

Procedimiento para el análisis, control y diseño del proceso anóxico de la desnitrificación por Respirimetría BM

Autor: Emilio Serrano - SURCIS, S.L.

Email: eserrano@surcis.com

www.surcis.com

Palabras Clave: Respirimetría BM, Tasa de utilización de la DQO biodegradable, Nitrato a desnitrificar, Consumo de oxígeno de la DQO biodegradable, Nitrificación, Desnitrificación, Coeficiente estequiométrico de producción de biomasa

Key words: BM Respirometry, Utilization rate of biodegradable COD, Nitrate to denitrify, Consumed oxygen in the biodegradable COD, Nitrification, Denitrification, Stoichiometric yield coefficient.

RESUMEN

La eliminación del nitrógeno en una planta depuradora de aguas residuales se puede completar mediante el proceso biológico de la desnitrificación en condiciones anóxicas. Para ello existen varios tipos de procesos, pero en general se lleva a cabo por medio de bacterias heterótrofas facultativas que principalmente utilizan una fuente de carbón orgánico para la síntesis y energía, así como el nitrato (NO_3^-) como fuente de oxígeno.

Al tratarse de bacterias heterótrofas, existe una relación entre su actividad aerobia y anóxica. Normalmente, la fuente de carbono externa para la desnitrificación puede provenir del agua residual o de una fuente externa como puede ser el metanol (comúnmente utilizado)

Uno de los retos importantes en la desnitrificación es el conocimiento de si el agua residual de entrada al proceso dispone de materia orgánica en suficiente cantidad y calidad para obtener el rendimiento requerido y el cálculo de la capacidad de desnitrificación.

En EDAR a escala real, Henze et al. (1994) recomendó una relación DQO/nitrógeno (DQO/N) de 6 a 11 g DQO/g N- NO_3 para la desnitrificación completa. Posteriormente, otros autores establecieron el rango de esta relación entre 6 y 20. Sin embargo todas estas relaciones pueden no dar el resultado esperado cuando los porcentajes de las fracciones fácilmente biodegradables (DQOrb), lentamente biodegradable (DQOIb) e inerte (DQOi) de la DQO quedan fuera de los rangos normales.

Por esta razón, se podría dar el caso de suponer que la desnitrificación dispone de suficiente DQO y sin embargo no obtener el rendimiento adecuado debido a que esta DQO contiene una fracción de DQO fácilmente biodegradable extremadamente pequeña y una elevada fracción inerte o lentamente biodegradable.

La tasa de desnitrificación tiene una relación directa con la tasa de eliminación del oxígeno que la materia orgánica consume en la DQO biodegradable. La prioridad está en la fracción DQO fácilmente biodegradable, pero si se diera el caso de que el porcentaje de la fracción dominante es la DQO lentamente biodegradable, podría generarse una tasa de desnitrificación lo suficientemente lenta como para no poder eliminar suficientemente el nitrato en el tiempo límite establecido por el tiempo de retención hidráulica del proceso anóxico.

ABSTRACT

The removal of nitrogen in a wastewater treatment plant can be completed by the biological process of denitrification under anoxic conditions. For this there are several types of processes, but in general it is carried out by means of facultative heterotrophic bacteria that mainly use a source of organic carbon for synthesis and energy as well as nitrate (NO_3^-) as a source of oxygen.

Being heterotrophic bacteria, there is a relationship between their aerobic and anoxic activity. Normally, the external carbon source for denitrification can come from wastewater or from an external source such as methanol (commonly used).

One of the important challenges in denitrification is to know if from the wastewater entering the process organic matter is available in sufficient quantity and quality to obtain the required performance.

In full-scale WWTPs, Henze et al. (1994) recommended a COD/nitrogen (COD/N) ratio of 6 to 11 g COD/g N- NO_3 for complete denitrification. However, these relationships may not give the expected result when the percentages of the easily biodegradable (COD_{rb}), slowly biodegradable (COD_{lb}) and inert (COD) fractions of COD fall outside the normal ranges.

The denitrification rate (NUR) has a direct relationship with the rate of removal of the oxygen consumed by the organic matter in the biodegradable COD. The priority is on the readily biodegradable COD fraction, but if the percentage of the dominant fraction is the slowly biodegradable COD, a denitrification rate slow enough to not be able to sufficiently remove nitrate in the time limit set by the hydraulic retention time of the anoxic process could be generated.

This article describes a simple procedure based on BM Respirometry, to know the biodegradable COD necessary for denitrification and the assessment of the effect that the slowly biodegradable fraction of COD can exert as a limiting agent of the process.

1. INTRODUCCIÓN

Desde que W. Eckenfelder demostró en el 1985 que el parámetro OUR de fango estaba relacionado con la tasa de desnitrificación, son ya varios los autores que se han dedicado a demostrar que la tasa del oxígeno que se consume en la DQO biodegradable de forma aerobia está relacionado con la tasa de desnitrificación anóxica (Henri Spanjers, Peter A. Vanrolleghem - 2004, GA Ekama – 2004, ...)

Por lo tanto, con este principio, no es necesario operar en un medio anóxico para obtener la tasa de desnitrificación y capacidad de desnitrificación..

Sobre esta base, aquí se presenta un procedimiento avanzado en donde por medio de la Respirometría BM de Surcis, operando en condiciones aeróbicas, se mide de forma automática la tasa de eliminación tanto de la DQO biodegradable y, con ello, se habilita el camino hacia el cálculo de la tasa de nitrificación y capacidad de nitrificación.

Así mismo, este procedimiento permite distinguir la DQO biodegradable total y la DQO fácilmente biodegradable utilizadas y analizar la influencia de las fracciones biodegradables de la DQO en la capacidad de eliminación del nitrato.

Con todo ello, se analiza también si el proceso anóxico va a necesitar alguna fuente externa de materia orgánica para obtener el rendimiento deseado.

2. Respirómetro BM

Este tipo de Respirimetría se basa en un sistema único, basado en la respirometría tipo LFS + LSS modificada, desarrollado por la empresa Surcis S.L. que se incluye en una serie de distintos modelos de respirómetros BM. Esta tecnología permite que, en la programación previa del ensayo, e incluso durante la ejecución del mismo, lo podamos adaptar a distintas condiciones de pH, temperatura, oxígeno y relación muestra / fango.

También permite la posibilidad de introducción de determinados datos que pueden participar en los cálculos automáticos de parámetros fundamentales en procesos de depuración. Las aplicaciones más habituales que se realizan con la Respirimetría BM son los siguientes: Tomar el pulso al proceso para una rápida valoración, fracciones de la DQO, Biodegradabilidad al fango, Toxicidad, Tasa de nitrificación (AUR), Tasa de desnitrificación (NUR), Valoración y seguimiento del sistema de aireación, entre muchas otras.

Opcionalmente, mediante un reactor especial (bio-carrier), los respirómetros BM pueden llevar a cabo ensayos de respirometría con lechos bacterianos para procesos tipo MBBR y de biomasa granular.



Figura1. Sistema de Respirometría BM – Nuevo modelo BM-Advanc

Modos de trabajo OUR & OUR Cíclico	<p>OUR: Tasa de Respiración - Oxygen Uptake Rate ($\text{mg O}_2/\text{l.h}$) Mide la tasa de consumo de oxígeno en una sola medida (modo OUR) o una serie de medidas encadenadas (modo OUR cíclico)</p> <p>SOUR: OUR específico - Specific OUR ($\text{mg O}_2/\text{g VSS.h}$) OUR relacionado con la concentración de SSVLM. $\text{SOUR} = \text{OUR} / \text{MLVSS}$</p>
Modo de trabajo R	<p>Rs: Tasa de Respiración exógena dinámica ($\text{mg O}_2/\text{l.h}$) Mide una serie cointinuada de valores de Rs que un determinado sustrato provoca en el fango durante su metabolización.</p> <p>Rsp: Rs específica ($\text{mg O}_2/\text{g VSS.h}$) Rs relacionada con la concentración de SSVLM. $\text{Rsp} = \text{Rs} / \text{MLVSS}$</p> <p>DQOb: DQO biodegradable ($\text{mg O}_2/\text{l}$) DQO biodegradable o rápidamente biodegradable – cuando la muestra es soluble Se calcula a partir de la integración de la serie de valores Rs.</p> <p>U: Tasa de eliminación de la DQO ($\text{mg DQO}/\text{l.h}$) Mide la velocidad con que la DQO se está eliminando.</p> <p>q: Tasa específica de eliminación de la DQO ($\text{mg DQO}/\text{mg SSV.d}$) Mide la U relacionada con la concentración de SSVLM.</p>

Tabla 1. Modos de trabajo y parámetros automáticos en el software BM

3. Puntos a considerar en la relación entre el consumo de oxígeno para la eliminación de la DQO biodegradable y la desnitrificación anóxica

- La Desnitrificación se lleva a cabo en el medio anóxico por medio de bacterias heterótrofas facultativas, utilizando el carbón orgánico para la síntesis y energía, así como el nitrato como fuente de oxígeno.
- En condiciones normales, cada mg de N_NO_3 reducido consume $2,86 \text{ mg}$ de oxígeno, produce $0,45 \text{ mg}$ de SSVLM y produce $3,57 \text{ mg}$ de Alcalinidad.
- En el proceso de desnitrificación anóxica, la eliminación del nitrato es proporcional a la eliminación la DQOb de la materia orgánica como fuente de carbono orgánico, dando prioridad a la utilización de la DQO fácilmente biodegradable (DQOrb)

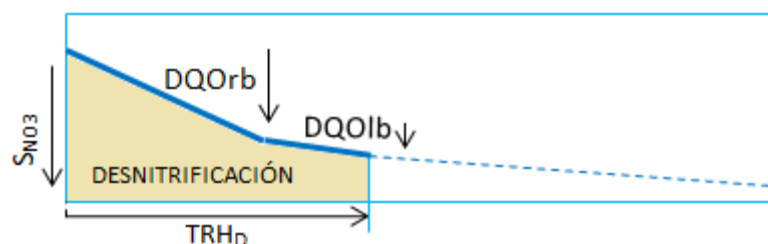


Figura 2. Esquema de la utilización de la DQOrb y DQOIb en la desnitrificación

4. Parámetros

Símbolo	Descripción
Ensayo R DQOb	Ensayo de respirometría BM de la DQO biodegradable (mg/L) Además de la DQOb, se obtienen los parámetros OC, U, entre otros.
DQOb _D	DQO biodegradable utilizado en la desnitrificación
S _{NO3}	Nitrato a desnitrificar (mg N-NO ₃ /L)
OC _D	Oxígeno neto que corresponde a la DQOb eliminada en la desnitrificación (mg/L)
Y _H	Coeficiente de rendimiento de la biomasa heterótrofa en condiciones aerobias (O ₂ /DQO)
Y _{HD}	Coeficiente de rendimiento para el crecimiento de la biomasa heterótrofa facultativa en la desnitrificación (O ₂ /DQO)
U _D	Tasa de utilización de la DQOb acumulada utilizada en la desnitrificación (mg DQO/L.h)
OUR _D	Tasa de consumo de oxígeno de la materia orgánica en la DQOb utilizada en la desnitrificación (mg O ₂ /L.h)
NUR	Tasa de desnitrificación (mg N-NO ₃ /L.h)
K _{OD}	Coeficiente de inhibición por oxígeno disuelto en la zona anóxica = 0,2 (Henze, et al 1996)
OD _D	Oxígeno disuelto en la zona anóxica de desnitrificación (mg/L)
TRH _D	Tiempo de retención hidráulica en el proceso de desnitrificación (h)
C _{NO3}	Capacidad de desnitrificación (mg N-NO ₃ /L)

5. Procedimiento para la determinación de la tasa de desnitrificación, Oxígeno Consumido, DQOb utilizada en el proceso y Capacidad de desnitrificación

Se trata de un procedimiento exclusivo de la Respirometría BM en el que podemos destacar su sencillez y amplia información de parámetros que permiten analizar con detalle el proceso anóxico de la desnitrificación.

Este procedimiento se realiza partiendo de un ensayo aeróbico de respirometría para la medida de la DQOb, en donde además se hace uso de los parámetros U y OC que se miden simultáneamente en el mismo ensayo y se presentan en una tabla de datos en función del tiempo..
Con ello, cada valor de OC tendrá su correspondiente DQOb y U.

5.1. Diagrama

Una vez calculado el OC_D se realiza el ensayo de la DQOb.

Con ello, desde la tabla de resultados del ensayo, se selecciona el OC con el mismo valor al del OC_D , previamente calculado, y los valores DQOb y U (en el mismo intervalo) que corresponderán a los valores de la DQOb_D y U_D.

Una vez obtenidos los valores Y_{HD} , OD_D y TRH_D , aplicamos las fórmulas matemáticas correspondientes para el cálculo del OUR_D , NUR y C_{NO3}

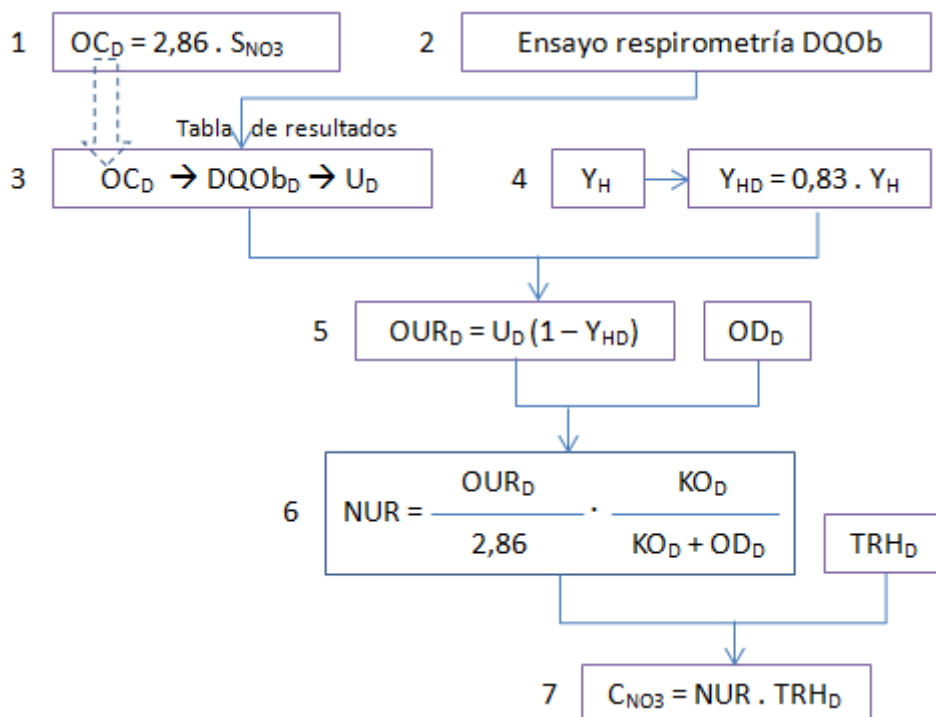


Figura 3. Diagrama del procedimiento

5.2. Desarrollo

El ensayo de la DQOb por respirometría BM, no solo incluye las tasas de respiración dinámica (R_s), sino además otros parámetros como son la demanda de oxígeno consumido (OC) y las tasa de utilización de la DQOb (U). Son precisamente estos parámetros (OC y U) los que se utilizarán para la obtención del NUR y capacidad de desnitrificación.

En todo ello es importante tener en cuenta que la desnitrificación utiliza la DQOb sin incluir la parte del oxígeno destinado a la producción de biomasa en este proceso (Y_{HD}) y, por lo tanto, la tasa de consumo de oxígeno neta por materia orgánica utilizada debe excluir este oxígeno. Con ello, la demanda de oxígeno por materia orgánica que se utiliza pasa a ser DQOb_D ($1 - Y_{HD}$)

1) Relación entre la demanda de oxígeno por materia orgánica y nitrato a desnitrificar

La relación entre el oxígeno que se consume (OC_D) por DQO biodegradable ($DQOb_D$) utilizada y el nitrato eliminado es de 2,86. (Henri Spanjers, Peter A. Vanrolleghem – 2004) Por lo tanto:

$$OC_D = S_{NO_3} \cdot 2,86 \quad (1)$$

2) Determinación automática de la $DQOb$ y tasa de utilización de la $DQOb$ en la desnitrificación

Para ello se llevará a cabo un ensayo de respirometría de la $DQOb$ del agua residual en condiciones equivalentes de pH y temperatura a las del proceso real.

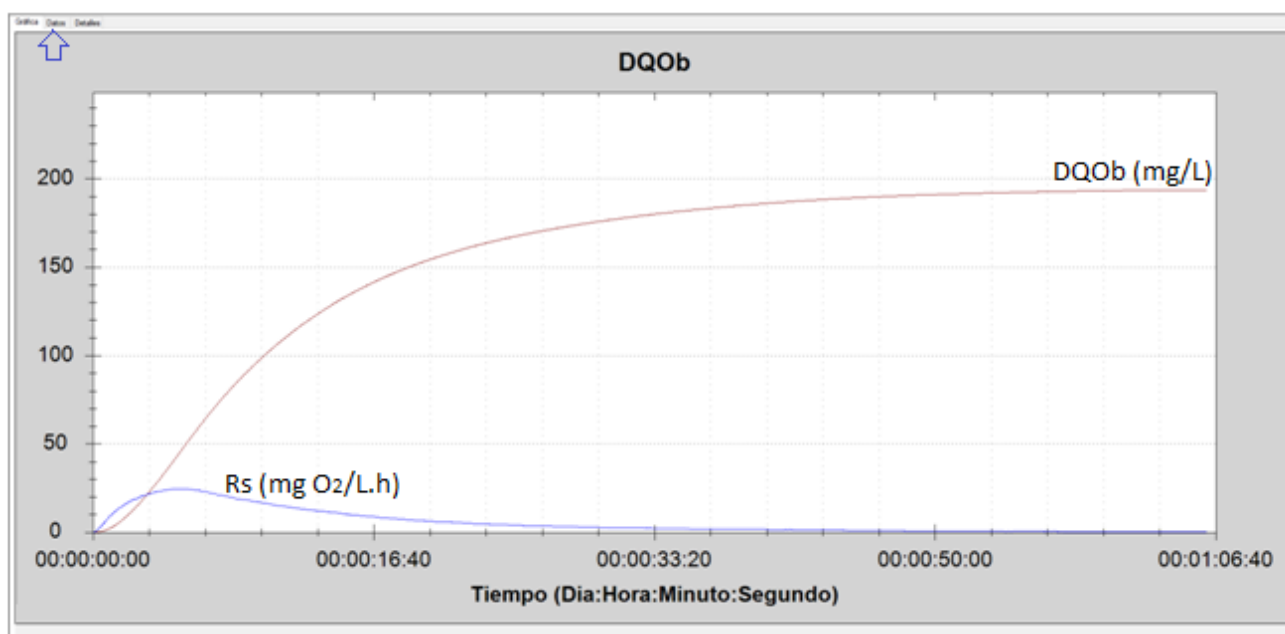


Figura 5. Respirogramas simultáneos de la $DQOb$ y Rs en un ensayo R de la DQO biodegradable

3) Determinación de los valores $DQOb_D$ y U_D desde el ensayo de respirometría de la $DQOb$

Una vez finalizado el ensayo, se irá a la pestaña de « Datos » (Figura 5) en donde podemos encontrar todos los resultados obtenidos en función del tiempo. Desde esta tabla, se localiza el valor que correspondiente al OC_D , que hemos calculado previamente, y se obtienen los valores de la U_D y $DQOb_D$ para el mismo intervalo.

Gráfica	Datos	Detalles
OC (mg/l)	$DQOb$ (mg/l)	U (mg $DQOb$ /l.h)
85,99	186,94	18,64
86,01 = OC_D	186,97 = $DQOb_D$	18,62 = U_D

Tabla 2. Obtención de la $DQOb_D$ y U_D correspondientes al OC_D en la desnitrificación

4) Coeficiente estequiométrico de la biomasa heterótrofa facultativa en zona de desnitrificación

El coeficiente estequiométrico de crecimiento en zona anóxica de desnitrificación se calcula aplicando un factor de corrección al coeficiente estequiométrico de la biomasa heterótrofa en zona aerobia.

$$Y_{HD} = 0,83 \cdot Y_H \quad (2) \quad (\text{Muller et al., 2003})$$

Si no se tuviere acceso a la Y_H , tomaremos por defecto un $Y_{HD} = 0,55$ (Muller et al., 2003)

El coeficiente Y_H se refiere a la biomasa heterótrofa aeróbica y el Y_{HD} se refiere a la biomasa heterótrofa facultativa anóxica.

5) Tasa de consumo de oxígeno de la materia orgánica en la DQOb utilizada en la desnitrificación

Se refiere a la tasa consumo neto utilizado en la desnitrificación, partiendo de la tasa de eliminación de la DQOb (U_D) y aplicando el factor $(1 - Y_{HD})$ para descontar la parte de DQO biodegradable destinada a la producción de biomasa.

$$OUR_D = U_D (1 - Y_{HD}) \quad (3)$$

5) Cálculo de la tasa de desnitrificación

Puesto que la relación directa entre el oxígeno que se consume por DQO biodegradable y nitrato eliminado es de 2,86, del mismo modo existe esta misma relación entre la tasa de oxígeno que se consume por DQOb utilizada y la tasa de eliminación de nitrato aplicando el factor de corrección por oxígeno disuelto. Por lo tanto:

$$NUR = \frac{OUR_D}{2,86} \cdot \frac{KO_D}{KO_D + OD_D} \quad (4)$$

Factor de corrección por oxígeno disuelto en zona anóxica: $KO_D / (KO_D - OD_D)$

5) Capacidad de desnitrificación

La capacidad de desnitrificación mide el nitrato que un proceso, con un determinado tiempo de retención hidráulica, es capaz de nitrificar.

$$C_{NO_3} = NUR \cdot TRH_D \quad (5)$$

A tener en cuenta:

- El TRH es inversamente proporcional al NUR.
- El NUR depende directamente de la tasa de eliminación de la DQOb acumulada (U)
- Cuando mayor sea el porcentaje de DQO lentamente biodegradable utilizado en el NUR el NUR será menor que si el porcentaje de DQOb fuera mayoritariamente DQO fácilmente biodegradable, repercutiendo de forma proporcional en la capacidad de nitrificación.
- El oxígeno disuelto en zona anóxica (OD_D) juega un papel importante por lo que, cuando mayor sea este oxígeno, menor será el NUR y menor la capacidad de nitrificación.

6. Análisis de la suficiencia de DQO para la desnitrificación

Una de las cuestiones que suelen aparecer a menudo es si el proceso de la desnitrificación dispone de suficiente DQO para su desarrollo.

En el paso 3) del procedimiento hemos visto como, una vez conocido el requerimiento de oxígeno a consumir (OC_D), con un ensayo de la DQO biodegradable se determina automáticamente la DQOb necesaria para el desarrollo del proceso ($DQOb_D$)

Conociendo la relación DQO total / DQOb total se da paso al cálculo de la DQO para la desnitrificación:

$$DQO_D = DQOb_D \cdot (DQO/DQOb) \quad (6)$$

Una vez conocido el valor de la DQO_D , se compara con el valor medio de la DQO actual para averiguar la suficiencia de DQO para la desnitrificación.

7. Ejemplo de cálculo de la tasa y capacidad de nitrificación (caso real)

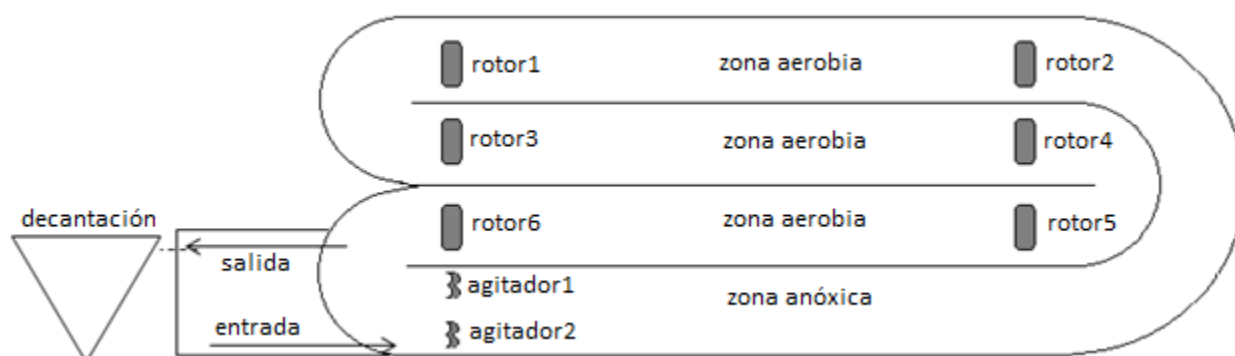


Figura 6. Reactor biológico: doble carroussel – aireación prolongada

Parametro	Valor entrada	Valor salida
Y_H (mg O_2 /COD)	0,70	-
NTK (mg N/L)	62	2,3
DBO (mg/L)	280	6
Relación DQOb /DQO	0,82	
TRH zona anóxica (h)	11,5	-
OD zona anóxica (mg/L)	~ 0,00	-
Nitrato (mg N- NO_3 /L)	-	3,5

Tabla 3. Datos del proceso de fangos activos

N nitrificable (mg N/L) = NTK entrada – N_{sin} – NTK salida = 62 – 13,7 – 2,3 = 46

N_{sin} : N síntesis de la biomasa = 0,05 * DBO eliminada = 0,05 . (280 – 6) = 13,7

Nitrato a desnitrificar (mg N- NO_3 /L): S_{NO_3} = N nitrificable – N- NO_3 salida = 46 – 3,5 = 42,5

Oxígeno consumido por utilización de la DQOb: OC_D = 2,86 . S_{NO_3} = 2,86 * 42,5 = 121,5 mg O_2 /L

Coeficiente Y_{HD} = 0,83 . Y_H = 0,83 * 0,70 = 0,58

Desde el ensayo de respirometría de DQOb, con el valor calculado de OC_D , se obtiene la U_D

Gráfica	Datos	Detalles
OC (mg/l)	DQOb (mg/l)	U (mgDQOb/l.h)
121,51 = OC_D	405,05 = $DQOb_D$	25,62 = U_D

Tabla 4. Obtención de la $DQOb_D$ y U_D correspondientes al OC_D del ejemplo de cálculo

Tasa de desnitrificación

Aplicando la fórmula (3)

$$NUR = [25,62 (1 - 0,58) / 2,86] \cdot 0,2 / (0,2 + 0,0) = 3,76 \text{ mg N-}NO_3\text{/L.h}$$

Capacidad de desnitrificación

Aplicando la fórmula (4)

$$C_{NO_3} = 3,76 \cdot 11,5 = 43.24 \text{ mg N-}NO_3\text{/L}$$

Análisis del resultado

En este ejemplo, la capacidad de desnitrificación es superior y muy cercana al nitrato a desnitrificar. ($C_{NO_3} \sim S_{NO_3}$) Por lo tanto, disponiendo de suficiente DQO, el proceso debería desarrollarse sin problema alguno.

8. DQO fácilmente biodegradables utilizada en la desnitrificación

Para ello se llevará a cabo un ensayo de respirometría de la DQO fácilmente biodegradable (DQOrb) con una muestra soluble del agua residual en condiciones equivalentes de pH y temperatura.

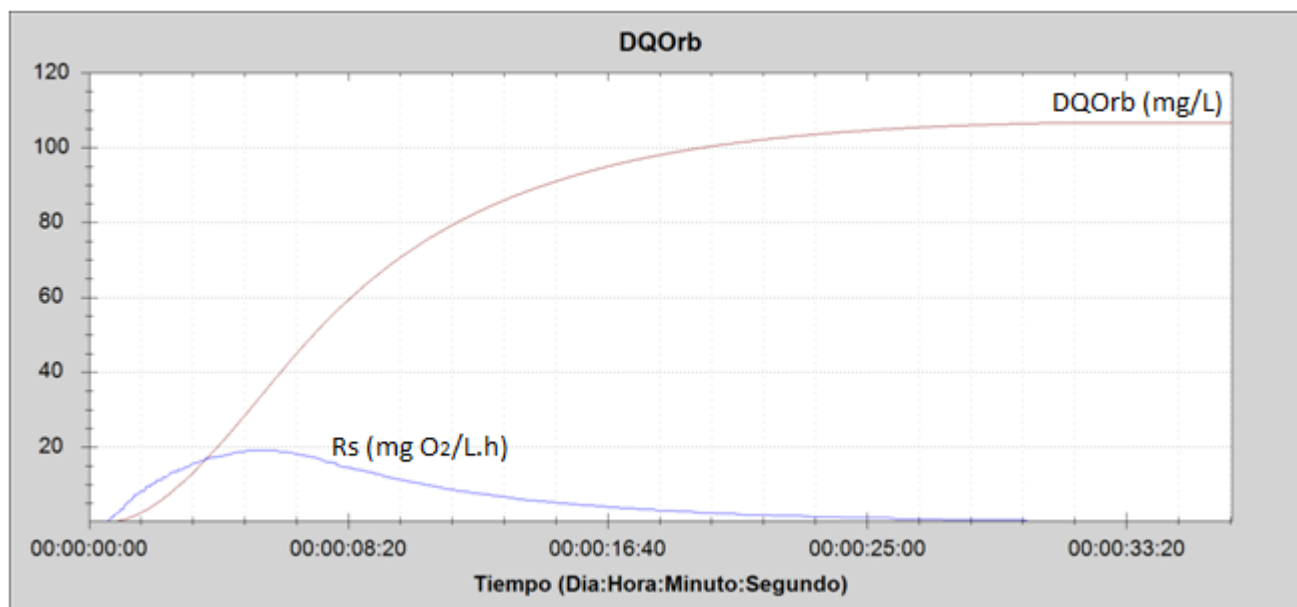


Figura 7. Respirogramas simultáneos de la DQOrb y Rs en un ensayo R de la DQO fácilmente biodegradable

Para el mismo intervalo de tiempo de la DQOb_D se puede utilizar igualmente la tabla de datos.

También se puede hacer uso de la opción del software BM ofrece « Generador de comparación de ensayos » en donde se accede a la superposición de respirogramas DQOb vs DQOrb con acceso a estos valores simplemente cliqueando sobre cada gráfica en el intervalo de tiempo correspondiente.

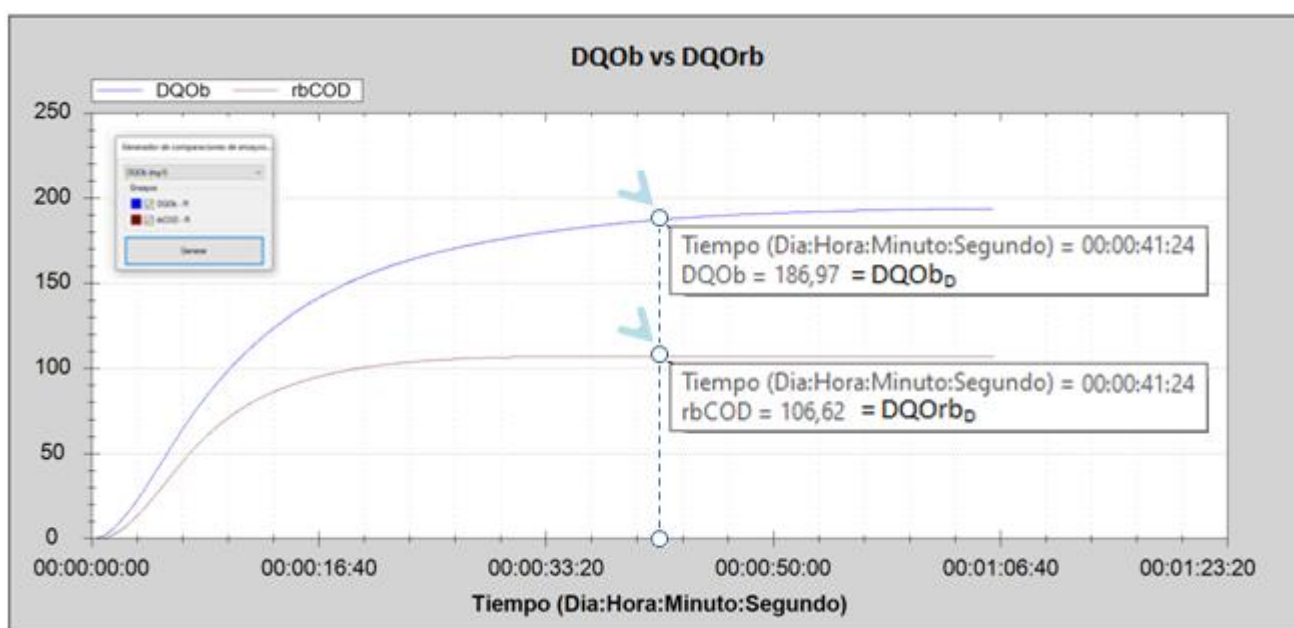


Figura 8. Respirogramas superpuestos de la DQOb y DQOrb con localización del punto de trabajo del NUR

9. DQO lentamente biodegradables utilizada en la desnitrificación

Una vez utilizada la DQOrb, que es la fracción prioritaria, el proceso de la desnitrificación puede utilizar una parte de la DQO lentamente biodegradable.

$$DQOlb_D = DQOb_D - DQOrb_D \quad (5)$$

DQOlb_D (mg/L): DQO lentamente biodegradable utilizada en la desnitrificación

10. Causas de una baja capacidad de desnitrificación

1. Que el proceso no se ajuste a las condiciones mínimas que se exigen en la desnitrificación:
 - pH entre 6,5 y 8,5
 - Temperatura entre 15 y 35 °C
 - DQO/NKT entre 2,5 a 5
 - Oxígeno disuelto < 0,3
 - Sin presencia de inhibición ni toxicidad
2. Baja carga de DQOb para la carga de nitrato a desnitrificar. De modo que, al quedarse sin materia orgánica, solo se consigue una nitrificación parcial.
3. Bajo porcentaje de DQOrb, que obliga al proceso a la utilización mayoritaria de la DQOlb provocando una bajo valor del NUR que no es suficiente para cumplir con la capacidad de desnitrificación que se exige en el proceso.
4. Baja capacidad de nitrificación, debido a un TRH_D demasiado corto para obtener el rendimiento deseado.
5. Presencia de nitritos en la zona a anóxica de desnitrificación debido a un posible proceso de nitrificación previo incompleto.

11. Conclusión

Aquí se ha presentado un procedimiento en donde el software de la Respirimetría BM, en condiciones aerobias, es capaz de obtener automáticamente unos parámetros básicos que pueden ser extrapolados para el cálculo de los parámetros esenciales de la desnitrificación anóxica.

De este modo, de forma automática, se obtiene el oxígeno utilizado en la DQO biodegradable que se consume en la desnitrificación y la tasa de eliminación de esta DQO biodegradable para dar paso al cálculo de la tasa de desnitrificación (NUR) y Capacidad de desnitrificación (C_{NO3})

Así mismo, con un ensayo adicional de respirometría podemos obtener la DQOrb para poder diferenciar la DQOrb y la DQOlb utilizadas en el proceso de la desnitrificación.

Este procedimiento pone en evidencia, que la tecnología y software exclusivos de la Respirometría BM permiten disponer de una herramienta única y fundamental para aplicaciones relacionadas con la desnitrificación sin tener que recurrir a sistemas anóxicos.

REFERENCIAS

Respirometry. Henri Spanjers Peter A. Vanrolleghem – 2002

Municipal wastewater characterization - Application of denitrification batch test. Valerie Naidoo - 1999

Estimation of denitrification potential with respiration based techniques. K. Kujawa-Roeleveld – 2000

Characterization of Functional Microorganism Groups and Substrate in Activated Sludge and Wastewater by AUR, NUR and OUR. Mogens Henze – 1992

Calculating specific denitrification rates in pre denitrification by assessing the influence of dissolved oxygen, sludge loading and mixed-liquor recycl.: Massimo Raboni, Vincenzo Torretta, Paolo Viotti & Giordano Urbini - 2014

NUR and OUR relationship in BNT processes. Euisio Choi, Rhu Daehwan – 2000

Activated Sludge Treatment of Industrial Wastewater. W.W. Eckenfelder & J.L. Musterman, 1995

Water treatment design. Solange Kamanzi - 2012

.