación específica: SAUR	SAUR (gN/gSSV.d)	0,029	Muy baja

4. Actividad del fango

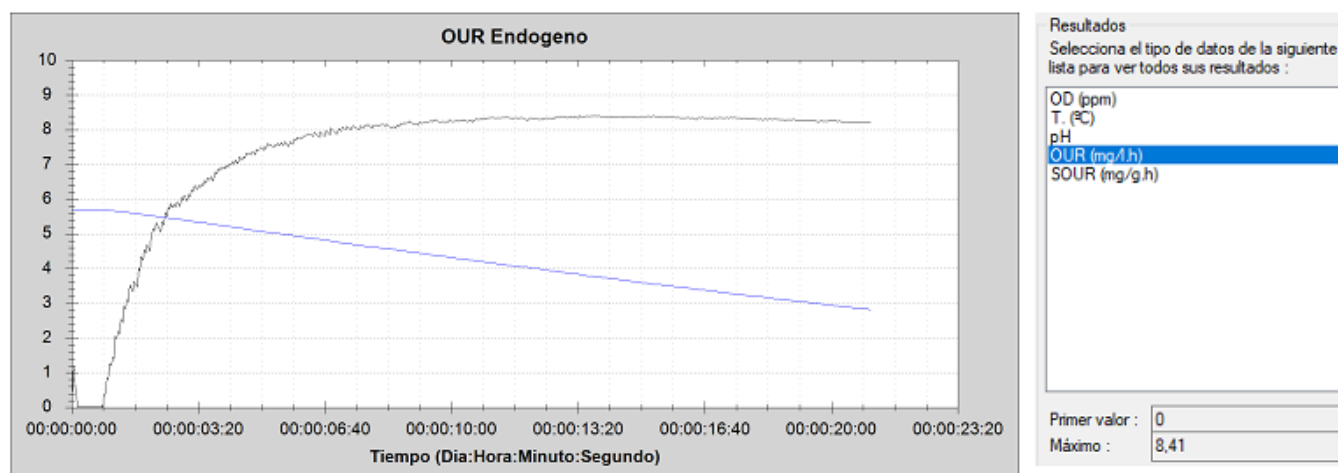
Por medio de un ensayo OUR del fango en estado endógeno se analiza la actividad del fango frente a los SSVLM.

Con ello, se valora si el fango tiene una actividad normal o, por el contrario, pueda tener una baja actividad para la concentración actual de SSVLM.

4.1. OUR endógeno: OUR_{end}

La tasa de respiración endógena es la que se obtiene desde el fango activo en ausencia de cualquier tipo de sustrato. Por ello, al depender exclusivamente de los microorganismos, es directamente proporcional a la concentración de biomasa activa. El fango endógeno se obtiene controlando el oxígeno del fango (recogido del final del proceso) que se está aireando durante >24 horas, hasta que el valor permanece constante. Luego se lleva cabo un ensayo OUR (Figura 2) con este fango.

Figura 2. – Respirograma y resultado del OUR endógeno



$OUR_{end} = 8,41$ mg O₂/l.h

Tabla 3. Tabla de valores OUR_{end} de referencia

SSVLM (mg/L)	OUR_{end} (mg/L/h)	SSVLM (mg/L)	OUR_{end} (mg/L/h)
1000	2 - 3,5	3000	6 - 10
1500	3 - 5	3500	7 - 12
2000	4 - 7	4000	8 - 13,5
2500	5 - 8,5	4500	9 - 5,5

Análisis del resultado

El valor de 8,41 queda ligeramente por encima del rango de normalidad de la concentración de SSVLM actual en la tabla de referencia.

Con ello, podemos asumir que el fango se encuentra con una actividad en rango y algo por encima de lo normal.

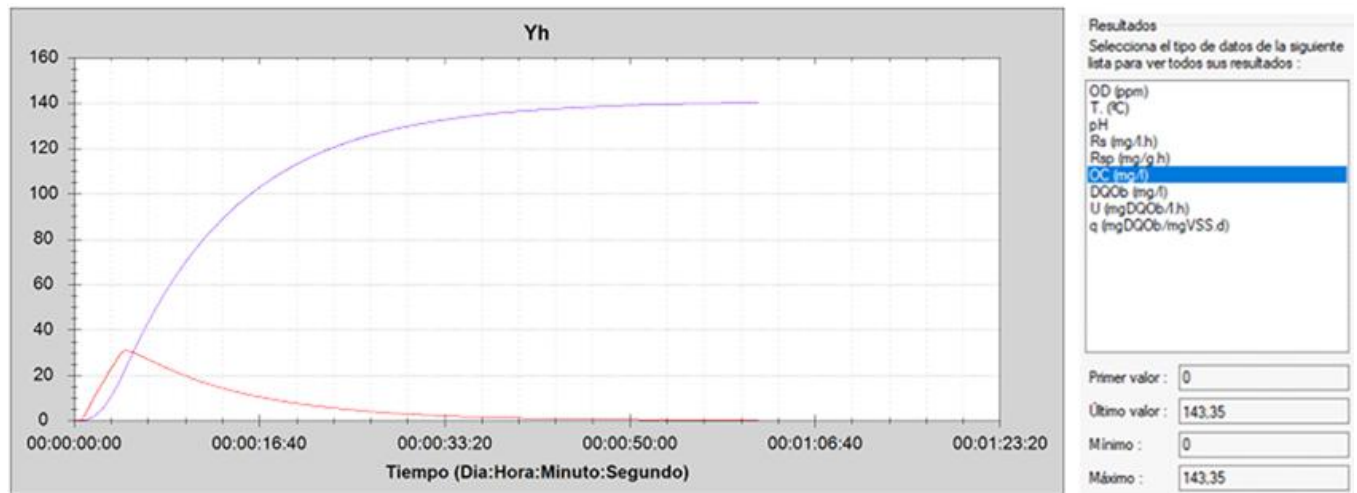
4.2. Coeficiente estequiométrico de la biomasa heterótrofa: Y_H

La determinación de Y_H nos permite conocer la capacidad de reproducción del fango que está directamente vinculada con su salud biológica.

Por otro lado, para el tipo de respirometría utilizada en este estudio, se utiliza para el cálculo de la DQO biodegradable.

Este ensayo se lleva a cabo por medio de una solución con estándar orgánico (acetato sódico) con una DQOac de 300 mg/L a nivel óptimo de oxígeno.

Figura 3. Respirograma del valor del oxígeno consumido (OC) y tasa de respiración exógena R_s



$$Y_H \text{ (mg DQO\{bact.\}/mg DQO)} = 1 - OC / DQO_{ac}$$

$$Y_{H.02} = 1 - 141 / 300 = \mathbf{0,53} \text{ O}_2/\text{DQO}$$

$$Y_{H.ssv} = Y_{H.02} / 1,42 = 0,53 / 1,42 = \mathbf{0,37} \text{ SSV/DQO}$$

Análisis del resultado

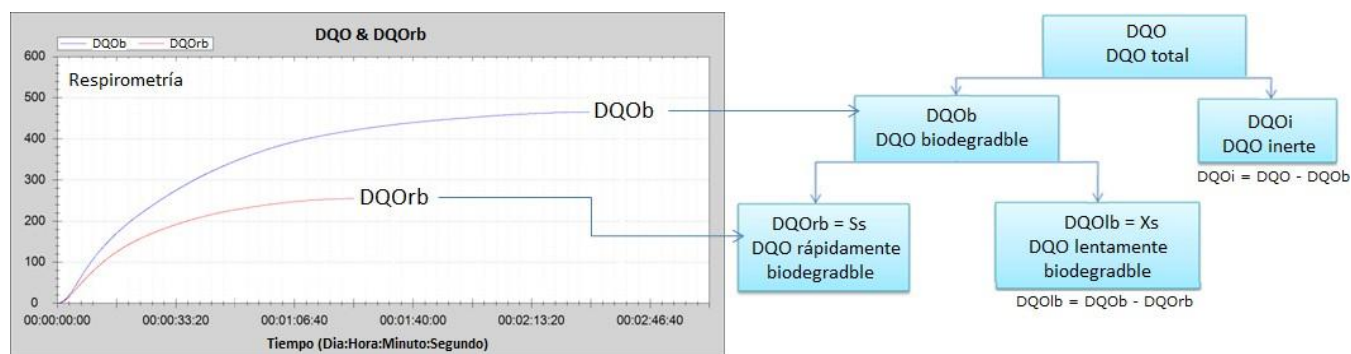
El valor de la $Y_{H.02}$ está ligeramente por debajo del rango normal (0,6 – 0,8). Ello significa una producción relativamente baja de biomasa.

5. Fracciones esenciales de la DQO - Biodegradabilidad

Se trata de una de las aplicaciones más importante en la respirometría.

Aunque el fraccionamiento completo puede ser algo más complejo, a efectos prácticos solo vamos a considerar la DQO total, DQO biodegradable (DQOb), DQO soluble rápidamente biodegradable (DQOrb = S_s) y DQO inerte no biodegradable (DQOi). Con estas fracciones podemos calcular la DQO lentamente biodegradable.

Figura 4. Fracciones esenciales de la DQO desde dos ensayos de respirometría: DQOb y DQOrb (Ss)

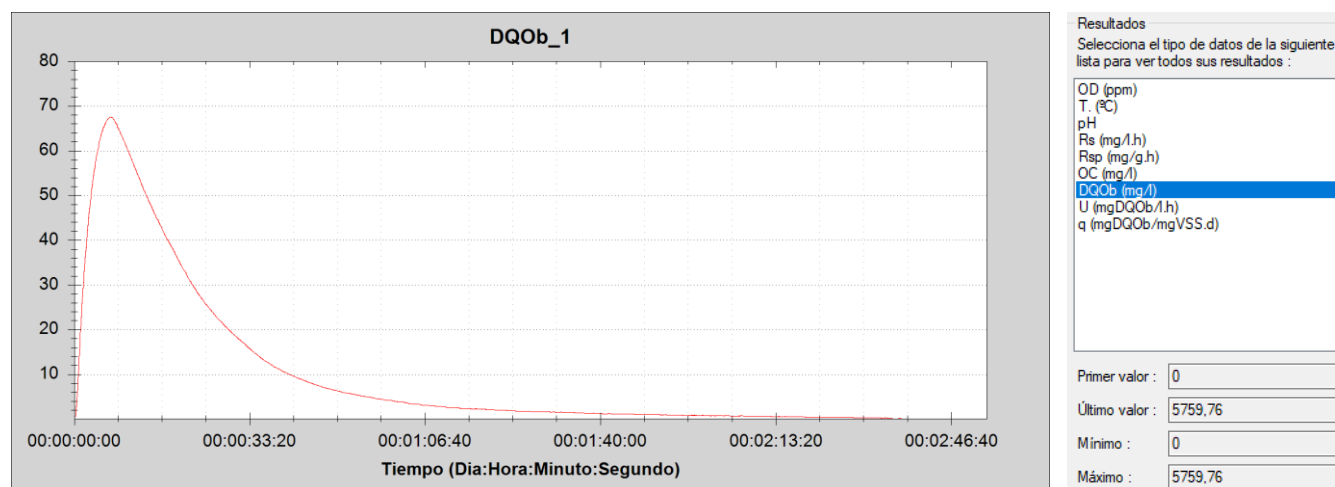


Una elevada DQO inerte o lentamente biodegradable puede ser la explicación a un bajo rendimiento y a una deficiencia de nutrientes.

5.1. DQO biodegradable: DQOb

La DQOb se obtiene de forma automática por medio de un ensayo R en donde se utiliza fango en fase de respiración endógena al que se le añade una dosis controlada de agua residual. Por integración de la serie de tasas de respiración dinámicas R_s , el software calcula el oxígeno consumido para la eliminación del sustrato añadido y, con ello, se aplica la formula correspondiente para la determinación de la DQOb.

Figura 5. Respirograma R_s y resultado de la DQOb



DQOb = 5759 mg/l

Biodegradabilidad = Porcentaje de DQOb en DQO: **Pb** = $100 * 5759 / 5800 = 99 \%$

Análisis del resultado

El valor del Pb de 99% nos indica que se trata de una muestra muy degradable. Prácticamente toda la DQO se podría considerar como biodegradable.

5.2. DQO inerte: DQOi

$$\text{DQOi} = \text{DQO} - \text{DQOb} = 5800 - 5759 = \mathbf{41 \text{ mg/l}}$$

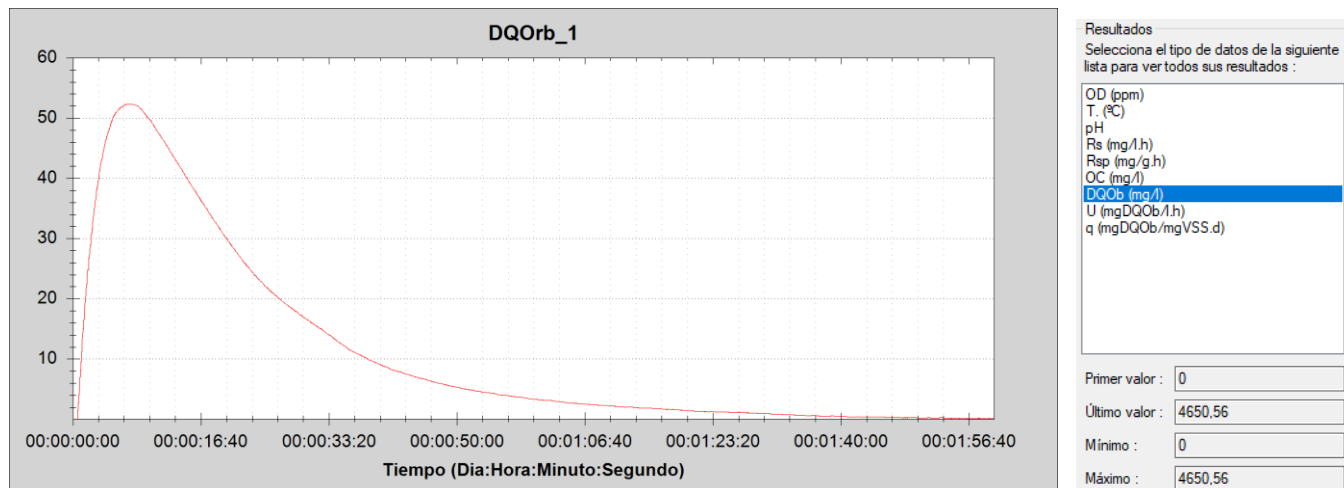
$$\text{Porcentaje de DQOi en DQO: } \mathbf{Pi} = 100 * 41 / 5800 \approx \mathbf{1 \%}$$

Análisis del resultado

El valor del Pi de 0,7% nos indica que prácticamente no existe DQO inerte (refractaria).

5.3. DQO rápidamente biodegradable: Ss

Figura 6 Respirograma Rs y resultado de la DQO soluble rápidamente biodegradable



$$\text{DQOrb (Ss)} = \mathbf{4650 \text{ mg/l}}$$

$$\text{Porcentaje de DQOrb en DQO: } \mathbf{Prb} = 100 * 4650 / 5800 = \mathbf{80 \%}$$

Análisis del resultado

El valor del Prb de 80% es un porcentaje muy elevado de DQOrb. Ello nos indica que una gran parte de la DQOb es rápidamente biodegradable.

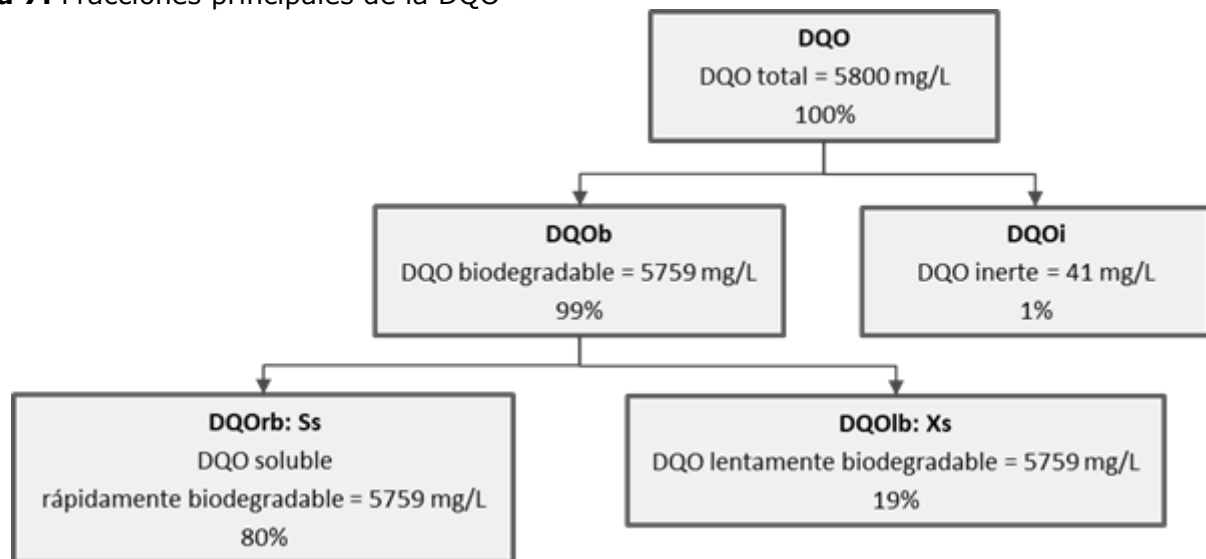
5.4. DQO lentamente biodegradable: Xs

$$\text{DQOlb (Xs)} = \text{DQOb} - \text{DQOrb} = 5759 - 4650 = \mathbf{1109 \text{ mg/l}}$$

$$\text{Porcentaje de DQOlb en DQO: } \mathbf{Plb} = 100 * 1109 / 5800 = \mathbf{19 \%}$$

5.5. Esquema del porcentaje de las fracciones de la DQO

Figura 7. Fracciones principales de la DQO



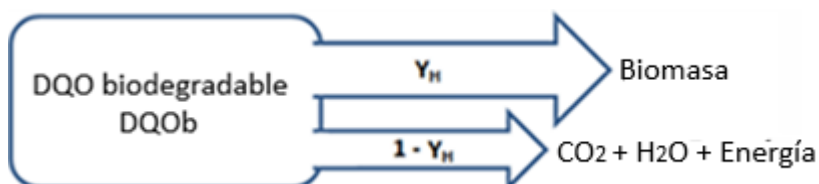
6. Relación de nutrientes

6.1. Carbono

Para la relación de nutrientes se hará uso de la DQO biodegradable (DQOb) del agua de entrada al proceso.

Normalmente se utiliza la DBO5 y DQO. Pero aquí hemos optado por utilizar la DQOb. Las razones por la que se usa la DQOb en lugar de la DBO o la DQO son las siguientes:

1- DBO solo mide la demanda de oxígeno general durante 5 días, pero ignora la que se refiere (Y_H) a la producción de biomasa bacteriana



2 – Tanto la DQO total como la DBO ignoran la DQO inerte no biodegradable.

$$\text{DQO inerte (no-biodegradable) DQOi} = \text{DQO} - \text{DQOb}$$

Por ello, se hará uso de la relación DQOb / N / P

Dr. Akepati S. Reddy – School of Energy and Environment – Thapar University

6.2. Relación de nutrientes actual en el proceso de depuración

C: DQOb = **5759** mg/l; N: NTK = **56** mg N/l; P: P = **1,4** mg P/l

$$\mathbf{C/N/P = 5759 / 56 / 1,4 = 100 / 0,97 / 0,024}$$

Análisis del resultado

La relación C/N/P con que el proceso está operando queda extremadamente lejos del rango normal (100/5/1)

Por lo tanto, podemos asumir que existe una fuerte deficiencia de nutrientes.

6.3. Valores mínimos de las relaciones C/N y C/P que el proceso debería tener

Según bibliografía, para asegurar el crecimiento de la biomasa heterótrofa y autótrofa, el resultado de la relación C/N debe situarse entre 5 y 10 como valor de seguridad. Con esta condición, en base a un valor de 100 para C, la relación C/N deberá estar en 5 y 10

Puesto que a medida que crece el valor de la relación C/N baja el porcentaje de crecimiento de la biomasa nitrificante, asumimos el valor de C/N = 5, como valor límite de seguridad.

Con ello, la relación C/N/P límite recomendada pasaría a ser la siguiente:

$$\mathbf{C/N/P = 100/5/1}$$

C: DQO biodegradable (mg/l) = DQOb (mg/L)

N: NTK (mg N/l)

6.4. Cálculo de los valores N y P en la relación de nutrientes con que el proceso debería operar

$$\mathbf{C/N = 100 / 5 = 5759 / N \rightarrow N = 5 * 5759 / 100 = 287 \text{ mg N/l} \rightarrow \mathbf{NTK = 287 \text{ mg N/l}}$$

$$\mathbf{C/P = 100 / 1 = 5759 / P \rightarrow P = 1 * 5759 / 100 = 57 \text{ mg P/l} \rightarrow \mathbf{P = 57 \text{ mg N/l}}$$

Por lo tanto:

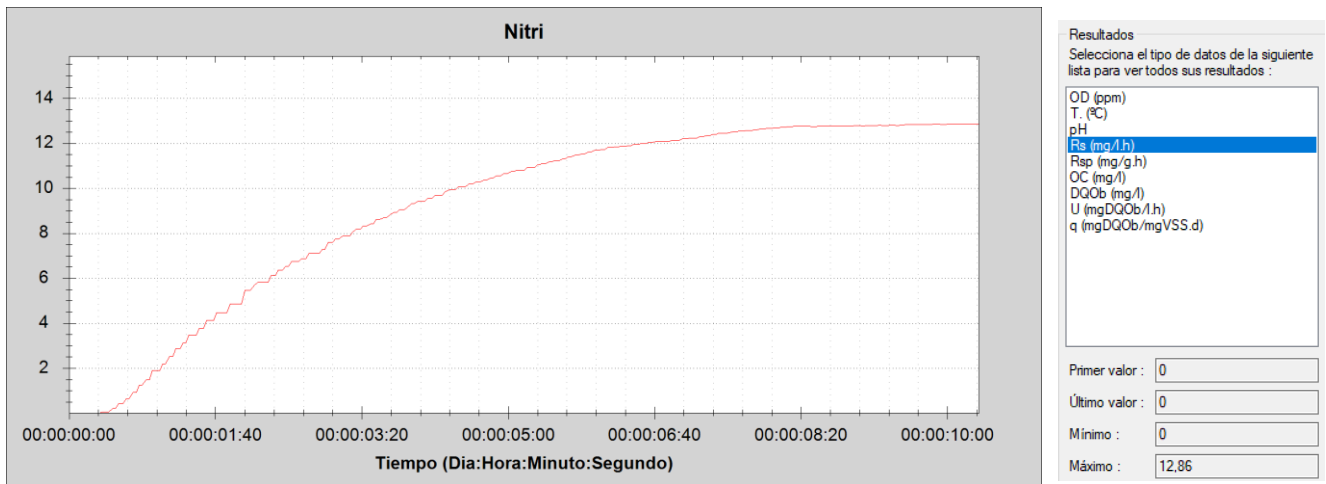
$$\mathbf{DQOb/N/P = 5759/287/57 = 100/5/1}$$

7. Nitrificación

7.1. Tasa de nitrificación

La tasa de nitrificación se obtiene a partir del resultado de la tasa de respiración por nitrificación obtenida con un ensayo de respirometría en donde se utiliza fango en fase de respiración endógena al que se le añade una dosis equivalente de cloruro de amonio.

Fig. 8. Respirograma Rs por efecto de la nitrificación



$$R_{SN} = 12,86 \text{ mg/l.h}$$

$$\text{Tasa de Nitrificación: } \mathbf{AUR} = R_{SN} / 4,57 = 12,86 / 4,57 = \mathbf{2,81 \text{ mg N/L/h}}$$

$$\text{Tasa específica de Nitrificación: } \mathbf{SAUR} = 24 * AUR / SSVLM = 24 * 2,81 / 3600 = \mathbf{0,018 \text{ g N /g SSV/d}}$$

Análisis del resultado

Al comparar el valor del SAUR obtenido con la gráfica de referencia (Figura 9, 10) podemos deducir que la extremadamente baja actividad nitrificante es debida a la alta relación C/N que da paso a una baja concentración de biomasa nitrificante activa.

Figura 9. Tasa específica de nitrificación de referencia

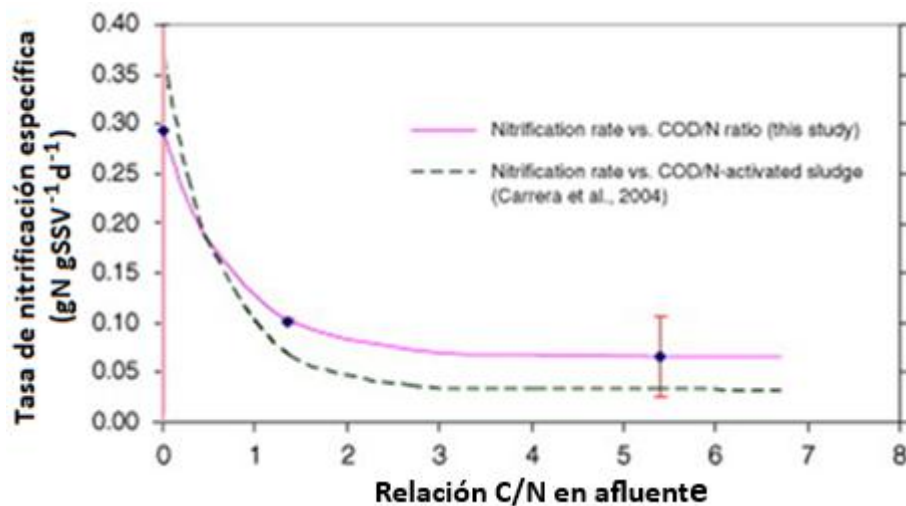
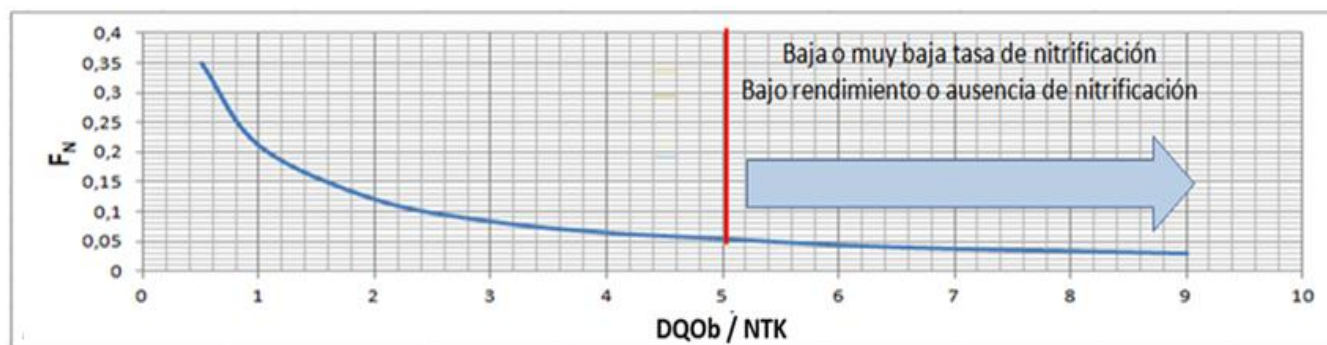


Fig. 10. Relación DQOb/NTK y su influencia en la nitrificación



8. Anexos

8.1. Indicadores de una deficiencia de nutrientes

1. Concentración de nitrógeno inorgánico total y orto-fosfato en el efluente por debajo de 1 mg/l.
2. Bulking
3. IVF menor de 150 ml/g
4. Presencia de bacterias filamentosas.
En este caso, como filamentosas representativas podemos citar la proliferación del tipo Thiothrix I y II, tipo 021N y N. Limicola.
Pueden coexistir S. Natans, H. Hydrosis y Tipos 0041 y 0675.
5. Fango viscoso y/o con espumas: con contenido de polímero extracelular.
6. Baja actividad nitrificante

8.2. Fuentes externas de nutrientes

Fuente de nitrógeno

- Normalmente se usa la UREA.
Se recomienda dosificarla en cabecera de planta con el fin de permitir un tiempo suficientemente largo como para que la enzima Ureasa (presente en el licor-mezcla) la pueda hidrolizar y dar paso a la formación de aminas que subsecuentemente serán utilizadas por las bacterias.

1 g de Urea corresponde 0,47 g de N

Fuentes de fósforo

Los más utilizados son los siguientes:

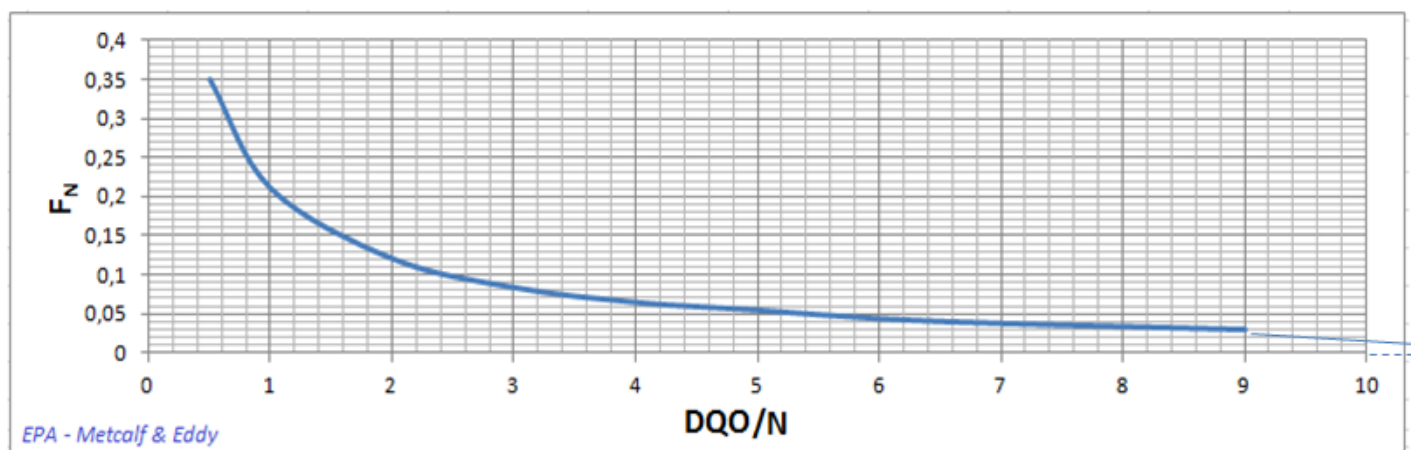
- Una mezcla 50/50 % de PO_4K_2H/PO_4KH_2
- PO_4H_3 (con control de pH)

1 g de orto P corresponde a 0,33 g de P

8.3. Condiciones para la nitrificación

Parámetro	Valor	Comentario														
pH	7,5 a 8,5	En algunos casos puede haber nitrificación con pH 9														
T (°C)	12 a 35	A temperaturas bajas, depende del resto de condiciones														
OD (ppm)	2 a >3	A OD bajo, depende del resto de condiciones														
F/M (DBO)	0,2 a <0,05	La F/M debe correlacionarse con el TRC														
TRC (d)	5 - 35	<table><tr><th>T (°C)</th><th>TRC (d)</th></tr><tr><td>35</td><td>5</td></tr><tr><td>30</td><td>7</td></tr><tr><td>25</td><td>10</td></tr><tr><td>20</td><td>15</td></tr><tr><td>15</td><td>20 - 25</td></tr><tr><td>10 - 15</td><td>30 - 35</td></tr></table> El TRC se debe tomar en combinación con la F/M y resto de condiciones.	T (°C)	TRC (d)	35	5	30	7	25	10	20	15	15	20 - 25	10 - 15	30 - 35
T (°C)	TRC (d)															
35	5															
30	7															
25	10															
20	15															
15	20 - 25															
10 - 15	30 - 35															
C/N	<4	Se suele tomar DBO5 como C, pero es más apropiado tomar la DQO biodegradable Como N se debe tomar el NTK. Esta ratio se establece con el fin de que la prioridad hacía el consumo de oxígeno no se decante exclusivamente hacia la eliminación de la materia orgánica fácilmente asimilable.														
TRH	> T(DQOrb)	El TRH debe ser suficiente para que, una vez eliminado el 80% de la DQOrb, se disponga de tiempo suficiente para el desarrollo de la nitrificación completa.														
Toxicidad	Exenta de toxicidad	Toxicidad específica a la nitrificación														

8.4. Biomasa nitrificante activa: X_N



$$X_N = F_N * SSVLM$$

8.5. Video: <https://youtu.be/NpdRf6s2mTM>

SURCIS

Encarnación, 125 – Barcelona

Tel. +34 932 194 595

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