



UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

**TRABAJO FIN DE MASTER**

MASTER EN INGENIERÍA AMBIENTAL

**PUESTA EN MARCHA DE UNA PLANTA PILOTO  
DE FANGOS ACTIVOS**

SONIA CLAUDIA VERÁSTEGUI FLORES  
JULIO, 2014



Fernando Fernández Polanco, profesor del Departamento de Ingeniería Química y Tecnología del Medio Ambiente de la Universidad de Valladolid, Natalia Alfaro Borjabad, estudiante de Doctorado de la Universidad de Valladolid INFORMAN:

Que D. Sonia Claudia Verástegui Flores ha realizado bajo mi dirección el Trabajo Fin de Master, del Master en Ingeniería Ambiental, titulado Puesta en marcha de una planta piloto de fangos activos.

Valladolid, ..... de .....de 2014

Fdo. TUTOR

Reunido el Tribunal designado por el Comité Académico del Master en Ingeniería Ambiental, para la evaluación de los Trabajos Fin de Master, y después de estudiar la memoria y atender a la defensa del trabajo “Puesta en marcha de una planta piloto de fangos activos”, presentado por el alumno D. Sonia Claudia Verástegui Flores, decidió otorgarle la calificación de \_\_\_\_\_.

Valladolid, ..... de .....de 2014

El Presidente

El Secretario

Fdo.: \*\*\*\*\*

Fdo.: \*\*\*\*\*

Vocal

Fdo.: \*\*\*\*\*

# PUESTA EN MARCHA DE UNA PLANTA PILOTO DE FANGOS ACTIVOS

Sonia Claudia Verástegui Flores - Universidad de Valladolid Departamento de Ingeniería Química y Tecnología del Medio Ambiente, Facultad de Ciencias, Universidad de Valladolid, Paseo del Prado de la Mergelina, s/n, 47011, Valladolid, España

## RESUMEN

Este trabajo muestra la realización de la puesta en marcha de una planta piloto de fangos activos de 3 reactores aeróbios a escala laboratorio, la problemática encontrada a lo largo de la experimentación y propuesta de mejora.

En este estudio se realizaron ensayos de DQO total y soluble, SST, SSV, IVL y OD, así como la determinación de parámetros de operación, todos utilizados como indicadores de operación. Los resultados muestran que el tratamiento biológico obtuvo un rendimiento de eliminación del 83 a 88% de materia orgánica carbonada, asimismo un porcentaje de eliminación del 86 a 91% en sólidos en suspensión.

La sedimentabilidad del fango no presenta adecuados resultados, se observó que los tiempos de aireación parecen tener una relación con los valores de IVL.

Se propone purgar el fango, un incremento exagerado de la relación F/M, y bajas edades del lodo parecieran las condiciones más desfavorables para un reactor de mezcla completa

Palabras clave: Puesta en marcha, planta piloto, materia orgánica, fangos activos

## INTRODUCCIÓN

El proceso de fangos activos ha sido utilizado para el tratamiento de las aguas residuales tanto industriales como urbanas desde aproximadamente un siglo (R.S. Ramalho, 1996). Su nombre proviene de la utilización como elemento básico del proceso de una masa activada de microorganismos capaz de eliminar una parte importante de la contaminación del agua residual (Ortega, 2013).

Diversos estudios a escala de laboratorio se van realizando para evaluar la evolución de las características del agua residual.

Los antecedentes en su aplicación son múltiples, por ejemplo (Van den Broeck et al., 2008) realizó tres experimentos a escala de laboratorio para la evaluación de la estabilidad de lodos activos, donde hacen hincapié en la importancia del monitoreo de lodos activos para alcanzar una población de lodos activos estable, utilizando una serie de análisis físicos, microscópicos y bioquímicos.

Estudios a escala laboratorio en una serie de reactores aerobios demuestran que la forma de alimentación tiene efecto sobre el hinchamiento de lodos activos (López, 2010).

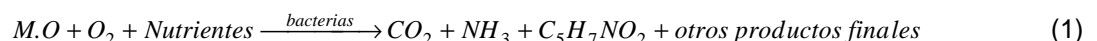
En el proceso de fangos activos, pueden distinguirse dos operaciones diferenciadas: La oxidación biológica y la separación sólido-líquido. Las partes más importantes constan de:

- Reactor biológico, donde se desarrolla la aireación.
- Masa floculenta de microorganismos denominada sólidos suspendidos en el licor mezcla (SSLM), utilizada para transformar la materia orgánica soluble y en suspensión presente en el agua residual.
- Sedimentador secundario para separar los SSLM.
- Recirculación de los sólidos sedimentados para mantener una concentración constante de microorganismos.
- Purga del lodo en exceso para garantizar un tiempo de retención celular adecuado.

Los sedimentadores secundarios ejercen un papel fundamental en el proceso, permitiendo la salida del efluente clarificado, la concentración de los sólidos suspendidos en el fondo y la recirculación del lodo concentrado al tanque de aireación (Grady et al., 1999).

En el reactor, se tienen lugar las reacciones de oxidación biológica, dándose dos tipos diferentes: de síntesis o asimilación y de respiración endógena (Ortega, 2013).

La reacción de síntesis utiliza una parte de los compuestos orgánicos como fuente de energía necesaria para su realización, transformándose en productos inorgánicos finales como H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>, nitratos, sulfatos, etc. Otra parte se asimila para formar un nuevo protoplasma, las reacciones globales corresponden a la ecuación (1):



La reacción de respiración endógena consiste en la autooxidación del protoplasma celular y aparecen cuando empieza a faltar la materia usada como alimento por los microorganismos. Una fracción del protoplasma es transformado en H<sub>2</sub>O y CO<sub>2</sub> de tal forma que la masa de microorganismos disminuye y tiende hacia cero, las reacciones globales corresponden a la ecuación (2):



Dependiendo del tipo de diseño y modo de operación, los fangos activos se pueden clasificar en diferentes modalidades, flujo en pistón o convencional, aireación por pasos, mezcla completa, estabilización por contacto, con selector anóxico. La configuración más utilizada es la de mezcla completa, por su simplicidad, distribución uniforme de agua residual, las concentraciones de contaminantes y demanda de oxígeno no varían en el reactor, es adecuada para aguas residuales con materias biodegradables tóxicas para los microorganismos en concentraciones modestas (Rittmann B. E. et al., 2001).

De acuerdo a la Directiva de la Unión Europea 91/271 sobre el tratamiento de las aguas residuales urbanas, los límites de vertido en zonas normales tienen valores de concentraciones de DQO de 125 mgO<sub>2</sub>/l, y de sólidos en suspensión de 35 mg/l.

El objetivo de este trabajo es realizar la puesta en marcha de un sistema de fangos activos a escala de laboratorio, compuesta de 3 reactores aeróbios de mezcla completa, con una recirculación interna automática, en cuanto a la operación y capacidad de eliminar la materia orgánica carbonada, a través de pruebas y variables medibles.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Características del proceso

El proceso de fangos activos se llevó a cabo con 3 reactores cilíndricos de material de metacrilato de 12 cm de diámetro y 5 mm de espesor, con 6,90 L de volumen cada uno, conectado a sedimentadores secundarios por medio de una recirculación interna, las dimensiones el sedimentador secundario comprenden, 12 cm de diámetro y 2,05 L de volumen. La principal diferencia de operación frente al proceso convencional de lodos activos, es que no se produce una recirculación de lodo mediante bombas; en el sistema actual, las unidades de reacción y sedimentación se encuentran juntas, conectadas por un conducto tubular, asimismo el sistema actual, no posee una purga que es extraída de la línea de recirculación.

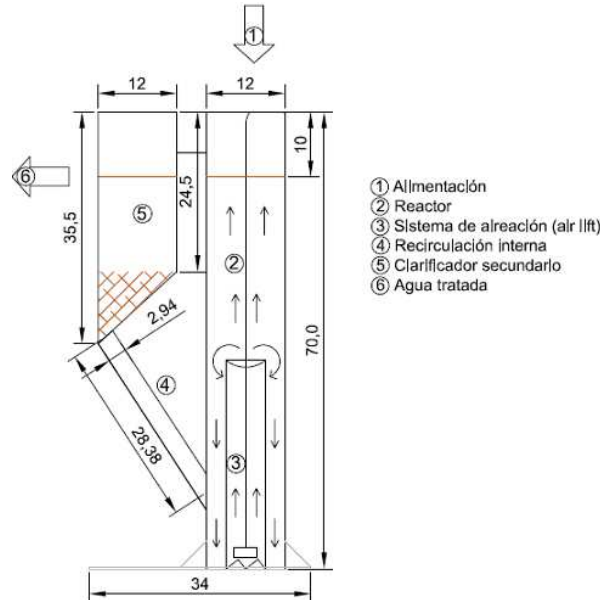


Figura 1. Esquema del tratamiento biológico mezcla completa a escala laboratorio

El agua residual utilizada para la alimentación de los reactores, se obtuvo de una alcantarilla, mediante bombeo con una bomba hidráulica, de manera que las aguas son impulsadas al tanque de almacenamiento, de volumen de 700 L, previamente habiendo pasado por un rototamiz y seguidamente del tanque almacenamiento al sedimentador primario, por medio de una bomba peristáltica. El sedimentador primario tiene un volumen de 62 L, alimenta a los reactores a través de la tubería principal de alimentación de material de plástico reforzado de 2,5 cm de diámetro; la tubería principal se divide en 3 corrientes, que son conducidas a los reactores por medio tuberías de plástico de 0,5 cm de diámetro, a través de 3 bombas (2 eléctricas y una peristáltica).

El fango activo ha sido procedente de la depuradora de Valladolid (correspondiente a una población equivalente de 570.000 habitantes), el fango se mezcló con agua residual en los 3 reactores aeróbios, para posteriormente ser agitado continuamente dentro de los reactores.

La configuración física de mezcla completa, ha consistido de un sistema air lift en el interior de los reactores, compuesto por un tubo de PVC de 2" y un difusor de pecera, los cuales son conectados al rotámetro por medio de tuberías de plástico de 0,5 cm de diámetro y estos al compresor.

Los microorganismos toman el oxígeno disuelto que aportan las burbujas de aire y el agua residual, junto con los nutrientes existentes y al crecer ganan una densidad mayor que la del agua y sedimentan. Al permanecer en el reactor están sometidos al fenómeno de mezcla completa con el oxígeno y el agua residual, pero al pasar al sedimentador pueden asentarse y separarse del agua tratada, produciendo el flujo efluente, que fue recogido diariamente por garrafas de plástico de un volumen de 30 L.

Posteriormente, se ha realizado una secuencia de encendido y apagado de (15-30 min) al reactor R4, mediante un temporizador, el cual está conectado a una bomba de membrana y este al rotámetro.

El sistema de fangos activos está implantado en una caseta perteneciente al departamento de Ingeniería Química y Tecnología del Medio Ambiente de la Universidad de Valladolid. La temperatura de operación es de 18°C aproximadamente, temperatura dentro de la caseta gracias a un sistema de climatización en su interior.

Inicialmente se tenía prevista la realización de 4 reactores en serie, a causa de fallas en el equipamiento, se optó por la realización de 3 reactores, por ese motivo se denominan reactores 2, 3 y 4, en adelante R2, R3 y R4. El esquema actual de la planta piloto de fangos activos se muestra en la figura 2.

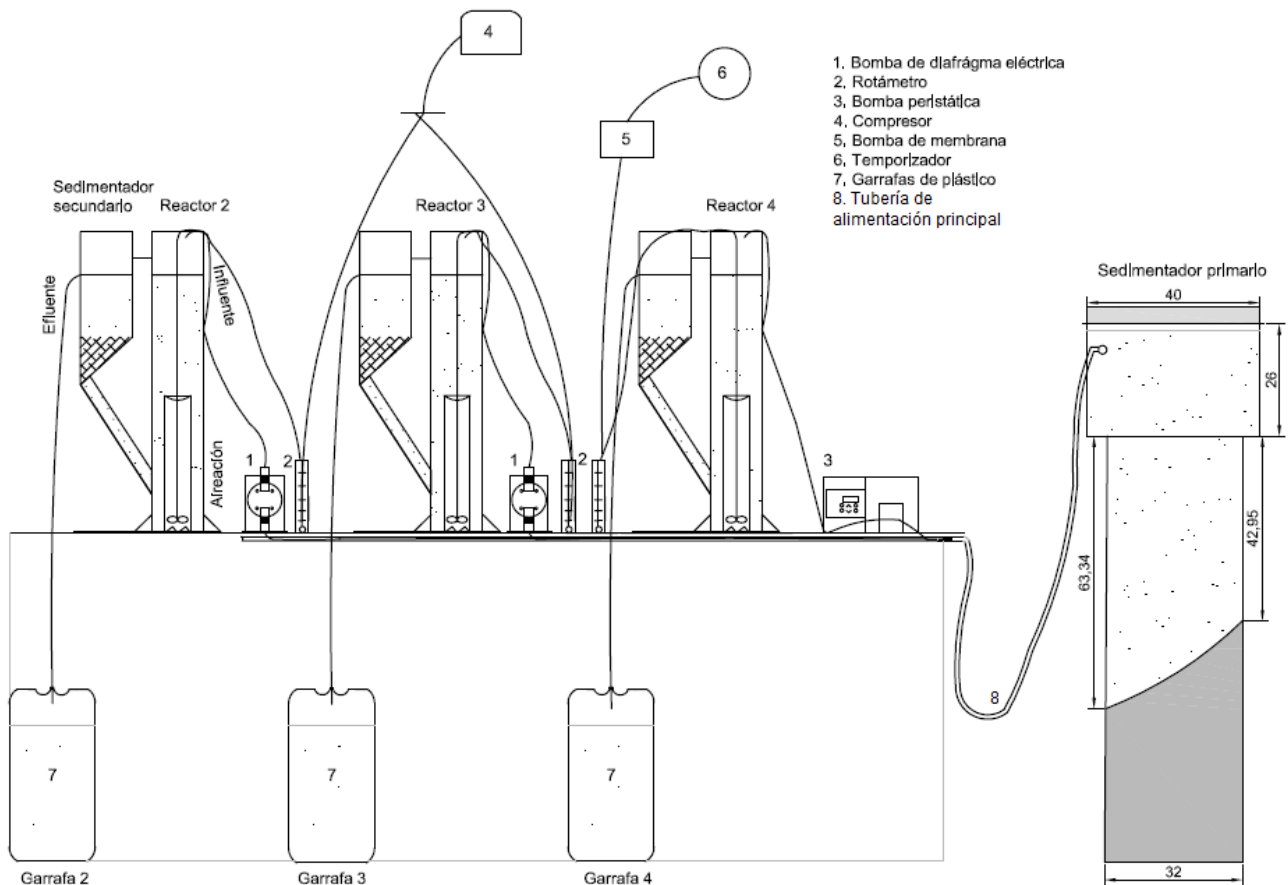


Figura 2. Esquema del montaje experimental de planta piloto de fangos activos

### Pruebas y análisis realizados en la planta piloto de fangos activos

Las siguientes pruebas y análisis se realizaron en la planta piloto de fangos activos, con el fin de alcanzar el objetivo propuesto:

- ❖ Definición de un caudal de inicio, pruebas con agua y calibración de bombas
- ❖ Pruebas con distintos sistemas de aireación
- ❖ Montaje sistema fangos activos
- ❖ Prueba 1

- ❖ Prueba 2
- ❖ Sistema de purga
- ❖ Medidas de volúmenes de garrafas del efluente

### Métodos físico químicos

Se llevaron a cabo ensayos de control en el sistema mediante la determinación de parámetros como la demanda química de oxígeno total y soluble (DQOT y DQOs), ambos por el método de reflujo cerrado.

Sólidos suspendidos totales (SST), sólidos suspendidos volátiles (SSV), de acuerdo a procedimientos normalizados APHA-AWWA –WPCF.

Asimismo ensayos de índice volumétrico de lodos (IVL) y oxígeno disuelto (OD).

El índice volumétrico de lodos se define como el volumen en mililitros ocupado por un gramo de sólidos en suspensión del licor mezcla SSLM, expresado en peso seco después de sedimentar durante 30 minutos en una probeta graduada de 1000 ml. Los valores de IVL para lodos con buenas características están comprendidos entre 150-35 ml/g (R.S. Ramalho, 1996).

El oxígeno disuelto es la concentración de oxígeno que existe en la cuba de aireación, para que los microorganismos realicen sus funciones. Concentraciones adecuadas se obtienen con 2,0 mg/l (Metcalf y Eddy, 2003).

Los puntos de muestreo se establecieron como se muestra en la tabla 1.

Parámetro	Puntos de muestreo			Frecuencia	
	Afluente (Sedimentador Primario)	Reactores (R2, R3 y R4)	Efluente (Garrafas)	Diario	Días alternos
DQO TOTAL	X		X		X
DQO SOLUBLE	X		X		X
SST	X	X	X		X
SSV	X	X	X		X
IVL		X		X*	
OD		X		X	

X\* el ensayo IVL se realizó desde la fecha 30/06/2014.

**Tabla 1.** Plan de ensayos de control del sistema de fangos activos

### Parámetros característicos del proceso

#### Tiempo de retención hidráulico (TRH)

Es el tiempo que las bacterias están en contacto con el agua residual. Se expresa en unidades de tiempo (horas o minutos), según la ecuación (3)

$$TRH = \frac{V}{Q} \quad (3)$$

#### Relación alimentación/microorganismo (F/M)

Es la relación entre la masa de materia orgánica que entra en el reactor por unidad de tiempo y la masa de microorganismos existentes en el mismo. Se expresa en kg DQO<sub>alim</sub>/kg SV reactor\*d, de acuerdo a la ecuación (4).

$$F/M = \frac{Q_0 * S_0}{V * X} \quad (4)$$

#### Rendimiento celular (Y)

Es la relación entre la producción de microorganismos entre los kg de DQO<sub>eliminada</sub>, como indica la ecuación (5).

$$Y = \frac{P_X}{(Q_0 * (S_0 - S))} \quad (5)$$



## Edad del lodo ( $\theta_c$ )

Es la relación entre la masa de fangos existente en el reactor y la masa de fangos extraídos por unidad de tiempo. Se expresa en unidades de tiempo (días), de acuerdo a la ecuación (6).

$$\theta_c = \frac{V \cdot X}{Y \cdot Q_0 \cdot (S_0 - S)} \quad (6)$$

Los valores de  $Q$ ,  $V$ ,  $S_0$ ,  $S$ ,  $X$ ,  $P_x$ , representan; caudal de agua bruta ( $m^3/h$ ), volumen del reactor biológico ( $m^3$ ), concentración DQO inicial ( $mg/l$ ), concentración DQO a la salida ( $mg/l$ ), concentración de microorganismos en el reactor ( $mg/l$ ), producción de microorganismos ( $kg$  SSV/d), respectivamente.

(Imhoff, 1970) ha relacionado los parámetros de operación y al rendimiento de eliminación de materia orgánica, edad del lodo y F/M, como muestra en la figura 3.

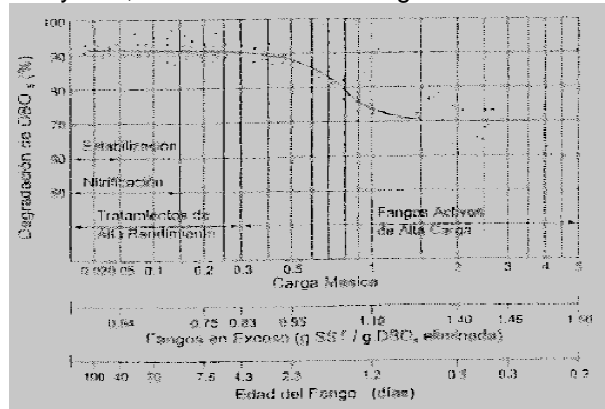


Figura 3. Relación de parámetros de operación en función de la edad del lodo y F/M (Imhoff, 1970)

## RESULTADOS Y DISCUSIONES

### Definición de pruebas y ensayos en la planta piloto de fangos activos

- ❖ Definición de caudal de inicio, pruebas con agua y calibración de bombas

Para el arranque, se estableció un tiempo de retención horario de 6,9 h, con el cual se calculó un caudal de inicio de 1 L/h. Se realizaron pruebas con agua potable, mediante el bombeo de agua a los reactores; en un lapso de tiempo el agua llenaba los sedimentadores y por rebose se obtenía un efluente, el cual fue recogido por garrafas de plástico. El proceso consistió en medir el peso de cada una de las garrafas de plástico vacías, una vez que retenían agua las garrafas durante un cierto tiempo, se procedían a pesarlas y se descontaban los pesos de las garrafas vacías correspondientes, para hallar el volumen del agua dentro de ellas y así obtener los caudales en (L/h), hasta llegar al deseado, este procedimiento fue realizado diariamente por varias semanas cambiando las garrafas todos los días.

- ❖ Pruebas con distintos sistemas de aireación

La agitación fue adicionada a las pruebas con agua, a objeto de obtener condiciones de mezcla completa, se realizaron pruebas de agitación en los 3 reactores con 2 difusores de pecera conectados por medio de tubos de plástico de 0,5 cm de diámetro, al rotámetro y esté a un compresor, el cual produce aire comprimido, creando pequeñas burbujas, se observó que los difusores no tenían el suficiente peso, ya que se desplazaban a lo largo del reactor e ingresaban burbujas a la recirculación interna, como se observa en la figura 4, más adelante se optó por colocar un contrapeso a los difusores, lo cual tampoco fue definitivo puesto que continuaban ingresando burbujas, posteriormente se cambió el compresor a uno de menor capacidad y se hicieron pruebas con un difusor. Al cambiar el compresor por otro de menor capacidad, hizo que se tengan presiones bajas por lo tanto poco suministro de aire a los reactores, se bloquea la entrada de aire del R4 para obtener una mayor presión.

En estas pruebas se midió continuamente el oxígeno disuelto, a través del oxímetro OXI 330, previamente habiéndolo calibrado.

Al observar las dificultades encontradas con anterioridad en la aireación, se realizó pruebas con un sistema air lift, construido con tubería de PVC de 2" con orificios en la parte inferior para que las burbujas puedan escapar de modo que se genere una circulación fluida de burbujas que asciendan por la parte interna y desciendan por la parte externa, favoreciendo la mezcla completa, tal como se ve en la figura 1. Se

realizó pruebas para ver si la altura, el ancho y los huecos del tubo de PVC en la parte inferior, eran relevantes en el análisis, llegando a la conclusión que la altura del tubo no tiene influencia en la distribución uniforme, el ancho y los huecos en la parte inferior del tubo, si tuvieron importancia puesto que, impedían subir a las burbujas con facilidad y no permitían la salida de burbujas por la parte inferior del reactor respectivamente, se observó también que la posición adecuada del difusor era cerca a la base del reactor, el difusor se ubicó al centro del tubo de PVC para una adecuada distribución. Es así que el sistema de aireación air lift, estuvo constituido por un tubo de PVC fue de 2", con una altura hasta casi la mitad del reactor, con agujeros en la parte inferior y con un difusor en el centro cerca a la base del reactor.



Figura 4. Prueba de calibración de bombas con agua potable y agitación

#### ❖ Montaje sistema fangos activos

Se unió las tuberías de plástico de 5 cm de diámetro de las bombas que alimentan los reactores, con la tubería principal de alimentación, esta fue conectada con el sedimentador primario ubicado en una caseta adyacente a la del sistema de fangos activos.

El tramo de tubería descubierto ha sido cubierto con un protector de espuma para conservar la temperatura natural del agua residual dentro la tubería.

El agua residual ingresaba a la caseta por gravedad por medio de la tubería principal, pero sin la suficiente fuerza para llegar a los reactores, por tal motivo se utilizaron 3 bombas conectadas a 3 tuberías de plástico. Antes de bombear se cebaba la tubería de alimentación principal, así como las tuberías que alimentan a reactores.

Como se indicó con anterioridad, el sistema de fangos activos no cuenta con una línea de recirculación y de una purga de fangos en exceso. Según (R.S. Ramalho, 1996), la purga puede tomarse directamente desde el reactor. Se fabricó un tomamuestras fácil de operar, construido con un tubo de PVC de 2", un hilo de construcción sujeto una válvula antiretorno en la parte inferior, al halar el hilo, hace que se abra la parte inferior y el peso del agua produce que la válvula se cierre. Con la idea de extraer fango de la parte media del reactor, tanto para la purga o toma de muestras.

#### ❖ Prueba 1

En la primera prueba con agua residual, se han inoculado los tres reactores con aproximadamente 3,5 L de fango activo de la depuradora de Valladolid, en concreto de la recirculación del reactor biológico, la cual se diluyó con agua residual en los 3 reactores aeróbios, con el objeto de conseguir una concentración de SSLM de 1500 a 4000 mg/l en el reactor (Metcalf y Eddy, 2003).

Se puso en marcha las bombas de los reactores R2, R3 y R4, con el caudal necesario para obtener el tiempo de residencia deseado en los reactores, se calibró las bombas con los mejores tiempos obtenidos utilizando agua potable y a la vez se encendió la agitación dentro del reactor (por medio de difusores y pesos añadidos a los mismos), siempre controlando la concentración de oxígeno disuelto.

En el transcurso del día de la inoculación se fue observando que se creaba una masa de sólidos en la parte superior del decantador secundario, por lo que se protegió las bombas de un posible corto circuito con recipiente, al día siguiente de haber sido inoculado se observó que los fangos estaban flotando y el R3 había rebosado, los flóculos eran gruesos y flotaban, obstruyendo el paso del agua, la salida del efluente tenía un diámetro pequeño de 1 cm, tal como muestra la figura 5. Se recogió los fangos de la superficie.

Debido a la persistencia del problema de estancamiento en la salida del efluente, se decidió agrandar el agujero de salida y cambiar las tuberías de diámetro de 1 cm por otras de 2,5 cm. Los microorganismos permanecieron con agitación por dos días hasta que los reactores estén listos.



**Figura 5.** Primera prueba con agua residual urbana y fango activo, la figura de la derecha muestra la consistencia y flotación del fango.

#### ❖ Prueba 2

La segunda prueba consistió en concentrar el fango de la primera prueba (reactores R2, R3 y R4), en un solo reactor (R2) e inocular los reactores R2 y R3 con fango nuevo proveniente de la depuradora (3,5 L a cada uno).

El procedimiento de inoculación fue el mismo que el de la primera prueba, realizando controles diarios por la mañana y por la tarde de la concentración de oxígeno disuelto en los reactores, control de alimentación (agua en el tanque de bombeo, vigilar las bombas), verificar el movimiento de fangos en la recirculación. La figura 6 muestra la realización de la segunda prueba.



**Figura 6.** Segunda prueba con agua residual, fango activo y sistema de aireación air lift (fotografía tomada el 02/06/2014, a 4 días de la inoculación)

Como en la anterior prueba, los lodos flotaban en la parte superior del sedimentador secundario, sin presentar problema de estancamiento del efluente. A los 10 días los reactores tenían periodos de variabilidad, en cuanto a la decantación, recirculación y oxígeno disuelto, tal como se ve en la figura 7.

En el reactor R4, se realizó un sistema de aireación y detención, (15-30 min ) con ayuda de un temporizador, el mismo que fue conectado al rotámetro del R4, como muestra la figura 2, para apreciar la sedimentabilidad del fango, esta modificación se realizó desde el día 11/06/2014 hasta el final de la experimentación.

Posteriormente se bajó el caudal de alimentación de los 3 reactores a la mitad, para reducir el caudal de entrada hasta aproximadamente 0,5 l/h, para aumentar la concentración de SSV.

Cerca al mes del funcionamiento se observó condiciones de recirculación, sedimentación, concentraciones de oxígeno más estabilizadas, se observaba una separación clara del agua en la parte superior del sedimentador y una visible sedimentabilidad, el reactor R4 presentaba mayor recirculación dentro del conducto tubular, como se observa en la figura 8.

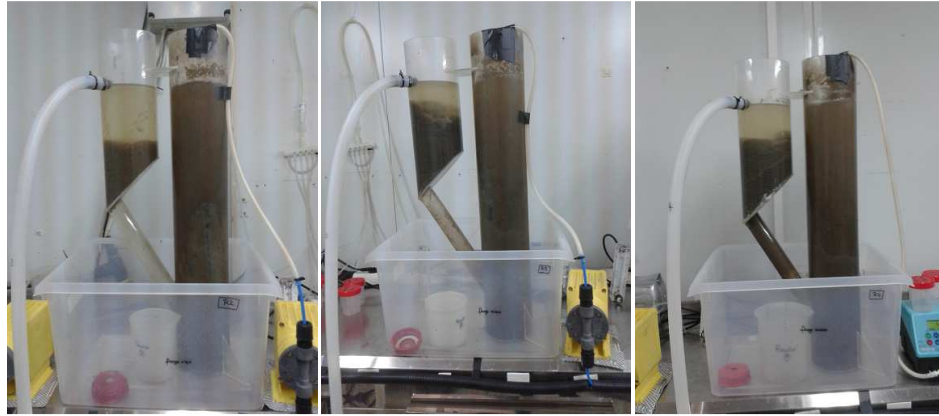


Figura 7. Comportamiento del fango (Fotografía tomada el 08/06/14)



Figura 8. Recirculación del fango (Fotografía tomada el 28/06/14)

#### ❖ Sistema de purga

No se realizó una purga diaria debido a la pérdida de sólidos suspendidos en el licor mixto (SSLM), de acuerdo a ensayos de SSV, por lo que se mezcló fangos de cada uno de los reactores, es decir el reactor 2, se vació en un recipiente, se dejó sedimentar y después de la decantación, se volvió a vaciar los sólidos al reactor para continuar con la alimentación, se hizo lo mismo para los otros dos reactores, existían periodos donde no había alimentación.

#### ❖ Medidas de los volúmenes de los efluentes de las garrafas

Con el objetivo de hallar caudales reales de inicio, después de observar condiciones de estabilidad, se realizaron mediciones de los volúmenes de los efluentes anotando la hora de inicio y fin para posteriormente hallar los caudales de entrada a los reactores.

### Métodos físico químicos

El análisis de este trabajo que incluyen ensayos de laboratorio se realizaron desde el 29/05/2014 hasta el 07/07/2014 (40 días), es decir desde la segunda prueba que se describió con anterioridad.

Durante los 8 primeros días no se realizaron mediciones de DQO y SSV, SST e IVL, solamente se controló el oxígeno disuelto y la alimentación de los microorganismos, puesto que en la primera etapa del proyecto lo importante era poner en marcha, pues al principio los datos fluctúan mucho debido a la aclimatación del fango, únicamente se trató de dar solución a los problemas encontrados.

Para realizar la prueba 2, se tomaron muestras del fango activo nuevo procedente de la depuradora de Valladolid, y el viejo de la primera prueba, para los análisis en laboratorio, sólidos suspendidos volátiles (SSV) y sólidos suspendidos totales (SST), los resultados son mostrados en la tabla 2.

Tipo	SST (g/l)	SSV (g/l)
Fango nuevo	7,28	5,68
Fango viejo	4,20	3,68

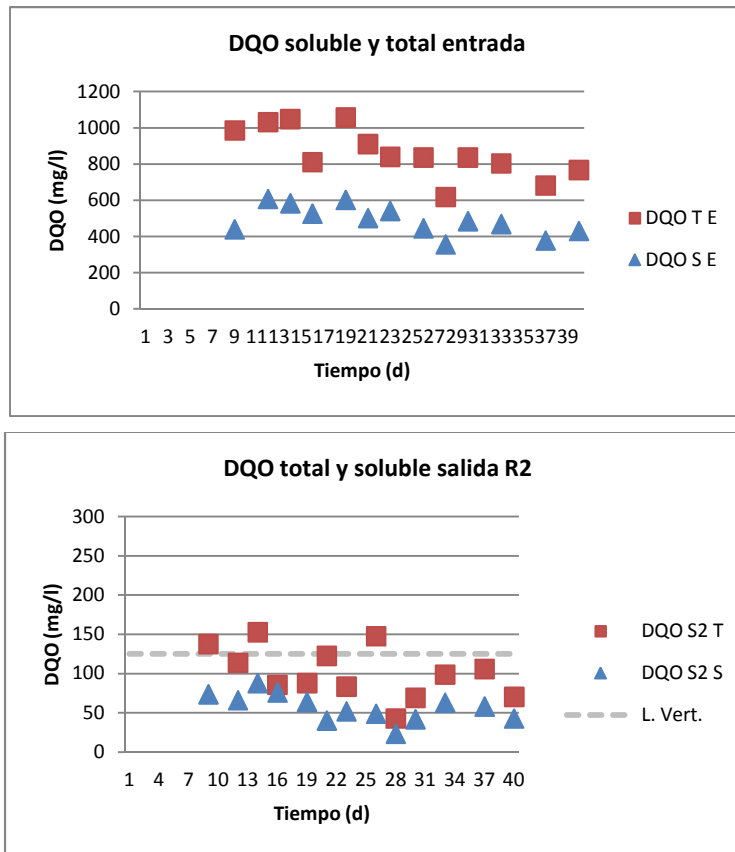
Tabla 2. Resultados de ensayos de laboratorio del fango nuevo y viejo

**Demanda química de oxígeno (DQO)**

Estos resultados representan la descomposición del material biodegradable en compuestos orgánicos más simples. La DQO total indica la materia orgánica biodegradable y no biodegradable presente en el agua residual.

La figura 9, representa la variación de la DQO con respecto al tiempo de realización. La DQO total de la entrada tuvo valores desde 618 a 1058 mgO<sub>2</sub>/l. De acuerdo al límite de vertido de la Directiva de la Unión Europea 91, se observa que los reactores R2, R3 y R4 presentan una salida adecuada al final de la experimentación. El rendimiento de eliminación promedio fue del 83 a 88%.

Se observa que a partir del día 30, correspondiente a la fecha 27/06/2014, la remoción de materia orgánica tuvo características más homogéneas ya que los valores de DQO, no sufren variaciones grandes, por lo que se podría decir que se encuentra en estado estable.



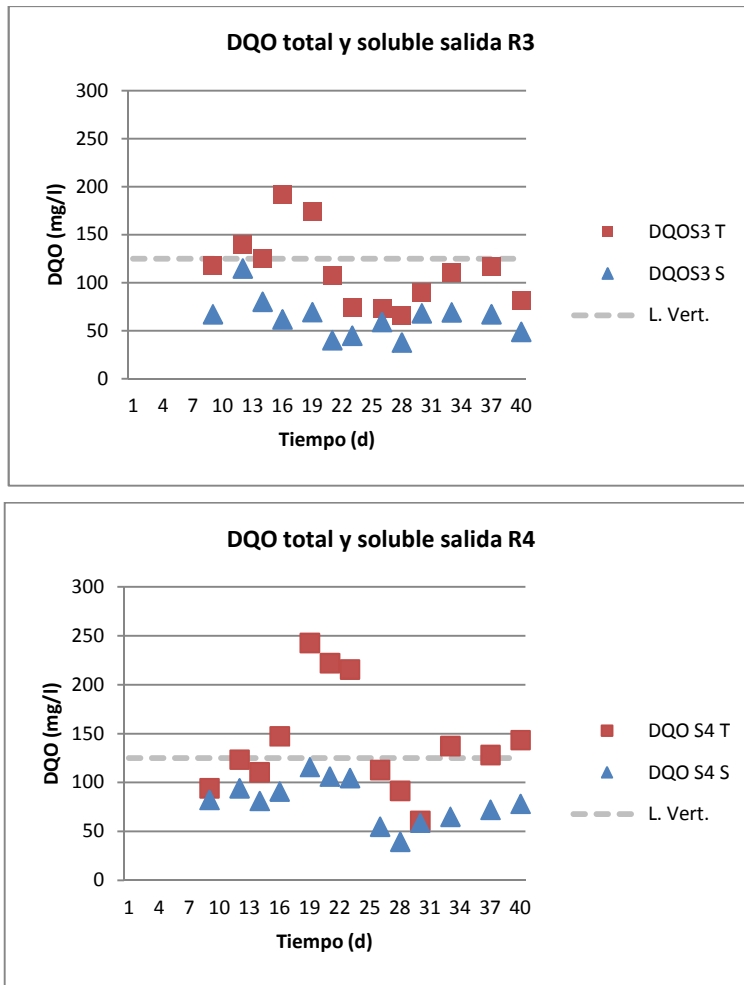


Figura 9. DQO total y soluble del afluente y efluente reactores R2, R3 y R4 en función del tiempo

**Solidos suspendidos totales y volátiles (SST) y (SSV)**

En la gráfica de los SST en los reactores, correspondiente a la figura 10, se pueden ver picos y descensos, los últimos se relacionan con el lavado de los sólidos, por ejemplo los días 13, 19, 27 corresponden a la realización de la decantación y vaciado de solidos de los 3 reactores.

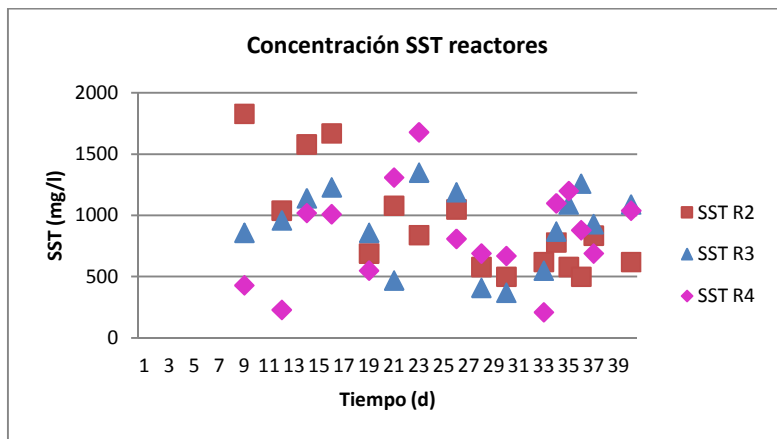


Figura 10. Solidos suspendidos totales reactores R2, R3 y R4 en función del tiempo

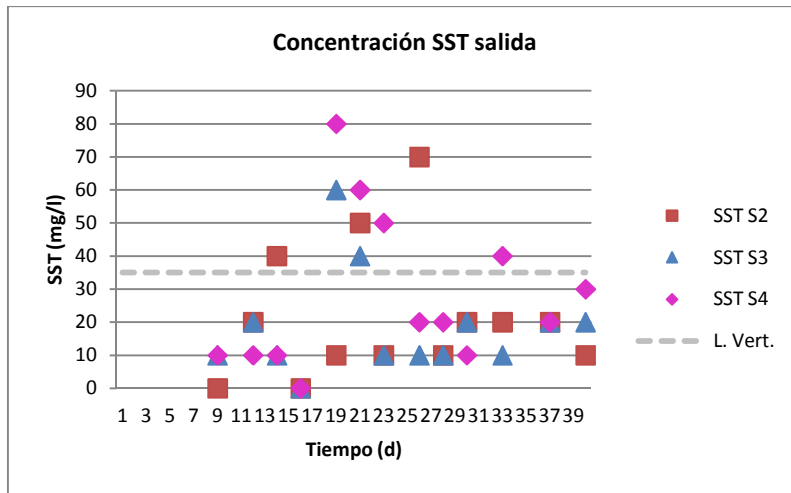


Figura 11. Sólidos suspendidos totales efluente en función del tiempo

La figura 11, muestra que los sólidos suspendidos a la salida del sistema, cumplen con la normativa de vertido utilizada de referencia, con un rendimiento promedio de eliminación del 86-91%.

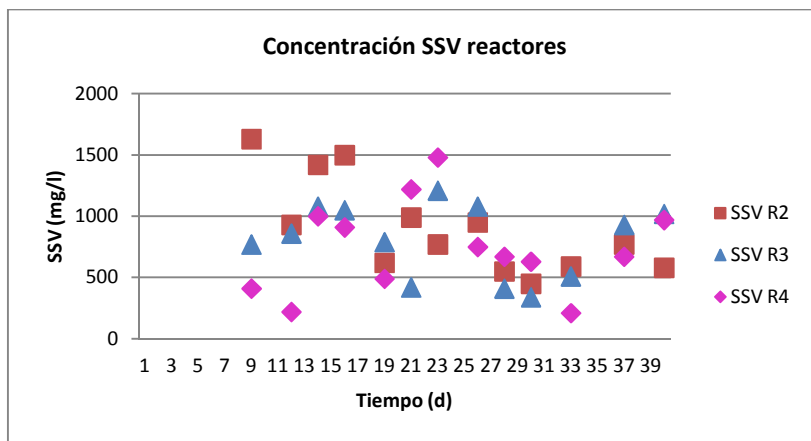


Figura 12. Sólidos suspendidos volátiles reactores R2, R3 y R4 en función del tiempo

La gráfica de SSV en los reactores de la figura 12, es parecida a la figura 10, con la diferencia que, la presente se asimila con la biomasa contenida en el reactor biológico.

Desde el inicio de la prueba donde se tenían concentraciones de 5680 mg/l de fango nuevo (que fue diluida con agua residual para repartir a los reactores R3 y R4) y de 3680 mg/l de fango nuevo (reactor R2); ha habido una pérdida considerable de microorganismos. Se observa que empieza a mejorar desde el día 30.

**Índice volumétrico de lodos (IVL)**

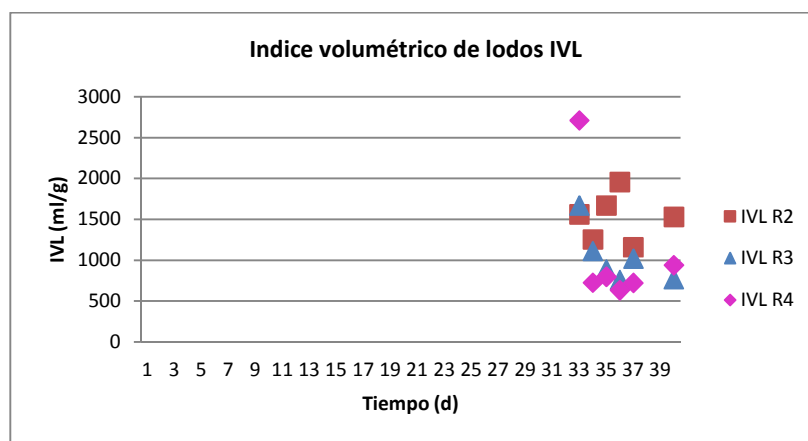


Figura 13. Índice volumétrico de lodos de reactores R2, R3 y R4 en función del tiempo



De acuerdo a la figura 13, se observa que el reactor R4 presenta mejores condiciones de sedimentabilidad con respecto a los reactores R2 y R3, pero aun así tiene un valor que esta sobre los 500 ml/g. Siendo el R2 el que tiene las peores condiciones.

En el día 33, se observa un incremento de IVL en el fango del R4, en el día 40 se observa un aumento de IVL del fango del R2, lo que se correlaciona con la figura 10, pues representa un descenso de sedimentabilidad y por consiguiente una pérdida de sólidos. Al contrario el fango del reactor R4 tiene una mayor sedimentabilidad y un aumento de sólidos, el IVL del R3 en el día 40 comienza a mejorar.

La figura 14, muestra una mejor sedimentabilidad del fango del reactor R4 y una pésima sedimentación del R2 y R3.

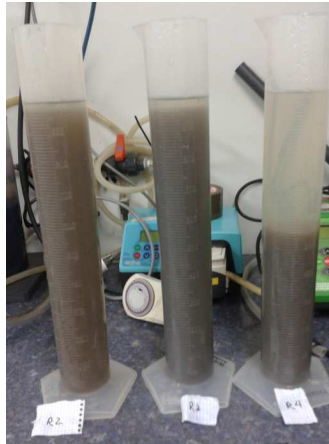


Figura 14. Ensayos del índice volumétrico de lodos de reactores R2, R3 y R4

### Oxígeno disuelto (OD)

La figura 15, muestra que el oxígeno disuelto en los reactores R2, R3 y R4, el día 1 fue de alrededor de 0,4-1,5 mg/l, a partir de esos puntos se observa cómo van fluctuando con relación al tiempo, dada la dificultad de mantener en un valor constante, generalmente a causa de falta de sustrato, en general se observa que se encuentran entre 1 a 3 mg/l, lo que es importante, puesto que a intervalos superiores a 1 mg/l y cercanos a 2 mg/l los microorganismos tienen concentraciones adecuadas de oxígeno para la oxidación.

En el día 9, se observa un incremento general de oxígeno disuelto, esto se debe a que ese día los reactores estaban sin alimentación desde la mañana hasta la tarde. Además un descenso drástico de concentración de oxígeno del reactor R4, desde los días 17 al 27, puede ser debido a que el control de la medición se haya realizado al poco tiempo que el sistema air lift comience a generar burbujas dentro del reactor, puesto que desde el día 14 hacia adelante, el reactor R4 estaba con temporizador, con periodos de parada y encendido. En el día 33 se tiene valores por debajo de 1mg/l, esto es debido a que se realizó la medida una hora después de realizar el ensayo de IVL, cuando los microorganismos recién empezaban a asimilar el oxígeno.

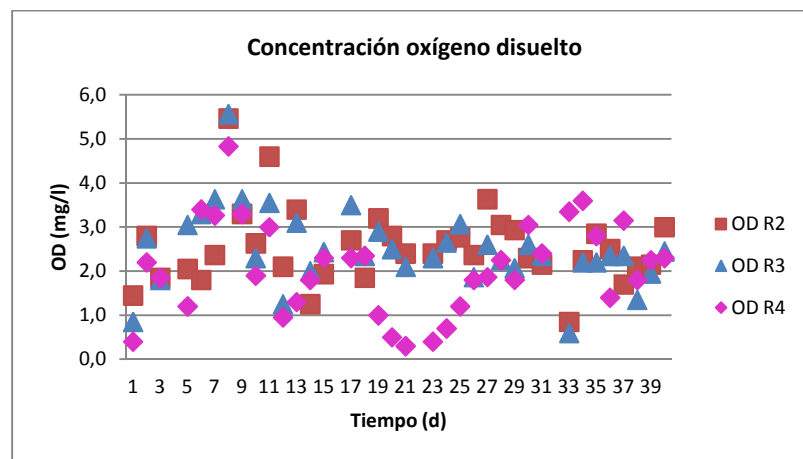


Figura 15. Oxígeno disuelto reactores R2, R3 y R4 en función del tiempo



La figura 14 se correlacionó con las figura 10 y 12 se observa que cuando hay valores bajos de OD (se consume más OD), se tiene mayor cantidad de SST y SSV. Esto puede ser debido a que los SST y SSV están ligados a la biomasa que utiliza OD para hacer uso del sustrato.

## PARAMETROS CARACTERISTICOS DEL PROCESO

Con los resultados de las pruebas realizadas con anterioridad se construyó las gráficas de los diferentes parámetros de diseño y operación del proceso de fangos activos. Se calcularon caudales de entrada, para conjuntamente con los ensayos de laboratorio obtener parámetros, como, el tiempo de residencia hidráulico (TRH), la relación F/M, edad del fango ( $\theta_c$ ), crecimiento bacteriano ( $Y$ ) y observar su evolución. Los diferentes caudales de los reactores R2, R3 y R4, se observan en la figura 16.

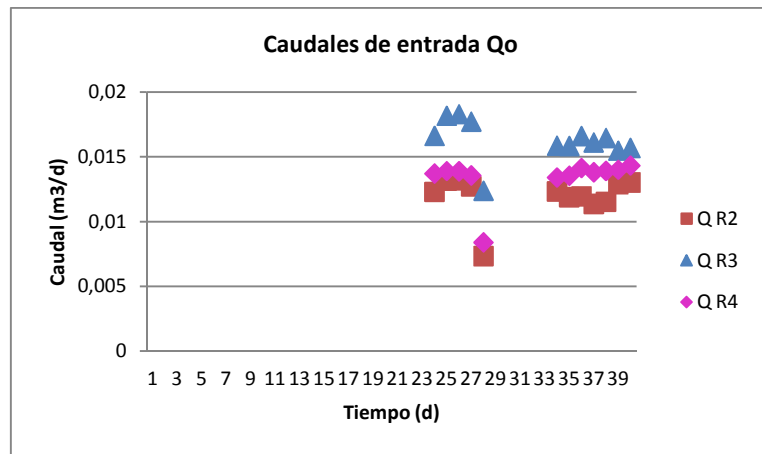


Figura 16. Caudales de entrada reactores R2, R3 y R4

El tiempo de retención hidráulico se encuentra en el rango de 9,30-14,5, siendo valores altos, dado que se suele encontrar entre 4-8 h. La figura 17, se muestra como el inverso de la figura 16, con picos notorios en el día 29 para el R2 y R4.

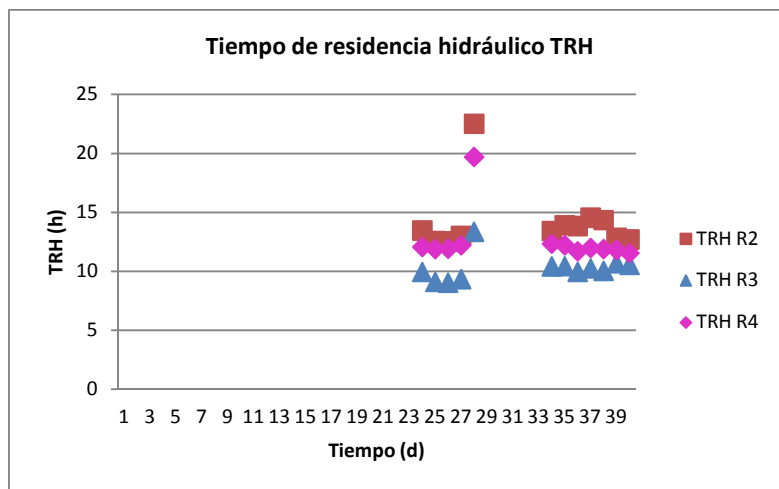


Figura 17. Tiempo de retención hidráulico reactores R2, R3 y R4

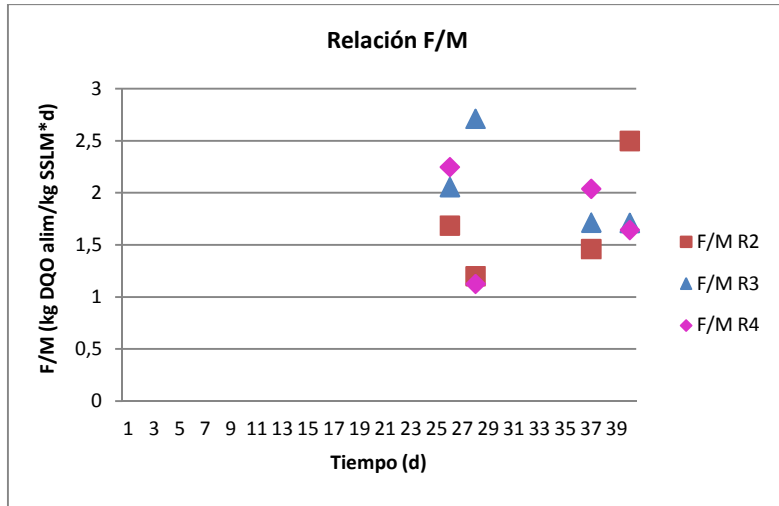


Figura 18. Relación F/M reactores R2, R3 y R4

Con referencia a la figura 18, el día 27, los reactores R3 y R4 presentan mayor relación F/M, para posteriormente mejorar hasta el día 40, sin embargo la relación F/M del reactor R2 empeoró, lo cual se relaciona con el lavado de la biomasa.

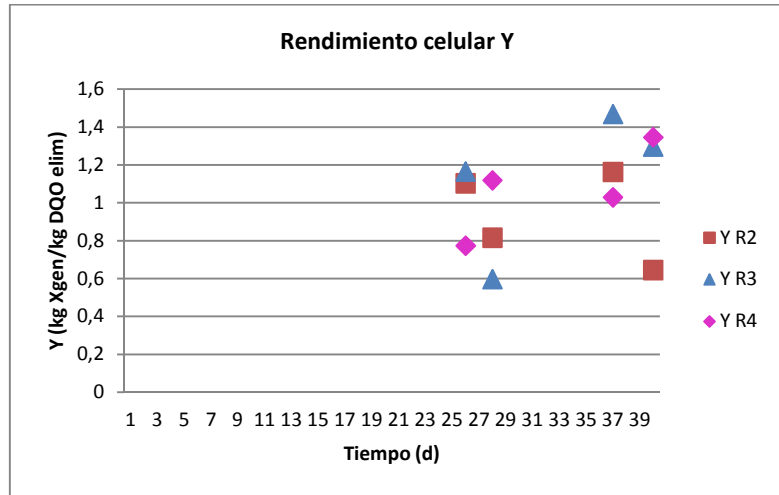


Figura 19. Rendimiento celular R2, R3 y R4

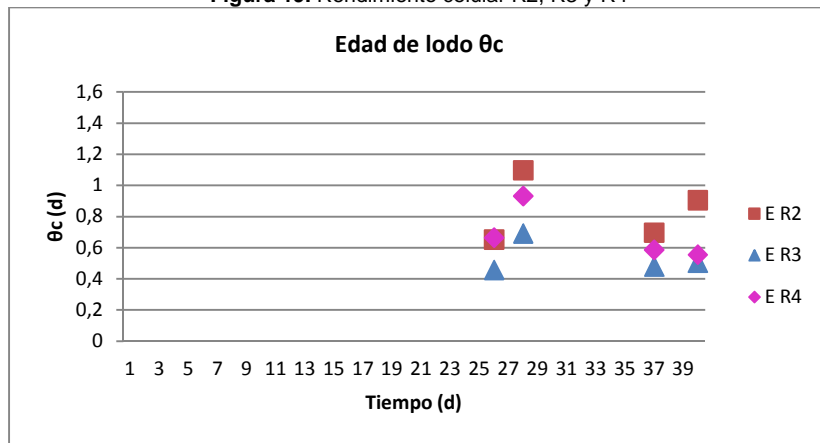


Figura 20. Edad del lodo R2, R3 y R4

La figura 19, muestra la síntesis de los microorganismos, observándose un crecimiento de microorganismos en el reactor R3 y R4.

La edad del lodo presenta valores demasiado bajos, como se ve en la figura 20, lo que se refleja en general en los floculos de malas características y baja sedimentabilidad, fácilmente arrastrado en el efluente.

Según los resultados obtenidos y la gráfica de Imhoff se propone realizar una purga de 1,35 g SST/g DQO<sub>eliminada</sub> para el reactor R2, 1,40 g SST/g DQO<sub>eliminada</sub> para el reactor R3 y 1,30 g SST/g DQO<sub>eliminada</sub> para el reactor R4. Lo aconsejable sería aumentar la edad del lodo y reducir la relación F/M para obtener mejores resultados.

## CONCLUSIONES

En este trabajo se realizó la puesta en marcha de una planta de fangos activos a escala de laboratorio con 3 reactores aeróbios de mezcla completa, en lo que respecta a la operación, depuración de materia orgánica carbonada y solidos suspendidos.

El sistema obtuvo buenos resultados de eliminación de materia orgánica, obteniendo un rendimiento de eliminación materia orgánica del 84-88% para el reactor R4. En cuanto a la eliminación de sólidos en suspensión, se tiene un de 86-91% de eliminación.

Los tiempos de aireación parecen tener una relación con los resultados del IVL, mejores resultados se obtuvieron para el R4, de acuerdo a su comportamiento en la investigación se observó que recirculaba más que los reactores R2 y R3, por lo que se podría decir que una recirculación adecuada reduce la cantidad de lodo en el fondo del reactor, previene la pérdida de solidos con el efluente y presenta una buena sedimentabilidad expresada en IVL.

La adecuación del sistema de reactor con recirculación interna obtuvo buenos resultados en el tratamiento biológico, en cuanto a la sedimentación, falta realizar ajustes en el sistema, el reducir el caudal de alimentación, produciría que no se sigan creando microorganismos jóvenes, que ocasionan la pérdida de microorganismos al flotar por el sedimentador secundario.

Tanto la relación F/M como la edad del fango, determinan el rendimiento de depuración del proceso de fangos activos, se propone purgar de 1,20 g SST/g DQO<sub>eliminada</sub> para el reactor R2, 1,40 g SST/g DQO<sub>eliminada</sub> para el reactor R3 y 1,35 g SST/g DQO<sub>eliminada</sub> para el reactor R4; mejores resultados pueden obtenerse con una menor relación F/M, edad del fango mayor y un tiempo de retención adecuado.

## AGRADECIMIENTOS

El autor agradece el apoyo de los tutores.

## BIBLIOGRAFÍA

APHA, AWWA and WEF. 1992. Standard methods for the examination of water and wastewater. 18th ed. American Public Health Association, Washington, D.C.

Grady J., Daigger G. and Lim H, 1999. "Biological wastewater treatment", Marcel Dekker, Inc., New York.

Imhoff, 1970. Manual de saneamiento de poblaciones.

López, 2010 Estudio a escala de laboratorio de los efectos de la forma de alimentación sobre el hinchamiento de los lodos de reactores aerobios mezcla completa en etapa de arranque, Fragua, Vol. 4, No. 7, pp. 115-138.

Metcalf y Eddy, 2003. Wastewater Engineering. Treatment and reuse.

Ortega, 2013. Tratamientos biológicos de fangos activados: Aspectos generales y procesos convencionales.

R.S. Ramalho, 1996. Tratamiento de aguas residuales.

Rittmann B. E., 2001 B., McCarty, P. 2001. Biotecnología del medio ambiente. Principios y aplicaciones.

Unión Europea, 1991. Directiva sobre tratamiento de las aguas residuales urbanas.

Van den Broeck et al., 2008 Assessment of activated sludge stability in lab-scale experiments *Journal of Biotechnology* 141 (2009) 147–154.

