Reducción del consumo energético y de la producción de lodos mediante reactor anerobio en la EDAR Blanca de Murcia

En el marco del Proyecto Life- Ramsés, liderado por Acciona Agua y Esamur, se ha diseñado, construido y operado un reactor anaerobio tipo UASB como tratamiento primario en una estación depuradora de aguas residuales (EDAR) convencional de la Región de Murcia (EDAR Blanca). Este trabajo evalúa los resultados obtenidos de la primera experiencia *full scale* en Europa de tratamiento anaerobio operado a temperatura ambiente en la línea principal de agua de esta depuradora. La nueva configuración ha supuesto una reducción considerable de la producción de lodos y del consumo energético. Ante la actual situación de escasez de agua, es imprescindible aprovechar todos los posibles recursos disponibles. El Proyecto Life Ramses busca la mejora de la calidad del agua regenerada mediante la aplicación de novedosas técnicas anaerobias de depuración con relleno plástico en la línea principal de una EDAR, reduciendo los costes de tratamiento y aumentando el volumen de agua para riego en agricultura.

Palabras clave
UASB, energía, metano, sulfatos, DQO, lodos.

REDUCTION OF ENERGY CONSUMPTION AND SLUDGE PRODUCTION BY ANAEROBIC TREATMENT IN BLANCA'S WWTP (MURCIA, SPAIN)

Within Life-Ramses Project, led by Acciona Agua and Esamur, an anaerobic UASB reactor has been designed, built and operated as a primary treatment in a conventional urban wastewater treatment plant (Blanca WWTP) in the Region of Murcia.The results obtained from the first full scale experience in Europe of anaerobic treatment operated at room temperature on the main water line of an urban WWTP in Blanca are evaluated in this article. The new configuration has led to a considerable reduction in sludge production and energy consumption. Given the current situation of deficit of water, it is essential to use all possible resources available. The Life Ramses project will search to improve the quality of reclaimed water by applying new anaerobic purification techniques with plastic supports on the principal line of a WWTP, reducing treatment costs and increasing the volume of irrigation water in agriculture.

Keywords
UASB, energy, methane, sulfates, COD, sludge.

Pedro Simón Andreu
director técnico de la Entidad Regional de Saneamiento y Depuración de aguas residuales de la Región de Murcia (Esamur)

Carlos Lardín Mifsut
técnico de Explotación de la Entidad Regional de Saneamiento y Depuración de Murcia (Esamur)

Yolanda Solano Martos
jefe de planta EDAR Blanca, Acciona Agua

Amalia García del Real Torralva
responsable de explotación de EDAR Vega Alta, Acciona Agua

Paula Pérez Sánchez
responsable de Transferencia Tecnológica en Acciona Agua

Joan Marc Ponsoda Mauri
ingeniero de Procesos de O&M de Depuración en Acciona Agua

Amador Rancaño Pérez
responsable de O&M de Depuración de Acciona Agua

1. INTRODUCCIÓN

Los tratamientos anaerobios y aerobios constituyen las dos grandes alternativas de depuración biológica de las aguas residuales y los residuos orgánicos. La exigencia de altas calidades del agua tratada por parte de las autoridades competentes ha llevado al uso de tratamientos aerobios en la línea de agua de la gran mayoría de las estaciones depuradoras de agua residual (EDAR) urbanas en Europa, relegando el uso de tratamientos anaerobios a la estabilización de fangos en plantas de mediano y gran tamaño.

Desde principios del siglo XXI la creciente preocupación por la sostenibilidad de las instalaciones de tratamiento de aguas y el aumento de los costes de la energía eléctrica han provocado que se recupere el interés por las tecnologías anaerobias, caracterizadas por consumos energéticos y tasas de producción de fangos mucho menores a los asociados a los tratamientos aerobios.

El tratamiento anaerobio se basa en la digestión de la materia orgánica por parte de microorganismos presentes en medios húmedos que no contienen oxígeno, obteniéndose, como resultado de esta degradación, metano, dióxido de carbono, sulfuro de hidrógeno, amoníaco y otros compuestos. El hecho de no necesitar un sistema de aireación junto a la generación de biogás, que puede emplearse con finalidades energéticas, hacen que el tratamiento anaerobio resulte energéticamente muy favorable.

En las últimas décadas el desarrollo de sistemas de tratamiento anaerobio ha permitido contar con tecnologías fiables y aceptadas. Entre los procesos anaerobios avanzados destaca el UASB (*upflow anaerobic sludge blanket*), desarrollado en la década de los setenta. Este reactor ha sobresalido debido a la alta calidad del efluente producido y al relativo bajo coste del tratamiento, siendo ampliamente aplicado al tratamiento de aguas residuales domésticas en países tropicales y aguas complejas con alta carga orgánica.

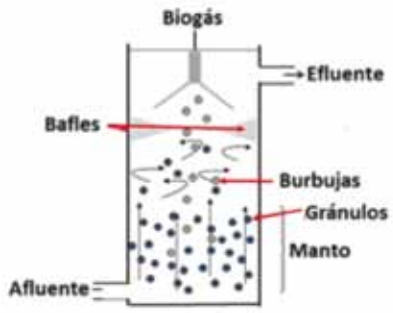
En los reactores UASB el agua residual se introduce por la parte inferior del digestor y fluye en sentido ascendente a través de un manto o cama de fango constituido por gránulos o partículas formadas biológicamente. El tratamiento se produce al entrar en contacto el agua residual y las partículas (**Figura 1**).

El biogás producido provoca una circulación interior, que colabora a la formación y mantenimiento de los gránulos, removiendo el manto de fangos y permitiendo el intercambio de estos con el agua residual. Parte de este gas se adhiere a las partículas biológicas y, tanto el biogás libre como las partículas a las que se ha adherido, ascienden hacia la parte superior del digestor. Allí se produce la liberación del biogás adherido a las partículas, al entrar estas en contacto con unos deflectores desgasificadores. Las partículas desgasificadas vuelven a caer a la zona inferior del digestor, y el biogás se captura en una bóveda de recogida de gases instalada en la parte superior del reactor.

El agua residual tratada, que contiene todavía sólidos en suspensión y algunos gránulos biológicos, pasa a una cámara de sedimentación, donde se separan estos sólidos y se reconducen a la superficie del manto de fango a través del sistema de deflectores. Finalmente, el agua abandona el reactor por rebose.

El reactor UASB representa un gran avance en el tratamiento anaerobio, debido a que puede tolerar cargas orgánicas altas en comparación a otros sistemas. Además, tiene la ventaja de que el lodo floculento, después de un tiempo y bajo determinadas circunstancias, puede convertirse en lodo granular, que presenta mayor contacto con el agua residual, mayor estabilidad y acepta mayor velocidad de carga orgánica.

FIGURA 1. Esquema de funcionamiento de un reactor UASB. Adaptado de [8].



Aunque el tratamiento de aguas residuales mediante reactores UASB es profusamente empleando en regiones tropicales, su aplicación en zonas de temperaturas bajas o moderadas es también posible. Varios estudios han demostrado que el tratamiento anaerobio de aguas residuales urbanas es una opción factible y atractiva en climas suaves [1-3].

Las limitaciones de los reactores UASB, así como de la mayoría de los procesos anaerobios, se encuentran en la calidad del efluente final, que no suele cumplir con las condiciones legales de vertido. Por lo general, la DBO_5 del efluente de un proceso anaerobio de tratamiento de aguas urbanas varía entre 60 y 150 ppm [4]. En el caso de la DQO total y los sólidos suspendidos totales, los valores se sitúan 100-200 y 50-100 ppm, respectivamente [5]. En cuanto al N y P, la eliminación de nutrientes durante el tratamiento de aguas residuales urbanas con UASB es baja o nula, ya que el nitrógeno y el fósforo orgánico se hidrolizan en amonio o fosfato.

En el marco del Proyecto Life Ramses, liderado por Acciona Agua y Esamur, se ha diseñado, construido y operado un reactor anaerobio tipo UASB como tratamiento primario en una EDAR urbana convencional de la Región de Murcia (EDAR Blanca). Con ello se ha reducido significativamente el consumo energético y la producción de lodos de la instalación. El tratamiento secundario convencional por fangos activados en aireación prolongada existente funciona como postratamiento, permitiendo así que la calidad del efluente final se mantenga en los parámetros exigidos con todas las garantías.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

La EDAR de Blanca (Murcia) se diseñó para un caudal medio diario de 2.000 m^3 y 13.333 habitantes equivalentes (he). En la actualidad, la planta trata un caudal medio de 950 m^3/día, siendo las principales características del agua bruta las indicadas en la **Tabla 1**.

La EDAR comprende un pretratamiento con desbaste y desarenado-desengrasado, homogeneización, tratamiento secundario de fangos activados en aireación prolongada con reactores tipo *carrousel*, y decantación secundaria y tratamiento terciario compuesto por fisicoquímico, decantación lamelar, filtración en arena y desinfección mediante radiación ultravioleta. La línea de fangos se compone de un espesamiento por gravedad y deshidratación mediante decantadores centrífugos.

Durante varios meses al año el agua bruta presenta un elevado componente industrial, debido a que se reciben efluentes procedentes de la industria alimentaria. Estos vertidos se caracterizan por elevadas cargas orgánicas con carácter biodegradable, que aumentan el componente soluble de DQO en el influente. Este hecho, junto a que las temperaturas medias del agua se mantienen en valores moderados durante todo el año, hace que la EDAR sea apropiada para poder implementar un tratamiento anaerobio en la línea de agua, que en cualquier

TABLA 1

PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS DEL AGUA BRUTA EN LA EDAR BLANCA.

Características del agua bruta	
DQO	840 mg O_2/L
DBO	536 mg O_2/L
SS	252 mg/L
NTK	72 mg N/L
SO_4	326 mg/L
Temperatura	20 ºC

FIGURA 2. Diagrama de proceso del tratamiento anaerobio. Línea de agua.

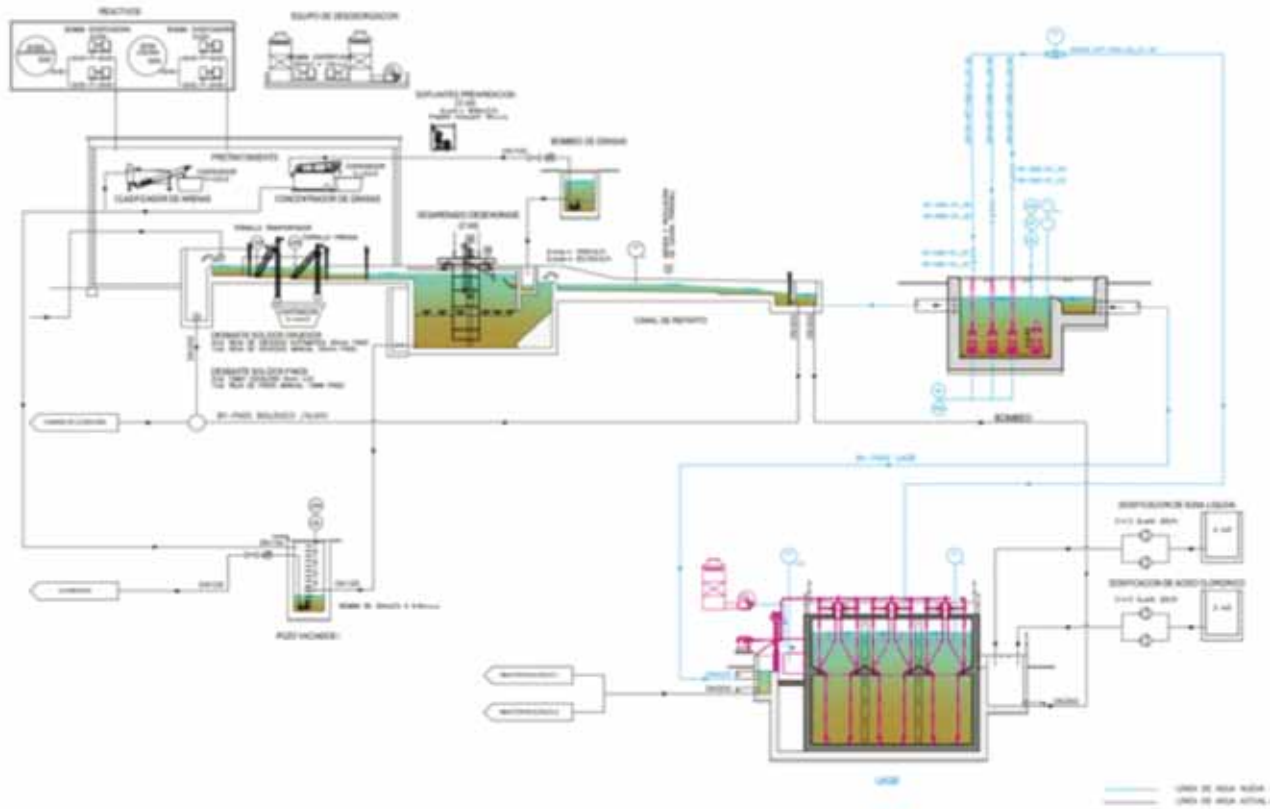


TABLA 2

PRINCIPALES PARÁMETROS DE DISEÑO DEL REACTOR UASB.	
Características del reactor anaerobio (I)	
Número de reactores	1
Altura máxima útil del digestor (m)	5,75 m
Borde libre en el digestor (m)	0,50 m
Coeficiente de producción de sólidos	0,18 kg SST/kg DQO)
Concentración de fangos en exceso	4%
Tiempo de retención hidráulico	8,00 h
Volumen total del tanque	217 m^3
Área total requerida	38 m^2

TABLA 3

PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS DE LOS SEPARADORES GLS.	
Características del reactor anaerobio (II)	
Ancho del canal colector de gas	2 m
Espesor de paredes GLS (m)	0,30 m
Profundidad zona de clarificación (m)	0,12 m
Borde libre (m)	1,50 m
Abertura paso zona clarificación (m)	0,50 m
Ángulo de la pared del colector GLS (º)	0,50 º
Ancho de cada abertura doble (m)	1 m
Largo de cada compartimento (m)	1 m
Ancho separadores GLS (m)	2,68 m
Tasa de liberación de biogás	4,73 $m^3/m^2 \cdot h$)

caso ha de ser seguido por un tratamiento de fangos activos para poder cumplir con las exigencias de calidad del efluente.

El tratamiento seleccionado es un reactor anaerobio de flujo ascendente que se ha diseñado para un caudal medio de 650 m^3/día, según los parámetros indicados en la **Tabla 2**, con objeto de tratar parte del caudal que llega a la EDAR eliminando parte de la materia orgánica y sólidos en suspensión.

El diagrama de proceso de la instalación se muestra en la **Figura 2**. El agua llega del pretratamiento a un nuevo pozo de bombeo, donde se impulsa parte del caudal al reactor anaerobio. El caudal que no es bombeado pasa por vertedero al *bypass* hasta la arqueta de salida del selector existente en la EDAR, para continuar al tratamiento biológico de fangos activos.

El agua bombeada llega al canal de reparto del reactor anaerobio, donde se reparte uniformemente a través de todo el tanque mediante un sistema de distribución circular que, a través de tuberías de 80 mm, conduce el agua a tratar al fondo del reactor, desde donde asciende. El agua pasa a través del manto de lodo formado en el fondo del tanque hasta llegar a la zona de separación.

El separador de tres fases (GLS) se sitúa por encima de esta capa para separar las partículas sólidas y permitir que el líquido y el gas abandonen el reactor. Sus principales características se recogen en la **Tabla 3**.

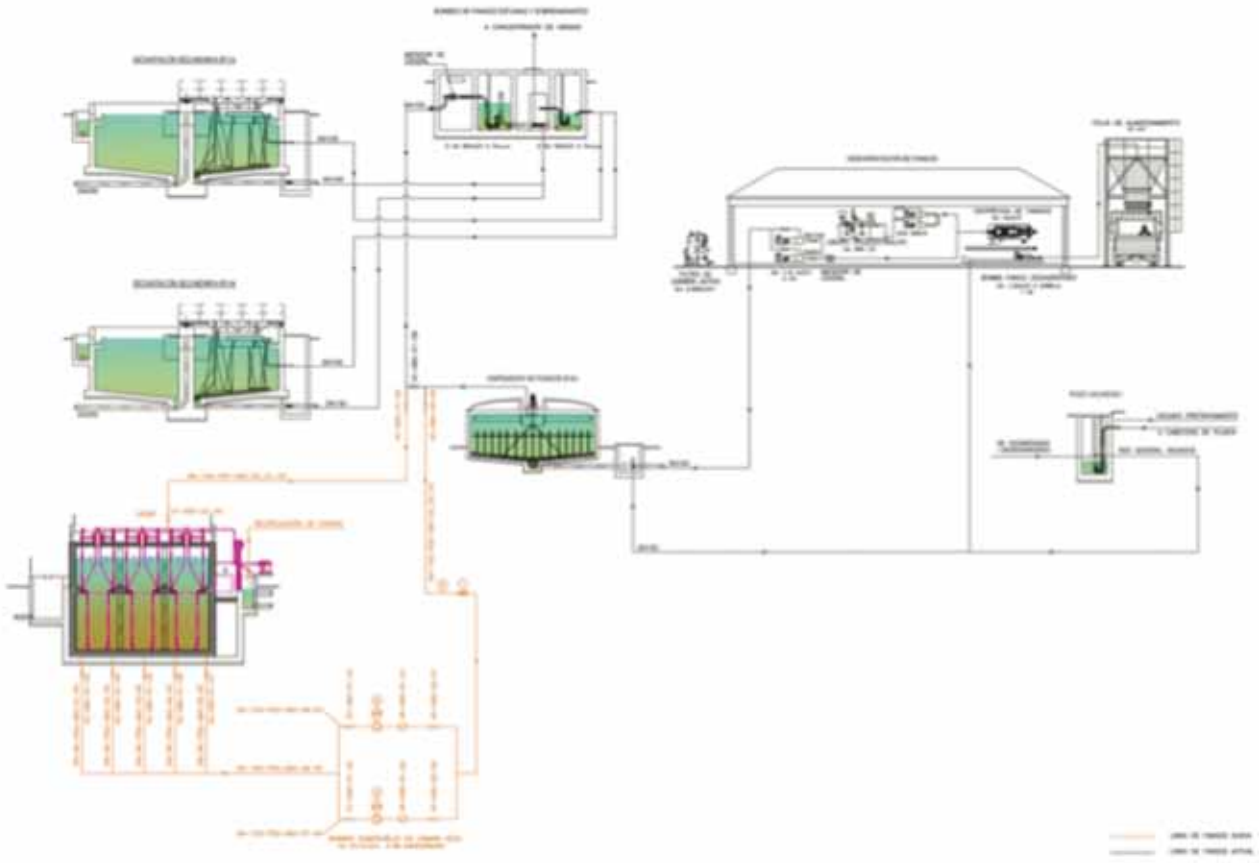
El objetivo principal del separador GLS es facilitar el retorno de sólidos sin la ayuda de energías externas o dispositivos de control. El separador garantiza suficiente interface gas-agua dentro de la cúpula de gas, suficiente área de sedimentación fuera de la cúpula para controlar la tasa de desbordamiento de la superficie y suficiente anchura en la abertura de la zona inferior para evitar turbulencias en la zona de entrada al sedimentador.

El reactor tiene múltiples campanas de gas para la separación de biogás. Como resultado, las numerosas interfaces de gas/agua reducen en gran medida las turbulencias, lo que hace posible las altas tasas de carga de 10-15 kg/m^3.

El gas generado se recoge y envía a una antorcha para su posterior combustión. A continuación, el agua tratada se recoge a través de varios canales mediante vertederos triangulares distribuidos en toda el área de descarga.

Los fangos en exceso son enviados al espesador, localizado aproximadamente a unos 115 m de distancia, realizando un injerto de la actual tubería de envío de fangos a espesador. La tubería colocada desde el injerto tiene una distancia

FIGURA 3. Diagrama de proceso del tratamiento anaerobio. Línea de fango.



aproximada de 94 m, y un diámetro de DN100. El envío se realiza mediante dos bombas sumergibles en cámara seca de 0,5-2 m^3/h. Asimismo, se permite el envío de los fangos en exceso del tratamiento secundario de la EDAR al reactor anaerobio. El diagrama de proceso de la línea de fangos se muestra en la **Figura 3**.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. RENDIMIENTOS DE DEPURACIÓN

La planta comenzó a operar a mediados de octubre de 2017, tratando un caudal medio de 520 m^3/h, correspondiente a un tiempo de retención de 10 h. No se realizó ningún inóculo y únicamente se alimentó con el agua bruta recibida en la EDAR. El resto de agua bruta se procesó de forma habitual en el tratamiento biológico de fangos activados junto al efluente del tratamiento anaerobio.

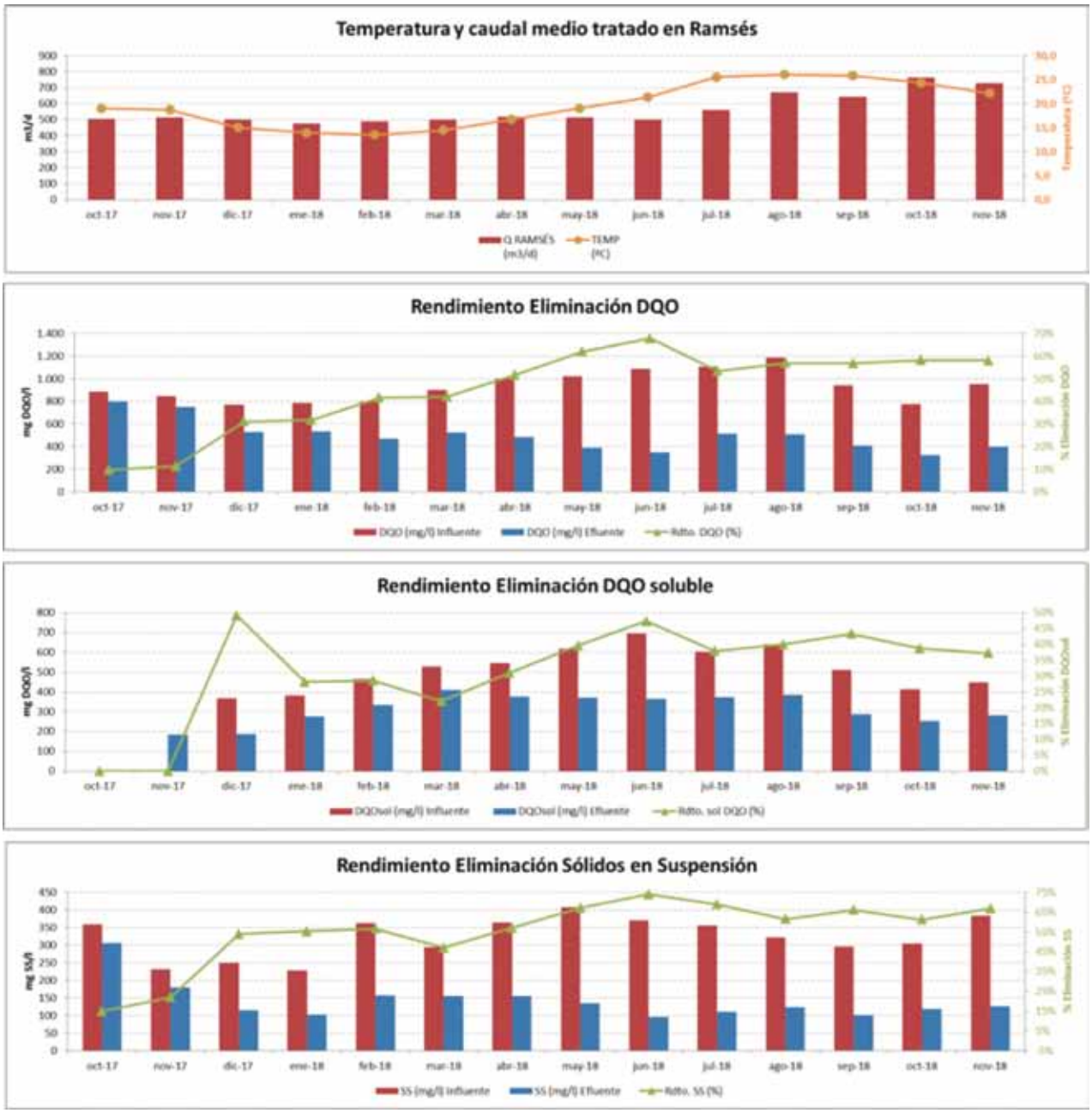
La puesta en marcha del reactor se realizó sin incidencias reseñables, y en un período de aproximadamente dos meses se comenzaron a obtener rendimientos en la eliminación de DQO del 30% y de SS del 50%, a pesar de registrarse bajas temperaturas en el reactor (15 °C). Los valores medios de los principales parámetros de operación del nuevo tratamiento se indican en la **Tabla 4**.

TABLA 4

PARÁMETROS MEDIOS DE OPERACIÓN DEL REACTOR ANAEROBIO.

Parámetros de operación medios	
Caudal medio	520 m^3/d
Temperatura	19,4 ºC
TRH	10,0 h
Velocidad ascensional	0,57 m^3/m^2/d
Carga orgánica	2,5 kg DQO/m^3/d
AGV	342 mg $CaCO_3$/L
TAC	1.251 $CaCO_3$/L
Carga orgánica específica	0,35 kg DQO/kg SSV/d

FIGURA 4. Temperatura, caudal y rendimientos depurativos del tratamiento anaerobio durante la operación del sistema.



Durante los meses sucesivos, las tasas de eliminación de DQO total, DQO soluble y SS crecieron de forma prácticamente lineal con la temperatura, hasta los 19 ºC, momento en el cual los rendimientos se estabilizan en valores medios del 67% en eliminación de SS, 61% de DQO total y 40% de DQO soluble (**Figura 4**).

El reactor mostró una gran estabilidad durante todos los meses de operación, con un pH de trabajo de 7,5 y relación AGV/TAC prácticamente constante, aunque con un ligero ascenso de ambos valores durante todo el año.

3.2. PRODUCCIÓN DE FANGOS Y BIOGÁS

La producción de fangos tiende a estabilizarse a partir del mes de marzo, momento a partir del cual se mantiene en valores que oscilan entre 70 y 120 g SS/kg DQO eliminada (**Figura 5**), inferior a valores típicos en UASB con aguas urbanas (de 140-160 g/kg DQO eliminada [6]) hasta septiembre, cuando de nuevo aumenta hasta 150 g SS/kg DQO. Además, es de reseñar que el fango purgado presenta una gran estabilización (62% de STV) frente a los valores habituales en el licor mezcla del tratamiento secundario de la EDAR (78% de STV).

FIGURA 5. Evolución de la producción de fangos y de biogás relacionadas con el rendimiento de eliminación de DQO en el tratamiento anaerobio.

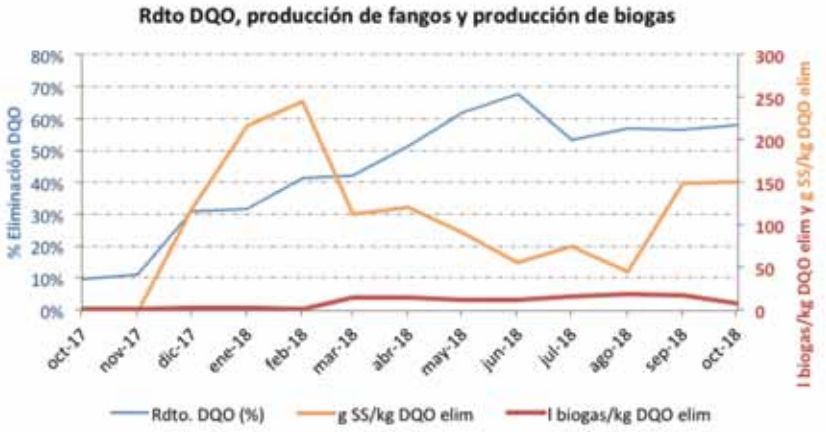
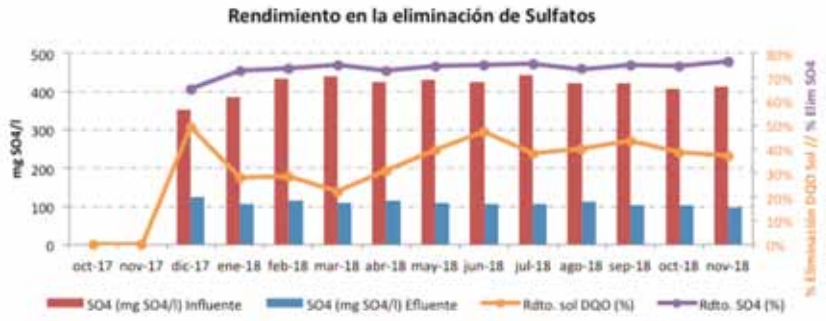


FIGURA 6. Evolución del rendimiento de eliminación de sulfatos y DQO en el tratamiento anaerobio.



La producción de biogás no se corresponde con los rendimientos de eliminación de materia orgánica obtenidos. A partir de febrero se comienzan a registrar ciertos caudales de biogás con contenido en metano de 50-75%, pero con una tasa de producción muy baja: de 10-15 L biogás/kg DQO eliminada (valores normales de 211 L/kg DQO eliminada [7] .

Las bajas tasas de producción de biogás se relacionaron inmediatamente con el contenido en sulfatos del agua residual. Los sulfatos presentes en el agua pueden ser empleados por bacterias sulfatoreductoras como aceptores de electrones durante la oxidación de materia orgánica [8]. Este tipo de bacterias está conformado por un numeroso grupo de microorganismos capaz de utilizar un amplio rango de sustratos, y su presencia puede cambiar completamente las secuencias metabólicas típicas de los procesos digestión anaerobia, pues muchos de los productos intermedios formados pueden ser empleados por bacterias sulfatoreductoras que compiten con los grupos acetogénicos y metanogénicos por el sustrato disponible. Finalmente, por tanto, pueden existir dos productos finales del proceso de digestión: metano (mediante metanogénesis) o sulfuros (mediante reducción de sulfatos). Las proporciones de uno u otro elemento dependen del ratio DQO/SO_4^{2-} del agua residual a tratar. Se considera que relaciones DQO/SO_4^{2-} menores a 7 pueden causar, incluso, inhibición de biomasa metanogénica. Los valores medios de DQO y SO_4^{2-} registrados durante 2018 en la EDAR suponen un ratio DQO/SO_4^{2-} de 2,3.

En la EDAR Blanca se han registrado valores de sulfatos en el agua bruta de 350 a 450 mg SO_4^{2-}/L, siendo reducidos aproximadamente un 70% de los mismos en el tratamiento anaerobio (**Figura 6**). La DQO utilizada en la reducción del sulfato presente en el agua residual puede estimarse según la **Ecuación 1**:

$$S^{2-} + 2O_2 \leftrightarrow SO_4^{2-} \qquad (\textbf{Ec. 1})$$

donde 1 mol de SO_4^{2-} requiere de 2 moles de oxígeno para su reducción, lo que supone una tasa de 1,5 g SO_4^{2-}/g DQO. Esto puede traducirse en que una reducción de 315 g SO_4^{2-}/L (cantidad media de sulfatos eliminados) supone el consumo de 210 mg DQO/L, que representa el 40% de la DQO total eliminada en el tratamiento anaerobio.

Los sulfuros generados quedan disueltos en el agua efluente, o bien desprendidos como H_2S en el biogás generado, que presentó unas concentraciones de entre 450 y 700 ppm. La cantidad de sulfuro desprendido con el biogás depende, fundamentalmente, de la cantidad de biogás generado, que en este caso es escasa, por lo que la mayoría de los sulfuros quedan disueltos en el agua. Al registrarse valores de pH de 7 en el reactor, puede estimarse que aproximadamente el 50% de los sulfuros disueltos estarían en la forma H_2S (forma más tóxica para la biomasa metanogénica), mientras que el resto estarían como HS^-.

Con el fin de comprobar los balances de azufre en el sistema, se han comenzado a analizar recientemente los sulfuros disueltos en efluente, aunque estos datos no se han incluido entre los mostrados en el presente artículo. En cualquier ca-

so, la alta cantidad de sulfatos en el agua bruta representa los siguientes problemas para el sistema:

- Los sulfuros que quedan disueltos en el agua ejercen una demanda de oxígeno en el posterior tratamiento biológico equivalente a 2 g O_2/g S^{2-}.
- La presencia de H_2S disuelto en el agua puede provocar inhibición de la biomasa metanogénica.
- El alto contenido de H_2S en el biogás dificulta su recuperación posterior.

Otra razón que puede explicar las bajas tasas de biogás obtenidas es la presencia de CH_4 disuelto en efluente del tratamiento anaerobio. En reactores UASB, una parte del CH_4 producido permanece siempre disuelto en efluente. Esta cantidad es variable en función de la temperatura, aunque en reactores UASB a baja temperatura, como es el caso en estudio, es normal que hasta el 50% del metano producido quede disuelto en el agua [9].

3.3. MEJORA GLOBAL DE LA INSTALACIÓN

El análisis comparativo de la instalación con el nuevo tratamiento anaerobio respecto a la situación inicial se efectúa tomando los datos de operación de la EDAR de los últimos tres años y considerando la nueva etapa a partir de enero de 2018, con el reactor UASB estabilizado.

El consumo energético específico global de la planta se ha reducido en un 15,6% durante el período de operación del nuevo tratamiento anaerobio, pasando de 0,99 kWh/m³ a 0,835 kWh/m³ (**Figura 7**). Aunque la reducción registrada es significativa, no se corresponde con la que cabría esperar con un rendimiento de eliminación de DQO en la etapa anaerobia del 61%. Esto ocurre probablemente por dos motivos:

FIGURA 7. Evolución del consumo energético de la EDAR de 2015 a 2018.

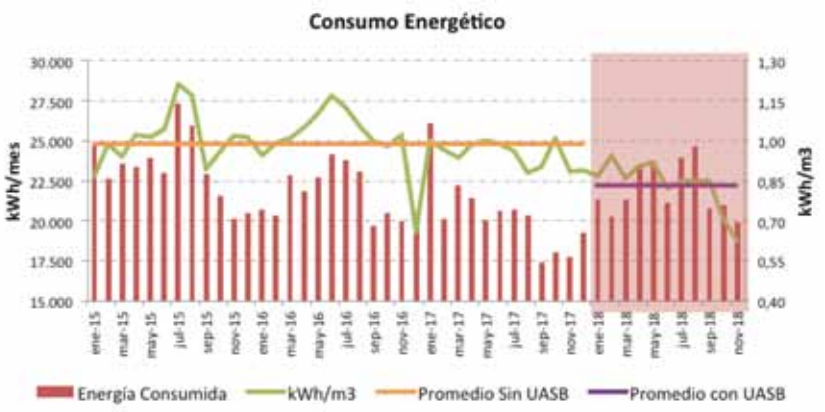


FIGURA 8. Evolución de la producción de lodos y sequedad en la EDAR de 2015 a 2018.

- Existe una interferencia importante en los datos de consumo energético del sistema de aireación durante el período analizado, ya que en 2018 se ha implementado una nueva filosofía de control del proceso en el tratamiento secundario que ha supuesto un incremento sustancial del consumo específico de esta etapa, que no tiene ninguna relación con el funcionamiento del nuevo reactor anaerobio. En la actualidad se trabaja en optimizar dicha filosofía de control, con objetivo de poder evaluar la reducción neta del consumo derivada del tratamiento anaerobio.
- El otro aspecto que justifica que el ahorro en el consumo energético sea menor al esperado es la presencia de cantidades importantes de sulfuros en el efluente del tratamiento anaerobio, que, como se ha explicado, ejercen una demanda de oxígeno disuelto adicional respecto al asociado a la materia orgánica y nitrógeno amoniacal a oxidar.

La producción de fangos de la EDAR ha disminuido durante el período de funcionamiento del tratamiento anaerobio en un 31,2 % en relación al promedio registrado en planta desde 2015 (**Figura 8**), pasando de evacuarse 2.230 g MH/m³ a 1.534 g MH/m³. Esto equivale aproximadamente a 144 toneladas

» El proyecto Life Ramses ha conseguido llevar a cabo el diseño y construcción de un reactor UASB a escala industrial en la línea de una depuradora urbana convencional (EDAR Blanca, en Murcia), operando con éxito y de forma estable a temperaturas entre 15 y 26 ºC durante más de un año. A pesar de no producirse granulación del fango y de registrar bajas tasas de producción de biogás, que penalizan la mezcla dentro del reactor, se han alcanzado rendimientos medios de eliminación de DQO del 61% y de SS del 67%

menos de lodo evacuadas de la planta al año. Dicha reducción se debe, por un lado, al menor coeficiente de producción de fangos del reactor anaerobio con la materia orgánica eliminada en esta etapa y, por el otro, al aumento de la sequedad obtenida en el fango deshidratado. Al conseguir un lodo mucho más mineralizado que con el tratamiento en aireación prolongada, se ha aumentado la sequedad del fango de una media del 16,9% a un 18,8%, empleando consumos de polielectrolito inferiores a los existentes hasta el momento.

4. CONCLUSIONES

Se ha conseguido llevar a cabo el diseño y construcción de un reactor UASB a escala industrial en la línea de agua de una EDAR urbana, y se ha operado el mismo con éxito y de forma estable a temperaturas entre 15 y 26 ºC durante más de un año.

A pesar de no producirse granulación del fango y de registrar bajas tasas de producción de biogás, que penalizan la mezcla dentro del reactor, se han alcanzado rendimientos medios de eliminación de DQO del 61% y de SS del 67%.

Procesando un 55% del caudal influente a la EDAR Blanca en el reactor anaerobio, se ha conseguido una reducción del 15,6% del consumo energético global de la planta. No obstante, se considera que el ahorro asociado a la operación del reactor es realmente mayor, ya que durante el mismo período se han llevado a cabo en la instalación otras actuaciones que han supuesto aumentos del consumo energético de algunos procesos unitarios.

La producción de fangos deshidratados se ha reducido en un 31,2%, gracias a una menor producción específica de fangos y a la mejora de su sequedad final, que ha podido aumentarse debido a la mayor estabilización del fango procedente del reactor anaerobio.

La alta cantidad de sulfatos presentes en el agua bruta incide negativamente en la producción de metano, debido a la competencia ejercida por la biomasa sulfatoreductora con la metanogénica. Además, aunque no se han comprobado con exactitud los balances de azufre del sistema, es seguro que parte de las formas reducidas de los SO_4^{2-} quedan disueltas en el efluente del tratamiento anaerobio, ejerciendo una importante demanda de oxígeno en el posterior tratamiento biológico y penalizando así la eficiencia energética global del sistema. En la actualidad se están analizando diversas alternativas para solucionar este problema.

5. AGRADECIMIENTOS

Al programa Life por permitir financiar una gran parte del presupuesto del proyecto, así como la divulgación internacional de los resultados obtenidos.

Bibliografía

[1] Lettinga, G.; Hobma, S.W.; Hulshoff Pol, L.W. (1983). Design operation and economy of anaerobic treatment. Water Science and Technology, núm. 15(8-9), págs. 177-195.

[2] Lettinga, G.; Roersma, R.E.; Grin, P.C. (1981). Anaerobic treatment of raw sewage. H2O, núm. 14(10), págs. 214-220.

[3] Lettinga, G.; Roersma, R.; Grin, P. (1983). Anaerobic treatment of raw domestic sewage at ambient temperatures using a granular bed UASB reactor. Biotechnology and Bioengineering, núm. 25(7), págs. 1.701-1.724.

[4]. Chernicharo, C.A.L. (2006). Post-treatment options for the anaerobic treatment of domestic wastewater. Reviews in Environmental Science and Biotechnology, núm. 5(1), págs. 73-92.

[5] Foresti, E.; Zaiat, M.; Vallero, M. (2006). Anaerobic processes as the core technology for sustainable domestic wastewater treatment: Consolidated applications, new trends, perspectives, and challenges. Reviews in Environmental Science and Biotechnology, núm. 5(1), págs. 3-19.

[6] Kassab, G., *et al.* (2010). Sequential anaerobic-aerobic treatment for domestic wastewater - A review. Bioresource Technology, núm. 101(10), págs. 3.299-3.310.

[7] Lobato, L.C.S.; Chernicharo, C.A.L.; Souza, C.L. (2012). Estimates of methane loss and energy recovery potential in anaerobic reactors treating domestic wastewater. Water Science and Technology, núm. 66(12), págs. 2.745-2.753.

[8] Lettinga, G.; Hulshoff, P.; Zeeman, G. (1996). Biological wastewater treatment. Part I: Anaerobic wastewater treatment". Lecture Notes. Wageningen Agricultural University.

[9] Singh, K.S.; Viraraghavan, T. (2003). Impact of temperature on performance, microbiological, and hydrodynamic aspects of UASB reactors treating municipal wastewater. Water Science & Technology, núm. 48(6), págs. 211-217.

[10] Anijiofor, S., *et al.* (2017). Aerobic and anaerobic sewage biodegradable processes: The gap analysis. International Journal of Research in Environmental Science, núm. 3(3), págs. 9-19.

[11] Simón Andreu, P.; Lardín Mifsut, C.; Solano Martos, Y.; García del Real, A.; Pérez Sánchez, P.; Ponsoda Mauri, J.M.; Rancaño Pérez, A. (2019). Operación de reactor anaerobio a temperatura ambiente en la línea de agua de EDAR Blanca, Murcia. Industria Química, núm. 65, págs. 68-75.