



# Modelación de un sistema de lodos activados en el sector de las curtiembres de San Benito Bogotá\*

Uriel Fernando Carreño Sayago\*\*, Juan José Pérez\*\*\*, Deysi Cote Montañez\*\*\*\*, Adolfo León Agatón\*\*\*\*\*

*Modeling of an activated muds system for the leather sector in San Benito, Bogota*

*Modelação de um sistema de lamas ativadas no setor das curtume de San Benito Bogotá*

## RESUMEN

**Introducción.** La contaminación orgánica a través de los residuos de grasas y pelambre, entre otros subproductos residuales del proceso de elaboración de cueros, afecta los ecosistemas acuáticos causando el fenómeno de eutrofización, así como malos olores y taponamiento de tuberías debido a la acumulación de grasas, entre otros. **Objetivo.** Aprovechando la alta carga orgánica y la presencia

de microorganismos, se tuvo como objetivo el diseño e implementación de un sistema de lodos activados para este tratamiento, con un sistema sedimentador tipo colmena, y con la recirculación de lodos y demás para las aguas residuales de las curtiembres. Donde la carga contaminante es extremada y arroja niveles de DBO de 1350 mg/L, la oxigenación en este sistema es constante para conseguir un grado óptimo de tratamiento. **Materiales y Métodos.** A través de una modelación se determinaron las constantes de

---

\* Artículo original derivado del proyecto de investigación "Desarrollo, optimización e implementación de sistemas de tratamiento de aguas residuales y programas de producción más limpia en las curtiembres de San Benito de Bogotá D.C." \*\* Ingeniero de Producción en Biotecnología. Magíster en Desarrollo Sostenible y Medio ambiente. Docente de la Facultad de Ingeniería, Ingeniería industrial. Fundación Universitaria los Libertadores. Bogotá, Colombia. E-mail: ufcarrrenos@libertadores.edu.co. \*\*\* Ingeniero Biotecnológico. Especialista en gestión ambiental. Coinvestigador del proyecto. E-mail: ps.juanjose@gmail.com \*\*\*\* Ingeniera Biotecnológica. Especialista en seguridad ocupacional. Coinvestigadora del proyecto. deisy-cote@hotmail.com \*\*\*\*\* Coinvestigador proyecto Ingeniero Industrial. Magíster en ingeniería industrial. E-mail: Aleona@libertadores.edu.co

muerte celular y de crecimiento microbiano, para determinar valores estipulados en la literatura y así diseñar un adecuado tratamiento de las aguas de las curtiembres. Otro objetivo de esta investigación fue crear un modelo representativo del sistema teniendo en cuenta las concentraciones de microorganismos en el afluente y en la recirculación de microorganismos en el sistema de tratamiento que arrojan valores significativos para este tratamiento. Se hicieron caracterizaciones de

las aguas para realizar los balances de masa con valores representativos. **Resultados.** Se propuso un modelo de confiabilidad probabilística con los datos, se establecieron los mejores criterios de calidad. **Conclusión.** se obtuvo una confiabilidad de este sistema de tratamiento con varias distribuciones de confiabilidad.

**Palabras clave:** lodos activados, microorganismos; sistema de tratamiento; modelos; confiabilidad.

## ABSTRACT

**Introduction.** The organic pollution caused by fat and fur remains, among other products derived from leather production, affect water ecosystems by bringing the eutrophication phenomenon, stinking odors and the plugging of pipelines due to the accumulation of fat, among other elements. **Objective.** Using the high organic load and the presence of microorganisms, the objective proposed was the design and the implementation of an activated muds system for this treatment, with a sedimentation system of the hive type, and with the mud recirculation, and the like, for waste waters from the leather production. Where the contaminating load is extreme and has BOD levels of 1350 mg/L, the oxygenation of this system is constant to achieve an optimal degree in the treatment. **Materials and**

**methods.** By means of a model, the constants of cell death and microbial growth were determined for the values considered in the literature to design an adequate treatment for waste waters from leather industries. Another objective was the creation of a representative model of the system, taking into account the concentrations of microorganisms in the stream and in the re-circulation of microorganisms in the treatment system with significant values for such treatment. The waters were characterized for the mass balances with representative values. **Results.** A probabilistic reliability model was also proposed with the data, the best quality criteria were established. **Conclusion.** a reliability of this system was obtained with different reliability distributions.

**Key words:** activated muds, microorganisms, treatment system, reliability models.

## RESUMO

**Introdução.** A contaminação orgânica através dos resíduos de gordura e pelagem, entre outros subprodutos residuais do processo de elaboração de couros, afeta os ecossistemas aquáticos causando o fenômeno de eutrofização, assim como maus cheiros e entupimento de tubos devido à acumulação de gorduras, entre outros. **Objetivo.** Aproveitando a alta carga orgânica e a presença de microorganismos, se teve como objetivo o desenho e implementação de um sistema de lamas ativadas para este tratamento, com um sistema separador tipo colmeia, e com a recirculação de lodos e demais para as águas residuais das curtiembres. Onde a carga contaminante é extremada e mostra níveis de DBO de 1350 mg/L, a oxigenação neste sistema é constante para conseguir um grau ótimo de tratamento. **Materiais e métodos.** Através de uma modelação se determinaram as constantes

de morte celular e de crescimento microbiano, para que mostre valores estipulados na literatura para desenhar um adequado tratamento das águas das curtiembres. Outro objetivo desta investigação foi criar um modelo representativo do sistema tendo em conta as concentrações de microorganismos no afluente e na recirculação de microorganismos no sistema de tratamento que mostram valores significativos para este tratamento. Fizeram caracterizações das águas para realizar os balances de massa com valores representativos. **Resultados.** Também se propôs um modelo de confiabilidade probabilística com os dados. **Conclusões.** Se estabeleceram os melhores critérios de qualidade e se obteve uma confiabilidade deste sistema de tratamento com várias distribuições de confiabilidade.

**Palavras chave:** lamas ativadas, microorganismos; sistema de tratamento; modelos; confiabilidade.

## INTRODUCCIÓN

Hoy en día, el mundo está enfrentando una crisis debido a la falta de agua dulce limpia. Esta escasez de agua es una consecuencia del rápido desarrollo de las industrias y la gran cantidad de aguas residuales de procesos industriales que se descarga a los ríos y sistemas hídricos. Estas aguas residuales suelen contener una gran variedad de contaminantes, muchos en forma de iones catiónicos y aniónicos, aceites y grasas, y demás residuos orgánicos con efectos nocivos y venenosos sobre los ecosistemas. Generalmente, la remoción de estos contaminantes requiere de tecnologías efectivas, por lo que en las últimas décadas se han desarrollado técnicas de limpieza que tratan esta problemática.

El sector de las curtiembres en Bogotá y Cundinamarca contamina las aguas con grandes contenidos de materia orgánica e inorgánica; estas aguas llegan al río Bogotá y causan graves impactos ambientales, sociales, económicos y de salud en las poblaciones aledañas. La falta de medidas que mitiguen estos impactos durante más de 50 años ha llevado a que se declare como una zona altamente impactada por este sector productivo.

La industria del cuero se enfrenta al desafío de implementar medidas que minimicen el impacto ambiental generado por tanto tiempo, con la finalidad de dar cumplimiento a las regulaciones impuestas por los órganos ambientales. Esto ha llevado a que este tipo de empresas busquen alternativas para minimizar este impacto, implementando plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) especializadas (Kanagaraj, Babu, Mandal 2008; Petersen Gearney, Henze Vanrolleghem, 2002; Polesel, Lehnberg, Dott, Trapp, Thomas, Plósz, 2015).

El tratamiento de efluentes mediante lodos activados constituye la principal vía de reducción de carga orgánica (Espinosa y Fall, 2014); (Mañunga, 2014; Gómez, 2014; Nansubuga; Banadda; Ronsse; Verstraete & Rabaey 2015). Sin embargo, en el caso de algunas de las corrientes del procesamiento del cuero pueden producirse

efectos inhibitorios por la presencia de sales y otras sustancias químicas, como también por la presencia de materia orgánica de alto peso molecular de los efluentes de pelambre. Vidal, Nieto; Márquez, Mansilla, Bornhardt (2003) describieron que la eficiencia de un tratamiento biológico puede mejorar significativamente mediante un pre tratamiento oxidativo. La determinación de las constantes de crecimiento microbiano ( $\mu$ ), de consumo de sustrato ( $K_s$ ) y de muerte microbiana ( $K_d$ ) de un sistema de lodos activados para diferentes industrias es fundamental para entender el tratamiento y que funcione (Cárdenas, Landeta, Perruolo, Angulo, Yabroudi, Trujillo, 2014; Nogaj, Randall, Jimenez, Takacs, Bott, Miller, Wett, 2015; Yuan, Zhi, Liu, Karyala, Vikesland, Chen, XZhang, 2015; Nielsen y McMahon, 2014).

Se busca optimizar un sistema de lodos activados en el sector de las curtiembres de San Benito, al sur de Bogotá, con los mejores parámetros de diseño para replicarlo en otras zonas productivas. A través de la modelación se buscarán las variables de diseño, como en el caso de Ramírez Fajardo y Gómez (2014) y Wu, Yang, Wu, Mao, Zhou (2016). El modelo utilizado fue un balance de materia con los datos de eficiencias y muestreo de microorganismos en el reactor. También se construyó un nuevo modelo donde describe el tratamiento de las aguas contaminadas con ecuaciones de distribución de probabilidad, para optimizar las cargas que pueden entrar al sistema, debido a que las aguas de las curtiembres poseen altas cargas contaminantes. Se estableció la carga límite que puede entrar para no desestabilizarse.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Caracterización de las aguas

Se caracterizaron las aguas vertidas al alcantarillado para establecer las cantidades de carga orgánica y de cromo vertido, con la finalidad de conocer de manera actualizada dichos contenidos. El efluente fue obtenido de una industria de curtiembres local, ubicada en la

zona de San Benito, sur de Bogotá, Colombia. Se trabajó con efluente proveniente de la etapa de pelambre.

### Diseño de un sistema biológico de tratamiento de aguas

Se diseñó e implementó un sistema de lodos activados a escala piloto para tratar las aguas de una curtiembre del sur de Bogotá. Para un sistema de tratamiento de aguas residuales como el de las curtiembres que vienen cargadas con grandes contenidos de materia orgánica, el sistema de lodos activados suele ser un tratamiento bastante eficiente a la hora de remover esta carga orgánica.

## RESULTADOS

Los microorganismos presentes en el agua residual suelen ser unos aliados en el proceso a la hora de descontaminar materiales orgánicos disueltos en el agua. En esta sección se presentarán las ecuaciones más importantes para la recirculación y crecimiento de estos microorganismos. La ecuación 1 representa la velocidad de crecimiento microbiano.

$$\frac{dx}{dt} = \mu X = rg \text{ Ecuación 1}$$

rg=Velocidad o tasa de crecimiento bacteriano en la fase de crecimiento logarítmico

$\mu$ =Velocidad específica de crecimiento

X=concentración de microorganismos

Estos microorganismos son los que van a descomponer la materia orgánica presente en el agua residual. El sustrato propio va a ser la materia orgánica presente en el agua. La velocidad específica de crecimiento microbiano fue establecida por Monod en 1942, y se utiliza hasta esta fecha para describir el crecimiento microbiano en un sistema de tratamiento de lodos activados, y se representa en la ecuación 2.

$$u = \frac{UmS}{Ks+S} \text{ Ecuación 2}$$

$\mu$ =Velocidad específica de crecimiento

$\mu$ m=máxima velocidad de crecimiento

$K_s$ =Constante promedio de velocidad. Concentración de sustrato a la mitad del máximo de velocidad de crecimiento. masa/unidad de volumen.

S=Concentración del sustrato. masa/unidad de volumen

Sustituyendo la ecuación 1 en la ecuación 2 tenemos:

$$rg = \frac{UmSX}{Ks+S} \text{ Ecuación 3}$$

Velocidad (rg) es la tasa de crecimiento bacteriano en la fase de crecimiento logarítmico; para este crecimiento se necesitan las condiciones ideales de nutrientes y requerimientos de oxigenación; se representan en la ecuación 4.

$$rg = -Yrsu \text{ Ecuación 4}$$

Y=Coficiente de máximo rendimiento medido durante un período finito en la fase de crecimiento logarítmico. Se define como la masa de células formadas/masa de sustrato consumidos.

rsu=Velocidad de utilización del sustrato. Masa/unidad de volumen x tiempo.

Sustituyendo la ecuación 4 en la ecuación 3

$$rsu = -\frac{UmSX}{Y(Ks+S)} \text{ Ecuación 5}$$

El decremento en la masa celular es directamente proporcional a la concentración de organismos. Este decremento se conoce en la literatura como decaimiento endógeno. Estos dos parámetros son fundamentales a la hora de establecer las condiciones de crecimiento en el reactor de lodos activados.

$$rd = kd X \text{ Ecuación 6}$$

Debido a esto al crecimiento bacteriano se le resta la constante de decrecimiento bacteriano.

$$r_g'' = \frac{U_m S X}{(K_s + S)} - K_d X \quad \text{Ecuación 7}$$

Esta ecuación 7 es la que describe el balance interno de crecimiento microbiano, donde hay una multiplicación importante en el reactor y, por ende, también presenta un decaimiento microbiano.

Biomasa que entra + biomasa producida = biomasa que sale

**Balance de masa en el sistema de lodos activos**

En un digestor biológico como el de las curtiembres, se requiere separar los microorganismos (X) que degradan el sustrato (S) que es la materia orgánica que entra. Para tal fin, después de permanecer en el sistema un tiempo de retención depurando las aguas, se deben recircular para la debida depuración del agua. En la figura 1 se muestran los parámetros utilizados y el balance de cada uno de estos.

$$Q_o X_o + V(r_g'') = Q_e X_e + Q_w X_w \quad \text{Ecuación 8}$$

Q<sub>o</sub>=Flujo de agua en el influente

Q<sub>w</sub>=Flujo de lodos extraídos o desechados

Q<sub>e</sub>=Flujo de agua producto o agua en el efluente

Q<sub>r</sub>=Flujo de lodos que se recirculan al digestor biológico

X<sub>o</sub>=Concentración de biomasa en el influente

X=Concentración o masa de biomasa en el reactor

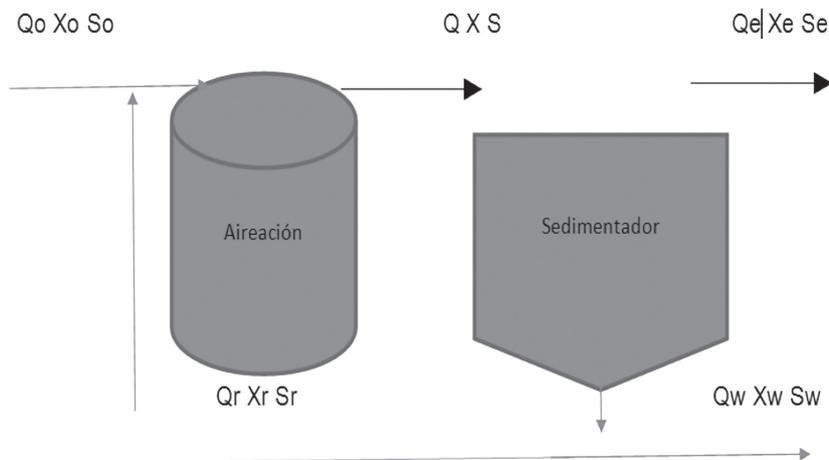
X<sub>w</sub>=X<sub>r</sub>=Concentración o masa de la biomasa en el sedimentador secundario, en el retorno de lodos y en los lodos residuales extraídos

X<sub>e</sub>=Concentración o masa de biomasa en el efluente

V=Volumen del reactor

r'<sub>g</sub>'=Tasa o velocidad real de crecimiento de los microorganismos

En la ecuación 8 reemplazamos la ecuación 7



**Figura 1. Sistema de tratamiento de aguas residuales con lodos activos**

Fuente: elaborado por los autores

$$Q_o X_o + V \left( \frac{U_m S X}{(K_s + S)} - K_d X \right) = Q_e X_e + Q_w X_w$$

Ecuación 9

Se hizo un balance de microorganismos que están creciendo en el reactor, por lo tanto, se tienen en cuenta el crecimiento microbiano y la muerte microbiana. En la ecuación 8 se muestra esta expresión.

En la ecuación 10 se asume que no hay microorganismos en el efluente, pero sí hay en la entrada.

$$V \left( \frac{U_m S X}{(K_s + S)} - K_d X \right) = Q_w X_w - Q_o X_o$$

Ecuación 10

Se divide todo por V

$$\frac{U_m S X}{(K_s + S)} = \frac{Q_w X_w}{V} - \frac{Q_o X_o}{V} + K_d X$$

Ecuación 11

Se divide todo por X

$$\frac{U_m S}{(K_s + S)} = \frac{Q_w X_w}{V X} - \frac{Q_o X_o}{V X} + K_d$$

Ecuación 12

### Balance de sustrato (DBO):

$$Q_o S_o + V(r_{su}) = Q_e S_e + Q_w S_w$$

Ecuación 13

Se tomó como referencia la ecuación 10 y en esta se involucró la ecuación 5 y 3, dando como resultado la ecuación 14.

$$Q_o S_o + V \left( \frac{U_m S X}{Y(K_s + S)} \right) = Q_e S_e + Q_w S_w$$

Ecuación 14

Donde

So es la cantidad de DBO en la entrada DBO

S es la concentración de DBO en el reactor

Sw concentración de DBO en el sedimentador secundario y en los lodos

Se concentración de DBO en el efluente

Pero  $S=S_e=S_w$  y también  $Q_e=Q_o-Q_w$

$$Q_o S_o + V \left( \frac{U_m S X}{Y(K_s + S)} \right) = (Q_o - Q_w) S + Q_w S_w$$

Ecuación 15

$$\left( \frac{V U_m S X}{Y(K_s + S)} \right) = Q_o (S_o - S)$$

Ecuación 16

$$\left( \frac{U_m S}{(K_s + S)} \right) = \frac{Q_o Y (S_o - S)}{V X}$$

Ecuación 17

Igualando las ecuaciones 12 y 17

$$\frac{Q_w X_w}{V X} - \frac{Q_o X_o}{V X} + K_d = \frac{Q_o Y (S_o - S)}{V X}$$

Ecuación 18

Para realizar los cálculos respectivos de las constantes Kd y Y, se deben caracterizar los caudales (Q), microorganismos (X) y concentraciones de sustrato DBO (S), antes que entren al sistema, en el sistema y por fuera del sistema.

La ecuación 18 servirá para realizar los ajustes respectivos y la modelación de este sistema de tratamiento. El tiempo de estancia o de retención de los lodos en el proceso  $\theta_c$  estará dado por la ecuación 20.

$$\theta_c = \frac{V X}{Q_w X_w}$$

Ecuación 19

El tiempo de residencia o tiempo de retención hidráulico  $\theta$  es:

$$\theta = \frac{V}{Q_o}$$

Ecuación 20

En este caso  $\theta_c$  es el tiempo de residencia de los lodos en el reactor y  $\theta$  el tiempo de residencia del agua en el mismo reactor de volumen V.

Otras ecuaciones de importancia para el proceso son:

$$Y_{obs} = \frac{Y}{1 + K_d * \theta}$$

Ecuación 21

$U$  = Velocidad específica de utilización del sustrato

$Y_{obs}$  = Rendimiento observado

$$Px = Y_{obs}Q_0(S_0 - S) \text{ Ecuación 22}$$

$Px$  = Cantidad de lodos que se producen por día, por unidad de masa de DBO removida

La cantidad de oxígeno demandada o requerida para la oxidación bioquímica sería la que se necesita para la oxidación del material orgánico, menos la que se requiere en las células o lodos de desecho producidos en el sistema.

$$O_2 \text{ Requerido} = Q_0(S_0 - S) - 1.42(Px) \text{ Ecuación 23}$$

## IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO DE LODOS ACTIVADOS

El reactor utilizado mostrado en la figura 2 estaba conformado por un recipiente cilíndrico de 70 L, un sistema de aireación, integrado por un compresor de aire de 72,737 KPa, conectado a un difusor punto burbuja de 28 cm de diámetro instalado por debajo del tanque, una bomba de recirculación del agua para el mezclado del lodo y el efluente de 180,425 W. Se emplearon ciclos de tratamiento con un tiempo de retención hidráulica ( $\theta$ ) de 1.1 día y una edad de lodo ( $\theta_c$ ) de 40 días y, una purga y sedimentación 1 hora.



**Figura 2. Sistema de tratamiento de lodos activados**

Fuente: elaborado por los autores

### Caracterización de las variables

Se caracterizaron los microorganismos en este sistema de tratamiento, antes del reactor, en el reactor y en las dos salidas. En la tabla I se representan estas caracterizaciones.

Se puede observar que los caudales son muy pequeños y a esta escala el sistema se deja modelar sin ningún problema. La recirculación de lodos es de una tercera parte del caudal. Las concentraciones de microorganismos en el reactor en el interior son importantes

para el proceso; la concentración inicial de microorganismos es fundamental en este cálculo.

Las concentraciones de DBO inicial y final son bastante eficientes donde se obtuvo un número de muestras representativas debido a que se tomaron 15 muestras para cada uno arrojando un promedio aritmético de 1350 (mg/L) en el afluente, y 150 (mg/L) en el efluente.

Los libros de tratamiento de aguas no contemplan la concentración inicial de microorganismos. En este artículo lo tenemos en cuenta.

Tabla I. Parámetros iniciales

Volumen (V)	L	70
Caudal (Qo)	L/día	60
Caudal (Qr)	L/día	20
Caudal (Qw)	L/día	40
DBO (So) Sustrato	mg/L	1350
DBO (S) Sustrato	mg/L	150
Concentración Inicial de Microorganismos (X)	mg/L	7700
Concentración Microorganismos (X)	mg/L	72500
Concentración Microorganismos (Xw)	mg/L	4500
Concentración Microorganismos (Xr)	mg/L	3200
Kd	l/día	0.064
Y	mg	0.6
$\theta_c$	l/día	40
$\theta$	l/día	1,1

Fuente: elaborado por los autores

### Modelación del sistema de tratamiento

Se toma la ecuación 18 y se despeja la constante de muerte microbiana.

$$\frac{Q_w X_w}{V_X} - \frac{Q_o X_o}{V_X} + K_d = \frac{Q_o Y (S_o - S)}{V_X}$$

Ecuación 24

Se despeja la Kd, siendo la Y = 0.6(mg)

$$K_d = \frac{Q_o Y (S_o - S)}{V_X} - \frac{Q_w X_w}{V_X} + \frac{Q_o X_o}{V_X}$$

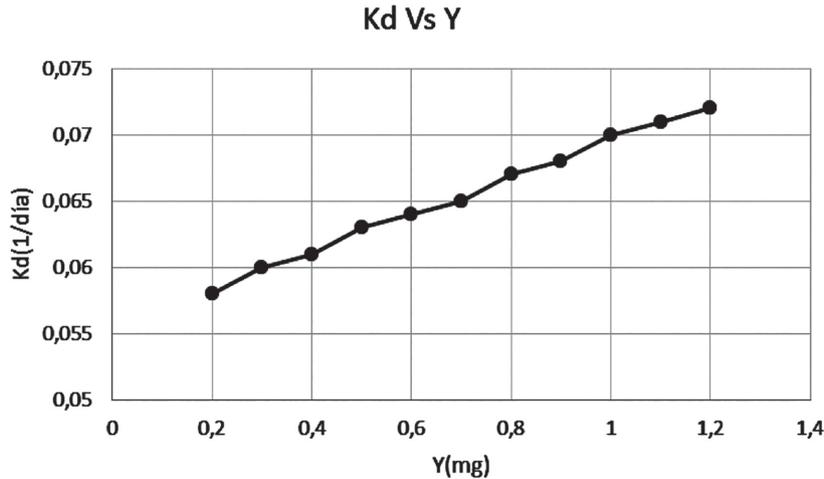
$$K_d = \frac{60 \left(\frac{mg}{L}\right) 0.6(mg) \left(1350 \left(\frac{mg}{L}\right) - 150 \left(\frac{mg}{L}\right)\right)}{70(L) * 72500 \left(\frac{mg}{L}\right)} - \frac{40 \left(\frac{mg}{L}\right) 4500 \left(\frac{mg}{L}\right)}{70(L) * 72500 \left(\frac{mg}{L}\right)} + \frac{60 \left(\frac{mg}{L}\right) 7700 \left(\frac{mg}{L}\right)}{70(L) * 72500 \left(\frac{mg}{L}\right)}$$

$$K_d = 0,064 \text{ día}^{-1}$$

Ecuación 25

A continuación, se muestra la proporcionalidad de estas dos constantes en el proceso. La gráfica 1 muestra la relación de la constante de

crecimiento celular y la constante de muerte celular.



**Gráfica 1. Kd Vs Y**

Fuente: elaborado por los autores

El coeficiente de máximo rendimiento (Y) es la masa de células formadas por masa de sustrato consumidos, y es proporcional sobre la constante de decrecimiento microbiano (gráfica 1).

$$\theta = \frac{Y}{Q_0}$$

$$\theta = \frac{70}{60}$$

$$\theta = 1.1 \text{ día}^{-1}$$

Ecuación 27

El tiempo de estancia del lodo se determinará con la ecuación 19, descrita en el diseño del sistema de tratamiento:

$$\theta_c = \frac{VX}{QwXw}$$

$$\theta_c = \frac{70(L) * 72500(\frac{mg}{L})}{20(\frac{L}{día}) * 5500(\frac{mg}{L})}$$

$$\theta_c = 40 \text{ día}^{-1}$$

Ecuación 26

La pertinencia de estos lodos en el sistema de tratamiento lo hace de bastantes días, ya que se necesita de las concentraciones microbianas para la estabilización del sistema de tratamiento.

El tiempo de residencia o tiempo de retención hidráulico  $\theta$  se obtiene con la ecuación 20:

Debido a la poca capacidad se decidió bajar el nivel de aguas a 60 L/día. El valor teórico de Y se verá reducido a Y(obs), ya que no todos los microorganismos se encuentran en fase exponencial. La ecuación que representa lo anteriormente mencionado es la ecuación 21.

$$Y_{obs} = \frac{Y}{1 + Kd * \theta}$$

$$Y_{obs} = \frac{0.6(\frac{mg}{mg})}{1 + (0.06d^{-1}) * (1.1d^{-1})}$$

$$Y_{obs} = 0.5$$

Ecuación 28

Se podría ajustar este valor en la ecuación 18. La ecuación 22 estipula la cantidad de lodos creados a diario.

$$Px = Y_{obs} Q_0 (S_0 - S)$$

Ecuación 29

Px=Cantidad de lodos que se producen por día, por unidad de masa de DBO removida

$$Px = 0.5 * 60 \left(\frac{l}{día}\right) (1350 \left(\frac{mg}{L}\right) - 150 \left(\frac{mg}{L}\right))$$

$$Px = 40195.5 \text{ mg/día}$$

Donde se genera una cantidad suficiente de lodos para la estabilización del sistema. La cantidad de oxígeno demandada o requerida para la oxidación bioquímica sería la que se necesita para la oxidación del material orgánico, menos la que se requiere en las células o lodos de desecho producidos en el sistema. A través de la ecuación 23, se determina la cantidad de oxígeno a utilizar.

$$O_2 \text{ Requerido} = Q_0 (S_0 - S) - 1.42 (Px)$$

$$O_2 \text{ Requerido} = 60 \left(\frac{l}{día}\right) (1350 \left(\frac{mg}{L}\right) - 150 \left(\frac{mg}{L}\right)) - 1.42 (40195.5)$$

$$O_2 \text{ Requerido} = 14922,9979 \text{ mg/día}$$

Ecuación 30

El requerimiento de oxígeno es de 14 g/día de oxigenación al sistema de tratamiento, debido a su alto grado de contaminación orgánica; la presencia de grasas y aceites es común en esta agua.

### Confiabilidad del sistema de tratamiento

La influencia de la carga de entrada puede desestabilizar el sistema de tratamiento. El objetivo de esta sección es determinar el límite que puede soportar el sistema para que pueda seguir con las eficiencias estipuladas. Comprobando con las diferentes distribuciones de probabilidad la confiabilidad de los datos, se establece la probabilidad con los datos monitorizados. En la tabla 2 se reportan los datos de la DBO en la entrada y salida.

Se puede observar que el tiempo de retención hidráulico es de 1 día; la DBO que entra es la carga que sale en un día. Un ejemplo es la DBO de 1350 mg/L del día 1, es la concentración de la DBO de salida 150 mg/L del día 2.

Se realizaron pruebas de Kolmogorov smirnov, para comprobar la distribución de los datos descritos. Los datos tienen un comportamiento

bajo, una distribución exponencial en el afluente y una distribución bajo una distribución Gamma en el efluente.

Gómez y Sarabia (2005) establecieron la confiabilidad a través de la distribución exponencial, ya que tiene una especial aplicación en sistemas ingenieriles como la predicción de la eficiencia en equipos. Además, se ha establecido que esta distribución es una de las más fáciles en implementar como es el caso de Carreño y Méndez (2012).

Este sistema de tratamiento se podría desestabilizar con unas concentraciones por encima del 1600 mg/L de DBO. A través de la siguiente ecuación 31 se determinará la probabilidad de que se dé este valor.

$$P(X \leq X_s) = 1 - \exp\left(-\frac{x}{s}\right), x \geq 0$$

Ecuación 31

Dónde:

X= DBO mg/L(S)

s = Promedio aritmético que es 1350 mg/L

**Tabla 2. Datos de la DBO de entrada y de salida durante 15 días de tratamiento**

	DBO (mg/L) (S)	DBO(mg/L) (So)
Día 1	1350	
Día 2	1400	150
Día 3	1420	140
Día 4	1370	155
Día 5	1250	130
Día 6	<b>1600</b>	145
Día 7	1450	<b>250</b>
Día 8	1230	160
Día 9	<b>1600</b>	130
Día 10	1150	<b>254</b>
Día 11	1200	150
Día 12	1580	130
Día 13	1350	143
Día 14	1200	154
Día 15	1500	135
<b>Promedio</b>	<b>1350</b>	<b>150</b>
Desviación estándar	138	31

Fuente: elaborado por los autores

$$P(X < 1600) = 1 - \exp\left(-\frac{1600}{1350}\right),$$

$$P(X < 1600) = 1 - \exp(-1,18),$$

$$P(X < 1600) = 1 - 0,30$$

A través de Excel se encontró que los parámetros son:

$$\lambda = 3,$$

$$p = 0,14$$

La confiabilidad de este sistema es del 70 %; hay una probabilidad del 30 % de que se sobrepasen estos valores; es necesario tener todas las previsiones para que no se pase este valor.

Se reemplazan en la Ecuación 32

$$F(x) = P(X < 30) = \frac{1}{0,14^3 * 3^0} x^{3-1} \exp\left(-\frac{x}{0,14}\right)$$

Para los datos de los efluentes se estableció que deben estar por debajo de 130 mg/L para cumplir con lo estipulado; aunque este valor debe ser mucho menor, se tuvo este objetivo para estabilizar la planta de tratamiento.

$P(X < 130) = 60\%$  de probabilidad en cumplir con el objetivo propuesto.

Para estabilizar este sistema de tratamiento se determinó la probabilidad en que se den concentraciones por debajo de 130 mg/L, estableciendo que en un 60 % se daría este valor.

$$F(x) = P(X < X_s) = \frac{1}{\lambda^3} x^{3-1} \exp\left(-\frac{x}{\lambda}\right)$$

$$F(x) = P(X < 130) = \frac{1}{\lambda^3} x^{3-1} \exp\left(-\frac{x}{\lambda}\right)$$

Ecuación 32

## CONCLUSIONES

- Se diseñó y construyó un sistema de tratamiento de lodos activados en el sector

de curtiembres de la ciudad de Bogotá, donde la carga contaminante es extremada, pues arroja niveles de DBO de 1350 mg/L; la oxigenación en este sistema es constante para conseguir un grado óptimo de tratamiento.

- Las constantes de muerte celular ( $K_d$ ) y de crecimiento microbiano ( $Y$ ) arrojaron valores estipulados en la literatura, determinantes a la hora de diseñar y ajustar el modelo para un adecuado manejo y tratamiento de las aguas de las curtiembres. Al determinar estas constantes en el modelo representativo del sistema se tuvieron en cuenta las concentraciones de microorganismos en el afluente y en la recirculación de microorganismos en el sistema de tratamiento; estas concentraciones no se tienen en cuenta en los modelos de diseño de lodos activados.
- Se propuso una modelación estadística de confiabilidad de los datos para estabilizar el sistema de tratamiento, en donde la entrada de los datos tiene una distribución exponencial estable, debido a que es muy poco probable que el sistema supere los 1600 mg/L, y en la salida la confiabilidad se determinó con las ecuaciones de distribución de probabilidad Gamma.
- Se propone un sistema de tratamiento del cromo complementario, debido a que afecta el crecimiento microbiano en las aguas y es altamente contaminante en el medio ambiente.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Cárdenas, C.; Landeta, K.; Perruolo, T.; Angulo, N.; Yabroudi, Trujillo A. y Flores, P.; (2014). Determination of kinetic constants for the design of biological treatment dairy effluent in batch system. *Rev. Téc. Ing. Univ. Zulia*. 37(1), 11 - 19, 2014.
- Carreño Sayago, U. & Méndez Sayago, J. (2012). Estimación de la confiabilidad de las plantas de tratamiento de aguas residuales que operan con lagunas de estabilización en la cuenca alta y media del río Bogotá. *Escuela de Ingeniería de los Recursos Naturales y del Ambiente. Eidenar*. V(10).
- Espinosa, R.; Fall, C. (2013). Optimization of the Production of Sludge in an Activated Sludge System Through the Calibration of the ASMI Model. *Ingeniería Investigación y Tecnología*. XVI (1), enero-marzo 2015: 93-104
- Gómez Déniz, E. & Sarabia, J. M. (2008). La distribución binomial-exponencial truncada con aplicaciones en el sector del seguro de automóviles. *Instituto de Actuarios Espanoles*, 14(8), 3-22.
- Gómez, J. D. (2014). Uso de herramientas computacionales en la enseñanza y el aprendizaje de la modelación de procesos ambientales. *Revista I3+*, 1(1). 64-82
- Kanagaraj, J., Babu, N. C., & Mandal, A. B. (2008). Recovery and reuse of chromium from chrome tanning waste water aiming towards zero discharge of pollution. *Journal of Cleaner Production*, 16(16), 1807-1813.
- Mañunga, T. (2014). *Evaluación del desempeño de un sistema de lodos activados en la modalidad de estabilización por contacto sin clarificación primaria tratando agua residual doméstica* (Doctoral dissertation). Trabajo de investigación para optar al título de Magister en Ingeniería: Área de énfasis en Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Universidad del Valle, Cali, Valle del Cauca. Colombia.
- Nansubuga, I., Banadda, N., Ronsse, F., Verstraete, W., y Rabaey, K. (2015). La digestión de alto índice de lodos activados acoplado a la formación de biocarbón para el mejoramiento del suelo en los trópicos. *Investigación del Agua*, 81, 216-222.
- Nielsen, P. H., & McMahon, K. D. (2014). Microbiology and microbial ecology of the activated sludge process. *Activated Sludge—100 Years and Counting*, IWA Publishing, London, 53-75.
- Nogaj, T., Randall, A., Jimenez, J., Takacs, I., Bott, C., Miller, M., ... & Wett, B. (2015). Modeling of organic substrate transformation in the high-rate activated sludge process. *Water Science & Technology*, 71(7), 971-979.
- Ramírez, J. S., Fajardo, A. M. & Cruz, C. A. (2015). Software de ingeniería especializado en el diseño y simulación de plantas de tratamiento de agua residual: revisión. *Revista Ingeniería y Región*, 13(1), 57-71.
- Rodríguez, M.; Fall C. (2014). Optimization of the Production of Sludge in an Activated Sludge

- System Through the Calibration of the ASMI Model. 16, (1). January–March 2015, 93–104.
- Vidal G.; Nieto J.; Márquez F; Mansilla H y Bornhardt C. (2003). Combinación de Procesos Biológicos y de Oxidación Avanzada para el Tratamiento de una Corriente de Proceso de la Industria de Curtiembre. *Congreso XXVII Interamericano de Ingeniería Sanitaria*. Cancún, México. Revista AIDIS.
- Petersen, B., Vanrolleghem, P. A., Gernaey, K., & Henze, M. (2002). Evaluation of an ASMI model calibration procedure on a municipal–industrial wastewater treatment plant. *Journal of Hydroinformatics*, 4(1), 15-38.
- Polesel, F., Lehnberg, K., Dott, W., Trapp, S., Thomas, K.V., & Plósz, B. G. (2015). Factors influencing sorption of ciprofloxacin onto activated sludge: Experimental assessment and modelling implications. *Chemosphere*, 119, 105-111.
- Yuan, L., Zhi, W., Liu, Y., Karyala, S., Vikesland, P. J., Chen, X., & Zhang, H. (2015). Lead toxicity to the performance, viability, and community composition of activated sludge microorganisms. *Environmental science & technology*, 49(2), 824-830.
- Wu, X., Yang, Y., Wu, G., Mao, J., & Zhou, T. (2016). Simulation and optimization of a coking wastewater biological treatment process by activated sludge models (ASM). *Journal of environmental management*, 165, 235-242.