

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE BIORREACTOR PARA  
DETERMINACIÓN DE COEFICIENTES CINÉTICOS DE TRATAMIENTO DE  
AGUA RESIDUAL PARA EL LABORATORIO DE TRATAMIENTO DE AGUAS DE  
LA UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS - SEDE BOGOTÁ

ANDREA VANESSA FORERO RAMÍREZ

Trabajo de grado

Para optar por el título de Ingeniera Civil e Ingeniería Ambiental

Director: Fabio Eduardo Díaz-Ingeniero Químico

Codirector: Andrés Felipe Martínez-Ingeniero Químico

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS  
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL  
FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL  
TRATAMIENTO DE AGUAS  
BOGOTÁ D.C.  
2021

## **Resumen**

Las aguas residuales no domésticas requieren de tratamientos específicos por los componentes y contaminantes emergentes que lo caracterizan por la actividad industrial desarrollada. Por esta razón es necesario determinar el tipo de tratamiento adecuado para cada tipo de vertimiento contribuyendo a reducir el impacto que generan sobre el cuerpo receptor. Para establecer el tratamiento acorde a la composición es necesario comprender el comportamiento de los microorganismos en dichos procesos de tratamiento por medio de la determinación de los coeficientes cinéticos empleando el método Lineweaver – Burk y la metodología experimental, simulando las condiciones reales en una planta a escala industrial, mediante un reactor a escala banco de pruebas que será la base para los diseños de reactores a escala real que se construyan y emplean métodos eficaces para la remoción de contaminantes por medio del tratamiento de lodos activados. El prototipo de reactor se pondrá en marcha en el laboratorio de tratamiento de agua de la Universidad Santo Tomás sede principal en Bogotá.

**Palabras clave:** Biorreactor, Agua residual, tratamiento, coeficientes cinéticos, prototipo, lodos activados, biológico.

## **Abstract**

Non-domestic wastewater requires specific treatments for the components and emerging pollutants that characterize it by the industrial activity developed. For this reason, it is necessary to determine the type of appropriate treatment for each type of shedding, helping to reduce the impact they generate on the recipient body. To establish the treatment according to the composition, it is necessary to understand the behavior of the microorganisms in said treatment processes by means of the determination of the kinetic coefficients using the Lineweaver - Burk method and the experimental methodology, simulating the real conditions in a scale plant. industrial, through a test bench scale reactor that will be the basis for the designs of full-scale reactors that develop effective treatments for the removal of pollutants through the treatment of activated sludge. The prototype reactor will be put into operation in the water treatment laboratory of the Universidad Santo Tomás headquarters in Bogotá.

**Keywords:** Bioreactor, Wastewater, treatment, kinetic coefficients, prototype, activated sludge, biological.

## **TABLA DE CONTENIDO**

|                                                      |    |
|------------------------------------------------------|----|
| <b>Resumen</b>                                       | 2  |
| <b>Abstract</b>                                      | 3  |
| <b>Introducción</b>                                  | 9  |
| <b>Planteamiento del problema</b>                    | 11 |
| <b>Objetivos</b>                                     | 12 |
| <b>Objetivo General</b>                              | 12 |
| <b>Objetivos Específicos</b>                         | 12 |
| <b>Justificación</b>                                 | 13 |
| <b>Antecedentes o estado del arte</b>                | 16 |
| <b>Marco teórico</b>                                 | 20 |
| Tratamientos Biológicos                              | 21 |
| Lodos Activados                                      | 22 |
| Reactores                                            | 23 |
| <b>Aerobios</b>                                      | 24 |
| <b>Anaerobios</b>                                    | 24 |
| Coeficientes de tratamiento (coeficientes cinéticos) | 25 |
| <b>Método Lineweaver-Burk</b>                        | 28 |
| <b>Alcance</b>                                       | 29 |

|                             |    |
|-----------------------------|----|
| <b>Metodología</b>          | 30 |
| Métodos                     | 33 |
| <b>Cronograma</b>           | 34 |
| <b>Resultados e impacto</b> | 35 |
| <b>Pertinencia social</b>   | 64 |
| <b>Conclusiones</b>         | 65 |
| <b>Recomendaciones</b>      | 67 |
| <b>Anexos</b>               | 68 |
| <b>Referencias</b>          | 72 |

## Lista de tablas

|                                                                                                                                                            |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabla 1 Datos obtenidos de la prueba de probeta invertida .....                                                                                            | 37 |
| Tabla 2 Cálculo de los caudales para el flujo en el biorreactor .....                                                                                      | 39 |
| Tabla 3 Determinación del tiempo de retención hidráulica .....                                                                                             | 40 |
| Tabla 4 Resultados medición diaria de DQO afluente y efluente.....                                                                                         | 45 |
| Tabla 5 Estimación del valor de DBO esperado a partir de DQO .....                                                                                         | 50 |
| Tabla 6 Resultados de la calibración de los cabezales OxiTop .....                                                                                         | 51 |
| Tabla 7 Elección de valor esperado de DBO a partir de los valores obtenidos de DQO.....                                                                    | 53 |
| Tabla 8 Consolidado resultados DBO de entrada y salida del biorreactor a partir del caudal .....                                                           | 55 |
| Tabla 9 Resultados medición solidos suspendidos volátiles del afluente.....                                                                                | 58 |
| Tabla 10 Datos recolectados de las pruebas de DBO del afluente y efluente, solidos suspendidos volátiles y porcentaje de remoción de materia orgánica..... | 59 |
| Tabla 11 Calculo de valores para gráfica 1 y determinación de coeficientes $K_s$ y $k$ .....                                                               | 59 |
| Tabla 12 Calculo de valores para gráfica 2 y determinación de coeficientes $k_d$ , $Y$ y $\mu$ .....                                                       | 60 |
| Tabla 13 Coeficientes cinéticos obtenidos a partir de la medición en laboratorio .....                                                                     | 62 |

## Lista de figuras

|                                                                                                                                                                             |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 Tasa de crecimiento de Monod constante en función del límite de la concentración de alimento (Metcalf, & Eddy, 2013).....                                          | 26 |
| Figura 2 Biorreactor para determinación de coeficientes cinéticos de agua residual .....                                                                                    | 35 |
| Figura 3 Montaje del biorreactor completamente mezclado de lodos activados para tratamiento de agua residual junto a tanques de entrada y salida y bomba peristáltica ..... | 36 |
| Figura 4 Prueba de probeta invertida para estimado de aire suministrado .....                                                                                               | 37 |
| Figura 5 Difusor de burbuja fina en zona de aireación del biorreactor de tratamiento de agua residual.....                                                                  | 37 |
| Figura 6 Bomba peristáltica de laboratorio MINIPULS® 3 Gilson para el control del caudal de entrada y salida del biorreactor .....                                          | 39 |
| Figura 7 (a) Biorreactor $Q_1 = 0,014 \text{ ml/s}$ Vol retención 4 L .....                                                                                                 | 41 |
| Figura 8 (b) Biorreactor $Q_2 = 0,019 \text{ ml/s}$ Vol retención 5 L .....                                                                                                 | 41 |
| Figura 9 (c) Biorreactor $Q_3 = 0,027 \text{ ml/s}$ Vol retención 6 L .....                                                                                                 | 41 |
| Figura 10 (d) Biorreactor $Q_4 = 0,045 \text{ ml/s}$ Vol retención 7 L.....                                                                                                 | 41 |
| Figura 11 (e) Biorreactor $Q_5 = 0,077 \text{ ml/s}$ Vol retención 8 L .....                                                                                                | 41 |
| Figura 12 Comparación de afluente y efluente del agua residual analizada.....                                                                                               | 42 |
| Figura 13 Control diario de pH para mantener el ambiente óptimo para el crecimiento de microorganismos.....                                                                 | 42 |
| Figura 14 Procedimiento para medición de DQO.....                                                                                                                           | 44 |
| Figura 15 Espectrofotómetro NANOCOLOR® UV/VIS II para lectura de DQO .....                                                                                                  | 44 |

|                                                                                                                                                                                                                              |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 16 Tubos para medición de DQO (a) Agua residual inicial (b) Comparación entre afluente y efluente (c) Muestras de agua residual de entrada al biorreactor d) Muestras de agua residual de salida del biorreactor..... | 46 |
| Figura 17 Perlas de NaOH, inhibidor de nitrificación y botellas OxiTop en calibración.....                                                                                                                                   | 50 |
| Figura 18 Gráficas con los resultados de calibración DBO .....                                                                                                                                                               | 51 |
| Figura 19 Incubadora TS 608/2-i para proceso DBO OxiTop.....                                                                                                                                                                 | 52 |
| Figura 20 Montaje de las botellas con los cabezales OxiTop para medición de DBO .....                                                                                                                                        | 53 |
| Figura 21 Gráficas de la lectura reportada de DBO del afluente .....                                                                                                                                                         | 54 |
| Figura 22 Gráficas de la lectura reportada de DBO del efluente .....                                                                                                                                                         | 54 |
| Figura 23 Balanza con peso de papel filtro.....                                                                                                                                                                              | 56 |
| Figura 24 (a) Bomba de vacío empleada para la separación de los sólidos suspendidos totales de la muestra de agua residual (b) Papel filtro con solidos suspendidos totales .....                                            | 57 |
| Figura 25 Horno para evaporar a sequedad el papel filtro a 105°C.....                                                                                                                                                        | 57 |
| Figura 26 Diferencia de apariencia entre agua residual de salida del biorreactor(izquierda) y muestra de agua residual de entrada (derecha) .....                                                                            | 58 |
| Figura 27 Gráfica 1 Metcalf y Eddy determinación de coeficientes cinéticos $k$ y $K_s$ .....                                                                                                                                 | 61 |
| Figura 28 Gráfica 2 Metcalf y Eddy determinación de coeficientes cinéticos $k_d$ , $Y$ y $\mu$ .....                                                                                                                         | 61 |

## Introducción

Las aguas residuales producidas por las industrias generan impacto al ser vertidas directamente a las fuentes de agua superficial, por esta razón se han implementado sistemas de tratamiento para disminuir y mitigar el impacto siendo una solución de final de tubo a la contaminación generada por los procesos de producción tradicionales. En muchos casos estos sistemas de tratamiento presentan problemas en su operación y funcionamiento debido a diseños que no corresponden a las condiciones ambientales, los parámetros y las características fisicoquímicas de los lugares donde se genera el efluente.

Los prototipos o modelos a escala laboratorio se construyen para verificar el diseño y operación exitosa de los sistemas de tratamiento para investigar, encontrar los parámetros de diseño y funcionamiento, entre otros y así poder evaluar la velocidad y eficiencia de remoción de contaminantes, como materia orgánica biodegradable por parte de los microorganismos según las características específicas del efluente que se va a tratar a partir de la medición de parámetros como la DBO, DQO y sólidos suspendidos totales, los cuales permiten determinar los coeficientes cinéticos de crecimiento biológico ( $Y, K_d, K_s, \mu_{max}, k$ ) que son específicos para cada tipo de residuo líquido.

Con el reactor de flujo continuo a escala de banco de pruebas se pueden determinar los parámetros cinéticos para el tratamiento de agua residual no doméstica teniendo en cuenta que estos coeficientes son específicos para cada tipo de efluente a considerar. Se han desarrollado estudios con respecto al diseño y construcción de reactores a gran escala pero en pocos casos se ha desarrollado un biorreactor a escala laboratorio como banco de pruebas para la investigación y determinación de las características propias de cada tipo de agua residual para que el diseño sea óptimo y acorde a las particularidades del efluente a tratar a partir de la determinación de los

coeficientes cinéticos que miden la velocidad de los microorganismos para remover de materia orgánica. Este equipo podrá ser usado por los estudiantes de ingeniería civil y ambiental de la Universidad Santo Tomás que podrán realizar proyectos de investigación empleando este biorreactor para determinar los coeficientes cinéticos de distintos tipos de agua residual no domestica dado que estos parámetros son específicos para cada tipo de efluente por el comportamiento de los microorganismos en los procesos de tratamiento de agua residual de acuerdo con la composición y fuente de la que proviene. Al poder identificar los procesos adecuados para el tipo de agua a la hora de diseñar las estructuras a gran escala se pueden generar descargas que cumplan con los requisitos y la normativa establecida por las autoridades ambientales con respecto a los vertimientos, lo cual disminuye el impacto a los cuerpos de agua donde son descargados estas aguas residuales industriales y a las comunidades aledañas que emplean el recurso hídrico en diversas actividades. El biorreactor se implementó dentro de los laboratorios de la Universidad Santo Tomás, empleando algunas muestras de una fuente no doméstica.

## **Planteamiento del problema**

Uno de los grandes problemas que se presenta en Colombia se debe al vertimiento de aguas no domesticas en las fuentes de agua superficial sin un tratamiento previo o con un tratamiento no adecuado según los componentes del agua residual dependiendo de la actividad de la cual proviene este vertimiento, generando problemas ambientales y riesgos a la salud de las poblaciones que se abastecen de estas fuentes de agua superficial contaminadas.

Es importante comprender el comportamiento de los microorganismos en dichos procesos de tratamiento de aguas residuales para definir el más adecuado según los contaminantes emergentes con los que cuente el agua residual y así poder determinar su tratamiento de remoción. Los coeficientes cinéticos permiten comprender el comportamiento de los microorganismos frente a la composición del agua residual y son empleados para diseñar estructuras como los biorreactores y lagunas de estabilización que llevan a cabo los procesos de tratamiento para generar descargas que cumplan con los requisitos de las autoridades ambientales en materia de normas de efluentes.

Para la determinación de los coeficientes cinéticos se propone el diseño, construcción y puesta en marcha de un prototipo de biorreactor de flujo continuo para la determinación de dichos coeficientes cinéticos experimentalmente para tratamiento de agua residual no doméstica, lo cual permitirá analizar el comportamiento de los microorganismos y las características particulares del agua residual para así tomar la mejor decisión frente al tratamiento a elegir. Este proyecto permitirá identificar en el laboratorio: (1) el grado de contaminación presente en las muestras de agua residual, (2) el tipo de tratamiento a seguir con dicho vertimiento de agua residual, mediante la caracterización física y química, con el fin de determinar los coeficientes cinéticos de tratamiento y (3) verificar qué porcentaje de remoción se logra con el procedimiento.

## **Objetivos**

### **Objetivo General**

Construir un prototipo de biorreactor de flujo continuo para determinación de coeficientes cinéticos de tratamiento de agua residual para el laboratorio de tratamiento de aguas de la Universidad Santo Tomás - Sede Bogotá

### **Objetivos Específicos**

- Diseñar el prototipo de biorreactor de flujo continuo para el tratamiento de agua residual no doméstica.
- Verificar el funcionamiento del biorreactor por medio de una calibración empleando un inóculo de agua residual.
- Determinar los coeficientes biocinéticos experimentalmente para agua residual no doméstica.
- Elaborar un manual de operaciones para el uso del biorreactor de tratamiento de agua residual.

## **Justificación**

Con el biorreactor se pueden determinar los coeficientes biocinéticos de cualquier tipo de agua residual industrial, que explican el comportamiento de los microorganismos en los procesos de tratamiento de agua residual. Comprender este comportamiento es importante para poder seleccionar los procesos más adecuados de tratamiento de agua residual con forme a las características del agua residual a la hora de diseñar las estructuras de tratamiento a gran escala. Los procesos de tratamiento pertinentes generan descargas que cumplen con los requisitos y la normativa de las autoridades ambientales con respecto a los vertimientos. El cumplimiento de los requisitos impuestos por estas entidades genera que los cuerpos de agua superficiales no reciban las cargas elevadas de contaminantes con las que cuentan las aguas residuales industriales sin tratamiento o con un tratamiento no adecuado para la remoción de los componentes. Esto genera un beneficio a los ecosistemas que se encuentran en el entorno y así mismo a los habitantes que se abastecen de este recurso primordial (Al-Malack, M. H., 2006).

Los efectos que tienen los vertimientos de aguas residuales industriales debido a la cantidad diversa de contaminantes emergentes con los que cuentan afectan el funcionamiento biológico de autodepuración por las sustancias y microorganismos que contienen y perjudican el ciclo natural del ecosistema, ya que son compuestos de distinto origen y naturaleza química, cuya presencia en el medioambiente, causan problemas ambientales y de riesgo para la salud. Estos compuestos se encuentran diseminados en el ambiente y se han detectado en fuentes de abastecimiento de agua, aguas subterráneas e incluso en agua potable (Gil, M. J. et al, 2012).

En Colombia, se cuenta con la regulación de vertimientos, la Resolución 0631 de 2015 que reglamenta el artículo 28 del Decreto 3930 de 2010 y actualiza el Decreto 1594 de 1984 (vigente desde hace 30 años) respondiendo a la nueva realidad urbana, industrial y ambiental del país. La

Resolución fomenta el control de las sustancias contaminantes que se depositan en los cuerpos de agua vertidas por cerca de 73 actividades productivas que se evidencian en ocho sectores económicos del país. Esta resolución debe ser cumplida y acatada por entidades y personas que desarrollan actividades industriales, comerciales o de servicios y que su desarrollo de actividades genere aguas residuales, que serán vertidas en un cuerpo de agua superficial o al alcantarillado público. El control se realiza a partir de la medición de la concentración de las sustancias descargadas a los cuerpos de agua y que afectan la calidad del agua. Las autoridades ambientales son las responsables de hacer un seguimiento y control al cumplimiento de esta Resolución a través de los permisos de vertimientos asignados. Por medio del proyecto se podrá aportar al cumplimiento de la normativa establecida y así disminuir los problemas ambientales y de riesgo para la salud que se puedan generar por los componentes de las aguas residuales industriales sin tratar o con un tratamiento no pertinente para el tipo de agua residual (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible ,2015).

Desde la ingeniería ambiental y civil, el prototipo de biorreactor para experimentación y estudios del tratamiento de agua residual a partir de procesos biológicos proporciona una solución para el tratamiento de aguas residuales no domésticas especialmente, con el prototipo a escala de banco de pruebas, siendo este el primer paso de escalado industrial, porque puede funcionar con flujo continuo y no intermitente como lo harían los prototipos a escala laboratorio o micro ensayos. Más adelante puede ser la base para futuros proyectos en las industrias, que representa al sector que genera la mayor cantidad de vertimientos sin tratamiento previo.

La elaboración del prototipo generará un aporte a la investigación, en las facultades de ingeniería civil e ingeniería ambiental de la Universidad Santo Tomás, por lo que se pretende sea la base

para los diseños de biorreactores industriales, para impactar de forma directa en el desarrollo de proyectos de docencia e investigación en diversas áreas del tratamiento del agua residual.

A partir de datos experimentales de demanda química de oxígeno (DQO), demanda biológica de oxígeno (DBO) y sólidos suspendidos, en el reactor se pueden obtener los coeficientes cinéticos  $Y, K_d, K_s, \mu_{max}, k$  siendo este el punto de partida para posibles planes de manejo y toma de decisiones frente al problema de los vertimientos. La implementación del prototipo se realizará en el laboratorio de aguas residuales de la Universidad Santo Tomás para experimentación, siendo la base para diseños de reactores de industrias que no cuenten con sistemas de tratamiento a partir de la determinación de los coeficientes biocinéticos y también para industrias que tengan sistemas de tratamiento, pero quieran establecer el tratamiento más adecuado según el comportamiento de los microorganismos en los procesos de tratamiento.

## **Antecedentes o estado del arte**

Para el tratamiento de agua residual industrial se debe considerar el tipo de fuente de la cual se obtiene el efluente a tratar porque no todos los tipos de agua residual industrial se tratan de la misma forma por la composición del vertimiento. Esto indica que el proceso de tratamiento es particular para cada industria para lo cual se han propuesto sistemas a escala laboratorio para determinar los coeficientes cinéticos del agua residual y así poder identificar el tipo de tratamiento pertinente para el diseño de estructuras a gran escala.

En las bases de datos se ha encontrado publicaciones que realizan el análisis de las variables que se pretenden considerar como lo son el caudal, el tiempo de retención hidráulica celular, pH, la temperatura, el oxígeno disuelto, DQO, DBO, VUO (la velocidad de utilización de oxígeno), los sólidos en suspensión volátiles en el licor de mezcla (SSVLM), los coeficientes cinéticos de crecimiento biológico ( $Y, K_d, K_s, \mu_{max}, k$ ), entre otros.

A partir del análisis de los resultados obtenidos en otros proyectos similares al que se llevará a cabo, se determinó emplear uno de los artículos como base para el desarrollo del biorreactor porque describe el diseño y la elaboración de este siendo un elemento útil para la medición de parámetros, poder seguir la metodología planteada y así poder evaluar la implementación de nuevos tratamientos cambiando a un medio continuo.

El procedimiento que se describe a nivel general se expresa en “El sistema fue evaluado por medio de un agua residual sintética de baja carga y composición conocida durante cuatro semanas con tiempos de retención hidráulica ( $\theta$ ) de 5, 14, 24 y 36 horas y celular ( $O_c$ ) de 7 días. Durante la evaluación se realizaron diariamente determinaciones de pH, temperatura y oxígeno disuelto, así mismo se determinaron tres veces por semana la DQO en el afluente y efluente, la

velocidad de utilización de oxígeno, el índice volumétrico de lodos y los sólidos suspendidos volátiles en el licor mezclado (SSVLM). La información generada por estos análisis permitió observar que el sistema tendió a estabilizarse durante las semanas tres y cuatro de operación alcanzando eficiencias de remoción de materia orgánica en términos de DQO entre 85 y 90 %, como también la determinación de los coeficientes cinéticos de crecimiento biológico  $Y$ ,  $k$ ,  $k_d$ ,  $a$ ,  $b$ ” (J. Quiroga, F. Díaz, 2008).

La determinación de los coeficientes biocinéticos genera una solución para comprender el comportamiento de los microorganismos en el proceso de tratamiento que se debe llevar a cabo dependiendo el tipo de agua residual. Los diagramas del proceso de tratamiento se pueden emplear para el proceso de estudio y experimento. Como una corta explicación del proceso “Los coeficientes biocinéticos y la eficiencia para tres procesos de lodos activados, incluida la aireación convencional, extendida y la estabilización de contacto, se determinaron a escala piloto durante seis meses en la planta de tratamiento de aguas residuales del sur de Isfahán...” (S. Mardani et al, 2008), la diferencia principal se enmarca en los tiempos considerados para el proyecto y las pruebas experimentales, porque las dimensiones que se tomarán son distintas y menores a las consideradas en el descrito anteriormente, pero la metodología puede ser aplicada para la determinación de los coeficientes biocinéticos.

En lo anterior se expresan los coeficientes de tratamiento que se pretenden determinar al construir el biorreactor, y demás parámetros por el tratamiento de lodos activados que es el que se considera aplicar. Así mismo, se tendrá en cuenta el impacto de las relaciones de recirculación de lodos en el rendimiento de anaeróbicos en un biorreactor de membrana para tratamiento de aguas residuales, proceso que se puede implementar en el prototipo de biorreactor, por medio del método de membrana anaerobia, el cual es una alternativa para el tratamiento, y que no se ha

implementado en gran magnitud en el país. Considerando así que se puede evaluar el proceso de lodos activados y de las membranas, para su comparación y elegir el método que genere mejores resultados a partir del estudio y de los datos obtenidos en diversos artículos para evaluar así mismo la recirculación de lodos y dar una posible recomendación para su uso (A. Aslam, et al, 2019).

La determinación de los coeficientes biocinéticos se ha realizado en estudios de biorreactores de membrana sumergida (IMBRs) justificando que es importante comprender el comportamiento de los microorganismos en los procesos de tratamiento de agua residual y así poder identificar los adecuados para el tipo de agua a la hora de diseñar las estructuras a gran escala. Los procesos de tratamiento pertinentes producen descargas que cumplen con los requisitos y la normativa de las autoridades ambientales con respecto a los vertimientos. En una de las investigaciones se realizó un proceso de lodos activados por membrana sumergida a escala laboratorio durante un período de más de 1 año para determinar los coeficientes biocinéticos del sistema IMBR bajo diferentes concentraciones de mezcla de sólidos suspendidos en licor (MLSS) y tasas de carga orgánica (Al-Malack, 2006).

La investigación mostró que el rendimiento ( $Y$ ), el coeficiente de desintegración endógeno ( $k_d$ ), la tasa máxima de crecimiento específico ( $\mu_m$ ) y la constante de saturación ( $K_s$ ) estaban en el intervalo de 0.487–0.583 mg / mg, 0.151–0.0261 día<sup>-1</sup>, 1,28–6,46 día<sup>-1</sup> y 289–2933 mg DQO / l, respectivamente, lo que indica que los valores de los coeficientes, excepto el de  $K_s$ , estuvieron dentro del rango de los reportados para los procesos convencionales de lodos activados. Los resultados también mostraron que se logró una eficiencia de eliminación de DQO que oscilaba entre el 80 y el 98%, donde se encontró que la eficiencia de eliminación de DQO aumentaba de manera insignificante con el aumento de la concentración de MLSS. La DQO del

efluente se simuló utilizando los coeficientes biocinéticos determinados durante la investigación. Se encontró que la producción de lodos a lo largo de la investigación fue de una media de 0,26 mg VSS / mg DQO (Al-Malack, 2006).

En una investigación con respecto al control de la formación de espuma para el tratamiento de aguas residuales farmacéuticas se determinaron los coeficientes biocinéticos en el sistema de biorreactor de membrana sumergida (SMBR) optimizando los valores de tasa de carga orgánica (OLR) y tiempo de retención de lodos (SRT) para disminuir la producción de sustancia polimérica extracelular (EPS) utilizada para el tratamiento de este tipo de agua. Se emplearon cuatro SMBR a escala de laboratorio durante un período de más de 8 meses para determinar los coeficientes biocinéticos y optimizar el funcionamiento de los sistemas SMBR bajo el SRT de 5, 10, 15, 20, 25 días y OLR de 0,03-0,32 g DQO / L. día. En este trabajo se evidencia que la menor cantidad de espuma se genera a una tasa de carga orgánica de 0,32 g DQO / L. día y un tiempo de retención de lodo de 15 días relacionado con poca concentración de proteína de EPS. Se encontró que el rendimiento (Y), el coeficiente de desintegración endógena ( $k_d$ ), la tasa máxima de crecimiento específico ( $\mu_{m\acute{a}x}$ ) y la constante de saturación ( $K_s$ ) de cuatro SMBR estaban en el intervalo de 0.073-0.310 mg / mg, 0.985 -3.119 día<sup>-1</sup>, 1.249-3.672 día<sup>-1</sup> y 2.63-106.671-232.55 mg / mg, 1-3.156 día mg DQO / L, respectivamente. Además, la condición de operación más apropiada para los lodos activados entre los SMBR fue el OLR de 0.1 g DQO / L. día y SRT de 15 días. En estas condiciones óptimas, se logró una eficiencia de eliminación de DQO del 92,8% y 3,708 l / día  $\mu_{m\acute{a}x}$ . Considerando los resultados obtenidos para un único tipo de agua residual y el análisis adicional de la espuma, se puede decir que la implementación de un biorreactor a escala laboratorio permite generar la determinación de los coeficientes biocinéticos para la

comprensión del comportamiento de los microorganismos con respecto al tratamiento en este caso de lodos activados (Farid A et al, 2009)

### **Marco teórico**

El agua residual es definida como un tipo de agua contaminada por sustancias orgánicas humanas o animales como sustancias fecales y orina y en consecuencia de la actividad industrial, se evidencia la diversidad de contaminantes dependiendo la fuente también conocida como aguas negras o servidas. La principal característica que presenta es que no puede usarse directamente por el alto contenido de contaminante. Este tipo de agua necesita de sistemas de tratamiento y disposición para prevenir la contaminación de fuentes hídricas principalmente (Gil, M. J. et al, 2012).

Se debe presentar una diferenciación a partir de la fuente del contaminante de la cual proviene y se encuentra presente en el agua. Se identifican dos grandes grupos, las aguas residuales domésticas y las aguas residuales industriales. De las aguas residuales domésticas se han generado gran cantidad de estudios, investigaciones, y demás análisis para su tratamiento y mayor aprovechamiento por la facilidad de identificación de sus contaminantes que son comunes en toda clase de agua residual doméstica como lo son constituyentes físicos, químicos y biológicos en una mezcla de sustancias orgánicas e inorgánicas, suspendidas o disueltas presentes en residuos alimenticios, materia vegetal, sales minerales, deposiciones, entre otros componentes debido a que las fuentes de las cuales provienen estas aguas residuales son similares.

Por el contrario, el agua residual industrial encierra una gran cantidad de tipos, que dependen de la fuente de la cual provienen con características físicas, químicas y biológicas distintas. De

forma general se puede establecer la siguiente clasificación a partir de la composición: aguas con materia orgánica biodegradable y no biodegradable (con presencia de metales pesados y aceites).

Por lo cual ha sido necesario desarrollar soluciones basadas en diversos métodos para el tratamiento de agua residual industrial. Algunos de los tratamientos se enmarcan en técnicas que pueden combinarse y pretenden erradicar diversos tipos de contaminantes como partículas en suspensión, aceites, materia orgánica no biodegradable, color, y metales, entre otros. Algunos de los procedimientos que facilitan la eliminación de algunos de estos contaminantes con estas características son la flotación, decantación, precipitación, coagulación-floculación, neutralización, adsorción, filtración, electrocoagulación y oxidación avanzada (A. F. Persino, 2012).

### Tratamientos Biológicos

Los tratamientos biológicos han evidenciado mayores rendimientos y menores costos de mantenimiento además que transforman los contaminantes por completo en sustancias inocuas como lo son el metano, el cual puede ser aprovechado como combustible, dióxido de carbono, agua y nitrógeno molecular. El proceso en el que se produce una destrucción completa de compuestos contaminantes mediante el uso de microorganismos es llamada mineralización, y según otras fuentes, los costos de inversión en tratamientos biológicos manejan una proporción de 5 a 20 veces menores que los tratamientos químicos, donde se describe así mismo los costes de tratamiento menores en una proporción de 3 a 10 veces en comparación a los tratamientos químicos (H. A. Hernández et al.; 2017, L.S. Daphne. et al., 1994 y A. Marco, S. Esplugas y G. Saum, 1997).

A través de los años, se han desarrollado diversos métodos de tratamiento biológico, generando ventajas económicas, eficientes y óptimas para remover la mayor cantidad de contaminantes presentes en el agua residual y reducir de alguna forma el impacto ambiental implementando este tipo de tratamientos. Existen varios tipos de tratamientos biológicos, por lo cual se nombran los principales: Lodos activados, nitrificación, lechos bacterianos, filtros verdes y digestión anaeróbica. Se describirá el principal aplicable al prototipo del biorreactor elegido a partir de sus ventajas en costos, implementación y optimización en la remoción de agentes contaminantes.

### Lodos Activados

El tratamiento por lodos activados o también llamado fangos activos es un proceso en el cual se evidencia el desarrollo de un cultivo de bacterias disperso en flóculos en un depósito con aireación sistemática. Se debe tener en cuenta que la materia orgánica sirve de alimento de estas bacterias aerobias, por lo cual se realiza una recirculación de una parte de estos fangos para mantener la concentración de bacterias en el depósito, es decir, mantener condiciones estables mientras se produce el crecimiento del cultivo. Este es un procedimiento empleado comúnmente para el tratamiento de aguas domésticas e industriales por la gran cantidad de ventajas que presenta, con la biomasa en suspensión, se debe disponer de un espacio para su disposición. (M. A. Pilato Sanz, 2017).

Este tratamiento biológico consiste en la transformación de la materia orgánica carbonácea disuelta y que en la mayoría de las veces se presenta en estado coloidal en diferentes gases y tejidos celulares junto a la formación de flocs biológicos compuestos de materia celular y coloides orgánicos presentes en aguas residuales, junto a la remoción por medio de la sedimentación. Es un proceso aerobio económico y eficaz, que se basa en la respiración, donde el

oxígeno es reducido y la materia orgánica o inorgánica es oxidada. El oxígeno libre cumple la función de aceptar electrones (J. Cuadrado y C. Cuartas, 2019, M. Bejarano, y M. Escobar, 2015).

Consiste principalmente en el consumo de sustrato por parte de los microorganismos a partir de reacciones de oxidación - reducción. El crecimiento de estos ocurre por la producción de células adicionales por las reacciones que se producen en los tratamientos de aguas residuales mediante la aplicación de biomasa al tanque, la cual es propia del agua residual que se va a tratar, actuando como el sustrato de los microorganismos y posteriormente consumida y biodegradable. Así se lleva a cabo la reproducción de las bacterias por fisión binaria, que se explica cuando la célula original se convierte en dos nuevos microorganismos y el tiempo requerido puede variar porque la división de las bacterias no está definida por un parámetro, solo depende de la disponibilidad de sustrato y los factores ambientales como la temperatura, la radiación solar, entre otras variables (M. A. Pilato, 2017, Metcalf, & Eddy, 2013).

### Reactores

En la industria se presentan considerables cantidades de aguas residuales ricas en fibras, carbohidratos, proteínas y lípidos. Diferentes teorías como la electrocoagulación y la separación por membrana han sido implementado para reducir la concentración de estos componentes El tratamiento anaeróbico presenta ventajas como la excelente remoción de la materia orgánica y menos producción de lodo, necesita poca energía, entre otras.

El tratamiento aeróbico es un proceso menos sensitivo, menor periodo de inicio, y eficiente remoción de nutrientes. Se evidencia “El tipo de tratamiento generalmente depende de las características de las aguas residuales, las pautas de efluentes y la mejor tecnología disponible.

Reactores como AF, RBC, ASP, MBBR y SBR se han ejecutado con éxito en el tratamiento de efluentes de mataderos. Por lo tanto, para reducir contenido tanto orgánico como inorgánico, ya sea SBR intermitente único o los conjuntos secuenciales combinados (anaeróbico y aeróbico) deben ser implementado.” (A. Aziz, et al., 2019). Por lo cual para definir si se puede emplear algún otro tipo de reactor se considera a partir de las características del agua a analizar. Los reactores se pueden clasificar de la siguiente forma:

### **Aerobios**

- **Lodos Activados:** Con la biomasa en suspensión, si se dispone de espacio, es un proceso económico y eficaz.
- **SBR Reactor biológico secuencial:** Proceso compacto y discontinuo que se caracteriza por su versatilidad y flexibilidad.
- **MBR Reactor biológico de membranas:** Necesita poco espacio, presenta una elevada eficiencia y un efluente de elevada calidad.
- **MBBR Reactor de lecho móvil:** Se caracteriza por estar la biomasa fija, obteniendo así una elevada eficiencia.
- **BIOCARB:** Proceso desarrollado con la biomasa fija, y supone una alternativa muy eficiente y competitiva.

### **Anaerobios**

- **Reactor UASB:** Proceso económico cuando las cargas orgánicas a tratar son elevadas.
- **Reactor RAFAC:** Proceso indicado para tratar elevadas cargas orgánicas, es muy competitivo (J. F. Muñoz y M. Ramos, 2014).

### Coeficientes de tratamiento (coeficientes cinéticos)

Las constantes cinéticas han sido estandarizadas para agua residual doméstica, pero para agua residual industrial no por la gran cantidad de composiciones que se presentan según la actividad que se realiza. Si se emplean estos coeficientes para agua residual domestica es muy probable que el diseño sea sobredimensionado generalmente porque no está analizando las condiciones propias del agua (C. L. Villamizar, D. A. R. Robayo, 2018).

En el modelo de reactor por lotes se emplea un método estándar para la determinación de los coeficientes cinéticos por medio de la medición del cambio en la concentración del sustrato en el tiempo y puede determinarse con el balance de masa del sustrato para un CSTR(Metcalf y Eddy, 2013) empleando las ecuaciones cinéticas discontinuas que se pueden usar para determinar si el tiempo de aireación del período de reacción seleccionado es suficiente para proporcionar la cantidad deseada de degradación.

Monod en 1949, desarrolló una ecuación modelo que supone que la tasa de utilización del sustrato y, por lo tanto, la tasa de producción de biomasa está limitada por la tasa de reacciones enzimáticas que involucran el compuesto del sustrato. La ecuación de Monod es:

$$\mu = \frac{\mu_m S}{K_S + S} \quad (1)$$

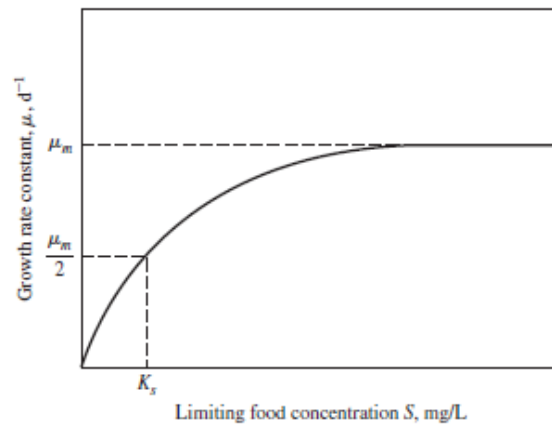
$$\mu_m = \text{Tasa de crecimiento específica máxima } d^{-1}$$

$$S = \text{Concentración de sustrato limitante del crecimiento } mg/L$$

$$K_S = \text{Coeficiente de velocidad media } mg/L$$

$$\text{Concentración de sustrato limitante cuando } \mu = 0,5\mu_m$$

La tasa de crecimiento de la biomasa sigue una función hiperbólica como se evidencia en la gráfica 1. Dos casos limitantes son de interés en la aplicación de la ecuación (1) a los sistemas de tratamiento de aguas residuales. En aquellos casos en los que hay un exceso del sustrato limitante, entonces  $S > K_s$  y la tasa de crecimiento constante  $\mu$  es aproximadamente igual a  $\mu_m$ . La ecuación (1) se convierte en orden cero en el sustrato. En el otro extremo, cuando  $S < K_s$ , el sistema está limitado por el sustrato y la tasa de crecimiento se vuelve de primer orden con respecto al sustrato.



*Figura 1 Tasa de crecimiento de Monod constante en función del límite de la concentración de alimento (Metcalf, & Eddy, 2013).*

En la ecuación (1) se supone solo el crecimiento de microorganismos y no tiene en cuenta la extinción natural. En general, se supone que la muerte o la descomposición de la masa microbiana es una expresión de primer orden en la biomasa y, por lo tanto, las ecuaciones se expanden a:

$$\frac{dX}{dt} = \frac{\mu_m SX}{K_s + S} - k_d X \quad (2)$$

$$r_g = \frac{\mu_m SX}{K_s + S} - k_d X \quad (3)$$

$$r_g = -Yr_{su} - k_d X \quad (4)$$

$k_d$  = Constante de velocidad de descomposición endógena o la velocidad

de decaimiento o muerte de microorganismos,  $d^{-1}$

$r_g$  = Tasa neta de producción de biomasa,  $g\ VSS/m^3 * d$

Si todo el sustrato en el sistema se convirtiera en biomasa, la tasa de utilización del sustrato ( $dS / dt$ ) sería igual a la tasa de producción de biomasa. Debido a la ineficiencia del proceso de conversión, la tasa de utilización del sustrato será mayor que la tasa de utilización de la biomasa, por lo que:

$$-\frac{dS}{dt} = \frac{1}{Y} \frac{dX}{dt} \quad (5)$$

$Y$  = Fracción decimal de la masa del sustrato convertida en biomasa

$$= \text{coeficiente de rendimiento} * \frac{\text{mg / L de biomasa}}{\text{mg / L de sustrato utilizado}}$$

Combinando las ecuaciones (1) y (5) se obtiene:

$$-\frac{dS}{dt} = \frac{1}{Y} \frac{\mu_m S X}{K_S + S} \quad (6)$$

$$r_{su} = \frac{1}{Y} \frac{\mu_m S X}{K_S + S} \quad (7)$$

$r_{su}$  = Tasa de utilización del sustrato o tasa de cambio de concentración del sustrato.

Las ecuaciones (3) y (7) son una parte fundamental del desarrollo de las ecuaciones de diseño para los procesos de tratamiento de aguas residuales (Metcalf, & Eddy, 2013).

Para determinar los coeficientes  $Y$ ,  $k$ ,  $K_s$  y  $k_d$ , se usan reactores a escala laboratorio o sistemas a escala de planta piloto como el que se realizó para la Universidad Santo Tomás a partir de este proyecto los cuales funcionan dentro de un intervalo de concentraciones de sustrato del afluente, y un tiempo de retención hidráulico específico para cada caudal. A partir de los datos experimentales obtenidos de las mediciones, se pueden determinar los valores medios de  $S_0$ ,  $S$  y  $X$  con la siguiente ecuación:

$$r_{su} = -\frac{S_0 - S}{\theta} = -\frac{kXS}{K_s + S} \quad (8)$$

Si se toma la inversa de la ecuación (8) se obtiene la forma lineal así:

$$\frac{X\theta}{S_0 - S} = \frac{K_s}{kS} + \frac{1}{k} \quad (9)$$

Los valores de los coeficientes  $K_s$  y  $k$  pueden determinarse graficando  $\frac{X\theta}{S_0 - S}$  respecto a  $\frac{1}{S}$  y los valores de  $Y$  y  $k_d$  pueden determinarse utilizando  $\frac{1}{\theta}$  respecto a  $\frac{S_0 - S}{X\theta}$  a partir del método Lineweaver-Burk.

### **Método Lineweaver-Burk**

A partir del ajuste por regresión lineal sobre datos transformados, se generan algunas ventajas, una de ellas consiste en que no requiere un software específico, además resulta fácil de evaluar estadísticamente. Este método es dependiente de la calidad de los datos. El método de linealización o dobles recíprocos, será utilizado como una herramienta gráfica para calcular los parámetros cinéticos. Este análisis es utilizado en cinética enzimática, los datos se grafican de tal manera que en el eje  $x$  se representa la variable independiente y en el eje  $y$  la variable

dependiente, la línea trazada por regresión lineal se elige para minimizar la suma de los cuadrados de las distancias de los puntos a partir de esa línea (E. Lira Silva, R. Jasso Chávez, 2013).

Este método permite tratar relaciones curvas y transformar los datos en una línea recta (regresión lineal). Algunos métodos de linealización utilizados son: Lineweaver–Burk ( $1/v$  versus  $1/S$ ), Eadie–Hofstee ( $v$  versus  $v/S$ ), Hanes ( $S/v$  versus  $S$ ) y Scatchard ( $v/S$  versus  $v$ ) donde  $v$  es velocidad inicial,  $S$  la concentración de sustrato. Estos métodos se pueden aplicar a la ecuación de Michaelis-Menten  $v = (V_{\max} [S]) / (K_m + [S])$ , para determinar la  $K_m$  y  $V_{\max}$  a partir de la pendiente y el intercepto. Es empleado como una herramienta gráfica para calcular los parámetros cinéticos de una enzima, cuyo recíproco es  $1/v = K_m / (V_{\max} [S]) + 1 / V_{\max}$ , donde  $v$  es la velocidad de reacción,  $K_m$  es la constante de Michaelis-Menten,  $V_{\max}$  es la velocidad máxima, y  $[S]$  es la concentración de sustrato y permite determinar  $K_s$  a partir del punto de intersección con el eje de las ordenadas es  $(1/k)$ , y el de las abscisas al origen se puede obtener  $(1/S)$ . Permite determinar  $Y$ ,  $K_d$  y  $\mu_{\max}$  a partir del punto de intersección con el eje de las ordenadas es  $(S_0 - S/\theta X)$ , y el de las abscisas al origen se puede obtener  $(1/\theta)$  (E. Lira Silva, R. Jasso Chávez, 2013).

## **Alcance**

Se realizó un prototipo de un biorreactor de flujo continuo para determinar coeficientes cinéticos experimentalmente para tratamiento de agua residual industrial a partir del diseño, construcción y puesta en marcha del prototipo el cual permitirá emplear distintos tipos de composición de agua residual para determinar sus características y coeficientes propios, esto con el fin de ser la

base para el diseño de un sistema de tratamiento acorde a las condiciones que presenta cada tipo de agua residual industrial según su composición.

La implementación del prototipo se realizó en el laboratorio de aguas residuales de la Universidad Santo Tomás para experimentación. Este prototipo es de gran importancia debido a que permite determinar los coeficientes cinéticos de crecimiento biológico para aguas residuales industriales y permite realizar la comparación de la cinética de consumo de sustrato. La determinación de los coeficientes es de gran importancia para poder diseñar plantas de tratamiento a escala real, lagunas de estabilización, entre otras estructuras para el tratamiento de agua residual industrial para poder tratar el tipo de efluente del cual se hallaron los coeficientes cinéticos. El prototipo a escala banco de pruebas facilitará la determinación de coeficientes de remoción de DBO ( $k$ ), que, a partir de la consulta realizada en varias fuentes, se evidencia ausencia de estudios en esta área en especial al estudio de las aguas residuales industriales. Este proyecto pretende profundizar el estudio y análisis del tratamiento de las aguas residuales industriales debido a que las constantes cinéticas están definidas para agua residual doméstica, pero para agua residual industrial no por la gran variedad que presenta. Se debe considerar que este prototipo permitirá especificar un tratamiento acorde al tipo de agua residual específica empleando los coeficientes cinéticos determinados. Si se emplean los coeficientes cinéticos estandarizados de agua residual doméstica en un tratamiento para agua residual industrial es muy probable que el diseño sea sobredimensionado generalmente porque no está analizando las condiciones propias del agua (C. L. Villamizar, D. A. R. Robayo, 2018).

## **Metodología**

Para el desarrollo del proyecto se plantearon y ejecutaron ciertas actividades para lograr el cumplimiento de los objetivos, entre ellas se encuentran las siguientes:

- Revisar la literatura y definir las características para la elaboración del prototipo.
- Diseñar el biorreactor con las mejores condiciones de flujo continuo tomando de referente biorreactores de uso doméstico. Para esta etapa del proyecto se empleó un modelo base adaptado que fue propuesto por Reynolds & Richards (2006). El biorreactor tiene un volumen de 18 litros, considerando que la capacidad útil representa 10 litros. Además, el biorreactor cuenta con una zona de sedimentación y una separación con un deflector regulable.
- A partir del diseño se construye el biorreactor de flujo continuo para determinación de coeficientes de tratamiento de agua residual no doméstica elaborado en acrílico y emplea aireación de burbuja fina. Se realiza la prueba de hermeticidad para corroborar que el biorreactor no tiene fugas y que el volumen será constante.
- Una vez construido el prototipo del biorreactor se realizan las pruebas hidráulicas de funcionamiento durante dos semanas aproximadamente. En estas pruebas iniciales se pretende alcanzar las condiciones de equilibrio del sistema, es decir que los valores de DQO y DBO sean constantes, además, se comprueba la calibración del biorreactor empleando un inóculo sintético de características conocidas.
- Determinar los resultados de los parámetros medidos para encontrar los coeficientes cinéticos experimentalmente para un inóculo de agua sintética de baja carga y composición conocida y un tipo de agua residual de alta carga orgánica asegurándose que los datos sean suficientes para el análisis de la cinética del crecimiento biológico del reactor. Se tomarán mediciones diarias de pH y temperatura, además, se registrarán los valores de demanda biológica de Oxígeno (DBO), demanda química de oxígeno (DQO) y sólidos suspendidos totales (SST).

Los insumos necesarios para el desarrollo del proyecto son:

- ✓ Reactor en acrílico
- ✓ Tanque de almacenamiento de agua residual
- ✓ Aireadores de burbuja fina
- ✓ Mangueras de silicona
- ✓ Kit DQO
- ✓ Reactivos DBO (KOH e inhibidor de nitrificación)
- ✓ Botellas OxiTop DBO5 e incubadora
- ✓ Sensor de pH
- ✓ Multiparámetro portable
- ✓ Solución de glucosa
- ✓ Nutrientes
- ✓ Caja de filtros de fibra de vidrio
- ✓ Espectrofotómetro
- ✓ Capsulas de porcelana
- Realizar los análisis de resultados aplicando la metodología descrita en el Standard Methods for the examination of water and wastewater, la cual establece como principal método el Lineweaver-Burk por medio de las gráficas elaboradas con los resultados obtenidos ajustando la curva de tendencia que mejor se adapte. Los valores de los coeficientes cinéticos serán estimados por medio de análisis de regresión de los datos experimentales a partir de valores promedio semanales de las variables medidas (DQO, DBO, SST). Los monitoreos se realizarán en el afluente, en reactor que contiene el lodo mezclado del reactor y en el efluente clarificado. Las constantes cinéticas se obtienen

gráficamente, y los datos obtenidos se analizan según las ecuaciones cinéticas de crecimiento biológico microbiano de Metcalf y Eddy y de Ramalho. En este estudio se determinarán:

- El coeficiente de velocidad media ( $K_s$ )
  - La tasa máxima de degradación de sustrato ( $k$ )
  - El coeficiente de producción de biomasa ( $Y$ )
  - La velocidad de decaimiento o muerte de microorganismos ( $K_d$ ).
  - La tasa máxima de crecimiento específico ( $\mu_m$ )
- Una vez se culminó la etapa experimental y de análisis de resultados se elaboró un manual de operaciones para el correcto uso del biorreactor de tratamiento de agua residual no doméstica indicando las recomendaciones pertinentes para futuros diseños de biorreactores y para estudios de plantas de tratamiento de agua residual.

## Métodos

Medición (para el diseño, construcción y análisis de DQO, DBO, SST), experimentación, estabilidad del sistema, condiciones de equilibrio, obtención de datos para análisis cinético del crecimiento biológico dentro del reactor y comparación de resultados (a partir de otros estudios realizados). De carácter inferencial se realizó la tabulación de datos, gráficas, promedio, regresión lineal e intervalos de confianza.

Selección de las Variables: Se tuvieron en cuenta variables como: volumen del reactor, el caudal, el tiempo de retención hidráulica celular, pH, temperatura, demanda química de oxígeno (DQO),

demanda biológica de oxígeno (DBO), sólidos suspendidos totales, sólidos en suspensión volátiles y finalmente los coeficientes cinéticos de crecimiento biológico ( $K_s$ ,  $Y$ ,  $k$ ,  $K_d$ ,  $\mu_m$ ).

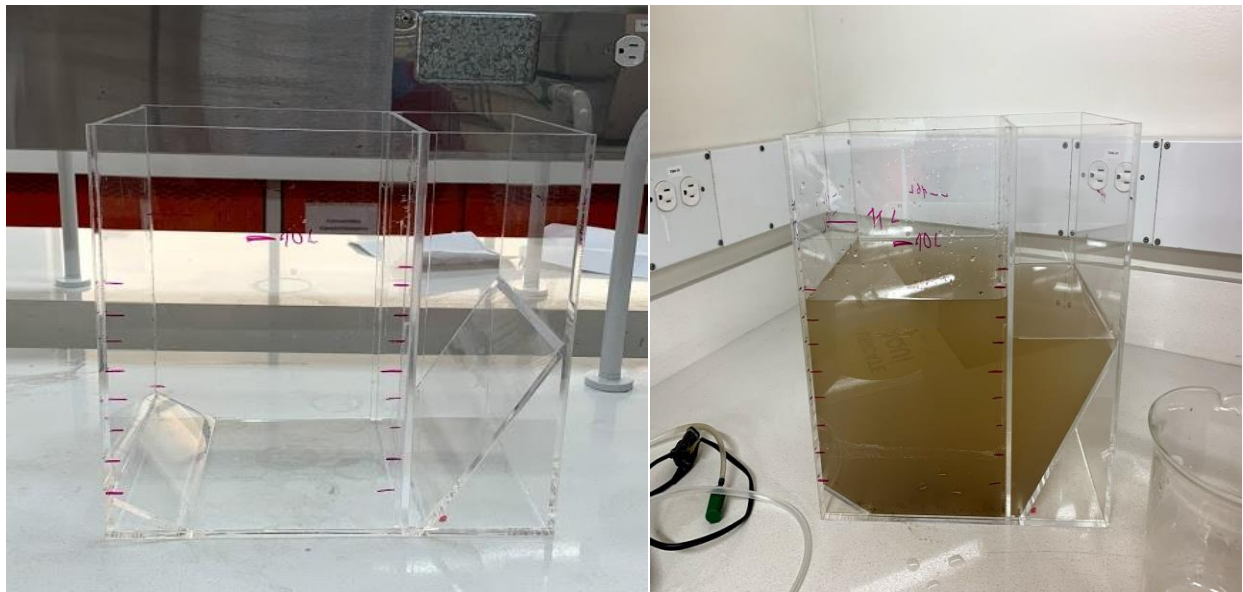
### **Cronograma**

El proyecto requiere de tiempo de trabajo para todos los procedimientos de análisis de las fuentes relacionadas, el diseño, construcción, pruebas experimentales y determinación de coeficientes cinéticos de tratamiento.

El tiempo proyectado para la operación del sistema es de 4 semanas. En las primeras dos semanas se pretende alcanzar las condiciones de equilibrio del sistema, es decir que los valores de DQO y VUO sean constantes. Se llevo a cabo dentro de los laboratorios de la Universidad Santo Tomás, empleando algunas muestras de agua residual comercial.

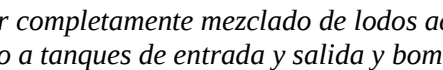
## Resultados e impacto

A continuación, se presenta el biorreactor el cual consiste en un modelo adaptado propuesto por Reynolds & Richards (2006). El biorreactor tiene un volumen de 18 litros, de los cuales 12 litros corresponden a la zona de aireación y 6 litros a la zona de sedimentación, dichas zonas se encuentran separadas por medio de un deflector regulable. Para su funcionamiento se considera que la capacidad útil representa 10 litros. Los detalles del diseño se presentan en el plano (ver Anexo A).



*Figura 2 Biorreactor para determinación de coeficientes cinéticos de agua residual*

Se realizó el diseño, construcción, puesta en marcha y operación de un biorreactor completamente mezclado en estado estable porque mantiene un flujo continuo. Este reactor no tiene gradientes de mezcla por el tamaño a escala que presenta. Comprende un proceso de tratamiento de lodos activados para el tratamiento de aguas residuales a escala laboratorio. El modelo seleccionado es una adaptación del propuesto por Reynolds & Richards (2006), las



El sistema consiste en dos fases, la primera comprende una zona de aireación para establecer el

conectados a la manguera que suministra la aireación dentro de la probeta y se toma el tiempo desde que se inicia la aireación para evidenciar el volumen que desocupa el agua. Esta prueba se realizó tres veces para tomar un promedio del suministro de aire en el reactor.

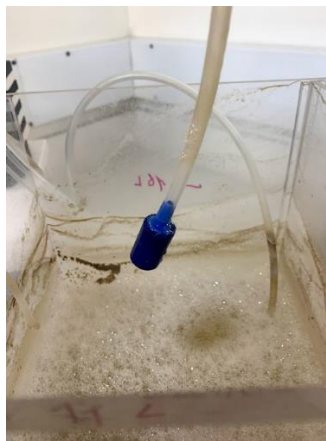


*Figura 4 Prueba de probeta invertida para estimado de aire suministrado*

*Tabla 1 Datos obtenidos de la prueba de probeta invertida*

| PRUEBA DE PROBETA INVERTIDA                           |      |
|-------------------------------------------------------|------|
| Flujo de aire total (ml/s aire)                       | 33   |
| Porcentaje de oxígeno presente en el aire (% $O_2$ )  | 21%  |
| Flujo de oxígeno en la probeta (ml/s $O_2$ )          | 6,93 |
| Volumen que ocupa un mol de gas (volumen molar L/mol) | 22,4 |
| Peso oxígeno (g/mol $O_2$ )                           | 32   |
| Oxígeno suministrado (mg/s $O_2$ )                    | 9,9  |

*Fuente propia*



*Figura 5 Difusor de burbuja fina en zona de aireación del biorreactor de tratamiento de agua residual*

El segundo compartimiento con el que cuenta el biorreactor es el sedimentador, en el cual pasa el agua por el deflector regulable para realizar el proceso de sedimentación de lodos y así obtener un agua clarificada logrando un alto porcentaje de remoción.

Este proceso se llevó acabo por 5 semanas, en cada una de ellas se cambió el caudal para evidenciar la mejor condición de remoción de materia orgánica y así poder calcular los coeficientes cinéticos de este tipo de agua residual no doméstica.

Para realizar el control al proceso, el volumen que se ha mantenido máximo en el biorreactor corresponde a 10 litros a partir del cambio de los caudales. Para el control del caudal se empleó una bomba peristáltica de laboratorio MINIPULS® 3 Gilson de alto rendimiento y bajo pulso con cabezales de bomba intercambiables para suministrar una variedad diversa de líquidos sin alterar los componentes críticos dentro del líquido. Este equipo cuenta con 8 mangueras para asignar diferentes canales, maneja un rango de velocidad de la cabeza entre 0.01 a 48 rpm (revoluciones por minuto), la cual permite manejar varios flujos con el mismo caudal logrando así que el caudal de entrada sea igual al caudal de salida para cumplir así con el flujo continuo necesario para el desarrollo del proceso (Gilson, 2018).



*Figura 6 Bomba peristáltica de laboratorio MINIPULS® 3 Gilson para el control del caudal de entrada y salida del biorreactor*

Para la determinación de coeficientes cinéticos se consideró la variación de 5 caudales para tomar los parámetros correspondientes y así mismo poder determinar cuál de estos caudales es el óptimo para la mayor remoción de materia orgánica. Se tomaron los caudales basados en la velocidad de la cabeza que permite la bomba peristáltica determinando los siguientes: 2.5, 5, 7, 10 y 15 rpm. No se emplearon velocidades más altas para favorecer el tiempo de retención hidráulica y así favorecer la actividad de los microorganismos. Para cada una de las velocidades elegidas para el análisis se determinó el tiempo de llenado de un volumen determinado de 10 ml para calcular los siguientes caudales.

*Tabla 2 Cálculo de los caudales para el flujo en el biorreactor*

| Velocidad (rpm) | Tiempo (min) | Tiempo (seg) | Volumen (ml) | Caudal (ml/s) | Caudal (l/h) |
|-----------------|--------------|--------------|--------------|---------------|--------------|
| 2,5             | 12:00        | 720          | 10           | 0,014         | 0,05         |
| 5               | 8:50         | 530          | 10           | 0,019         | 0,07         |
| 7               | 6:10         | 370          | 10           | 0,027         | 0,10         |
| 10              | 3:42         | 222          | 10           | 0,045         | 0,16         |
| 15              | 2:10         | 130          | 10           | 0,077         | 0,28         |

*Fuente propia*

Una vez se cuenta con los caudales se procede a calcular el tiempo de retención hidráulica a partir del volumen que mantiene el biorreactor con respecto al flujo de los caudales determinados.

*Tabla 3 Determinación del tiempo de retención hidráulica*

| N° | Caudal (ml/s) | Caudal (l/s) | Volumen (l) | $\theta = \theta_c$ (seg) | $\theta = \theta_c$ (h) | $\theta = \theta_c$ (d) |
|----|---------------|--------------|-------------|---------------------------|-------------------------|-------------------------|
| 1  | 0,014         | 1,3889E-05   | 4           | 288000                    | 80                      | 3,3                     |
| 2  | 0,019         | 1,8868E-05   | 5           | 265000                    | 74                      | 3,1                     |
| 3  | 0,027         | 2,7027E-05   | 6           | 222000                    | 62                      | 2,6                     |
| 4  | 0,045         | 4,5045E-05   | 7           | 155400                    | 43                      | 1,8                     |
| 5  | 0,077         | 7,6923E-05   | 8           | 104000                    | 29                      | 1,2                     |

*Fuente propia*

El reactor se puso en marcha empleando una muestra de agua residual de alta carga orgánica de tipo comercial como se puede evidenciar en los siguientes resultados. El biorreactor se estabilizó a la segunda semana, de acuerdo con el control de los parámetros del biorreactor y el efluente.

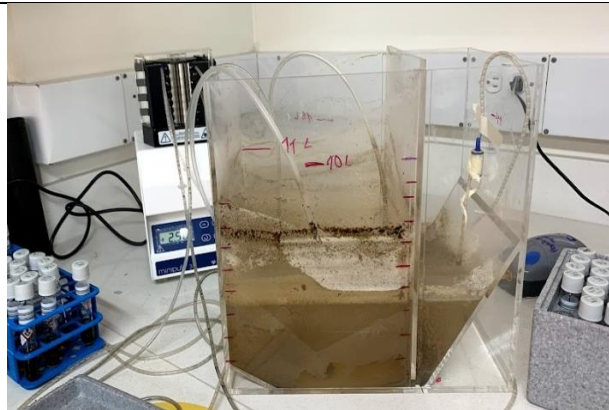


Figura 7 (a) Biorreactor  $Q_1 = 0,014 \text{ ml/s}$  Vol retención 4 L

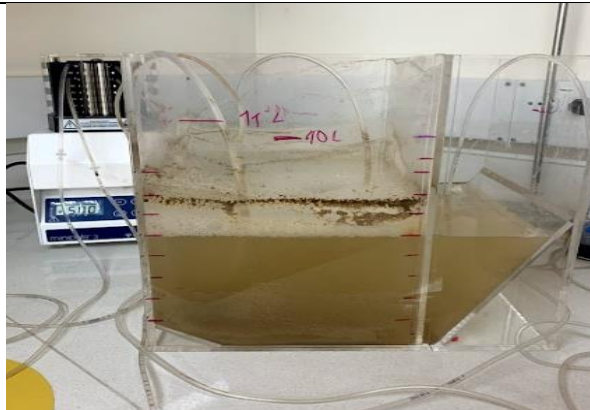


Figura 8 (b) Biorreactor  $Q_2 = 0,019 \text{ ml/s}$  Vol retención 5 L

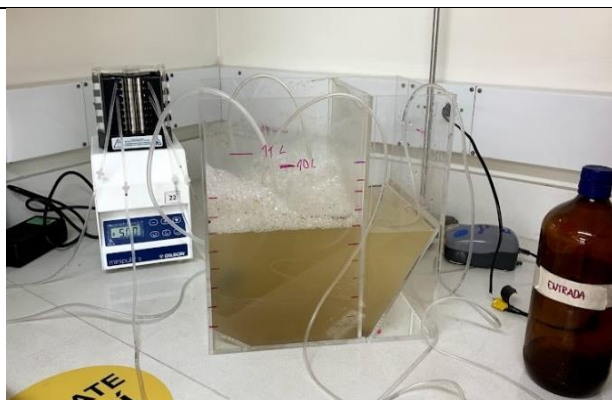


Figura 9 (c) Biorreactor  $Q_3 = 0,027 \text{ ml/s}$  Vol retención 6 L

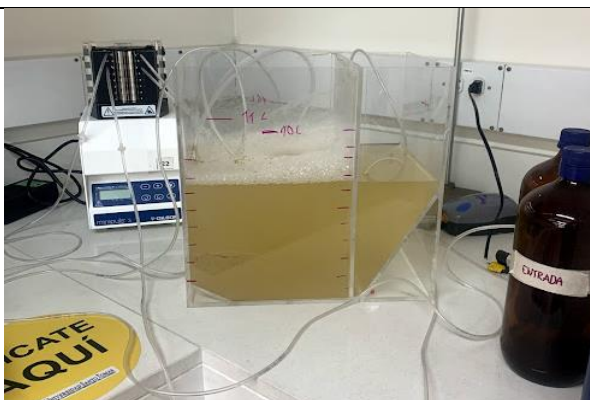


Figura 10 (d) Biorreactor  $Q_4 = 0,045 \text{ ml/s}$  Vol retención 7 L

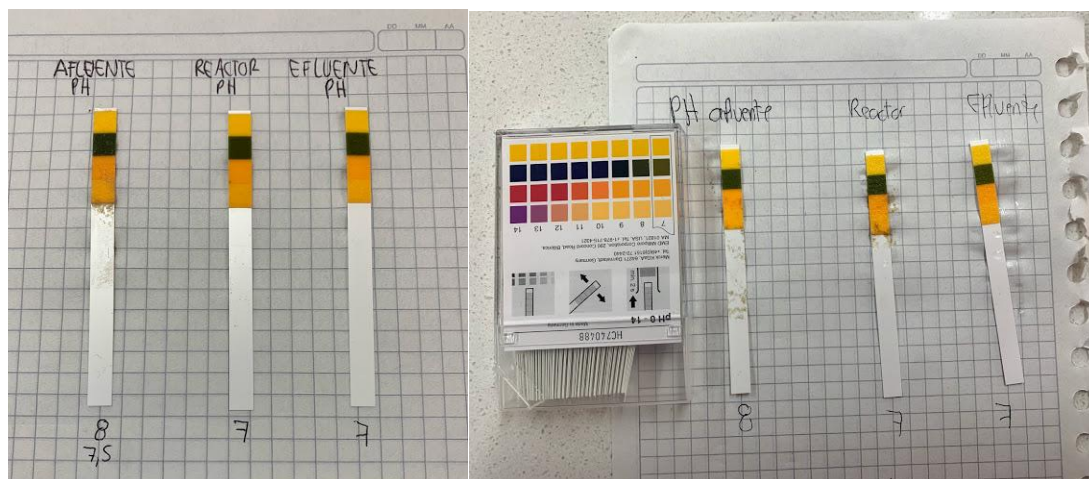


Figura 11 (e) Biorreactor  $Q_5 = 0,077 \text{ ml/s}$  Vol retención 8 L



*Figura 12 Comparación de afluente y efluente del agua residual analizada*

Uno de los factores más importantes que influye en el crecimiento bacteriano es el pH por esta razón se realizó el control de este parámetro teniendo en cuenta que las bacterias a nivel general presentan un crecimiento optimo en el intervalo de pH de 6,5 a 8.



*Figura 13 Control diario de pH para mantener el ambiente óptimo para el crecimiento de microorganismos*

Es importante tener en cuenta que las actividades metabólicas de las bacterias generan cambios en el pH de su medio, por consiguiente, el ambiente debe tener un respaldo para neutralizar y mantener las condiciones propicias para favorecer el crecimiento de los microorganismos por

largos periodos de tiempo y de manera continua. Para mantener estas condiciones se agregó al afluente los nutrientes necesarios descritos en la determinación de la DBO para el crecimiento de las bacterias y así se genere un mejor proceso de remoción de materia orgánica.

Se midieron los siguientes parámetros: demanda química de oxígeno (DQO), demanda biológica de oxígeno (DBO5), sólidos suspendidos totales (SST), sólidos suspendidos volátiles (SSV) y pH.

Para la lectura de la medición de la DQO se empleó la guía de los métodos normalizados para el análisis de aguas en el apartado 5220 D reflujo cerrado, método colorimétrico, determinación fotométrica de la concentración de cromo (III) tras oxidación con dicromato potásico / ácido sulfúrico / sulfato de plata. Se empleó el método NANOCONTROL DQO 1500 (REF 92529) o Multitest Entrada de Depuradora (REF 925012). Los tubos de test contienen ácido sulfúrico 80–98 %, dicromato potásico 0,38–1,26 % y sulfato de mercurio (II) 0,74–1,50 % a partir del ajuste de los métodos normalizados alemanes para el examen de aguas, aguas residuales y lodos (DIN 38 409 - H41-1 y DIN ISO 15 705 - H45) (E.W. Rice et al., 2017).

No se realizó el método recomendado y aprobado por las autoridades ambientales como el IDEAM DQO por reflujo cerrado y volumetría teniendo en cuenta que describe un procedimiento complejo y que genera un impacto considerable al ambiente ya que la solución de digestión contiene sustancias tóxicas como Dicromato de Potasio y Sulfato de Mercurio, además que su manipulación debe realizarse con todos los elementos de seguridad siguiendo ciertos parámetros establecidos para su disposición final (IDEAM, 2007).

El procedimiento para realizar la medición de DQO rápida a 160 °C consiste en abrir el tubo de test con el reactivo y cubrir lentamente el contenido con 2 ml de muestra. Una vez se encuentre

dentro del tubo se debe enroscar, tapar con el tapón y sujetar el tubo de la parte superior para mezclar el contenido. Se debe tener precaución teniendo en cuenta que el tubo tiende a calentarse. Finalmente se debe ubicar el tubo en el termorreactor, programarlo para que llegue a una temperatura de 160°C y dejar el tubo durante 30 min. Una vez se complete el tiempo se saca el tubo del bloque del termorreactor y se deja en una gravilla durante 10 min mientras desciende a la temperatura ambiente (E.W. Rice et al., 2017).



*Figura 14 Procedimiento para medición de DQO*

Para la lectura e interpretación del resultado de DQO se empleó un espectrofotómetro visible NANOCOLOR® UV/VIS II para análisis de calidad del agua.



*Figura 15 Espectrofotómetro NANOCOLOR® UV/VIS II para lectura de DQO*

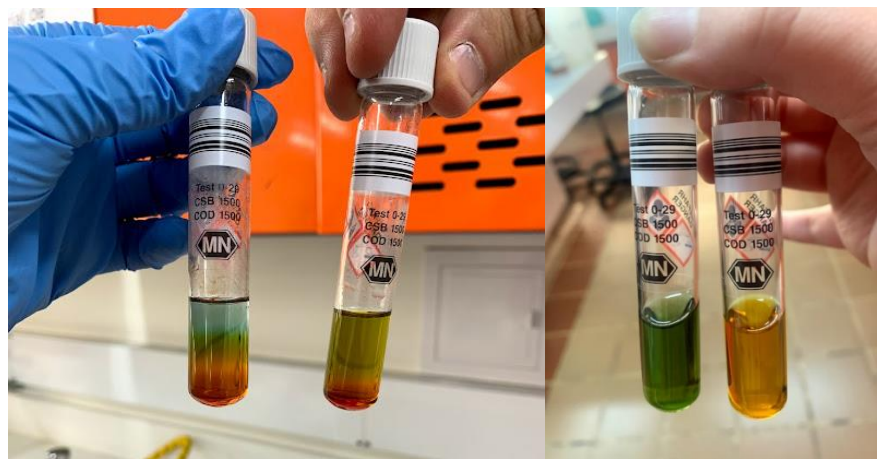
Se determinaron los siguientes resultados de DQO a partir de las mediciones diarias a excepción de los días en los cuales no se podía ingresar al laboratorio.

*Tabla 4 Resultados medición diaria de DQO afluente y efluente*

| Caudal<br>(ml/s) | Fecha de<br>toma de<br>muestra | DQO Afluente (mg/l O <sub>2</sub> ) |      |      | DQO Efluente (mg/l O <sub>2</sub> ) |     |     |
|------------------|--------------------------------|-------------------------------------|------|------|-------------------------------------|-----|-----|
|                  |                                | 1                                   | 2    | 3    | 1                                   | 2   | 3   |
| 0,014            | 11/06/2021                     | 976                                 | 1032 | 729  | 550                                 | 497 | 504 |
|                  | 15/06/2021                     | 830                                 | 1046 | 1037 | 587                                 | 599 | 581 |
|                  | 16/06/2021                     | 1500                                | 1500 | 1069 | 251                                 | 544 | 545 |
|                  | 17/06/2021                     | 1037                                | 1045 | 879  | 342                                 | 451 | 507 |
|                  | 18/06/2021                     | 1232                                | 1167 | 808  | 536                                 | 357 | 346 |
|                  | 21/06/2021                     | 1500                                | 1054 | 952  | 544                                 | 425 | 515 |
| 0,019            | 22/06/2021                     | 1500                                | 1500 | 1500 | 293                                 | 274 | 295 |
|                  | 23/06/2021                     | 1500                                | 1500 | 1500 | 389                                 | 273 | 238 |
|                  | 24/06/2021                     | 1032                                | 1314 | 1335 | 238                                 | 271 | 295 |
|                  | 25/06/2021                     | 1467                                | 1180 | 1117 | 227                                 | 269 | 315 |
|                  | 28/06/2021                     | 1297                                | 1232 | 1236 | 292                                 | 293 | 335 |
|                  | 29/06/2021                     | 1135                                | 1500 | 1332 | 367                                 | 298 | 323 |
| 0,027            | 30/06/2021                     | 944                                 | 1322 | 1500 | 228                                 | 339 | 300 |
|                  | 1/07/2021                      | 812                                 | 817  | 757  | 390                                 | 251 | 231 |
|                  | 2/07/2021                      | 1234                                | 719  | 726  | 379                                 | 321 | 314 |
|                  | 6/07/2021                      | 1234                                | 785  | 1200 | 347                                 | 334 | 363 |
|                  | 7/07/2021                      | 1500                                | 1315 | 854  | 293                                 | 339 | 293 |
|                  | 8/07/2021                      | 1500                                | 1500 | 1500 | 360                                 | 329 | 315 |
| 0,045            | 9/07/2021                      | 857                                 | 1314 | 1330 | 329                                 | 394 | 505 |
|                  | 12/07/2021                     | 817                                 | 1180 | 732  | 421                                 | 432 | 360 |
|                  | 13/07/2021                     | 821                                 | 1151 | 1330 | 380                                 | 331 | 354 |
|                  | 14/07/2021                     | 852                                 | 1180 | 1025 | 321                                 | 303 | 300 |
|                  | 15/07/2021                     | 747                                 | 655  | 1322 | 360                                 | 598 | 478 |
|                  | 16/07/2021                     | 1500                                | 866  | 1500 | 222                                 | 245 | 261 |
| 0,077            | 21/07/2021                     | 807                                 | 1255 | 720  | 337                                 | 313 | 399 |
|                  | 22/07/2021                     | 825                                 | 808  | 761  | 381                                 | 326 | 310 |
|                  | 23/07/2021                     | 797                                 | 738  | 732  | 241                                 | 440 | 374 |
|                  | 26/07/2021                     | 976                                 | 1443 | 1394 | 394                                 | 455 | 383 |
|                  | 27/07/2021                     | 1151                                | 1092 | 753  | 292                                 | 293 | 331 |
|                  | 28/07/2021                     | 866                                 | 1500 | 742  | 367                                 | 298 | 323 |

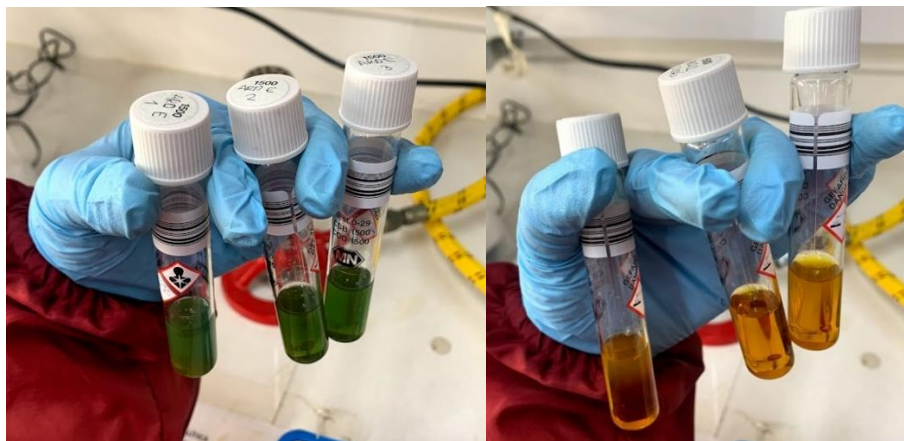
*Fuente propia*

A partir de los resultados anteriores se puede decir que se alcanzó hasta un 85% de remoción de materia orgánica a partir de su oxidación, logrando así medir la cantidad de oxidante consumida expresada en términos de su equivalencia en oxígeno. Se detectó un color característico en los tubos con las muestras del afluente que contienen mayor cantidad de contaminantes además se aumentó la temperatura de estos tubos en comparación a los tubos con la muestra del efluente del biorreactor la cual paso por la zona de aireación y sedimentación.



(a)

(b)



(c)

(d)

*Figura 16 Tubos para medición de DQO (a) Agua residual inicial (b) Comparación entre afluente y efluente (c) Muestras de agua residual de entrada al biorreactor d) Muestras de agua residual de salida del biorreactor*

Para el análisis de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO) se empleó el equipo WTW OxiTop® IS 12 con los cabezales de medición de DBO de aguas residuales de baja o mediana contaminación, midiendo la disminución de la presión de oxígeno y con la absorción simultánea del  $CO_2$  producido con las tabletas  $NaOH$ . Para llevar a cabo el método respirométrico DBO se empleó la guía de los métodos normalizados para el análisis de aguas en el apartado ASTM 5210 D, OECD 301 F para las mediciones de consumo de oxígeno, DBO5. Este método está ligado químicamente a la concentración de  $O_2$  consumido por los microorganismos presentes en el agua residual contaminada y a la presión que generan las botellas cerradas en la muestra analizada con la temperatura constante de 20°C garantizada con la nevera especializada y agitación constante en el tiempo de análisis correspondiente a 5 días. Para garantizar el ambiente óptimo de supervivencia de los microorganismos se debe mantener un pH entre 6,6 a 7,2 regulado a partir de ácido sulfúrico o hidróxido de sodio según el caso (E.W. Rice et al., 2017).

Antes de realizar la prueba de laboratorio se debe verificar la calibración de las botellas con los cabezales a partir de una prueba con el patrón estándar compuesto por 150 mg de glucosa y 150 mg de ácido glutámico en 1 litro de agua destilada lo cual representa el alimento para los microorganismos. Para el análisis realizado no se logró conseguir el ácido glutámico por esta razón la concentración esperada es de 300 mg/L glucosa. Se debe preparar el agua de dilución que representa los nutrientes necesarios para favorecer el crecimiento de los microorganismos. De acuerdo con los métodos normalizados para el análisis de aguas, método respirométrico estándar 5210 D WTW se establece la formulación de reactivos del agua de dilución a partir de las soluciones para 1 litro y está compuesta por:

1. **2,5 ml de solución buffer de fosfatos 1,5 M (R1):** Se prepara disolviendo 207 g de dihidrogenofosfato de sodio ( $NaH_2PO_4$ ) en 1 litro de agua. Se debe neutralizar la

solución a pH 7,2 con (R6) Solución de hidróxido de potasio 6 M: se prepara disolviendo 336 g de  $KOH$  en 1 litro de agua. Se debe agregar el reactivo al agua lentamente mezclando constantemente para evitar la acumulación excesiva de calor.

2. **0,65 ml de solución de cloruro de amonio 0,71 M (R2)**: Se prepara disolviendo 38,2 g de cloruro de amonio ( $NH_4Cl$ ), en 1 litro agua. Se debe neutralizar a pH 7,0 con (R6) Solución de hidróxido de potasio 6 M.
3. **1,0 ml de solución de cloruro de calcio 0,25 M (R3)**: Se prepara disolviendo 27,7 g de cloruro de calcio ( $CaCl_2$ ) en 1 litro de agua.
4. **0,22 ml de solución de sulfato de magnesio 0,41 M (R4)**: Se prepara disolviendo 101 g de sulfato de magnesio ( $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ ) en 1 litro de agua.
5. **0,1 ml de solución de cloruro férrico 0,018 M (R5)**: Se prepara disolviendo 4,84 g de cloruro férrico ( $FeCl_3 \cdot 6H_2O$ ) en 1 litro de agua.
6. **1,0 ml de solución de oligoelementos o elementos traza (R12)**: Se prepara disolviendo 40 mg  $MnSO_4$ , 57 mg  $H_3BO_3$ , 43 mg  $ZnSO_4 \cdot 7H_2O$ , 35 mg  $(NH_4)_6Mo_7O_{24}$ , 100 mg Fe- Quelato ( $FeCl_3$ -EDTA) en un litro de agua. Esterilice a 120 ° C y 200 kPa (2atm) de presión durante 20 min.
- **1,0 ml de solución de extracto de almidón (R13)**: Se prepara disolviendo 15 mg de extracto de levadura de cerveza de grado farmacéutico o de laboratorio a 100 ml de agua. Esta solución se debe preparar inmediatamente antes de cada prueba en la que se use.
- **Agua destilada que complete 1 litro** una vez se agregaron las soluciones anteriormente mencionadas. Esta agua debe contener 0.01 mg de metales pesados / L y estar libre de cloro, cloraminas, alcalinidad cáustica, materia orgánica o ácidos.

Esta agua de dilución nutritiva y las soluciones R12 y R13 están formuladas para su uso con el método OCDE.

Adicionalmente se deben preparar las siguientes soluciones para regular el pH de las soluciones que forman los nutrientes:

- **(R7) Soluciones ácidas (1 M):** Agregue 28 ml de ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ) o 83 ml de ácido clorhídrico ( $HCl$ ) en 1 litro de agua.
- **(R8) Solución alcalina (1 M):** Agregue 40 g de hidróxido de sodio ( $NaOH$ ) en 1 litro de agua.

(E.W. Rice et al., 2017).

Se establecen 250 ml de volumen según la siguiente tabla del manual para la Determinación de la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) WTW de acuerdo con la DBO esperada, que a partir del análisis anterior teniendo en cuenta que debe agregarse el 50% del agua de dilución al patrón la concentración es de 150 mg/L glucosa. El sistema de medición OxiTop no necesita tener en cuenta estos factores de la tabla, ya que el controlador emite directamente el resultado en mg / L de DBO. En la botella se asignan 125 ml de la solución de glucosa y 125 ml del agua de dilución junto a 2 ml de agua residual para obtener una concentración de DBO esperada de 300 mg/L (E.W. Rice et al., 2017).

Tabla 5 Estimación del valor de DBO esperado a partir de DQO

| Valor de DBO esperado<br>[mg/L] | Cantidad de muestra a utilizar<br>[mg/L] | Factor (*) |
|---------------------------------|------------------------------------------|------------|
| 0 – 40                          | 432                                      | 1          |
| 0 – 80                          | 365                                      | 2          |
| 0 - 200                         | 250                                      | 5          |
| 0 – 400                         | 164                                      | 10         |
| 0 – 800                         | 97                                       | 20         |
| 0 – 2000                        | 43,5                                     | 50         |
| 0 - 4000                        | 22,7                                     | 100        |

Fuente: E.W. Rice et al., 2017

Finalmente se debe agregar 5 gotas de inhibidor de nitrificación, 4 a 5 perlas de hidróxido de sodio ( $NaOH$ ) y el agitador dentro de la botella. El cabezal debe sellar correctamente la botella para que el procedimiento se lleve a cabo de la mejor manera.



Figura 17 Perlas de  $NaOH$ , inhibidor de nitrificación y botellas OxiTop en calibración

Con el método respirométrico se espera alcanzar a los 5 días la recuperación del analito cercana a  $260 \pm 30$  mg/L. Se realizó esta prueba a las botellas habilitadas para su uso para verificar su calibración y estos son los resultados obtenidos de las pruebas de patrón estándar.



*Figura 18 Gráficas con los resultados de calibración DBO*

Se calibraron 10 botellas OxiTop y estos fueron los resultados obtenidos de la calibración.

*Tabla 6 Resultados de la calibración de los cabezales OxiTop*

| N° de botella | CAL DBO <sub>5</sub> (mg/L) |
|---------------|-----------------------------|
| 1             | 270                         |
| 2             | 352                         |
| 3             | 265                         |
| 4             | 290                         |
| 5             | 310                         |
| 6             | 334                         |
| 7             | 287                         |
| 8             | 296                         |
| 9             | 327                         |
| 10            | 270                         |

*Fuente propia*

A partir de los resultados obtenidos se toma la decisión de emplear los cabezales para las pruebas con el biorreactor. Para las mediciones se consideraron los 5 caudales establecidos con la bomba peristáltica y se tomaron las muestras correspondientes de entrada y salida del biorreactor, de acuerdo con la aproximación dada por el valor de DQO obtenido se asignó el volumen para las muestras con respecto a la tabla 5. Se ubican las botellas con los cabezales OxiTop en la incubadora especializada TS 608/2i para las muestras durante 5 días a 20 ° C.



*Figura 19 Incubadora TS 608/2-i para proceso DBO OxiTop*

Como la muestra de agua residual que se empleó para los análisis contiene alta carga orgánica con una población microbiana suficiente no es necesario preparar la semilla como esta mencionado en los métodos estándar 5210 B para DBO<sub>5</sub> (E.W. Rice et al., 2017). Para el montaje de las muestras, el volumen de muestra varía según la DBO estimada calculada con la DQO a partir de la Tabla 4. Para seleccionar el rango de medición correcto se debe tener en cuenta que el oxígeno contenido dentro de la botella no debe convertirse en un limitante para el valor de DBO y la degradación de los carbonos presentes en la muestra, por esta razón al tener una muestra con valores esperados altos de DBO el volumen de la muestra es inferior representando una relación inversa para que el oxígeno gaseoso pueda disponerse dentro de la botella. Como se está realizando un procedimiento experimental se debe estimar el valor aproximado de DBO a partir de una relación establecida con la DQO. El factor que corresponde a esta relación es el siguiente: el valor de DBO =  $\frac{1}{2}$  x valor de DQO. De acuerdo con esta relación se asignó el valor aproximado de DBO de la siguiente manera como se muestra en la tabla 7.

Tabla 7 Elección de valor esperado de DBO a partir de los valores obtenidos de DQO

| Tipo de muestra | Rango de DQO (mg / L) | Valor de DBO esperado (mg / L) | Cantidad de muestra a utilizar (ml) |
|-----------------|-----------------------|--------------------------------|-------------------------------------|
| Afluente        | 719 - 1500            | 0-400                          | 164                                 |
| Efluente        | 222 - 599             | 0-200                          | 250                                 |

Una vez determinado el valor de DBO esperado se debe agregar el 50% de agua de dilución a la muestra porque representa el aporte de nutrientes para los microorganismos, las gotas 5 gotas del inhibidor de nitrificación, las 4 perlas de  $NaOH$  y el 50% del volumen correspondiente a la muestra de agua residual.



Figura 20 Montaje de las botellas con los cabezales OxiTop para medición de DBO

A continuación, se presentan los resultados obtenidos de las mediciones de DBO. El lector de resultados presenta la gráfica del comportamiento de la muestra en los 5 días de análisis de la

entrada y la salida del agua residual una vez pasa por las dos fases del biorreactor, la aireación y la sedimentación.



Figura 21 Gráficas de la lectura reportada de DBO del afluente

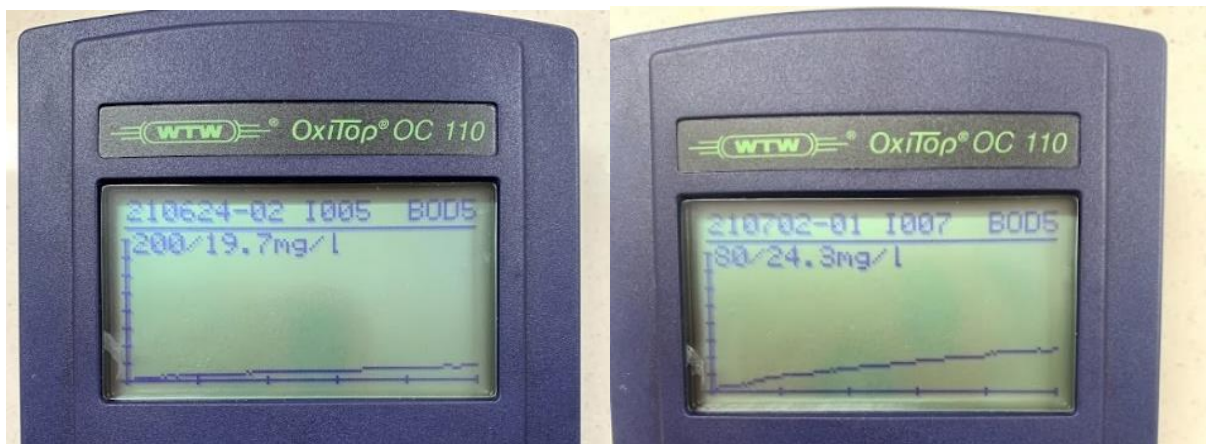


Figura 22 Gráficas de la lectura reportada de DBO del efluente

*Tabla 8 Consolidado resultados DBO de entrada y salida del biorreactor a partir del caudal*

| N° | Caudal<br>(ml/s) | DBO <sub>5</sub> Afluente<br>S <sub>0</sub> mg/L | DBO <sub>5</sub> Efluente S<br>mg/L |
|----|------------------|--------------------------------------------------|-------------------------------------|
| 1  | 0,014            | 293                                              | 17                                  |
| 2  | 0,019            | 264                                              | 19,7                                |
| 3  | 0,027            | 256                                              | 22                                  |
| 4  | 0,045            | 250                                              | 24,3                                |
| 5  | 0,077            | 163                                              | 25,4                                |

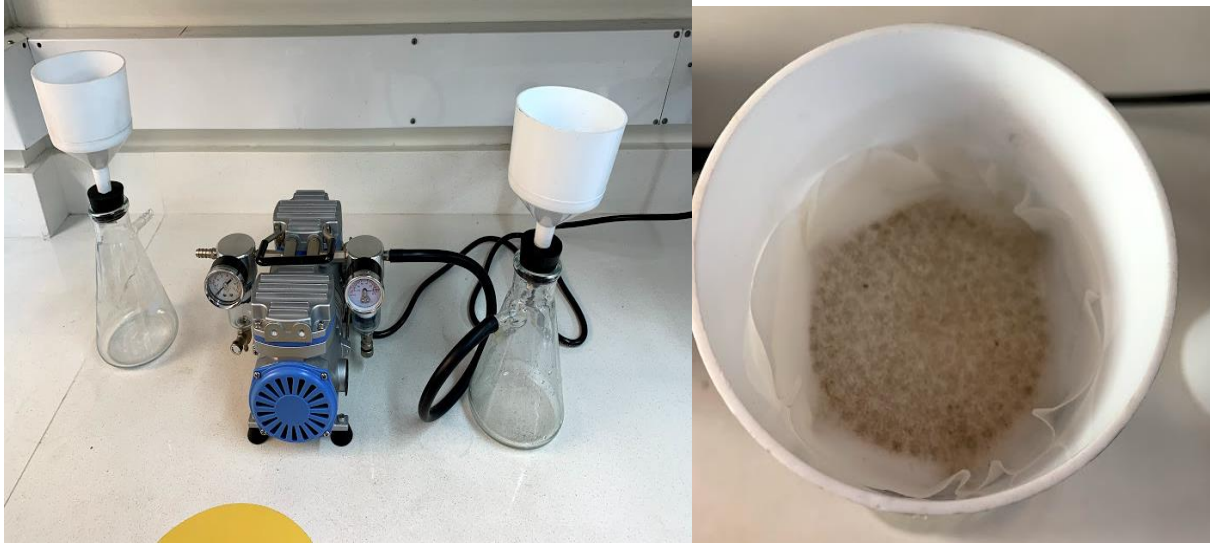
Se realizó la medición de los sólidos suspendidos totales (SST) y sólidos suspendidos volátiles (SSV) a partir del procedimiento descrito en la guía de los métodos normalizados para el análisis de aguas en el apartado 2540 D sólidos suspendidos totales secados a 103–105 ° C y 2540 E sólidos fijos y volátiles encendidos a 550 ° C. Se debe pesar cada uno de los papeles filtro que se van a emplear para posteriormente realizar la diferencia y determinar el valor de los sólidos. Primero se toman 50 ml de la muestra de agua residual de entrada al biorreactor, posteriormente se pesa el papel filtro que se va a utilizar. Para la determinación de los sólidos suspendidos volátiles es necesario emplear un filtro de fibra de vidrio para que resista la calcinación a 550°C, el cual no se pudo emplear porque no se logró conseguir y el laboratorio no lo pudo suministrar (E.W. Rice et al., 2017).

Para subsanar este percance se siguió la relación que establece Reynolds & Richards (2006), donde se indica que los sólidos suspendidos volátiles representan el 75% de los sólidos suspendidos totales.



*Figura 23 Balanza con peso de papel filtro*

Se emplea una bomba de vacío para separar los sólidos suspendidos de los sólidos disueltos que pasan el filtro y se quedan en el Erlenmeyer que recibe la muestra filtrada. Se ubica el papel filtro dentro del embudo y se enciende para iniciar con el vertido de la muestra y sean retenidos en el papel filtro los sólidos suspendidos totales. Una vez se filtra todo el volumen de la muestra se debe llevar el papel filtro a secado en el horno a 105°C para remover la humedad y poder obtener el peso real de los sólidos. Se ubica el papel filtro encima de una capsula de porcelana y se deja secando dentro del horno aproximadamente 2 horas hasta que se evapore la totalidad de agua. Una vez se ha terminado este proceso se debe sacar el papel filtro y se lleva al desecador para enfriar y posteriormente tomar el peso del papel filtro.



(a)

(b)

*Figura 24 (a) Bomba de vacío empleada para la separación de los sólidos suspendidos totales de la muestra de agua residual (b) Papel filtro con solidos suspendidos totales*

Una vez obtenido el peso de los sólidos suspendidos totales se aplica el 75% que representa los sólidos suspendidos volátiles. Si se ejecutará el procedimiento adecuado se lleva el filtro de fibra de vidrio a la mufla a 550°C durante 15 min y posteriormente se lleva al desecador con las pinzas para dejar enfriar y obtener el peso de los sólidos suspendidos volátiles.



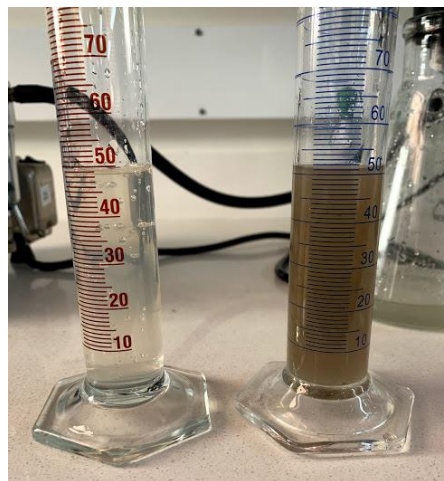
*Figura 25 Horno para evaporar a sequedad el papel filtro a 105°C*

Para la determinación de los sólidos suspendidos totales se tomó un volumen determinado de 50 ml de la muestra de agua residual del afluente del reactor.

*Tabla 9 Resultados medición solidos suspendidos volátiles del afluente*

| Fecha de toma de muestra | Peso del papel filtro (g) | Volumen muestra (ml) | Papel filtro + Solidos suspendidos totales (g) | Peso SST en 50 ml (mg) | Concentración mg/L | Solidos suspendidos volátiles/L | Promedio SSV/L |
|--------------------------|---------------------------|----------------------|------------------------------------------------|------------------------|--------------------|---------------------------------|----------------|
| 11/06/2021               | 0,57                      | 50                   | 0,5942                                         | 24,2                   | 484                | 363                             | 371            |
| 21/06/2021               | 0,5767                    | 50                   | 0,602                                          | 25,3                   | 506                | 379,5                           |                |
| 22/06/2021               | 0,57                      | 50                   | 0,591                                          | 21                     | 420                | 315                             | 300            |
| 29/06/2021               | 0,573                     | 50                   | 0,592                                          | 19                     | 380                | 285                             |                |
| 30/06/2021               | 0,4389                    | 50                   | 0,463                                          | 24,1                   | 482                | 361,5                           | 283            |
| 8/07/2021                | 0,4389                    | 50                   | 0,4525                                         | 13,6                   | 272                | 204                             |                |
| 9/07/2021                | 0,4389                    | 50                   | 0,461                                          | 22,1                   | 442                | 331,5                           | 320            |
| 16/07/2021               | 0,4389                    | 50                   | 0,4594                                         | 20,5                   | 410                | 307,5                           |                |
| 21/07/2021               | 0,5754                    | 50                   | 0,5905                                         | 15,1                   | 302                | 226,5                           | 234            |
| 28/07/2021               | 0,4389                    | 50                   | 0,455                                          | 16,1                   | 322                | 241,5                           |                |

Se alcanzaron las siguientes eficiencias comparando los resultados obtenidos del afluente y el efluente.



*Figura 26 Diferencia de apariencia entre agua residual de salida del biorreactor(izquierda) y muestra de agua residual de entrada (derecha)*

A continuación, se presentan los datos del reactor de flujo continuo completamente mezclado de lodos activados para la determinación de los coeficientes cinéticos:

*Tabla 10 Datos recolectados de las pruebas de DBO del afluente y efluente, solidos suspendidos volátiles y porcentaje de remoción de materia orgánica*

| Unidad<br>numero | S <sub>0</sub><br>mg/L<br>DBO <sub>5</sub> | S<br>mg/L<br>DBO <sub>5</sub> | $\theta = \theta_c$<br>d | X<br>mg<br>SSV/L | %<br>REMOCIÓN |
|------------------|--------------------------------------------|-------------------------------|--------------------------|------------------|---------------|
| 1                | 293                                        | 17                            | 3,3                      | 371              | 94,20         |
| 2                | 264                                        | 19,7                          | 3,1                      | 300              | 92,54         |
| 3                | 256                                        | 22                            | 2,6                      | 283              | 91,41         |
| 4                | 250                                        | 24,3                          | 1,8                      | 320              | 90,28         |
| 5                | 163                                        | 25,4                          | 1,2                      | 234              | 84,42         |

Aplicando las ecuaciones mencionadas anteriormente, se realiza el procedimiento para encontrar los coeficientes cinéticos Ks y k.

*Tabla 11 Calculo de valores para gráfica 1 y determinación de coeficientes Ks y k*

| S <sub>0</sub> – S<br>mg/L | X <sub>0</sub><br>(mg SSV/L)<br>d | X <sub>0</sub> /(S <sub>0</sub> -S)<br>d | 1/S<br>(mg/L) <sup>-1</sup> |
|----------------------------|-----------------------------------|------------------------------------------|-----------------------------|
| 276                        | 1236,67                           | 4,481                                    | 0,059                       |
| 244,3                      | 920,14                            | 3,766                                    | 0,051                       |
| 234                        | 727,15                            | 3,107                                    | 0,045                       |
| 225,7                      | 575,56                            | 2,550                                    | 0,041                       |
| 137,6                      | 281,67                            | 2,047                                    | 0,039                       |

Una vez se han realizado los cálculos para la determinación de los coeficientes Ks y k, se desarrolla la solución para encontrar kd, Y y  $\mu$ .

Tabla 12 Calculo de valores para gráfica 2 y determinación de coeficientes  $k_d$ ,  $Y$  y  $\mu$

| Unidad<br>numero | $1/\theta$<br>$d^{-1}$ | $(S_0-S)/\theta x$<br>$d^{-1}$ |
|------------------|------------------------|--------------------------------|
| 1                | 0,300                  | 0,223                          |
| 2                | 0,326                  | 0,266                          |
| 3                | 0,389                  | 0,322                          |
| 4                | 0,556                  | 0,392                          |
| 5                | 0,831                  | 0,489                          |

A partir de los datos obtenidos por medio de los valores experimentales se hacen las gráficas correspondientes para la determinación por el método Linearweaver-Burk los coeficientes cinéticos por medio de la ecuación de la línea de tendencia lineal. Se toman los valores de la pendiente y el punto de corte de la ecuación obtenida para calcular los coeficientes. Es importante mencionar que el valor de  $R^2$  del grafico 1 es 0,9739 y del grafico 2 es 0,9513, los cuales representan un menor margen de error porque se encuentran cercanos a la unidad.

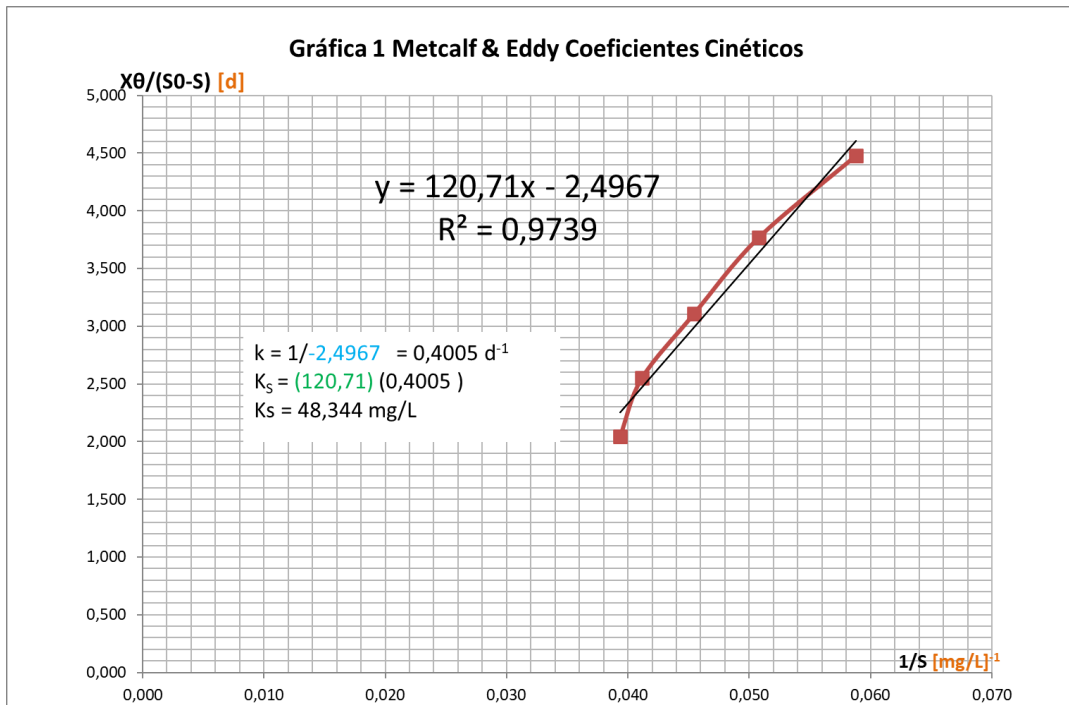


Figura 27 Gráfica 1 Metcalf y Eddy determinación de coeficientes cinéticos  $k$  y  $K_s$

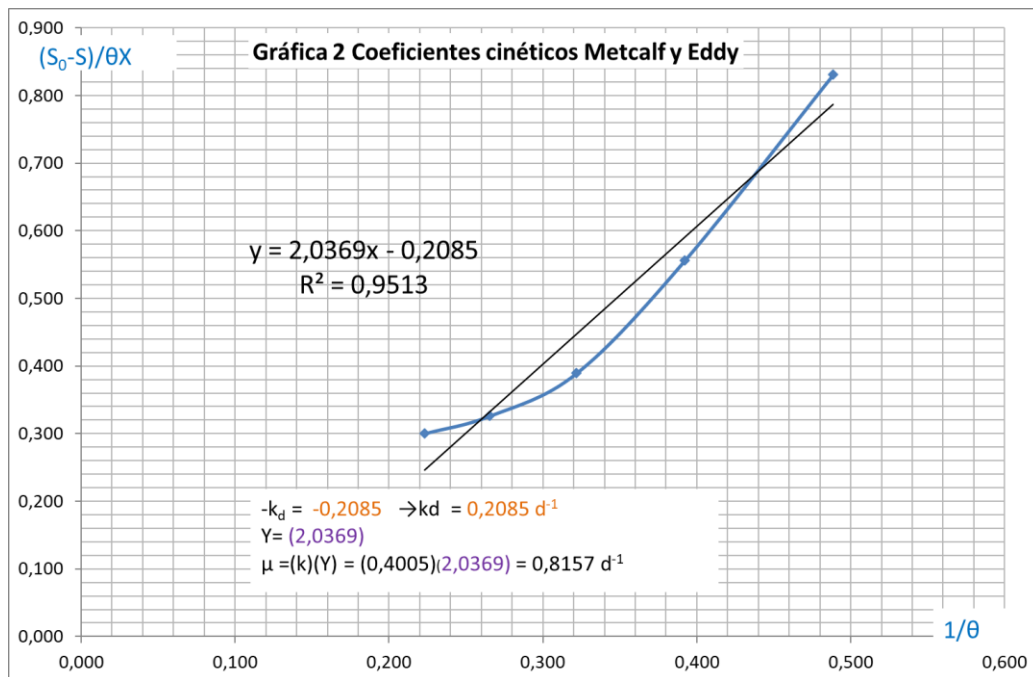


Figura 28 Gráfica 2 Metcalf y Eddy determinación de coeficientes cinéticos  $k_d$ ,  $Y$  y  $\mu$

En la siguiente tabla se presentan los coeficientes cinéticos de crecimiento biológico obtenidos con el agua residual utilizada para evaluar el sistema. Estas constantes fueron obtenidas gráficamente a través los valores promediados semanales de DQO y SSV las ecuaciones de cinética de crecimiento microbiano deducidas por Metcalf & Eddy (2013) y Ramalho (2003).

*Tabla 13 Coeficientes cinéticos obtenidos a partir de la medición en laboratorio*

| Coeficientes cinéticos                                                                                              | Valor obtenido |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|
| k =Velocidad específica de consumo de sustrato o tasa máxima de degradación de sustrato ( $d^{-1}$ )                | 0,4005         |
| Ks = Coeficiente de velocidad media (mg/L)                                                                          | 48,344         |
| Y= Coeficiente de producción de biomasa por consumo de sustrato (mg SSV/mg DBO)                                     | 2,0369         |
| kd= Consumo de biomasa por respiración endógena o velocidad de decaimiento o muerte de microorganismos ( $d^{-1}$ ) | 0,2085         |
| $\mu_m$ = la tasa máxima de crecimiento específico ( $d^{-1}$ )                                                     | 0,8157         |

Para el análisis de agua residual no domestica se debe tener en cuenta que los coeficientes cinéticos no pueden ser comparados con otros porque son específicos dependiendo la fuente de la que provienen. Con respecto a cada uno de los coeficientes cinéticos obtenidos se pueden determinar las características específicas del tipo de agua residual e indica un tipo de tratamiento adecuado a las condiciones de disponibilidad de sustrato, velocidad de degradación, eliminación de materia orgánica, microorganismos presentes y crecimiento biológico.

Los coeficientes cinéticos determinados representan ciertas condiciones a tener en cuenta a la hora de diseñar un reactor a gran escala:  $k = 0,4005(d^{-1})$  representa la velocidad específica de

consumo de sustrato, es decir, la tasa máxima de degradación de sustrato lo cual indica que el agua residual analizada presenta un proceso mas lento de degradación de materia orgánica biodegradable,  $K_s = 48,344$  (mg/L) es el coeficiente de velocidad media lo cual significa que se necesita como mínimo 48,344 mg de materia orgánica en un litro para alcanzar la mitad de la velocidad media de crecimiento,  $Y = 2,0369$  (mg SSV/mg DBO) es el coeficiente de producción de biomasa por consumo de sustrato lo cual representa que por cada mg de materia orgánica consumida por los microorganismos a partir de la medición con DQO se generan 2,0369 mg de microorganismos,  $k_d = 0,2085$  ( $d^{-1}$ ) es el consumo de biomasa por respiración endógena o velocidad de decaimiento o muerte de microorganismos lo cual representa que el 20,85% de la cantidad total de los solidos suspendidos volátiles se oxida en el proceso de respiración dentro del reactor y  $\mu_m = 0,8157$  ( $d^{-1}$ ) que es la tasa máxima de crecimiento específico de los microorganismos. Con respecto al análisis obtenido de los coeficientes y el consumo de sustrato representado en la medición de DBO se obtiene un 90,57% de remoción de materia orgánica a partir del consumo y comportamiento de los microorganismos (crecimiento, velocidad de consumo y muerte). Uno de los factores que influyó en la eficiencia del proceso fue el control del pH del afluente, dentro del reactor y el efluente el cual se mantuvo dentro del rango de 6,5 a 8 y la temperatura se preservó dentro de los 17 a 20°C.

## **Pertinencia social**

El trabajo que se llevó a cabo impacta directamente a los estudiantes de ingeniería civil e ingeniería ambiental de la Universidad Santo Tomás que estarán cursando el espacio académico de tratamiento de aguas residuales, para que realicen diversas pruebas, aportando a la investigación por parte de estudiantes y docentes. Además, servirá como instrumento para futuros proyectos en los cuales los estudiantes de la Universidad Santo Tomás planteen el diseño de reactores de tratamiento de agua residual para industrias y otros tipos de fuentes de vertimiento. El desarrollo del biorreactor permite determinar los coeficientes biocinéticos de distintos tipos de residuos líquidos biodegradables, que explican el comportamiento de los microorganismos en los procesos de tratamiento de agua residual. Al poder identificar los procesos adecuados para el tipo de agua a la hora de diseñar las estructuras a gran escala se producen descargas que cumplen con los requisitos y la normativa de las autoridades ambientales con respecto a los vertimientos, lo cual beneficia a los cuerpos de agua donde son descargados estas aguas residuales industriales porque se disminuye de alguna forma el impacto que generan estos vertimientos que pueden afectar a las comunidades aledañas que emplean el recurso hídrico en diversas actividades.

## Conclusiones

- Se construyó, se puso en marcha y se estabilizó un reactor a escala laboratorio tipo banco de pruebas completamente mezclado empleando el tratamiento de lodos activados sin recirculación y con zona de aireación con 2 difusores de burbuja fina y zona de sedimentación con el deflector regulable en el laboratorio de tratamiento de agua de la Universidad Santo Tomas, sede principal Bogotá, empleando una bomba peristáltica para el control del caudal continuo de cualquier tipo de agua residual.
- El reactor para tratamiento de agua residual a partir de lodos activados utilizó un volumen útil de 10 L entre la cuba de aireación y el sedimentador y a partir de la variación de caudales se mantuvo un volumen para el tiempo de residencia determinado según el flujo que lleva el agua al pasar por el sistema.
- A partir de las mediciones periódicas de DQO se puede decir que el sistema alcanza porcentajes de remoción de hasta un 85% a partir de la oxidación de las sustancias logrando así medir la cantidad de oxidante consumida expresada en términos de su equivalencia en oxígeno, teniendo en cuenta la variación de caudales y las condiciones estables que presento el biorreactor a la hora de realizar su operación.
- De acuerdo con la medición con las botellas OxiTop para la determinación de la DBO, se puede decir que se alcanzaron porcentajes de remoción de afluente a efluente entre un rango de 85 a 95% identificando así mismo que el caudal  $1 = 0,014 \text{ ml/s}$  presenta el mayor porcentaje de remoción en comparación con los demás caudales analizados.
- Con respecto a los sólidos suspendidos totales se alcanzaron porcentajes de remoción comparando afluente y efluente de 90% a partir del proceso de aireación y sedimentación

del tanque donde se formaron con estos solidos los lodos activados que permitieron realizar el proceso biológico con los microorganismos que consumen el sustrato.

- Se determinaron los coeficientes cinéticos para el agua residual comercial analizada,  $k = 0,4005 (d^{-1})$ ,  $K_s = 48,344(mg/L)$ ,  $Y = 2,0369 (mg\ SSV/mg\ DBO)$ ,  $k_d = 0,2085(d^{-1})$  y  $\mu_m = 0,8157 (d^{-1})$  los cuales se estimaron por medio del análisis de regresión de los datos experimentales a partir de valores promedio semanales de las variables medidas DBO y SSV.
- Se realizó la caracterización del afluente y efluente a partir de la medición de DQO registrando valores mayores a 1500 mg/L en el afluente y en el efluente mínimos de 222 mg/L en el caudal 4 de 0,045 ml/s. Con respecto a la medición de DBO5 en el afluente se obtuvieron valores máximos de 293 mg/L y mínimos en el efluente de 17 mg/L. El pH se mantuvo dentro del rango de 6,5 a 8
- Se elaboro un manual de operaciones para el adecuado uso del biorreactor de tratamiento de agua residual del laboratorio de tratamiento de aguas ubicado en la Universidad Santo Tomas Bogotá sede principal.
- Se comprobó el correcto funcionamiento del biorreactor realizando el control y medición de los parámetros pH, DBO, DQO, SST y SSV. El prototipo a escala banco de pruebas facilitará la determinación de coeficientes de remoción de materia orgánica y así poder realizar caracterizaciones de diferentes tipos de agua residual para diseños a gran escala de reactores para el tratamiento de afluentes con alto porcentaje de contaminación.
- La importancia de la determinación de los coeficientes cinéticos de crecimiento biológico para un agua residual no domestica recae en la comparación de la cinética de consumo de sustrato y que a partir de los coeficientes obtenidos se podrá diseñar una planta de lodos

activados a escala real para el tratamiento del efluente del cual se encontraron los coeficientes cinéticos.

## **Recomendaciones**

- Para obtener mejores análisis con respecto al tipo de agua residual y sus características es de gran importancia realizar un análisis microbiológico a los lodos activados para identificar los microorganismos que están realizando el trabajo de asimilar la materia orgánica para analizar su comportamiento e identificar las condiciones óptimas para el crecimiento máximo y degradación de contaminantes en menor tiempo y así obtener mejores porcentajes de remoción.
- Medir el parámetro de oxígeno disuelto indica la cantidad de oxígeno gaseoso que esta disuelto en el agua y favorece la vida de los microorganismos aerobios para que realicen el proceso de degradación de materia orgánica, por esta razón se considera como un indicador de la capacidad del agua para mantener la vida en el medio y es un parámetro importante de análisis a la hora de realizar el montaje con el biorreactor.
- Es pertinente emplear los filtros de fibra de vidrio para la determinación de los sólidos suspendidos volátiles para obtener resultados más específicos con respecto a la disponibilidad de material orgánico para la reacción y degradación que generan los microorganismos, realizando el secado en la mufla a 550°C según el procedimiento descrito en la guía de los métodos normalizados para el análisis de aguas en el apartado 2540 E sólidos fijos y volátiles encendidos a 550 ° C.
- Para el control del caudal de entrada y salida se empleó una bomba peristáltica que permite el flujo continuo del agua residual, permite caudales que manejan un rango de

velocidad de la cabeza entre 0.01 a 48 rpm y cuenta con 8 mangueras para asignar diferentes canales, la cual permite manejar varios flujos con el mismo caudal logrando así que el caudal de entrada sea igual al caudal de salida, se recomienda utilizar una bomba más sencilla que maneje únicamente el flujo de entrada y salida del biorreactor.

## **Anexos**

A: Plano del diseño del biorreactor en AutoCAD

B: Manual de operaciones

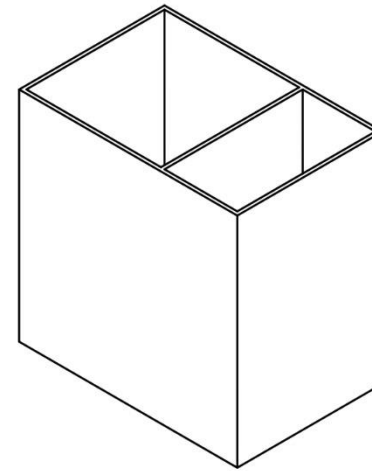
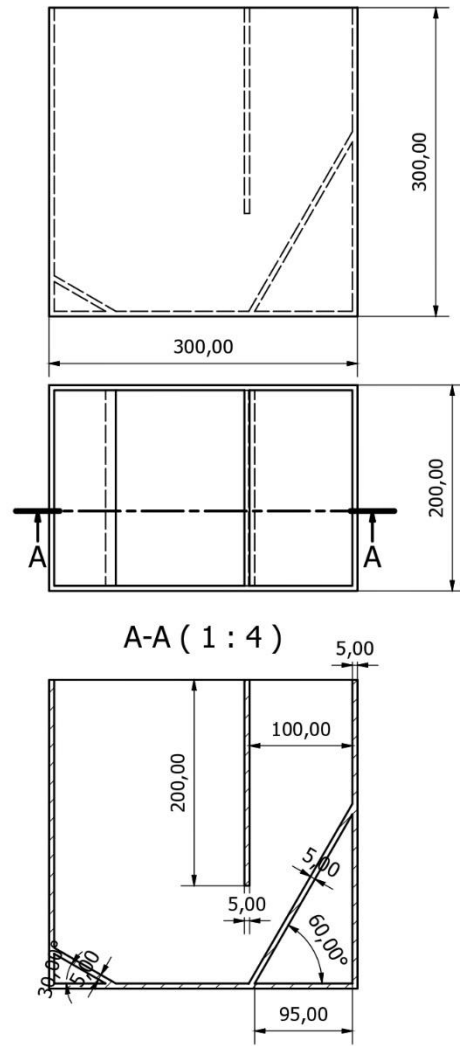
## **ANEXO A**

### **Plano del diseño del biorreactor en AutoCAD**

CREADO CON UNA VERSION PARA ESTUDIANTES DE AUTODESK

CREADO CON UNA VERSION PARA ESTUDIANTES DE AUTODESK

CREADO CON UNA VERSION PARA ESTUDIANTES DE AUTODESK



|                                 |              |              |              |            |       |
|---------------------------------|--------------|--------------|--------------|------------|-------|
| Diseño de                       | Revisado por | Aprobado por | Fecha        | Fecha      |       |
| Vanessa Forero                  | Fabio Diaz   |              |              | 10/07/2020 |       |
| Plano de vistas del biorreactor |              |              | Material:    |            |       |
|                                 |              |              | Unidades: mm | Edición    | Hoja  |
|                                 |              |              |              |            | 1 / 1 |

CREADO CON UNA VERSION PARA ESTUDIANTES DE AUTODESK

## **ANEXO B**

### **Manual de operaciones**

## Referencias

- [1] Al-Malack, M. H. (2006). Determination of biokinetic coefficients of an immersed membrane bioreactor. *Journal of Membrane Science*, 271(1), 47-58. doi:10.1016/j.memsci.2005.07.008.
- [2] Gil, M. J., A., /., Soto, M., J, /., Usma, I., & D Gutiérrez, D.O. (2012). Emerging contaminants in waters: Effects and possible treatments.
- [3] Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2015). Resolución 631 de 2015, vol. 73. Colombia, 2015.
- [4] J. Quiroga, F. Díaz. S. (2008). Treatment activated sludge at laboratory scale, “Tratamiento de aguas residuales mediante lodos activados a escala laboratorio,” vol. 7., no. 2.
- [5] S. Mardani, A. Mirbagheri, M. Amin, M.Ghasemian. (2011). “Determination of biokinetic coefficients for activated sludge processes on municipal wastewater,” vol. 8, no. 1, p. 25.
- [6] A. Aslam, S. J. Khan, H. M. A. Shahzad. (2019). “Impact of sludge recirculation ratios on the performance of anaerobic membrane bioreactor for wastewater treatment,” vol. 288, p. 121473.
- [7] Farid A. O. Habib E. Reza Y. (2009). Foaming control and determination of biokinetic coefficients in membrane bioreactor system under various organic loading rate and sludge retention time
- [8] A. F. Persino. (2012). “Electrocoagulación para el Tratamiento de Efluentes,” Universidad Privada - Instituto Tecnológico de Buenos Aires.
- [9] H. A. Hernández García, G. Buitrón Méndez, C. M. Lopez-Vazquez, F. J. Cervantes Carrillo. (2017). Tratamiento biológico de aguas residuales.

- [10] L.S. Daphne. (1994). Hazardous organic waste a menable to biological treatment. *Biotechnology for the Treatment of Hazardous Waste*, 1-26. D.L: Stoner, Ed. Chelsea, MI.
- [11] A. Marco, S. Esplugas, and G. Saum, (1997). “How and why combine chemical and biological processes for wastewater treatment,” vol. 35, no. 4. pp. 321–327.
- [12]M. A. Pilato Sanz, (2017). “Diseño del tratamiento biológico de fangos activos para eliminación de materia orgánica y nutrientes para una población de 60000 HE.” Universidad politécnica de Valencia.
- [13]J. Cuadrado and C. Cuartas, (2019). “Evaluación experimental de la eficiencia de remoción de materia orgánica en un reactor de lodos activados a escala piloto, alimentado con agua residual artificial, a partir de un aumento de presión en el sistema.,” Universidad Santo Tomás.
- [14]M. Bejarano, and M. Escobar. (2015). Eficiencia del uso de microorganismos para el tratamiento de aguas residuales domésticas en una planta de tratamiento de agua residual. Universidad de la Salle, Bogotá D.C., Colombia.
- [15] Metcalf, & Eddy. (2013). *Wastewater engineering treatment and resource recovery*. (ISBN 1259250938) New York: Mc Graw Hill.
- [16] A. Aziz, F. Basheer, A. Sengar, Irfanullah, S. U. Khan, I. H. Farooqi, (2019). “Biological wastewater treatment (anaerobic-aerobic) technologies for safe discharge of treated slaughterhouse and meat processing wastewater,” vol. 686, pp. 681–708.
- [17]J. F. Muñoz Paredes, M. Ramos. (2014). “Reactores discontinuos secuenciales: Una tecnología versátil en el tratamiento de aguas residuales,” vol. 24, no. 1, pp. 49–66.

[18]C. L. Villamizar, D. A. R. Robayo, (2018). “Determinación de los coeficientes cinéticos para el diseño de lagunas de estabilización en la Industria Alimentaria, caso productos Ramo S.A.”

[19]E. Lira Silva, R. Jasso Chávez, (2013). “Comparación de los diferentes métodos de análisis cinéticos para determinar el tipo de inhibición de dos compuestos,” vol. 32, no. 1, pp. 19–32.

[20] E.W. Rice, R.B. Baird, A.D. Eaton. (2017). Standard methods for the examination of water and wastewater. 23 Edition American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation.

[21] Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (2007). “Demanda química de oxígeno por reflujo cerrado y volumetría”. Código: TP0086. Versión 5.

[22] Gilson. (2018). MINIPULS 3 Peristaltic Pump (Drive Unit) with Eight Channel, Standard Flow Head (R8). Recuperado de <https://www.gilson.com/default/minipuls-3-pump-drive-unit-with-eight-channel-standard-flow-head-r8.html>