



Estudio hidráulico y bioquímico de un decantador de succión con simulación y medidas experimentales

En este trabajo se han desarrollado modelos 3D a escala real de la decantación secundaria de una estación depuradora de aguas residuales (EDAR) mediante técnicas de simulación computacional de fluidos (CFD), incluyendo submodelos de sedimentación y bioquímicos. Se ha realizado también una serie de medidas experimentales en el laboratorio para calibrar los modelos CFD y la monitorización en planta con tal de validar del modelo. El resultado es un diagnóstico del comportamiento hidráulico del decantador y la influencia en las reacciones bioquímicas, atendiendo a los principales factores que rigen su correcta operación y que dependen de la disponibilidad de oxígeno y el tiempo de retención hidráulico. Finalmente, se han definido mejoras del funcionamiento del proceso centradas en la tasa de recirculación externa y en la apertura de los tubos de succión.

Palabras clave

EDAR, decantación secundaria, simulación CFD, modelización, sedimentación, monitorización.

HYDRAULIC AND BIOCHEMICAL STUDY OF A SUCTION DECANTER WITH FLUID DYNAMICS SIMULATION AND EXPERIMENTAL MEASUREMENTS

In this work, full-scale 3D models of the secondary settling of a wastewater treatment plant (WWTP) have been developed using computational fluid dynamics simulation (CFD) techniques, including settling and biochemical sub-models. A series of experimental measurements were also carried out in the laboratory to calibrate the CFD models and in-plant monitoring for model validation. The result is a diagnosis of the hydraulic behaviour of the settling tank and the influence on the biochemical reactions, considering the main variables that govern its correct operation and that depend on the oxygen availability and the hydraulic retention time. Finally, improvements of the process operation have been defined focusing on the external recirculation rate and on the suction tubes opening.

Keywords

WWTP, secondary settling, CFD simulation, modelling, settling, monitoring.

Javier Climent Agustina
CEO de Hydrodynamic and Environmental Services (Hydrens)

Enrique Baquerizo Rodríguez
jefe de Aguas Residuales de la Empresa Metropolitana de Abastecimiento y Saneamiento de Sevilla, S.A. (Emasesa)

Enrique Toro Baptista
jefe de Supervisión de la EDAR de Copero en la Empresa Metropolitana de Abastecimiento y Saneamiento de Sevilla, S.A. (Emasesa).

José Vilarroig Herrera
CTO de Hydrodynamic and Environmental Services (Hydrens)

Natividad Fernández Moriña
jefa de Explotación de la EDAR de Copero en Sociedad de Fomento Agrícola Castellonense, S.A (Facsa)

David Miguel Seisdedos
coordinador de Zona de Explotaciones de Depuración de Sociedad de Fomento Agrícola Castellonense, S.A (Facsa)



1. INTRODUCCIÓN

La decantación secundaria es una de las operaciones unitarias de la EDAR más sensibles en términos hidráulicos. Permite la separación de las fases sólida y líquida del licor mezcla que llega al clarificador. El comportamiento del flujo dentro del tanque debe balancear las funciones de clarificador, espesador y almacén de fango, influenciado por características de diseño y operación [1]. Fallos relacionados con estas funciones pueden resultar en un aumento de la concentración de sólidos en suspensión en el efluente o en el deterioro del proceso de fangos activados [2].

Las técnicas de simulación en 1D son las más utilizadas para reproducir el comportamiento de la decantación secundaria debido a su buena predicción en estado transitorio en comparación con la teoría tradicional de flujo de sólidos [3]. Actualmente, estos modelos matemáticos siguen siendo una preferencia por los expertos en modelización de EDAR, los cuales priorizan el 1D frente al uso de modelos 2D y 3D, a causa de su simplicidad y bajo consumo de tiempo computacional. El modelo 1D permite implementar la velocidad de sedimentación del licor mezcla [4,5] para después calcular la distribución de sólidos en el manto de fangos. Sin embargo, su aplicación tiene limitaciones cuando el foco de interés es el estudio de fenómenos relacionados con la hidrodinámica y la configuración de la geometría o elementos internos del decantador, siendo necesarias herramientas como la dinámica de fluidos computacional (CFD).

En este caso, la modelización del decantador de la EDAR de Copero se ha realizado a través de herramientas CFD en 3D. La simulación CFD es una herramienta que permite prever el comportamiento y la interacción de

» Este estudio busca reproducir el comportamiento hidráulico del decantador secundario de una EDAR, optimizar su operación y mejorar su configuración

los fluidos en todo tipo de espacios y condiciones de contorno. Además, la simulación CFD es capaz de simular el transporte de sustancias y de sólidos previamente caracterizados para determinar el comportamiento del decantador tanto en régimen estacionario como en régimen dinámico, y analizar su hidrodinámica en función de las diferentes condiciones de contorno que pueden encontrarse durante su operación real.

La decantación secundaria de la EDAR de Copero está constituida por 8 decantadores circulares de 50 m de diámetro con un sistema de recirculación por succión. Este tipo de sistema de recirculación, recomendada para decantadores con diámetros superiores a 45 m, e implementada en decantadores planos (solera sin pendiente), se lleva a cabo mediante una serie de tubos dispuestos a lo largo del diámetro del puente decantador, succionando el licor mezcla concentrado desde la región cercana al fondo y de forma local en todo el diámetro del puente. Como este tipo de diseño opera de manera diferente a los clarificadores de fondo cónico, resulta recomendable el análisis mediante CFD.

2. OBJETIVO

El principal objetivo de este estudio se centra en entender y reproducir el comportamiento hidráulico del decantador secundario de una EDAR real, optimizar su operación y proponer mejoras en la configuración. Para ello se utilizarán técnicas de simulación CFD junto con medidas experimentales. Debido a las dificultades para llevar a cabo la operación del

decantador, por problemas hidrodinámicos, y a la dificultad de reducir la tasa de recirculación externa, se buscará conseguir una disminución de misma y de la concentración de sólidos coloidales del efluente. Además, será esencial evitar tasas de recirculación bajas que puedan propiciar condiciones de baja concentración de oxígeno disuelto, que conducen a la liberación de fósforo disuelto en el decantador.

Pese a ser un estudio innovador, es necesario que el modelo se construya con un enfoque práctico, con el que se puedan proponer soluciones para mejorar el proceso, priorizando su fácil implementación en el sistema real. Para la consecución del objetivo principal se deben llevar a cabo los siguientes objetivos específicos:

- Estudiar el funcionamiento actual y la configuración del sistema de decantación.
- Calibrar la curva de velocidad de sedimentación del licor mezcla mediante ensayos de sedimentación e implementarlo en el modelo CFD.
- Desarrollar un modelo CFD a escala real y en 3D que reproduzca el funcionamiento actual de la EDAR.
- Monitorizar la altura de manto de fangos y validar el modelo CFD en campo.
- Simular diferentes escenarios de funcionamiento modificando la carga, la tasa de recirculación, etc.
- Proponer mejoras que favorezcan la operación en la EDAR.
- Implementar un modelo bioquímico que sea capaz de reproducir la liberación de fósforo soluble en el decantador.

3. DESARROLLO DEL MODELO DE SIMULACIÓN CFD

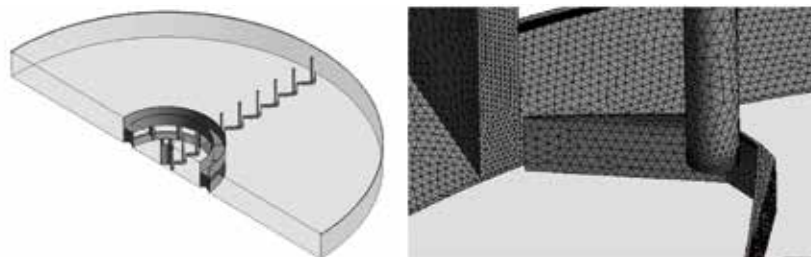
3.1. ELABORACIÓN DE LA GEOMETRÍA Y MALLADO

En la realización del modelo geométrico, se ha prestado atención a los elementos deflectores de la campana central y las rasquetas centrales y perimetrales del decantador. Ante el gran tamaño del decantador y a su particular geometría con simetría especular, se ha decidido utilizar únicamente el 50% del modelo para realizar las simulaciones mediante CFD (**Figura 1** izquierda). En su conjunto, la malla tiene un tamaño de 1,2 millones de nodos. Tras realizar un test de sensibilidad de malla se ha concluido que esta cantidad de nodos es estrictamente necesaria para conseguir calcular los efectos hidrodinámicos que pueden causar una diferencia significativa en el funcionamiento. Se ha mallado de forma cuidadosa la sección correspondiente a la salida perimetral, así como la entrada a la tubería de succión, donde el tamaño de nodo utilizado ha sido de 50 y 75 mm (**Figura 1** derecha).

3.2. DEFINICIÓN DE LAS CONDICIONES DE CONTORNO

Las simulaciones se han realizado en régimen transitorio para poder observar la evolución del manto de

FIGURA 1. Geometría 3D (izquierda) y mallado (derecha).



fangos con el tiempo. Se han simulado 10 horas de funcionamiento del decantador, a intervalos de tiempo de 30 segundos. Las condiciones del caudal de entrada y de recirculación se han establecido a partir de los datos medios de proceso en la EDAR según el caudal de entrada, el porcentaje de recirculación y el número de tubos de succión operativos en cada caso.

Se ha seleccionado el modelo de turbulencia *shear stress transport* (SST) y calibrado un submodelo de sedimentación acorde a las características del fango presente en la EDAR. Para ello se ha obtenido e implementado una ecuación algebraica que permite determinar la velocidad de sedimentación en función de la concentración de sólidos presente en el decantador (**Figura 2**). El cálculo de esta ecuación ha sido posible gracias a los ensayos experimentales realizados en planta.

Se han simulado diferentes situaciones variando la tasa del caudal de

recirculación, número de tubos de succión en funcionamiento y concentración de sólidos en la entrada. Tras la simulación de cada una de las situaciones, se han comparado para determinar la configuración óptima de funcionamiento (**Tabla 1**). Las curvas de caudal dinámico también han sido implementadas tras realizar un tratamiento de datos de caudal registrados cada 10 minutos durante periodos con duración de orden de magnitud mensual para garantizar la representatividad de la simulación.

4. RESULTADOS

4.1. SIMULACIÓN DEL ESCENARIO ACTUAL

Analizando en detalle el comportamiento hidrodinámico, se ha observado la coexistencia de dos zonas con un comportamiento hidráulico muy diferente: la zona de la campana central con velocidad del licor mezcla elevada, y la zona externa del decantador con velocidades menores.

FIGURA 2. Ejemplo de los ensayos de decantabilidad y velocidad de sedimentación.

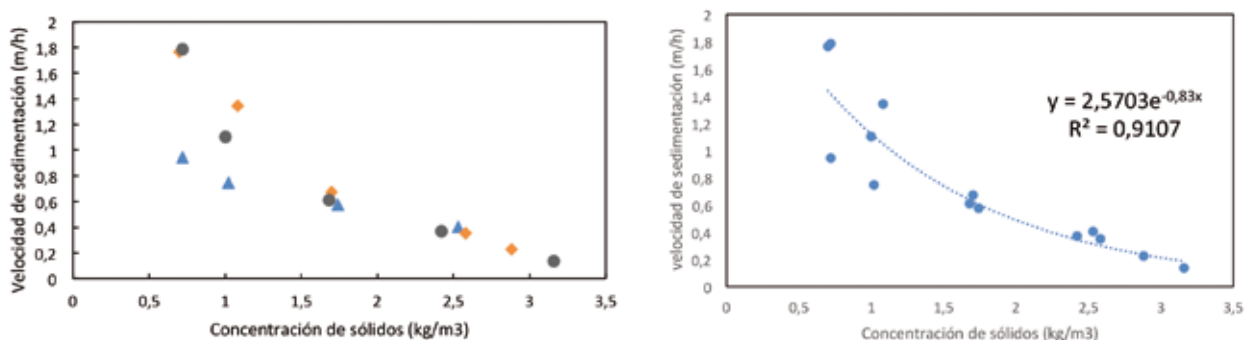




TABLA 1

PRINCIPALES ESCENARIOS CALCULADOS.

Escenario	Q tratado (m ³ /h)	Q recirculación (m ³ /h)	Recirculación (%)	Número de decantadores	Número de tubos	Concentración SST entrada (mg/L)
Actual	3.727	7.804	209	6	16	1.740
Modificado	4.439	5.700	128	6	10	1.740

En la campana central (**Figura 3**), el flujo entra a gran velocidad desde la tubería central y se desplaza por la lámina libre a velocidades superiores a los 0,4 m/s. Este flujo impacta con la campana y es orientado hacia el fondo del decantador, donde colisiona con la solera y genera dos remolinos: uno hacia dentro de la propia campana y otro hacia fuera, como consecuencia de la cuña situada en el fondo del decantador. Este último remolino pone en evidencia la importancia de la cuña de la campana, ya que, sin ella, el flujo impactaría con gran energía sobre el manto sedimentado en la parte externa del decantador, resuspendiendo los sólidos. La velocidad media en el interior de la campana es de 0,11 m/s, suficiente para evitar la sedimentación de sólidos en esta zona.

En cuanto al resto del decantador (zona externa a la campana, **Figura 4**), se puede observar que la velocidad presenta prácticamente un orden de magnitud por debajo de las de la campana, estimándose su media en 0,019 m/s. El flujo que sale de la campana se desplaza de forma radial por la parte inferior del decantador hacia la periferia, y posteriormente, una vez alcanzado el muro externo, retorna hacia el centro por la parte superior, cercana a la lámina libre. La velocidad del flujo en el tercio inferior del decantador disminuye a valores de entre 5-1 mm/s, valores esperados para favorecer la sedimentación.

FIGURA 3. Líneas y contornos de velocidad de flujo en el interior de la campana.

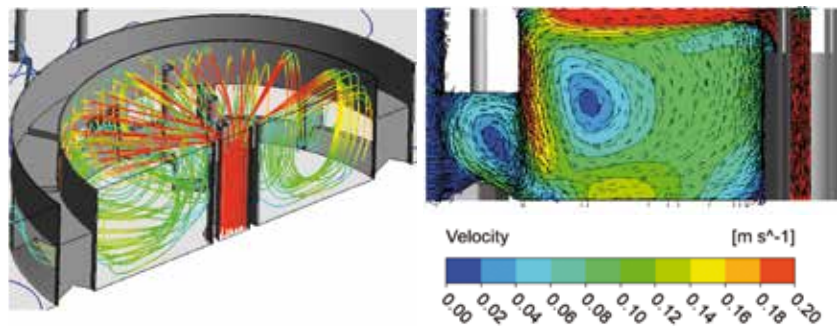
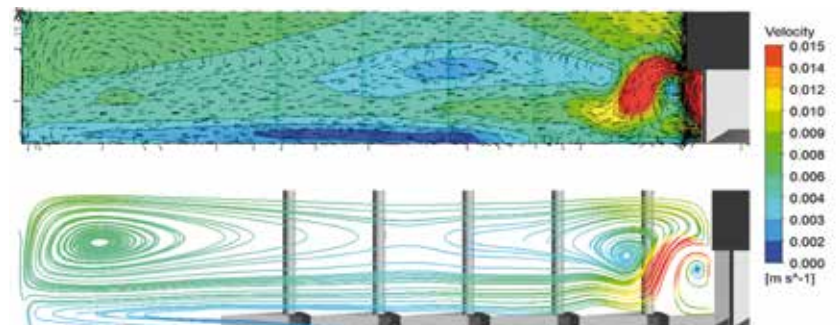


FIGURA 4. Líneas y contornos de velocidad de flujo la zona exterior de la campana.



Resulta interesante analizar el comportamiento hidrodinámico sobre el plano paralelo al suelo que se encuentra a la altura de las rasquetas. Al analizar las velocidades en ese plano, se puede observar el efecto de la rotación del puente: teóricamente, las rasquetas se desplazan a una velocidad de 0,022 m/s según la velocidad angular del puente, y que coincide con la obtenida en la simulación, hecho que valida el modelo CFD del decantador.

Como resultado de esta simulación, se cree conveniente analizar la reducción de la tasa de recirculación eliminando la succión de la recircu-

lación por las 2 tuberías interiores de la campana y la tubería 1 (**Figura 5**). Así mismo, se analizará la acumulación de sólidos que queda favorecida en la periferia, donde la velocidad del paso del puente decantador es máxima, siendo esta la zona donde mayor impacto puede haber en la resuspensión de sólidos.

4.2. SIMULACIÓN DEL ESCENARIO MODIFICADO

El análisis del comportamiento hidráulico de este escenario confirma que el funcionamiento de las dos tuberías de succión interiores no produce cambios significativos en el

comportamiento interno de la campana, donde las concentraciones son homogéneas y las velocidades altas como para no permitir la sedimentación. Sin embargo, existe una zona de baja velocidad en la base de la tubería central donde, en este caso, se acumula una cantidad de sólidos ligeramente superior a la anterior. En general, la tendencia seguida por la sedimentación del fango es similar a la observada en el escenario actual, por lo que el escenario modificado es una alternativa viable para disminuir la tasa de recirculación en el decantador sin afectar la sedimentación (Figura 6).

4.3. MONITORIZACIÓN ON LINE DE LA ALTURA DEL MANTO DE FANGOS. MEDIDAS EXPERIMENTALES EN CAMPO

Se ha llevado a cabo una monitorización de la altura del manto de fangos en diferentes posiciones radiales del decantador con una sonda comercial de ultrasonidos y bajo diferentes escenarios, modificando la tasa de recirculación externa, para entender el funcionamiento de la operación del decantador mediante información experimental y validar el modelo CFD (Figura 7). A continuación se muestran los principales resultados.

Los datos monitorizados de la altura del manto de fangos en la posición central del puente del decantador muestran una altura constante superior a 30 cm que se desplaza verticalmente en un rango de ± 5 cm durante el día (Figura 8), lo que hace pensar que es un manto estable. Tras la disminución de la tasa de recirculación, se observa una oscilación del manto que rápidamente se estabiliza en un valor similar con una amplitud ligeramente mayor.

Tras el cambio de ubicación de la sonda hacia la zona periférica y

FIGURA 5. Distribución de velocidad del flujo en un plano paralelo a la solera a la altura de las rasquetas.

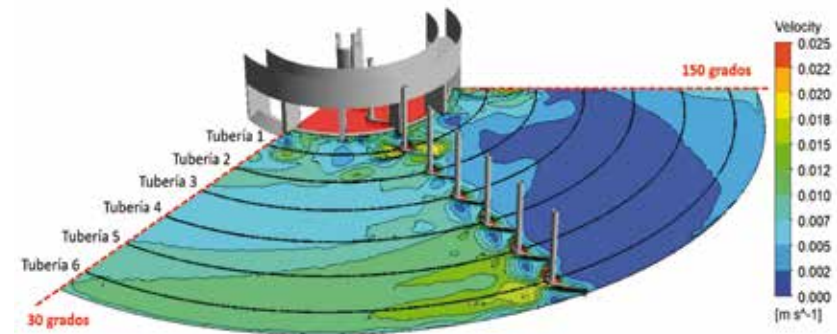


FIGURA 6. Detalle de la distribución de fangos en el interior de la campana (izquierda) y zona exterior (derecha).

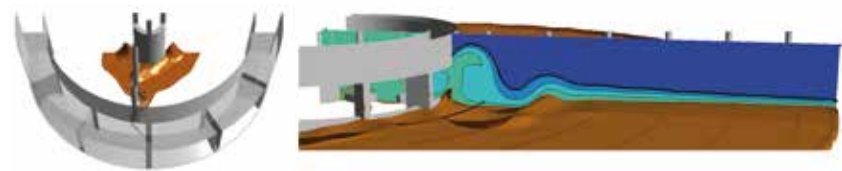


FIGURA 7. Detalle del montaje experimental y posicionamiento.



disminución del caudal de recirculación, se observa un cambio de tendencia. Por una parte, la disminución de la altura entre [5-30] cm, y por otra, el aumento del rango a 25 cm durante el día. Además, se aprecia la influencia del caudal influente a planta en la altura del manto de fangos mediante ciclos diarios y los giros del puente decantador dentro de cada ciclo (Figura 9).

Finalmente, al aumentar la recirculación externa hasta una tasa del 130%, debido a la disminución de la concentración de oxígeno disuelto,

se observa un aumento de la altura del manto de fangos y un aplanamiento de las curvas, de forma que los ciclos diarios no aprecian con la misma facilidad, volviendo a recuperar una altura estable del manto.

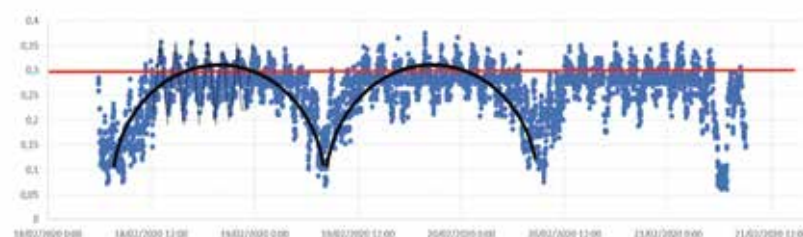
En resumen, la altura del manto de fangos se ha medido en valores medios ligeramente superiores a 30 cm, siendo en el exterior, menor que en la zona radial central. Una disminución de la recirculación se traduce en menor altura del manto de fangos, ya que favorece la sedimentación (mayor compactación).



FIGURA 8. Altura del manto medida en un punto radial central correspondiente a un periodo de 1 día.



FIGURA 9. Altura del manto de fangos medido en la periferia del decantador correspondiente a 3 días.



4.4. SIMULACIÓN BIOQUÍMICA

Se ha elaborado un modelo CFD fenomenológico en el que se ha implementado un modelo bioquímico simplificado para reproducir el comportamiento de liberación de fósforo soluble en el decantador. Bajo la metodología de modelización de fangos activos, se han incluido reacciones bioquímicas tipo ASM (*activated sludge models*), con el propósito de reproducir fenómenos que han sido medidos y descritos en el apartado correspondiente a la validación experimental en planta.

Se ha reproducido el modelo bioquímico para la configuración recomendada de 6 tubos cerrados y una recirculación del 130% del caudal influente. El objetivo del modelo bioquímico es reproducir la liberación de fósforo soluble en relación a la concentración de oxígeno disuelto en el tanque. Su disminución se debe al consumo de este en el interior del decantador, principalmente por vía heterótrofa. Cabe comentar que, cuanto menor es la recirculación, mayor es la altura del manto de fangos y

la concentración de sólidos (totales y volátiles) acumulados en el decantador, que llevan a cabo el consumo de oxígeno (término OUR, *oxygen uptake rate*). Se han realizado medidas experimentales de laboratorio y en planta real para calibrar las constantes cinéticas del modelo bioquímico.

En la **Figura 10** se muestran los resultados obtenidos del modelo bioquímico para el oxígeno disuelto, donde se observa que el modelo ofrece la distribución de esta variable asociada al comportamiento hidráulico del decantador. Para facilitar la comprensión, se han introducido vectores que explican el flujo del licor mezcla puesto que dan como resultado la distribución de las líneas de contorno de las especies transportadas. Se observan valores de concentración esperados, en el rango medido experimentalmente, que distan un orden de magnitud, desde 0,05 ppm en la zona perimetral de la solera, a 0,5 ppm en la zona de la campana.

Además, se ha calculado la concentración de fósforo disuelto don-

de, atendiendo a la concentración de oxígeno disuelto y sólidos, el modelo libera fósforo al medio. Se observan concentraciones máximas en las zonas donde existe menor concentración de oxígeno disuelto y se acumulan los sólidos. Se produce un aumento máximo de 0,18 ppm respecto a la concentración de entrada (0,20 ppm), valores coherentes con los medidos en la planta real.

Para analizar correctamente la concentración de oxígeno disuelto se debe atender a su consumo. El modelo refleja el consumo en función de la cantidad de sólidos suspendidos en el licor mezcla (**Figura 11**), de forma que se observa mayor velocidad de consumo en las zonas donde se acumulan los sólidos. Sin embargo, en el interior de la campana, se consume mayor masa y el oxígeno pasa de 2,5 ppm (condición de entrada) a 0,25 ppm. Así mismo, la velocidad de reacción de liberación de fósforo disuelto, en el caso analizado, se puede considerar baja o nula en la mayor parte del decantador y alta en las zonas perimetrales cercanas a la solera donde se dan las condiciones (bajo oxígeno y presencia de sólidos).

Un aumento del tiempo de residencia en el decantador por la disminución de la tasa de recirculación a valores inferiores a la tasa recomendada (130% del valor influente), provocaría una mayor acumulación de sólidos en el decantador y, por ende, un mayor consumo de oxígeno. Manteniendo la concentración media de oxígeno superior a 0,10 ppm, la liberación se puede considerar muy baja o nula. Sin embargo, en aquellas zonas que presentan concentración de oxígeno baja (<0,05 ppm), la liberación aumenta considerablemente, tal y como se ha podido validar experimentalmente.

FIGURA 10. Distribución de la concentración de oxígeno disuelto y ortofosfato en el decantador.

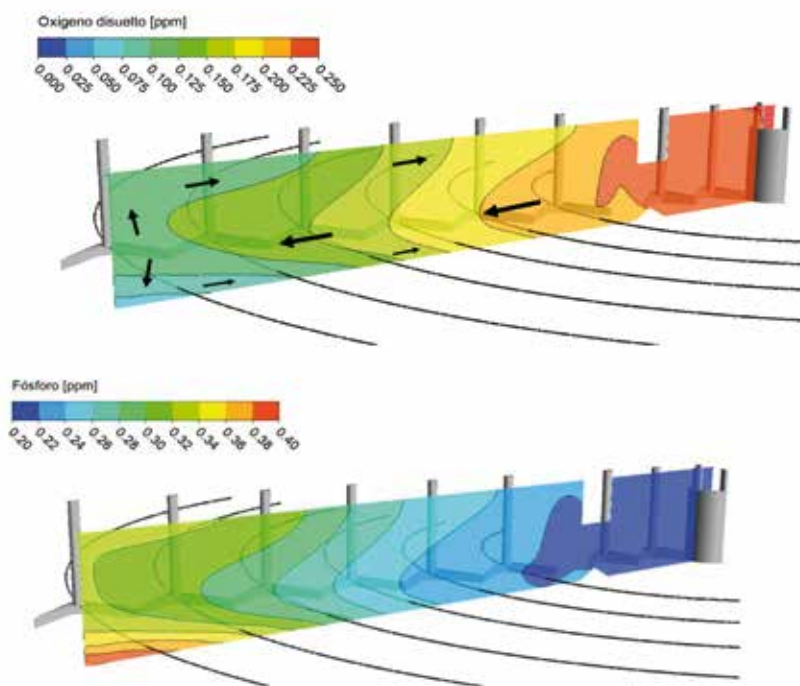
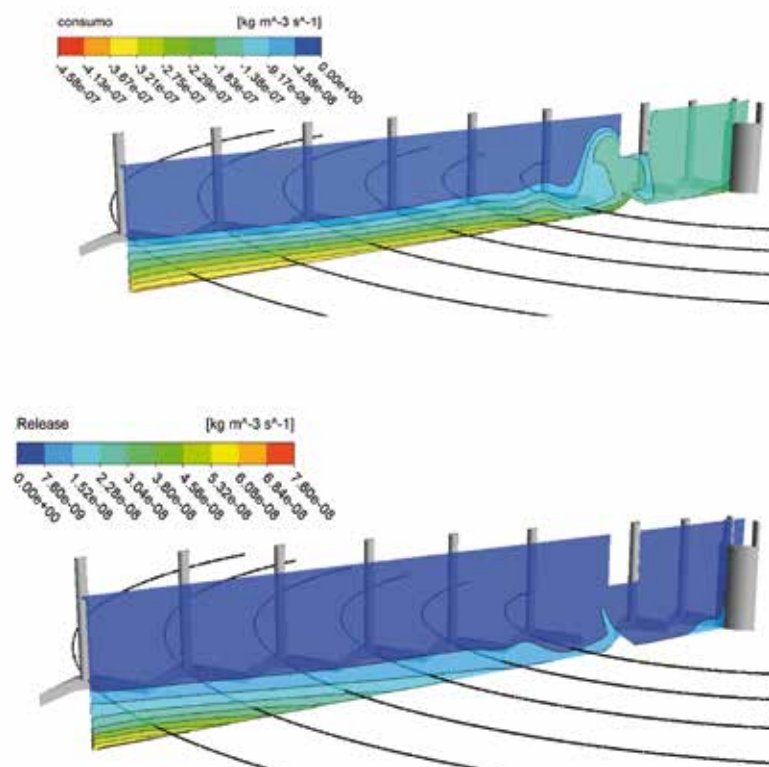


FIGURA 11. Tasa de consumo de oxígeno en el decantador (superior) y tasa de liberación de fósforo (inferior).



5. CONCLUSIONES

Se ha realizado un análisis profundo del sistema de decantación secundaria de la EDAR de Copero mediante modelización, simulación CFD y medidas experimentales tanto en planta como en laboratorio. Se ha podido reproducir y entender el funcionamiento del decantador, proponiendo un caudal de recirculación mínimo bajo criterios técnicos, y optimizar su funcionamiento hidráulico.

Los datos de altura del manto de fangos de la simulación han sido respaldados mediante monitorización *on line* a través de medidas experimentales en planta con una sonda de ultrasonidos. Además, se ha calibrado un modelo CFD fenomenológico, mediante la implementación de un modelo bioquímico simplificado, capaz de reproducir el consumo de oxígeno en el interior del decantador y la liberación de fósforo soluble. Los resultados calculados para la tasa de recirculación propuesta muestran valores favorables para la operación en planta.

En definitiva, se ha podido desarrollar una metodología que combina herramientas de simulación con medidas experimentales, replicable a otros sistemas. A partir de los resultados de este trabajo, se dispone de una herramienta de simulación calibrada y útil con la que apoyar la toma de decisiones sobre cambios operacionales del proceso de decantación secundaria.

Bibliografía

- [1] Ekama, G.A.; Barnard, J.L.; Günthert, F.W.; Krebs, P.; McCorquodale, J.A.; Parker, D.S.; Wahlberg, E.J (1997). Secondary settling tanks: theory, modelling, design and operation. IAWQ, London.
- [2] Weiss, M.; Gy Plosz, B.; Essemiani, K.; Meinhold, J. (2007). Suction-lift sludge removal and non-Newtonian flow behaviour in circular secondary clarifiers: Numerical modelling and measurements. Chemical Engineering Journal, núm. 132, págs. 241-255.
- [3] Kynch, G.J. Theory of sedimentation. Trans. Farad. Soc., núm. 48, págs. 166-175.
- [4] Vesilind, P.A. (1968). Design of prototype thickeners from batch settling tests. Water Sewage Works, núm. 115, págs. 302-307.
- [5] Takács, I.; Patry, G.G.; Nolasco, D. (1991). A dynamic model of the clarification thickening process. Water Res., núm. 25, págs 1.263-1.271.