



# Proceso Pronox: ahorro de energía en EDAR mediante procesos no oxidativos

Con el fin de reducir el consumo eléctrico en las estaciones depuradoras de aguas residuales (EDAR), se propone el proceso Pronox como variante del proceso HRAS. Este estudio se ha desarrollado incorporando herramientas de simulación e investigación experimental. Se ha utilizado el simulador Sumo y una planta piloto de capacidad de 35 m<sup>3</sup>/d. El estudio se centró en estudiar las condiciones óptimas de funcionamiento para derivar materia orgánica y nitrógeno. Se ha estudiado en detalle la eficacia de la eliminación de las diferentes fracciones del DQO en la planta piloto. Los resultados confirman que el proceso Pronox, como sustituto de la decantación primaria, puede reducir el consumo total de electricidad en una planta de tratamiento de aguas del orden del 35-40%.

### Palabras clave

EDAR, HRAS, sensores en línea, eliminación fracciones DQO; planta a escala industrial.

### PRONOX PROCESS: ENERGY REDUCTION IN WWTP THROUGH NON OXIDATIVE PROCESSES

*In order to reduce electricity consumption in wastewater treatment plants (WWTP), the Pronox process is proposed as a variant of the HRAS process. This study is being developed by incorporating simulation and experimental research tools. Sumo software and a pilot plant with 35 m<sup>3</sup>/d capacity have been used. The study focused on controlling the process and studying the optimum operating conditions for diverting organic matter and nitrogen. The effectiveness of eliminating the different fractions of the COD has been studied in detail. Results confirm that when using the Pronox process, as a substitute for the primary settling process, the total electricity consumption in the WWTP can achieve a reduction of 35-40%.*

### Keywords

WWTP, HRAS, on line sensors, COD removal fractions, industrial-scale plant.

#### Joan Canals Tuca

ingeniero Industrial de GS Inima Environment, S.A.

#### Oriol Carbó Monmany

ingeniero químico, técnico junior de I+D+i de GS Inima Environment, S.A.

#### Antonio Ordóñez Fernández

ingeniero industrial, director de I+D+i de GS Inima Environment, S.A.

#### Mercé Baldi Coll

ingeniera química, jefa del Departamento de Depuración en la Dirección de I+D+i de GS Inima Environment, S.A.

#### Belén Gutiérrez

doctora en Ingeniería Química, jefa del Departamento Desalación en la Dirección de I+D+i de GS Inima Environment, S.A.

#### Fernando Huertas Linero

ingeniero técnico industrial, técnico senior de I+D+i de GS Inima Environment, S.A.

#### Héctor Monclús Sales

investigador Ramón y Cajal del Laboratori d'Enginyeria Química i Ambiental (LEQUIA) de la Universitat de Girona

#### María José Martín Sánchez

profesora titular del Laboratori d'Enginyeria Química i Ambiental (LEQUIA) de la Universitat de Girona

#### Manel Poch Espallargas

catedrático de Ingeniería Química del Laboratori d'Enginyeria Química i Ambiental (LEQUIA) de la Universitat de Girona



## 1. INTRODUCCIÓN

El proceso de lodos activos, tecnología de uso generalizado para el tratamiento de las aguas residuales, ha demostrado su eficacia y versatilidad durante sus 100 años de aplicación, adecuándose a las nuevas exigencias de calidad. No obstante, desde el punto de vista de su sostenibilidad, constituye un proceso de alto consumo energético y de elevado impacto ambiental por los subproductos (lodos) que genera. Es por ello que en los últimos años se ha dado un importante impulso al desarrollo de nuevas tecnologías de tratamiento que intentan mejorar el proceso convencional, con especial énfasis en la reducción de su consumo energético e impacto ambiental.

Del análisis de los consumos eléctricos de las principales operaciones unitarias de una EDAR para eliminar materia orgánica ( $\text{DBO}_5$ ), como se indican en la **Tabla 1**, se deduce que el consumo eléctrico específico ( $\text{kWh/kg DBO}_5$  eliminada) es 15 veces superior en el tratamiento biológico (proceso oxidativo) que en la decantación primaria (proceso físico). Esto es debido principalmente a las diferentes formas en las que se encuentra la  $\text{DBO}_5$  (soluble, coloidal, particulada) tanto en el influente como en el efluente de la decantación primaria, así como a los rendimientos de eliminación que se obtienen.

La **Figura 1** presenta el fraccionamiento de la  $\text{DBO}_5$  en el agua residual urbana y las eficacias de separación de las mismas en el decantador primario. Como se observa, un 37% de la  $\text{DBO}_5$  del influente ( $95,6 \text{ mg/L}$ ) es eliminada en la decantación primaria y, por tanto, tratada a posteriori en la digestión anaeróbica (DA). El 63% restante ( $164,3 \text{ mg/L}$ ) pasa

directamente al tratamiento secundario con la consiguiente aeración y consumo de oxígeno asociado. Es, por tanto, un requisito clave mejorar la eficiencia del decantador primario para evitar mayores consumos en el tratamiento secundario.

Para conseguir dicha mejora, se han utilizado hasta ahora diferentes propuestas de modificación de la decantación primaria. Heinke et al., (1980) propuso la adición de reactivos químicos, previa al decantador primario, que permite desestabilizar la materia coloidal y facilitar la decantación de la particulada. Yetis y Tarlan (2002) y Ross y Crawford (1985) propusieron la recirculación de lodos activos en el decantador primario. Li (1998) y Huang y Li (2000) propusieron la recirculación de los lodos decantados en el propio decantador primario.

También se han realizado propuestas de sustitución de la decantación primaria. Rogalla et al. (2004) propuso la conversión de la decantación primaria, en un proceso de DA a baja temperatura tipo UASB, aunque otros estudios propusieron la conversión de la decantación primaria en un proceso biológico de alta carga

(HRAS, high-rate activated sludge), favoreciendo la adsorción/biofloculación de la materia orgánica coloidal y soluble (Christian et al., 2008; Constantine et al., 2012; Ding et al., 2015; Jiménez et al., 2015; Nogaj et al., 2015; Wett et al., 2007; y Yesli et al., 2014).

Modin et al. (2015), con un enfoque parecido a la última propuesta, propuso el uso de procesos no oxidativos para separar el contenido orgánico del agua residual, presentado dos categorías de procesos:

- Procesos basados en la adsorción de materia orgánica, por ejemplo HRAS (cuyo objetivo es la eliminación de materia orgánica mediante producción de lodos que se derivan a digestión anaeróbica).
- Procesos basados en el almacenamiento celular de materia orgánica (cuyo objetivo es la producción de productos químicos específicos a partir de la materia orgánica del agua residual).

La importancia del problema planteado se deduce de los valores de consumos energéticos para el tratamiento del agua residual urbana en

**TABLA 1**

**CONSUMO ELÉCTRICO MEDIO PARA ELIMINAR MATERIA ORGÁNICA  $\text{DBO}_5$ :**

Proceso	Eliminación de $\text{DBO}_5$	Consumo específico	
		$\text{kWh/m}^3$	$\text{kWh/kg DBO}_5$
Decantación primaria	35%	0,005	0,014
Lodos activos	65%	0,154	0,237

**FIGURA 1.** Fraccionamiento de la  $\text{DBO}_5$  y eliminación en decantación primaria.



España. Con un caudal tratado de 4.997 hm<sup>3</sup>/año (INE) y un consumo específico medio de 0,45 kWh/m<sup>3</sup>, el consumo total eléctrico en España en el año 2018 fue de 2.248 GWh.

## 2. PROCESO PRONOX

El proceso Pronox, desarrollado por GS Inima en colaboración con el grupo LEQUIA de la Universidad de Girona (UdG) y financiado por el Centro para el Desarrollo Tecnológico Industrial (CDTI), presenta una clara vocación de dar respuesta a los retos antes indicados, los cuales han sido identificados en la Estrategia Española y en el esquema de la Unión Europea reflejado en el Horizonte 2020.

El proceso Pronox, a instalar antes de la unidad de lodos activos, pretende derivar la mayor cantidad de materia orgánica y nitrógeno al proceso de DA, evitando así su paso al proceso de lodos activos, gran consumidor de energía eléctrica. Esta derivación no solo reduce el consumo de energía eléctrica en el proceso de lodos activos, sino que permite incrementar la producción de biogás mediante DA y la generación de energía eléctrica mediante cogeneración (Figura 2).

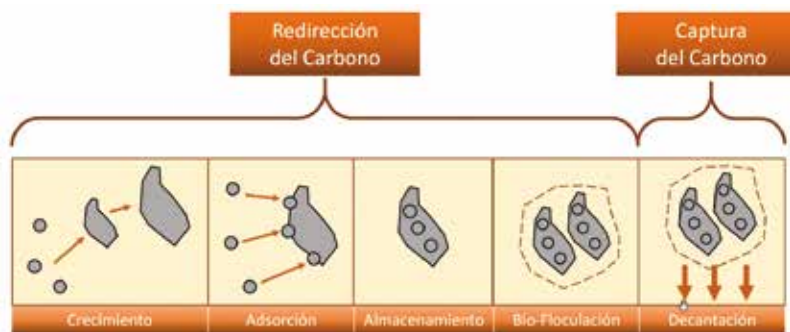
La innovación del proceso Pronox consiste en trabajar con dos reactores, uno anóxico estratificado y otro aeróbico, para fomentar los procesos de biofloculación, con el doble objetivo de aumentar la producción de biogás y reducir la carga orgánica. A diferencia del proceso de lodos activados convencional, el proceso Pronox funciona con un bajo tiempo de retención hidráulico (HRT), inferior a una hora, y un bajo tiempo de retención de sólidos (SRT), inferior a un día.

En el proceso Pronox se utilizan dos conceptos importantes que cabe detallar. Por un lado, el concepto de redirección de carbono, que repre-

FIGURA 2. Esquema conceptual del proceso Pronox.



FIGURA 3. Procesos principales implicados en la redirección y captura de carbono.



senta la transformación del carbono orgánico (particulado, coloidal y soluble) de las aguas residuales a la matriz de lodos a través de procesos relacionados con la biosorción (adsorción o enmeshment extracelular, almacenamiento intracelular y biofloculación) y fenómenos de crecimiento microbiano (Modin et al., 2015; Rahman et al., 2019; Rosso, 2019), siendo controlado solo por el proceso biológico. Y, por otro lado, el concepto de captura de carbono, que no es más que la recuperación del carbono a través de procesos físicos y biológicos, como sedimentación y purga (Rosso, 2019) (Figura 3).

El proceso Pronox produce lodos con mayor degradabilidad y mayor tasa de degradación que los lodos purgados del proceso de lodos activos, lo que mejora la recuperación de energía a través de la DA.

## 3. MOTIVACIÓN Y OBJETIVOS

El objetivo principal del estudio fue maximizar la captura y redirección de carbono y nitrógeno con una mí-

nima oxidación del carbono. La aplicación de este proceso tenía hasta ahora una limitación, que era la demanda mínima de materia orgánica a la entrada de la unidad de lodos activos para realizar la desnitrificación. No obstante, en la actualidad y mediante la implementación del proceso Anammox (desnitrificación sin consumo de materia orgánica) en la línea de retornos, esta limitación queda reducida, pudiéndose en consecuencia maximizar la eliminación de materia orgánica antes de la unidad de lodos activos.

Asimismo, para alcanzar el principal objetivo se definieron unos objetivos secundarios:

- Evaluación del rendimiento de eliminación de las diferentes fracciones de la materia orgánica, DQO y DBO<sub>5</sub>.
- Evaluación del consumo de DQO en el proceso Pronox.
- Evaluación del ahorro energético a partir de los resultados obtenidos en la planta piloto y en simulación.



- Evaluación de la reducción del volumen de los reactores de la unidad de lodos activos posterior al proceso Pronox.

## 4. METODOLOGÍA

### 4.1. DESCRIPCIÓN DE LA PLANTA PILOTO

GS Inima, conjuntamente con la UdG y la participación del Consorci Besòs-Tordera, construyó y operó una planta piloto a escala industrial con capacidad de  $35 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ , que procesa el efluente del pretratamiento de la EDAR de Montornès del Vallès con grandes variaciones de carga debido a la actividad industrial de la zona (Figura 4).

La planta piloto dispone de: bomba de entrada ( $2,5 \text{ m}^3/\text{h}$ ), reactores biológicos ( $2 \times 0,8 \text{ m}^3$ ), tanques de sedimentación ( $1 \text{ m}$  y  $1,4 \text{ m}$  de diámetro), bomba de recirculación ( $2 \text{ m}^3/\text{h}$ ) y bomba de purga ( $0,5 \text{ m}^3/\text{h}$ ), según lo indicado en la Figura 5. Además, cuenta con diversos sensores y analizadores.

### 4.2. SIMULACIÓN DEL PROCESO

La operación de la planta piloto fue diseñada y monitoreada a partir de simulaciones previas utilizando el simulador Sumo (Hauduc et al., 2019). Se seleccionó este simulador ya que considera la doble población de organismos heterotróficos ordinarios (OHO) y organismos heterotróficos a-stage (AHO), y los procesos de adsorción y floculación sobre la materia fácilmente biodegradable, como los ácidos grasos volátiles (VFA), monómeros, polímeros y materia coloidal. El diagrama de proceso considerado para la simulación con Sumo se muestra en la Figura 6.

### 4.3. MUESTREO Y ANÁLISIS

Se recogieron muestras del influen-

FIGURA 4. Planta piloto en la EDAR de Montornès, Consorci Besòs-Tordera.



FIGURA 5. Diagrama de proceso de la planta piloto.

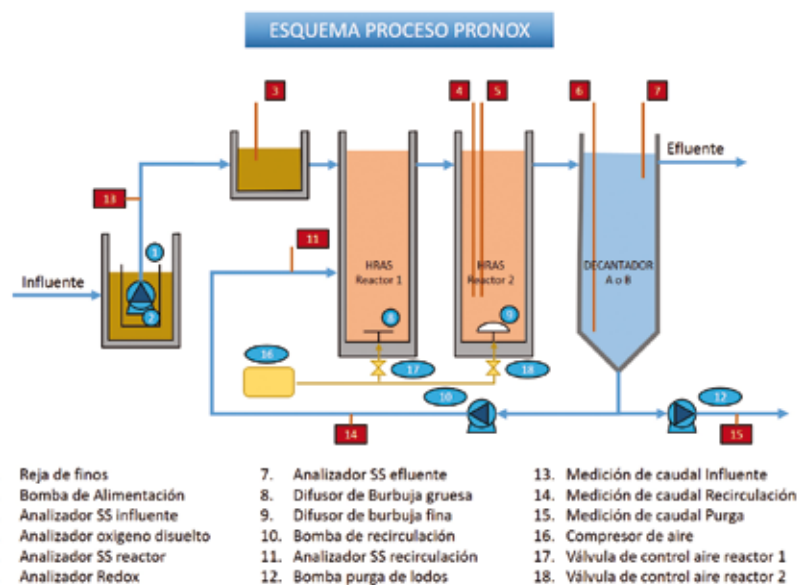
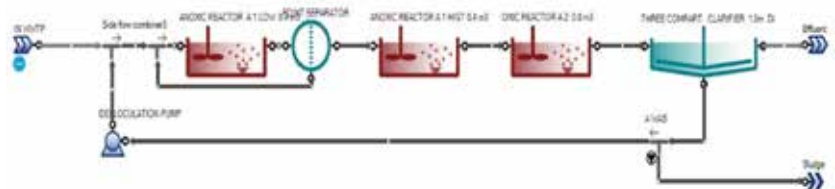


FIGURA 6. Diagrama de proceso de la planta piloto adoptada según el simulador SUMO.



te y el efluente dos días por semana, con un muestreador automático (Hach) a fin de disponer de muestras integradas de 24 horas. Se realizaron análisis de DQO (soluble, coloi-

dal y particulada),  $\text{DBO}_5$ , TSS, VSS,  $\text{NH}_4^+$ , TKN,  $\text{PO}_4^{3-}$  y TP. Las analíticas se realizaron de acuerdo a Standard Methods (APHA, 2005). Para el fraccionamiento de la DQO se consideró:



-  $DQO_{(p)} = DQO - f DQO$  (1,5 micras).

-  $DQO_{(s)} = ff DQO$  (floculada + filtrada 0,45 micras).

-  $DQO_{(c)} = f DQO$  (1,5micras) - ff DQO (0,45 micras).

Siendo la  $DQO_{TOTAL}$  la suma de todas sus fracciones: ( $DQO_{(p)} + DQO_{(s)} + DQO_{(c)}$ ). (Marais et al.,1993).

Las muestras para análisis de TSS, VSS y DQO se recogieron dos veces por semana de los reactores y la recirculación. Además, se registraron en continuo los valores de oxígeno disuelto (OD) y redox (ORP) en el reactor óxico y en la parte inferior del clarificador, respectivamente.

#### 4.4. CARACTERÍSTICAS DEL INFLUENTE A LA PLANTA PILOTO

En la Tabla 2 se resumen las principales características del influente a la planta piloto, que ha sido tomado directamente de la salida del desarenador-desengrasador de la EDAR, asumiendo en consecuencia variaciones horarias y estacionales en la carga contaminante. La alta variación en la carga influyente se debe a la importancia de los vertidos industriales en la EDAR de Montornès.

#### 4.5. CONDICIONES DE TRABAJO DE LA PLANTA PILOTO PARA CADA PERÍODO

La planta piloto se operó desde marzo de 2019 a diciembre de 2020, en nueve períodos diferentes. Las principales diferencias de cada período son: caudal (constante o variable), control de purga de lodos, diámetro del decantador, temperatura del agua, HRT cuando se trabaja con uno o dos reactores, SRT y variación de características de aguas residuales. Las condiciones de trabajo de la planta piloto se indican en la Tabla 3.

TABLA 2

CARACTERÍSTICAS DEL INFLUENTE A LA PLANTA PILOTO (EN EL PERÍODO MARZO 2019-DICIEMBRE 2020).			
Parámetro	Acrónimo	Promedio ± DS	Unidades
Demanda química de oxígeno	DQO (IN)	686 ± 212	mg·L <sup>-1</sup>
Demanda química de oxígeno particulada	DQO <sub>(p)</sub> (IN)	456 ± 201	mg·L <sup>-1</sup>
Demanda química de oxígeno coloidal	DQO <sub>(c)</sub> (IN)	58 ± 24	mg·L <sup>-1</sup>
Demanda química de oxígeno soluble	DQO <sub>(s)</sub> (IN)	172 ± 60	mg·L <sup>-1</sup>
Demanda bioquímica de oxígeno	DBO <sub>5</sub> (IN)	255 ± 148	mg·L <sup>-1</sup>
Sólidos en suspensión	SS (IN)	399± 175	mg·L <sup>-1</sup>
Sólidos en suspensión volátiles	VSS (IN)	297 ± 156	mg·L <sup>-1</sup>
Nitrógeno total Kjeldahl	TKN (IN)	70 ± 33	mg·L <sup>-1</sup>
Nitrógeno amoniacal	N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (IN)	38 ± 17	mg·L <sup>-1</sup>
Fósforo total	TP (IN)	8,7 ± 4,9	mg·L <sup>-1</sup>
Ortofosfatos	P-PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> (IN)	1,7 ± 1,0	mg·L <sup>-1</sup>
Rango de temperatura de los reactores	T	18 - 26	°C

#### 4.6. BALANCE DE DQO

Con los valores medios de cada período se realizaron balances de DQO, de acuerdo con la siguiente expresión:

$$DQO(IN) = DQO(OUT) + DQO(W) + DQO(OXID)$$

donde: DQO(IN) es la DQO de la muestra influente integrada 24 horas; DQO(OUT) es la DQO de la muestra efluente integrada 24 horas; DQO(W) es la DQO asociada a la purga de lodos diarios; y DQO(OXID) es la DQO oxidado en el proceso.

La DQO (OXID) se determina cerrando el balance anterior al 100%, y representa la materia orgánica que ha sido mineralizada en el proceso HRAS.

### 5. RESULTADOS

#### 5.1. ELIMINACIÓN DE MATERIA ORGÁNICA

Los trabajos en planta piloto en servicio durante 18 meses han permiti-

do obtener los rendimientos de eliminación de las diferentes fracciones de la DQO en cada período.

Tal como se refleja en la Figura 7, los valores medios de eliminación de los nueve períodos son: 28 ± 5% para la DQO<sub>(s)</sub>; 8% ± 27% para la DQO<sub>(c)</sub>; 74 ± 6% para la DQO<sub>(p)</sub>; y 58% ± 5% para la DQO. La mayor dispersión se presenta para la DQO<sub>(c)</sub>, siendo de poca importancia la dispersión para DQO<sub>(s)</sub> y DQO<sub>(p)</sub>.

Del estudio de las analíticas diarias de la DQO(IN) y DQO(OUT), presentadas en la Figura 8, se puede concluir que el porcentaje de eliminación de DQO varía en forma similar a la concentración de DQO(IN). El proceso Pronox actúa como filtro de las puntas de DQO(IN), laminando la carga al posterior proceso de lodos activos.

A la alta dispersión en la DQO(IN), cuya media de los nueve períodos es 683 ± 214 mg/L, le corresponde una baja dispersión en el porcentaje de eliminación de DQO, media de los nueve períodos de 57 ± 9%, y



TABLA 3

**CONDICIONES DE TRABAJO DE LA PLANTA PILOTO PARA CADA PERÍODO.**

Período	Q(IN) (m <sup>3</sup> /d)	Q(IN) régimen	Purga desde	Reactor	MLSS R.oxico (mg/L)	HRT Fac.+Oxico Qm (hr)	Oxígeno (mg/L)	QR (%)	OLR-Oxico kgDQO/kgMLSS-d	Temperatura (°C reactor)	Decantador diámetro (m)
1	24,1	Constante	R. oxico	Facul.+oxico	3.043	1,6	0,7	73	9,9	18,5	1
2	29,3	Constante	Decantador	Facul.+oxico	2.577	1,3	0,4	60	8,8	22,1	1
3	31,8	Constante	Decantador	Facul.+oxico	1.729	1,2	0,4	55	14,9	25,6	1
4	30,8	Variable	Decantador	Facul.+oxico	2.555	1,2	0,4	54	8,5	26,3	1
5	30,7	Variable	Decantador	Facul.+oxico	2.508	1,2	0,4	54	9,8	22,8	1
6	31,1	Variable	Decantador	Facul.+oxico	2.290	1,2	0,5	70	9,3	19,3	1,4
7	31,1	Variable	Decantador	Oxico	2.163	0,6	0,5	70	14,6	18,9	1,4
8	30,6	Variable	Decantador	Oxico	2.010	0,6	0,5	62	10,4	23,2	1,4
9	31,1	Variable	Decantador	Oxico	1.924	0,6	1,1	63	9,5	20,1	1,4
<b>Promedio</b>	<b>30,1</b>				<b>2.311</b>	<b>1,1</b>	<b>0,5</b>	<b>62</b>	<b>10,6</b>	<b>21,9</b>	

FIGURA 7. Rendimientos de eliminación de cada fracción de DQO para cada período (1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 y 9) y para la media de los nueve períodos.

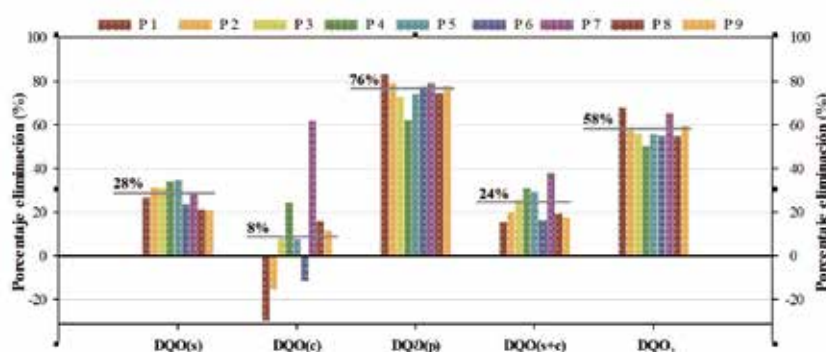
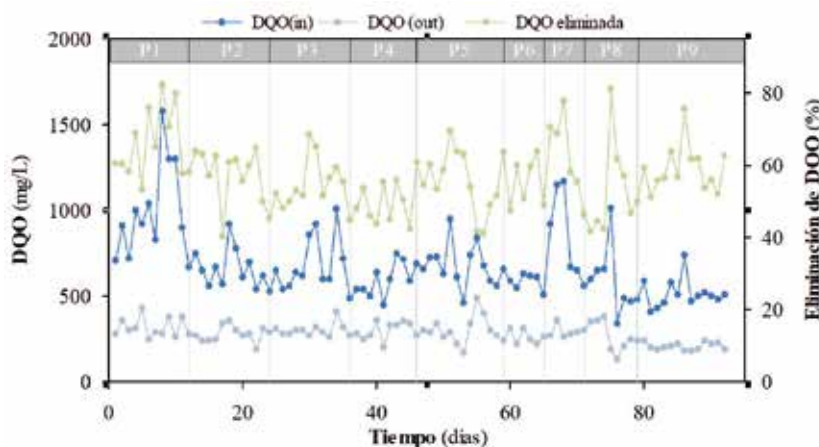


FIGURA 8. DQO (IN) (OUT) y rendimiento de eliminación de la DQO diario durante los períodos 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 y 9.



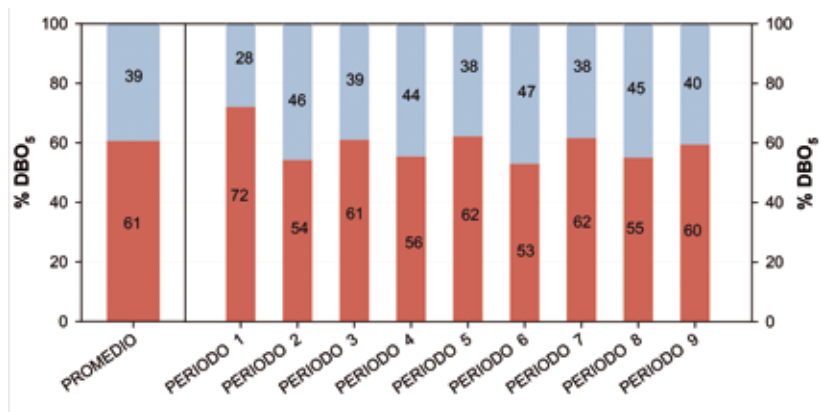
una baja dispersión en la DQO(OUT), media de los nueve períodos de 280 ± 63 mg/L.

El proceso Pronox permite no solo derivar mayor cantidad de materia orgánica a DA que la que permite derivar con decantación primaria, sino que presenta un efecto laminador de la carga influente a la unidad de lodos activos, asegurando su estabilidad y reduciendo el tamaño de los equipos a instalar en la misma para cubrir las puntas de demanda de oxígeno.

Así mismo, el proceso Pronox presenta un alto rendimiento de eliminación de DBO<sub>5</sub> (en la línea de agua). En la Figura 9 se presenta, para cada periodo y para la media global, DBO<sub>5</sub>(ELIM) 61 ± 5,9% y DBO<sub>5</sub>(OUT) 39 ± 5,9%.

Se ha considerado como DBO<sub>5</sub> ELIM en la línea de agua la diferencia entre DBO<sub>5</sub>(IN) - DBO<sub>5</sub>(OUT). Se trata pues básicamente de la DBO<sub>5</sub> derivada de la línea de agua a digestión anaerobia. Con la DBO<sub>5</sub> no es posible realizar un balance igual al realizado con la DQO. No se ha reali-

FIGURA 9. Reparto porcentual de DBO<sub>5</sub> (OUT) y DBO<sub>5</sub> (ELIM) (línea de agua) en relación a DBO<sub>5</sub>(IN) para los periodos 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 y 9.



zado un fraccionamiento de la DBO<sub>5</sub> similar al realizado para la DQO, es decir, la DBO<sub>5</sub> considerada incluye tanto la fracción soluble como coloidal como particulada.

El proceso Pronox, trabajando en las condiciones variables de carga indicadas, ha permitido alcanzar los siguientes rendimientos medios de los nueve periodos: DQO 57 ± 5%; DBO<sub>5</sub> 56 ± 6%; SS 77 ± 8%; TKN 22 ± 7%; N-org 45 ± 10%; N-NH<sub>4</sub> 0 ± 6%; TP 54 ± 7%; y PO<sub>4</sub> 12 ± 15%.

El valor de la ratio DQO/TKN(OUT) obligará en función de la ratio DQO/TKN del influente a implementar un tratamiento Anammox en la línea de retornos de la EDAR, a fin de asegurar el proceso de N/DN en los lodos activos en todas las circunstancias.

### 5.2. CONSUMO DE DQO EN EL PROCESO PRONOX

Uno de los objetivos del trabajo era determinar el consumo de DQO en el proceso Pronox, asociado a la derivación de materia orgánica. La Figura 10 indica, para cada periodo y para la media de los nueve periodos, la eficacia del proceso HRAS en derivar a DA materia orgánica, DQO(W), y el consumo de energía, DQO(OXID).

Con un valor medio de DQO(OXID) del 6,7 ± 3,6% de la

DQO(IN), se deriva a DA un valor medio de 54 ± 5,8% de la DQO(IN), confirmando que el proceso Pronox, incluso trabajando en condiciones extremas -SRT 0,4-0,5 d, DO 0,4-0,5 mg/L, y con altas variaciones de carga influente: DQO(IN) 683 ± 214 mg/L-, permite derivar del orden del 60% de la DQO(IN) con solo un consumo energético del 6% de la DQO(IN). Los valores medios para los nueve periodos son: DQO(OUT) 39,1 ± 5,8% de la DQO(IN); DQO(W) 54 ± 5,8% de la DQO(IN); y DQO(OXID) 6,7 ± 3,6% de la DQO(IN) (Figura 10).

### 5.3. RENDIMIENTO ENERGÉTICO

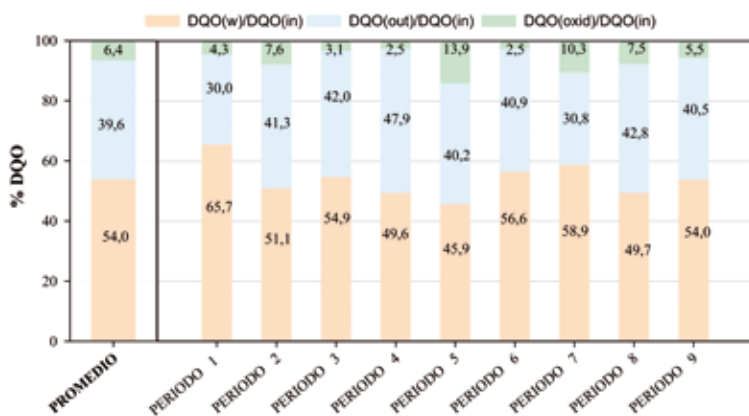
Para cuantificar el ahorro energético asociado a la implementación del

proceso Pronox en sustitución de la decantación primaria, se ha realizado mediante simulación Sumo los balances de DQO y TN, considerando las siguientes hipótesis:

- Agua residual influente: se ha considerado en los balances el mismo influente, igual a la media del estudio en planta piloto.
- Rendimiento de eliminación de la DQO en Pronox (línea de agua): 60%, valor medio del estudio en planta piloto.
- Rendimiento de eliminación de la DQO en decantación primaria (línea de agua): 50% (valor muy superior al normal en decantación primaria, 40%).
- Rendimiento de eliminación de la DQO en digestión anaerobia de lodo primario: 60-65% (Nowak, 2003) y simulación Sumo.
- Rendimiento de eliminación de la DQO en digestión anaerobia de lodo biológico : 30-45% (Nowak, 2003) y simulación Sumo.
- Calidad del efluente: 10 mg/L TN y 1 mg/L N-NH<sub>4</sub>.
- Digestión anaerobia: 20 d HRT, 35 °C.

En las Figuras 11 y 12 se presentan los balances de las dos alternativas de proceso siguientes:

FIGURA 10. Reparto porcentual entre DQO(OUT), DQO(W) y DQO(OXID) para cada periodo y promedio de los nueve periodos.





- Decantación primaria + nitrificación-desnitrificación + digestión anaerobia de lodos.

- Pronox + nitrificación-desnitrificación + digestión anaerobia de lodos + Anammox línea de retornos.

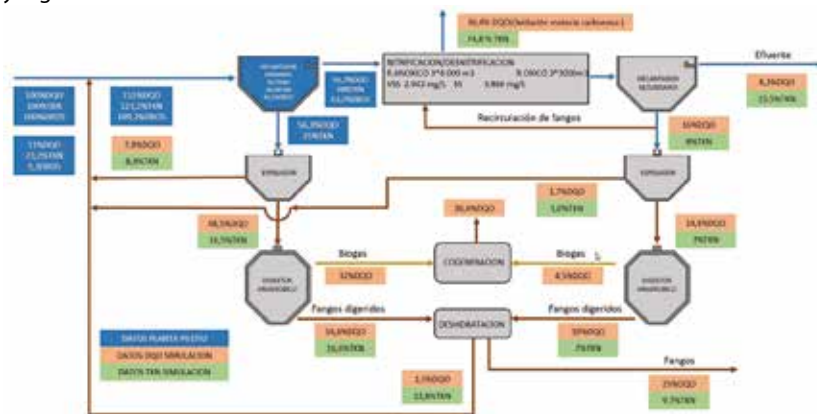
Conocidos los consumos de oxígeno y producción de biogás de cada diseño, interesa conocer su equivalencia en energía eléctrica kWh consumida y generada. Para ello, se utilizan las siguientes equivalencias específicas:

- Oxígeno/kWh:
  - Coeficiente  $\alpha$ : 0,6.
  - Coeficiente  $\beta$ : 0,97.
  - Temperatura máxima agua: 24 °C.
  - Calado reactor: 6 m.
  - Difusores aire: membrana burbuja fina.
  - Consumo específico: 0,78 kWh/kgO<sub>2</sub>.
- CH<sub>4</sub>/kWh:
  - Poder energético CH<sub>4</sub>: 3,9 kWh/kgCH<sub>4</sub>.
  - Rendimiento eléctrico cogeneración: 35%.
  - Producción eléctrica específica: 4,86 kWh/kg CH<sub>4</sub>.
  - Producción eléctrica específica: 3,44 kWh/Nm<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>.

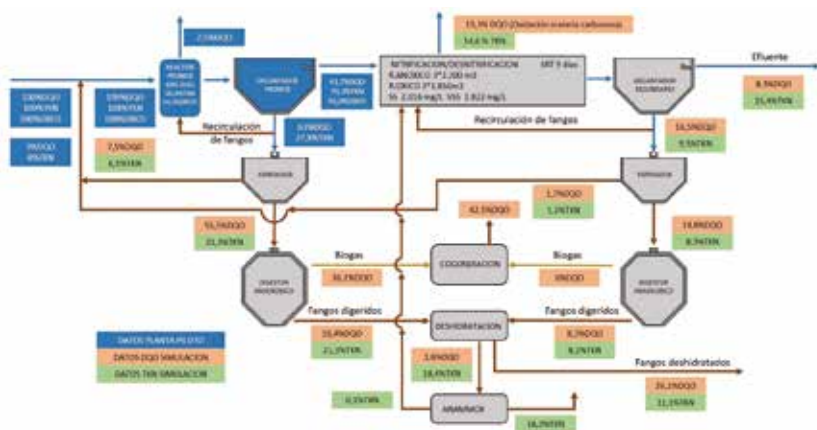
En la **Tabla 4** se presenta el consumo eléctrico y la producción eléctrica de la EDAR en los dos diseños indicados. La planta está dimensionada para tratar 24.000 m<sup>3</sup>/d con las siguientes concentraciones influentes: 725 mg/L DQO; 334 mg/L DBO<sub>5</sub>; 398 mg/L SS; 321 mg/L VSS; y 74 mg/L TN.

La implementación del proceso Pronox, conjuntamente con el proceso Anammox, en la línea de retornos a fin de reducir la demanda de

**FIGURA 11.** Balance DQO y TN. Decantación primaria, nitrificación-desnitrificación y digestión anaerobia.



**FIGURA 12.** Balance DQO y TN. Proceso Pronox, nitrificación-desnitrificación, digestión anaerobia de lodos y Anammox en línea de retornos.



materia orgánica en desnitrificación, conlleva un ahorro de 26,5% en el consumo eléctrico del tratamiento biológico, un incremento de un 15,7% en la producción de energía eléctrica en cogeneración y un ahorro total del consumo de energía eléctrica en la EDAR del 40%.

### 5.4. REDUCCIÓN DEL VOLUMEN DE LOS REACTORES DEL PROCESO DE LODOS ACTIVOS

Tal y como se indica en la **Tabla 5**, la implementación del proceso Pronox en sustitución de la decantación primaria comporta una reducción del volumen de los reactores de lodos activos del 36%. Este dato no solo es importante a nivel de coste de realización de la obra, sino que tiene una gran valor en reducción del

espacio ocupado. Los volúmenes de digestión anaerobia se incrementan un 11%, pasando de 4.702 m<sup>3</sup> a 5.228 m<sup>3</sup>.

## 6. CONCLUSIONES

La implementación del proceso Pronox como alternativa a la decantación primaria, antes de la unidad de lodos activos, con nitrificación-desnitrificación, permite una reducción del consumo eléctrico total de la EDAR de hasta un 40% (según datos en la EDAR de estudio), aplicando una instalación de eliminación de nitrógeno, tipo Anammox, en la línea de retorno de centrífugas.

En este caso, la producción de lodos deshidratados no presenta variaciones importantes. En cambio, el volumen del reactor de lodos acti-



TABLA 4

**AHORRO DEL CONSUMO ELÉCTRICO TOTAL DE LA EDAR.**

<b>EDAR</b> Tratamiento biológico Eliminación de nutrientes Digestión anaerobia - cogeneración Desodorización, ventilación y climatización Influyente: DQO 725; SS 398; VSS 321; DBO <sub>5</sub> 334; TKN 74	<b>EDAR</b> Decantación primaria Nitrificación - desnitrificación Digestión anaerobia  (kWh/m <sup>3</sup> )	<b>EDAR</b> Proceso Pronox Nitrificación - desnitrificación Digestión anaerobia Anammox  (kWh/m <sup>3</sup> )
Bombeo de elevación de agua bruta	0,060	0,060
Pretratamiento	0,007	0,007
Decantación primaria y bombeos	0,005	0,005
HRAS oxidación DQO	0,000	0,015
HRAS bombeo recirculación	0,000	0,013
Tratamiento biológico, materia carbonosa	0,189	0,108
Tratamiento biológico, nitrificación - desnitrificación	0,089	0,067
Bombeo lodos activos	0,035	0,035
Anammox	0,000	0,020
Manejo de lodos y digestión anaerobia	0,062	0,062
Equipos de deshidratación	0,056	0,056
Servicios auxiliares	0,012	0,012
Iluminación	0,030	0,030
Desodorización, ventilación y climatización	0,035	0,035
<b>Consumo eléctrico específico total</b>	<b>0,580</b>	<b>0,525</b>
<b>Consumo eléctrico específico total (kWh/kg DQO)</b>	<b>0,800</b>	<b>0,724</b>
Energía eléctrica específica cogenerada	0,318	0,368
<b>Consumo neto eléctrico específico</b>	<b>0,262</b>	<b>0,157</b>
Porcentaje de energía generada	54,8%	70,1%
<b>Ahorro de energía eléctrica</b>	<b>0,0%</b>	<b>40,1%</b>

» La implementación del proceso Pronox, conjuntamente con el proceso Anammox, en la línea de retornos a fin de reducir la demanda de materia orgánica en desnitrificación, conlleva un ahorro de 26,5% en el consumo eléctrico del tratamiento biológico, un incremento de un 15,7% en la producción de energía eléctrica en cogeneración y un ahorro total del consumo de energía eléctrica en la EDAR del 40%. Se convierte así en una alternativa a la decantación primaria



TABLA 5

VOLUMEN DE LOS REACTORES DE PROCESO DE LA EDAR (24.000 M<sup>3</sup>/D).

EDAR 24.000 m <sup>3</sup> /d	Decantación primaria	Pronox + Anammox
R. Pronox m <sup>3</sup>		1.000
R. anóxicos m <sup>3</sup>	12.000	6.600
R. óxicos m <sup>3</sup>	9.000	5.550
Anammox m <sup>3</sup>		230
Total m <sup>3</sup>	21.000	13.380
<b>Disminución volumen</b>		<b>36%</b>

vos conlleva una reducción del 36%, mientras que el volumen de la digestión anaeróbica tiene un incremento del orden del 10%.

Los valores antes indicados están asociados a una ratio DQO/TKN influente. Una disminución de esta ratio obligaría a trabajar con un menor rendimiento de eliminación de DQO y, en consecuencia, de recuperación de energía.

## 7. AGRADECIMIENTOS

GS Inima Environment agradece al Consorci Besòs-Tordera que permitiera instalar la planta piloto en la EDAR de Montornès y su total colaboración durante los trabajos de operación, y de forma muy especial al personal de operación de la EDAR. También agradece al Centro para el Desarrollo Tecnológico Industrial (CDTI) la financiación del proyecto.

### Bibliografía

- [1] APHA (2005). Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. American Public Health Association (APHA), American Water Works Association (AWWA) & Water Environment Federation (WEF), 21st ed. Washington DC.
- [2] Christian, S.J.; Grant, S.R.; Singh, K.S.; Landine, R.C. (2008). Performance of a high-rate/high-shear activated sludge bioreactor treating biodegradable wastewater. *Environ. Technol.*, núm. 29, págs. 837-846. <https://doi.org/10.1080/09593330801987616>.
- [3] Constantine, T.; Houweling, D.; Kraemer, J. (2012). Doing the two-step - Reduced energy consumption sparks renewed interest in multistage biological treatment. *WEFTEC 2012*. <https://doi.org/10.2175/193864712811709652>.
- [4] Ding, H.B.; Doyle, M.; Erdogan, A.; Wikramanayake, R.; Gallagher, P. (2015). Innovative use of dissolved air flotation with biosorption as primary treatment to approach energy neutrality in WWTPs. *Water Pract. Technol.*, núm. 10, págs. 133-142. <https://doi.org/10.2166/wpt.2015.015>.
- [5] Hauduc, H.; Wadhawan, T.; Takacs, I.; Al-Omari, A.; De Clippelleir, H.; Wett, B.; Jiménez, J.; Rahman, A. (2019). Colloids, flocculation and carbon capture - A comprehensive plant-wide model. *Water Sci. Technol.*, núm. 79, págs. 15-25. <https://doi.org/10.2166/wst.2018.454>.
- [6] Heinke, G.W.; Tay, A.J.H.; Qaz, M.A. (1980). Effects of chemical addition on the performance of settling tanks on JSTOR. *Water Pollut. Control Fed.*, núm. 52, págs. 2.946-2.954.
- [7] Huang, J.C.; Li, L. (2000). Enhanced primary wastewater treatment by sludge recycling. *J. Environ. Sci. Heal. - Part A Toxic/Hazardous Subst. Environ. Eng.*, núm. 35, págs. 123-145. <https://doi.org/10.1080/10934520009376958>.
- [8] Jiménez, J.; Miller, M.; Bott, C.; Murthy, S.; De Clippelleir, H.; Wett, B. (2015). High-rate activated sludge system for carbon management - Evaluation of crucial process mechanisms and design parameters. *Water Res.* núm. 87, págs. 476-482. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2015.07.032>.
- [9] Li, L. (1998). Improvement of primary wastewater treatment by sludge recycling. The Hong Kong University of Science and Technology, Clear Water Bay, Kowloon, Hong Kong. <https://doi.org/10.14711/thesis-b583777>.
- [10] Modin, O.; Alam, S.S.; Persson, F.; Wilén, B.M. (2015). Sorption and release of organics by primary, anaerobic, and aerobic activated sludge mixed with raw municipal wastewater. *PLoS One* 10. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0119371>.
- [11] Nogaj, T.; Randall, A.; Jiménez, J.; Takacs, I.; Bott, C.; Miller, M.; Murthy, S.; Wett, B. (2015). Modeling of organic substrate transformation in the high-rate activated sludge process. *Water Sci. Technol.*, núm. 71, págs. 971-979. <https://doi.org/10.2166/wst.2015.051>.
- [12] Nowak, O. (2003). Benchmarks for the energy demand of nutrient removal plants, in: *Water Science and Technology*. IWA Publishing, págs. 125-132. <https://doi.org/10.2166/wst.2003.0637>.
- [13] Rahman, A.; De Clippelleir, H.; Thomas, W.; Jiménez, J.A.; Wett, B.; Al-Omari, A.; Murthy, S.; Riffat, R.; Bott, C. (2019). A-stage and high-rate contact-stabilization performance comparison for carbon and nutrient redirection from high-strength municipal wastewater. *Chem. Eng. J.* núm. 357, págs. 737-749. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.09.206>.
- [14] Rogalla, F.; Field, A.; Sumner, B.; Kolarik, J. (2004). Cost effective treatment technologies for temperate wastewaters. In: *CIWEM 2nd National Conference*. Wakefield, págs. 29-40.
- [15] Ross, R.D.; Crawford, G.V. (1985). Influence of waste activated sludge on primary clarifier operation. *J. Water Pollut. Control Fed.*, núm. 57, págs. 1.022-1026.
- [16] Rosso, D. (2019). Carbon capture and management strategies for energy harvest from wastewater. The Water Research Foundation.
- [17] Wett, B.; Buchauer, K.; Fimml, C. (2007). Energy self-sufficiency as a feasible concept for wastewater treatment systems.
- [18] Yeshi, C.; Leng, L.C.; Li, L.; Yingjie, L.; Seng, L.K.; Ghani, Y.A.; Long, W.Y. (2014). Mass flow and energy efficiency in a large water reclamation plant in Singapore. *J. Water Reuse Desalin.* núm. 3, págs. 402-409. <https://doi.org/10.2166/wrd.2013.012>.
- [19] Yetis, U.; Tarlan, E. (2002). Improvement of primary settling performance with activated sludge. *Environ. Technol.*, núm. 23, págs. 363-372. <https://doi.org/10.1080/09593332508618395>.

Más artículos en:

[www.tecnoaqua.es](http://www.tecnoaqua.es)