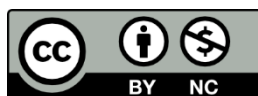


EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DE LA EFICIENCIA DE REMOCIÓN DE MATERIA
ORGÁNICA EN UN REACTOR DE LODOS ACTIVADOS A ESCALA PILOTO,
ALIMENTADO CON AGUA RESIDUAL ARTIFICIAL, A PARTIR DE UN AUMENTO DE
PRESIÓN EN EL SISTEMA.



JEAN PIERRE CUADRADO BAQUERO.

CARLOS HERNÁN CUARTAS SILVA.



UNIVERSIDAD SANTO TOMAS.

FACULTAD INGENIERÍA AMBIENTAL.

VILLAVICENCIO.

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.

JEAN PIERRE CUADRADO BAQUERO.

CARLOS HERNÁN CUARTAS SILVA.

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de Ingeniero Ambiental.

Director

HENRY CONTRERAS LEÓN

Especialista en Química Ambiental

UNIVERSIDAD SANTO TOMAS.

FACULTAD INGENIERÍA AMBIENTAL.

VILLAVICENCIO.

2019

Autoridades académicas

P. JUAN UBALDO LÓPEZ SALAMACA, O. P

Rector General

P. MAURICIO ANTONIO CORTÉS GALLEGO, O.P

Vicerrector Académico General

P. JOSÉ ARTURO RESTREPO RESTREPO, O.P

Rector Sede Villavicencio

P. FERNANDO CAJICÁ GAMBOA, O.P.

Vicerrector Académico Sede Villavicencio

JULIETH ANDREA SIERRA TOBÓN

Secretaria de División Sede Villavicencio

YESICA NATALIA MOSQUERA BELTRÁN

Decana Facultad de Ingeniería Ambiental

Nota De Aceptación

YESICA NATALIA MOSQUERA BELTRÁN

Decana de Facultad

HENRY CONTRERAS LEÓN

Director Trabajo de Grado

Christian José Rojas

Jurado

Carlos David Gómez Ortiz

Jurado

Villavicencio, marzo 2019

A Dios por ser el motor de mi vida, porque gracias a Él he alcanzado mis metas, obteniendo en cada uno de los obstáculos el mayor aprendizaje posible, para crecer como persona, y siempre está a mi lado para protegerme de todo mal y peligro.

A mis papás, Abraham y Luz Nancy por estar siempre para apoyarme en cada paso que di, dejándome el mejor legado que es la educación, por su amor, confianza y siempre estar ahí a mi lado.

A Angie Gutiérrez, por siempre impulsarme a ser mejor cada día, por darme ánimos para seguir adelante, siempre con paciencia, siendo una persona fundamental en la culminación de este proceso.

Jean Pierre Cuadrado.

A mi padre, Hernán Cuartas, quien hoy no está presente, con su amor y sabiduría me enseñó el valor de luchar por mis metas y cumplir mis sueños, me enseñó que nada en este mundo no es tan grande como para alcanzarlo con la fe en Dios.

A mi familia, mi madre Liliana Silva, que con su amor y entrega incondicional me apoyo en cada momento de bajera y que gracias a sus enseñanzas me enseñó a formar mi carácter para culminar con este proceso.

A mi otra madre, Edith Castillo, mi abuela, que estuvo presente cada día brindándome su ayuda para salir adelante, horas y horas dedicadas de su parte para mi bienestar y todo el amor incondicional que me brindo día a día.

A mi hermana, Alejandra Cuartas, quien, gracias a su carácter y amor a su carrera, me motivo a no rendirme a pesar de todas las adversidades que tuve en este proceso, su apoyo fue indispensable para ser la persona que soy hoy en día.

Por último y no menos importante, a Daniela González, quien fue una persona que me motivo día a día a ser el mejor, agradecer el amor que me brindo y aporte emocional para mi vida en todos los pasos dados en este proceso.

Carlos Hernán Cuartas.

Agradecimientos

A través de estas palabras agradecemos a quienes especialmente intervinieron durante el desarrollo de este trabajo de grado, en primer lugar, a Dios por siempre protegernos de camino a casa y permitir que tuviésemos la suficiente paciencia, fortaleza, sabiduría y dedicación para poder afrontar cada reto que se nos presentó en el camino y lograr alcanzar cada propósito.

A nuestras familias y personas especiales en nuestras vidas que nos dieron la confianza y el apoyo para ser cada día mejores personas y mejores profesionales,

A nuestro director, el Ingeniero Henry Contreras, quien con dedicación, experiencia, exigencia y esfuerzo nos orientó durante todo el recorrido para la culminación del mismo.

A todo el cuerpo docente, conformado por todos aquellos quienes brindaron su experiencia y conocimiento en nuestra etapa universitario, y nos ayudaron en asesorías y dudas presentadas en la elaboración de nuestro trabajo de grado.

Finalmente, expresamos nuestro agradecimiento a la Universidad Santo Tomás – sede Villavicencio, específicamente a la Facultad de Ingeniería Ambiental por todos los conocimientos y experiencias adquiridas a lo largo de estos cinco años de pregrado.

Tabla de contenido

	Pág.
Introducción	12
2. Planteamiento del problema.....	13
2.1 Descripción del problema	13
2.2 Formulación del problema	14
2.3 Hipótesis	14
3. Objetivos	15
3.1 Objetivo general.....	15
3.2 Objetivos específicos	15
4. Justificación	16
5. Alcance	17
6 Antecedentes.....	19
7 Marco referencial.....	23
7.1 Marco teórico.....	23
7.2 Marco legal	29
8 Metodología	31
8.1 Área de estudio	31

8.2 Temporalidad del estudio.....	31
8.3 Fase 1: modelo experimental y variables monitoreadas.	31
8.4 Fase 2: realizar el montaje del reactor de lodos activados a escala piloto	33
8.5 Fase 3: corridas operacionales	36
8.6 Fase 4: análisis de resultados.....	37
8.7 Fase 5: recomendaciones y consideraciones de diseño.....	39
9. Resultados	40
9.1 Evaluación de la eficiencia del biorreactor de lodos activados operado bajo presión.....	40
9.1.1 Potencial de hidrógeno (ph).....	40
9.1.2 Temperatura	41
9.1.3 Oxígeno disuelto	42
9.2 Análisis estadístico de las variables	51
9.2.1.2 Análisis de regresión lineal dbo	54
9.2.2 Análisis de varianza	55
9.4 Comparación del biorreactor de lodos operado bajo presión con biorreactor de lodos activados convencionales.....	57
10. Análisis de resultados.	63
11 Discusión de resultados.....	65
12. Recomendaciones	66
Conclusiones	68
Referencias bibliográficas.....	70

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Parámetros empíricos de diseño para el proceso de lodos activados	30
Tabla 2. Variables a medir y método de diseño factorial 3x3	32
Tabla 3. Características del agua residual sintética propuesta	33
Tabla 4. Compuestos para generar ARS	34
Tabla 5. Determinación de caudales de operación del reactor.....	36
Tabla 6. Variables dependientes a tener en cuenta en la investigación	36
Tabla 7. Análisis de varianza de los porcentajes de remoción de demanda biológica de oxígeno (DBO) para el esquema de parcelas divididas	56
Tabla 8. Análisis de varianza de los porcentajes de remoción de demanda química de oxígeno (DQO) para el esquema de parcelas divididas	56
Tabla 9. Avances en parámetros de diseño para reactores de lodos activados, para lograr una mayor eficiencia de remoción de materia orgánica.....	62

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Ubicación del reactor de lodos activados operado bajo presión, dentro del campus Aguas Claras, sede Villavicencio.....	18
Figura 2. Línea de tiempo documentos encontrados con la palabra de búsqueda “activated sludge with increased pressure” entre 1995-2017.....	19
Figura 3. Porcentajes de variación de tipos de documentos encontrados entre 1995 y 2017.....	20
Figura 4. Reacción de proceso aerobio.....	24
Figura 5. Metabolismo microbiano en el proceso de respiración aerobia.....	24
Figura 6. Curva de crecimiento bacteriano.....	25
Figura 7. Esquema del proceso convencional de lodos activados.....	26
Figura 8. Curva del comportamiento del Oxígeno Disuelto respecto a la variación de la Temperatura.....	28
Figura 9. Diseño esquemático del reactor de lodos activados a escala piloto.....	35
Figura 10. Resultados de pH en relación con el tiempo de retención hidráulico y presión en el biorreactor.....	41
Figura 11. Resultados de la temperatura en relación con el tiempo de retención hidráulico, la presión y hora de muestreo.....	42
Figura 12. Resultados del Oxígeno Disuelto en relación con la presión en biorreactor y tiempo de retención hidráulico.....	43
Figura 13. Valores de la Demanda Química de Oxígeno en la entrada y salida del biorreactor, respecto a los tiempos de retención hidráulico y diferentes presiones, medidos a determinadas horas.....	45
Figura 14. Valores de la Demanda Biológica de Oxígeno en la entrada y salida del biorreactor, respecto a los tiempos de retención hidráulico y diferentes presiones, medidos a determinadas horas.....	46
Figura 15. Resultados de Sólidos Suspendedos Volátiles en la salida del Biorreactor al sedimentador en el transcurso de las corridas operacionales.....	48

Figura 16. Resultados de Sólidos Suspendidos Volátiles en la salida del Biorreactor al sedimentador en el transcurso de las corridas operacionales.....	49
Figura 17. Eficiencia de remoción de materia orgánica (DBO-DQO) en el reactor en el transcurso de las corridas operacionales, respecto a los tiempos de retención hidráulico y diferentes presiones, medidos a determinadas horas.	51
Figura 18. Diagrama de dispersión de la Eficiencia DQO vs Presión, correlación lineal entre las variables y su R2 en relación con el tiempo de retención hidráulico.....	53
Figura 19. Diagrama de dispersión de la Eficiencia DBO vs Presión, correlación lineal entre las variables y su R2 en relación con el tiempo de retención hidráulico.....	54
Figura 20. Resultados relacionados entre los Sólidos Suspendidos Volátiles (SSV) del tanque de aireación y el sedimentador, eficiencia de remoción de la Demanda Química de Oxígeno (DQO) y Demanda Biológica de Oxígeno (DBO).	59
Figura 21. Resultados relacionados entre el Oxígeno Disuelto (OD) del tanque de aireación con la eficiencia de remoción de la Demanda Química de Oxígeno (DQO) y Demanda Biológica de Oxígeno (DBO).....	60
Figura 22. A. Caneca inicial para uso como reactor. B. Tanque final para montaje del reactor.	67

Resumen

Este trabajo evalúa la eficiencia de un sistema de tratamiento en un reactor de lodos activados, operado bajo presión, ubicado en el Campus Aguas Claras, Universidad Santo Tomas sede Villavicencio. El cuál tuvo como alimentación, agua residual sintética propuesta, con el fin de controlar las características de la misma, a la entrada del reactor. Se determinó la eficiencia del reactor, inicialmente realizando una caracterización del efluente a través de monitoreo *in situ* de los siguientes parámetros: Temperatura del agua, pH, Oxígeno disuelto y Caudal; seguido a esto, se midieron las variables independientes de la investigación, tales como la presión entre 3, 5 y 8 psi, en relación con la ley de Henry, para determinar la solubilidad del oxígeno en la mezcla de agua, asimismo, el tiempo de retención hidráulico (3, 4 y 6 horas), posteriormente se midieron variables, *ex situ*, como la DBO5, DQO y los SSV, determinando de esta manera, la remoción final de la materia orgánica en el reactor (eficiencia).

La temporalidad del trabajo abarcó los meses de septiembre a noviembre de 2019; en el cual a finales de septiembre se operó el biorreactor dejando un periodo de estabilización y adaptación de las bacterias de una semana. Posteriormente se iniciaron las corridas operacionales durante la primera semana de octubre, luego el muestreo y toma de datos se realizó durante las diferentes semanas del mismo mes y comienzos del mes de noviembre, periodo en el cual las variaciones para tiempo de retención hidráulico y presión se determinaron de la siguiente manera: TRH variación semanalmente, y la presión cada dos días.

En este sentido, sumado a la revisión de información secundaria se evaluó y comparó el diseño actual del sistema de lodos activados operado bajo presión, respecto a referentes teóricos de reactores convencionales, consecuentemente, se identificaron aspectos a mejorar en el tratamiento, proponiendo consideraciones de diseño tendientes a mejorar la eficiencia de remoción de carga contaminante, mediante información técnica del sistema de tratamiento que facilite el proceso de mantenimiento, seguimiento y control de las condiciones operativas.

Los resultados en la investigación, fueron la mayor eficiencia de remoción del 91,09% para DQO y 96,66% para DBO con una presión de 8 psi, un tiempo de retención de 4 horas y un oxígeno

disuelto de 4,7 mg/L. Contrariamente, la menor eficiencia se evidenció en 53,07% con una presión de 3 psi, un tiempo de retención de 6 horas y una concentración de OD de 3,4 mg/L, así como la corrida operacional en la cual se presentó un porcentaje de remoción de 76% con una presión de 8 psi, un tiempo de retención de 6 horas y un OD 5,8 mg/L respectivamente. El análisis estadístico de varianza indico que existe una relación significativa entre la presión aplicada al biorreactor y la eficiencia que se obtuvo del proceso, indicando así que a una mayor presión se presentan mejores porcentajes de remoción, por otro lado, los tiempos de retención no presenta ninguna relación significativa con la eficiencia del proceso.

Palabras Claves: Reactor de lodos activados, eficiencia, remoción de carga contaminante, presión.

Abstract

This work evaluates the efficiency of a treatment system in an activated sludge reactor, operated under pressure, located in the Santo Tomas University Aguas Claras Campus from Villavicencio -Colombia. Which was fed by synthetic waste-water proposed, in order to control the characteristics of it, at the entrance of the reactor. The efficiency of the reactor was determined, initially making a characterization of the effluent by an on-site monitoring of the following parameters: Water temperature, pH, Dissolved oxygen and Flow; after this, the independent variables of the investigation were measured, the pressure (3, 5 y 8 psi), in relation to Henry's law, to determine the solubility of oxygen in the water mixture, the hydraulic retention time (3, 4 y 6 hours), after which independent variables were measured, ex situ, such as BOD5, COD and SSV, that is determining the final removal of organic matter in the reactor (efficiency).

The temporality of the work covered the months of September to November; in which at the end of September the bioreactor was operated leaving a period of a week for the stabilization and adaptation of the bacteria. Later, the operational runs began during the first week of October, then the sampling and data collection was carried out during the different weeks of the same month and beginning of November, period in which the variations for hydraulic retention time and pressure were determined. as follows: TRH variation weekly, and pressure every two days.

In this sense, in addition to the review of secondary information, the current design of the activated sludge system operated under pressure was evaluated and compared to theoretical referents of conventional reactors, consequently, aspects to be improved in the treatment were identified, proposing design considerations tending to improve the efficiency of removal the charge, by means of technical information of the treatment system that facilitates the process of maintenance, monitoring and control of the operative conditions.

The results in the investigation, are presented by the highest removal efficiency, which was 91.09% for COD and 96.66% for BOD with a pressure of 8 psi, a retention time of 4 hours and a dissolved oxygen of 4.7 mg / L, conversely, the lowest efficiency was found in 53.07% with a pressure of 3 psi, a retention time of 6 hours and an OD concentration of 3.4 mg / L, as well as the

operational run in which a removal percentage of 76% was presented with a pressure of 8 psi, a retention time of 6 hours and an OD of 5.8 mg / L respectively. The statistical analysis of variance indicated that there is a significant relationship between the pressure applied to the bioreactor and the efficiency obtained from the process, indicating that at a higher pressure there are better percentages of removal, on the other hand, retention times do not present no significant relationship with the efficiency of the process.

Key words: Reactor of activated sludge, efficiency, removal of contaminant charge, pressure.

Introducción

La contaminación de cuerpos hídricos es uno de los mayores problemas que se presentan en nuestro medio natural. La introducción de estas sustancias en las fuentes de agua, por vertimientos incontrolados de uso doméstico, comercial e industrial; provocan un impacto a corto, mediano y largo plazo sobre la fuente receptora; por esto, algunos vertidos, están generando problemas ambientales como alteraciones en las fuentes hídricas y problemas de salubridad que afectan el sistema digestivo, la presencia de vectores (moscas, zancudos), muerte de fauna y flora; y que en forma acumulativa se convierten en impactos significativos al estilo de vida de las comunidades aledañas, a la salud y al paisaje natural del entorno (Alfaro, 2015)

Los diversos métodos de tratamiento de las aguas residuales han sido desarrollados para la reducción o eliminación de sus contaminantes, estas sustancias son tratadas mediante tratamientos primarios, secundarios y terciarios, encaminados a la reducción de materia orgánica, metales pesados, sustancias tóxicas y microorganismos patógenos (Villota, 2015)

De esta manera, dentro de los tratamientos que se realizan a las aguas residuales, el tratamiento biológico por fangos activos (lodos activados), el cual se presenta como el desarrollo de un cultivo bacteriano disperso en flóculos emplazado en un depósito con aireación sistemática. La materia orgánica sirve de alimento de estas bacterias aerobias. Se realiza una recirculación de una parte de estos fangos para mantener una adecuada concentración de bacterias en el depósito, mientras que el resto se purga. Hoy en día, el proceso de fangos activos es el más utilizado tanto para tratamiento de las aguas urbanas como de las aguas industriales (Sanz, 2016)

Por lo anterior y en respuesta a la necesidad de generar un uso masivo de los reactores de lodos activados, al disponer de menores costos asociados a la operación del reactor respecto a la disminución de la demanda energética por necesidad de inyección de aire, equipos más compactos al operar con menores tiempos de retención hidráulico (TRH). Se construyó un equipo controlado para el tratamiento biológico de agua residual artificial, en este caso un reactor de lodos activados a escala piloto, operados a diferentes variaciones de presión y TRH.

2. Planteamiento del problema

2.1 Descripción del problema.

Los sistemas de tratamiento de aguas residuales actualmente cuentan con varios procesos para la remoción de los contaminantes, entre estos a gran escala están conformados por un pretratamiento, tratamiento primario, tratamiento biológico y tratamiento terciario o avanzado (Adalberto et al. 2013). En el tratamiento biológico bacterias y microorganismos degradan la materia orgánica e inorgánica, logrando un crecimiento de su población (Bitton, 2013). Asimismo, dentro del tratamiento Biológico o secundario, cuenta con un sistema de lodos activados, el cual se realiza con bacterias aerobias, las cuales demandan la presencia de grandes cantidades de O₂, por lo tanto, existe la necesidad de aplicación de sistemas de aireación complejos que garanticen la correcta distribución y disponibilidad del O₂ en todo el sistema.

No obstante, los sistemas de aireación actuales no logran una correcta homogenización del oxígeno disuelto en toda la mezcla de agua, además de esto, es crucial mencionar que sin importar el sistema sofisticado y robusto de aireación que se instale, no se logra superar la concentración de oxígeno disuelto máxima establecida en relación con la temperatura, la cual no supera los 7mg/L a una temperatura cercana a los 30°C (Metcalf & Eddy, 2014). Cabe mencionar que el rango de T° elevadas en la Región de la Orinoquia se encuentra entre 20-40 °C según informe del IDEAM (Arango, Dorado, Guzmán, & Ruiz, 2012), y específicamente en Villavicencio con unas temperaturas frecuentes entre los 20 y 32°C (IDEAM, 2017).

Por ende, a estas temperaturas se puede denotar una baja concentración de oxígeno, teniendo en cuenta que el consumo de este es constante, por lo cual, la variación en disponibilidad de oxígeno disuelto se ve afectada directamente, donde la población microbiana se encontrará limitada para remover la carga contaminante presente en el agua residual. Los procesos de tratamientos biológicos aerobios, como el de lodos activados, requieren concentraciones de determinadas cantidades de oxígeno disuelto, (generalmente de 0,2 a 2,0 mg/L) donde se encuentra a estas concentraciones los microorganismos responsables del tratamiento (Alviz & Cueto, 2012).

Sin embargo, cuando el oxígeno se encuentra por debajo de una concentración 0,2 mg/L se generan condiciones anóxicas.

Por consiguiente, se genera la aparición de zonas muertas y productos de anaerobiosis, dificultando la eficiencia de remoción de carga del reactor de lodos, a su vez, demandando una mayor cantidad de inyección de aire por medio de los sistemas de aireación, los cuales tienen gran costo en la adquisición de equipos, ocupan grandes zonas para ser instalados, requieren un mantenimiento continuo, y por ende, representan un costo adicional, haciendo en ocasiones ineficientes a los sistemas de aireación.

2.2 Formulación del problema.

Con base en el planteamiento del problema, se generó la siguiente pregunta problema: ¿Cómo varía la eficiencia de remoción de materia orgánica en un reactor de lodos activados a escala piloto operado bajo presión y con una mayor disponibilidad de oxígeno disuelto, alimentado con aguas residuales artificiales, en 9 pruebas experimentales y con respecto a los reactores de lodos convencionales, en la Universidad Santo Tomás, sede Aguas claras?

2.3 Hipótesis.

Generando un aumento de presión en el reactor de lodos activados, aumentará la solubilidad del oxígeno disuelto en la mezcla de agua residual artificial, por consiguiente, la remoción de DBO efectuada por las bacterias será mayor, debido a que la concentración de oxígeno estará con mayor disponibilidad para suplir las necesidades de los microorganismos aerobios, a su vez, el montaje del reactor de lodos será más compacto, ocupando menos espacio de instalación, el cual se ve reflejado por la disminución en el uso de equipos de inyección de aire por una mayor disponibilidad de Oxígeno en el agua, así como por la disminución del Tiempo de Retención Hidráulico de operación.

3. Objetivos

3.1 Objetivo general.

Evaluar la eficiencia en la remoción de materia orgánica en un reactor de lodos activados a escala piloto operado bajo presión, mediante 9 pruebas experimentales, con el fin de incrementar la capacidad efectiva de remoción de materia orgánica de los reactores de lodos convencionales.

3.2 Objetivos específicos.

- Cuantificar los porcentajes de remoción mediante 9 pruebas experimentales a diferentes presiones, determinando la eficiencia en la remoción de materia orgánica, efectuada por las bacterias.
- Comparar la eficiencia del proceso de remoción entre las pruebas experimentales y su disponibilidad de oxígeno disuelto respecto a los reactores de lodos activados convencionales.
- Proponer consideraciones de diseño tendientes a la optimización de la efectividad del tratamiento.

4. Justificación

El diseño de un reactor de lodos activados con aumento de presión en su sistema, pretende solventar las grandes demandas de Oxígeno Disuelto de los microorganismos presentes en los tratamientos Biológicos, en los reactores de lodos convencionales. Asimismo, reducir los costos asociados al uso de equipos y sistemas de inyección de aire, debido a, un aumento de la solubilidad del oxígeno presente en la mezcla de agua, generado por el aumento de la presión en el reactor de lodos.

Por consiguiente, la Ley de Henry (formulada en 1803 por William Henry) enuncia que, a una temperatura constante, la cantidad de gas disuelto en un líquido es directamente proporcional a la presión parcial que ejerce ese gas sobre el líquido, la presión parcial de un gas es simplemente su concentración volumétrica multiplicada por la presión del aire. Matemáticamente puede formularse como $c_A = K_H \times P_A$ (Ecuación 1), siendo c_A la concentración molar del gas A disuelto, P_A la presión parcial del mismo y K_H la constante de Henry, que no es más que la constante de equilibrio (Romero, 2000).

Así mismo, para lograr una correcta distribución y homogenización del oxígeno disuelto en toda la mezcla de agua, es decir, se reduce directamente la necesidad de inyección de aire. Del mismo modo, al aumentar la disponibilidad de Oxígeno Disuelto para los microorganismos, se eliminarán las zonas muertas y la aparición de procesos de anaerobiosis que se generan a consecuencia del déficit de oxígeno en el agua (Bitton, 2013). A su vez, se hará más eficiente el proceso en el reactor de lodos, aumentando el porcentaje de remoción de materia orgánica.

Cabe resaltar, el trascender ambiental será un uso masificado y continuo de reactores de lodos activados en el tratamiento de aguas residuales, consecuentemente, al disponer de menores costos asociados a la operación del reactor respecto a la disminución de la demanda energética por necesidad de inyección de aire, equipos más compactos al tener menor TRH, organizaciones e instituciones interesadas se involucren en utilizar los reactores de lodos, por tal razón, se ha considerado realizar el proyecto en las instalaciones de la Universidad Santo Tomás, sede Aguas Claras, a escala piloto, alimentado por aguas residuales artificiales.

5. Alcance

El proyecto de investigación planteado, se realizó en la ciudad de Villavicencio-Meta en las instalaciones de la Universidad Santo Tomas, implementando un tanque de alimentación de 1000L con aguas residuales artificiales (véase Tabla 2), para tener una DBO constante de entrada, un reactor de lodos activados a escala laboratorio que opere con un volumen de 170-200L, este reactor compuesto por lámina de acero calibre 14, una motobomba domestica que brinde la recirculación, dos Venturi los cuales, uno brinde al succión de aire, que garantice el aumento de la presión atmosférica, el otro que ejerza una succión de agua del tanque de alimentación y del sedimentador, y un manómetro para medir las presiones correspondientes para llevar a cabo su operatividad.

La ciudad de Villavicencio cuenta con unas temperaturas frecuentes entre los 20 y 32°C (IDEAM, 2017), por consecuente, el reactor trabajo con bacterias Mesófilas que soportan unas temperaturas entre 20-40°C (Bitton, 2013). La cobertura temporal de la investigación abarco un tiempo de 9 meses aproximadamente, en el cual para el montaje que tuvo inconvenientes, se demoró 7 meses aproximadamente, en la adaptación de las bacterias del biorreactor y para garantizar una correcta operación del sistema se demoró un mes y las 9 pruebas experimentales propuestas tomaron un tiempo de 1 mes.

5.1 Descripción del área de estudio.

El área de estudio es la Universidad Santo Tomas sede Aguas Claras, la cual cuenta con una infraestructura adecuada de acuerdo con las necesidades del proyecto, ya que el área de los laboratorios cuenta con un suministro adecuado de agua y un soporte de energía UPS (Uninterruptible Power Supply). Por lo tanto, la ubicación del biorreactor de lodos activados se encuentra en la parte posterior a los laboratorios (véase Figura 1), colindando con el humedal Aguas Claras y la infraestructura. Se decidió ubicarlo en esta zona, puesto que, el reactor requiere un suministro de agua cercano, asimismo, en la zona propuesta cuenta con una toma de agua y de

energía con respaldo energético sin interrupción, la cual amortiguará las bajas de luz que se puedan generar, logrando que el reactor opere con la continuidad de diseño requerida. Cabe resaltar, que este tipo de tratamientos generan malos olores, por lo tanto, se decidió alejarlo de las zonas concurridas por los estudiantes de la Universidad.

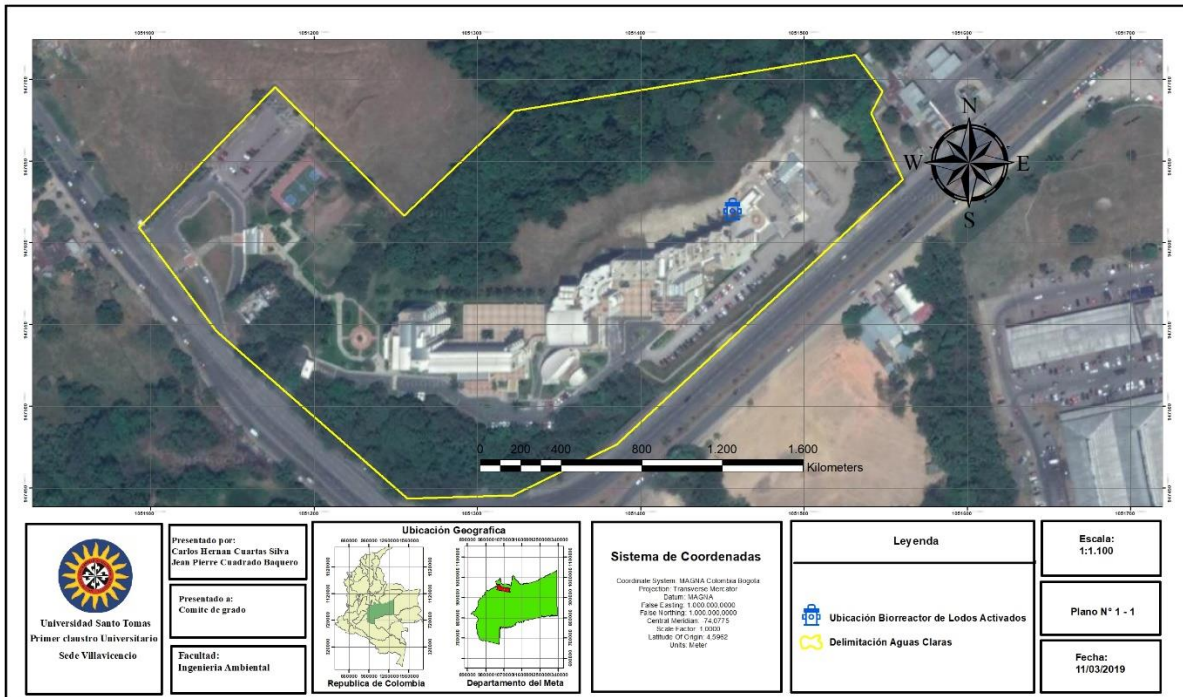


Figura 1. Ubicación del reactor de lodos activados operado bajo presión, dentro del campus Aguas Claras, sede Villavicencio. Adaptado del Software ArcGIS Pro 10.3 por J. Cuadrado, & C. Cuartas, 2018.

6 Antecedentes

En esta labor de consulta se encontró 222 artículos relacionados con la palabra de búsqueda “activated sludge with increased pressure” y dentro de la búsqueda no se encontró ninguna referencia que evalué la solubilidad del oxígeno al ejercer un aumento de la presión atmosférica dentro de un reactor de lodos activados, por lo tanto, se tuvo en cuenta las últimas tendencias en la evaluación de sistemas de tratamiento de lodos activados entre 1995 y 2018. En la Base de Datos Scopus se documenta 222 artículos relacionados a lo largo del tiempo, la línea de tiempo es la siguiente:

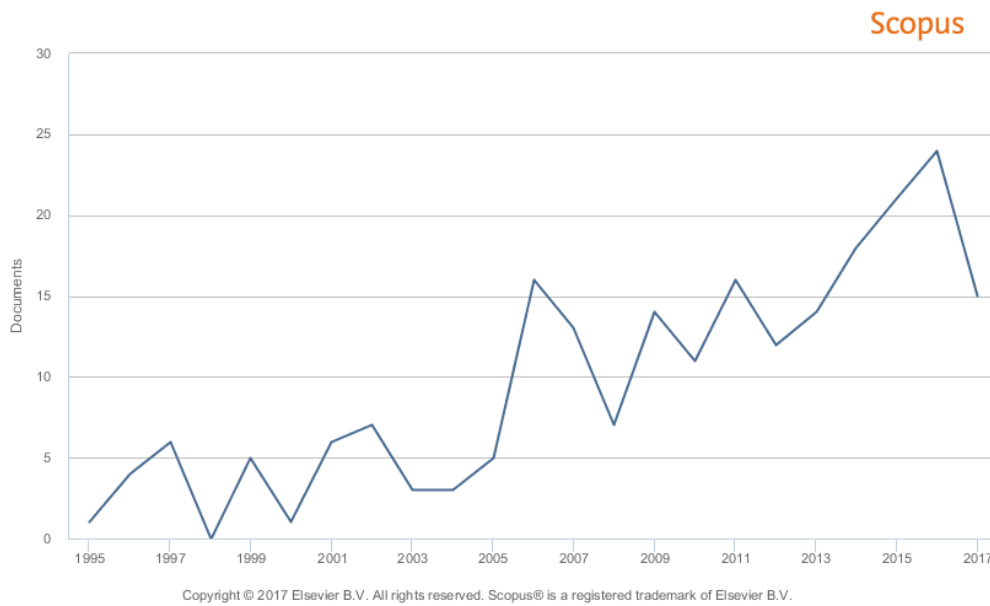


Figura 2. Línea de tiempo documentos encontrados con la palabra de búsqueda “activated sludge with increased pressure” entre 1995-2017. Adaptado de Base de datos Scopus por J. Cuadrado, & C. Cuartas, 2018.

La siguiente línea de tiempo muestra la producción de documentos a lo largo del tiempo referente a sistemas de lodos activados, el cual presenta un constante crecimiento hasta el 2016, año en el cual muestra el mayor pico con una producción de 25 documentos y en el año 2017 se presenta un decaimiento en la producción, con 15 documentos referentes al tema de investigación.

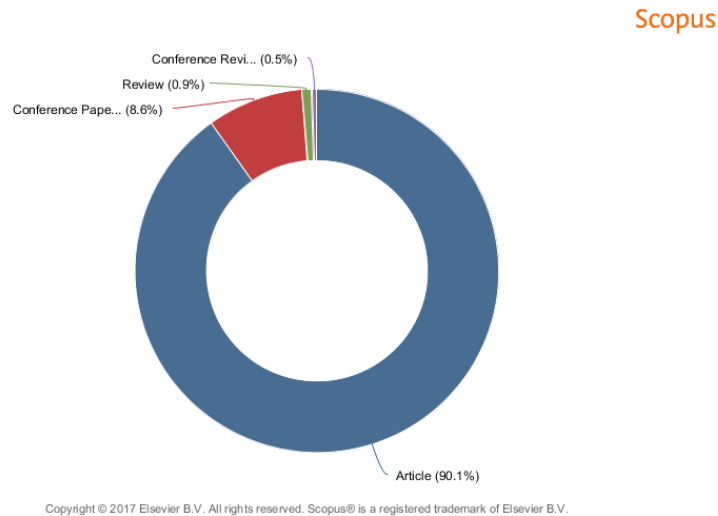


Figura 3. Porcentajes de variación de tipos de documentos encontrados entre 1995 y 2017. Extraído de Base de datos Scopus por J. Cuadrado, & C. Cuartas, 2018.

Se analizó de la gráfica que la mayoría de los documentos referentes a las palabras de búsqueda y al tema de investigación son artículos científicos con un 90% de los 222 documentos, con un referente desde el año 1995 a 2017.

De acuerdo a la búsqueda, los artículos que más se asemejan o tienen relevancia para la investigación son los relacionados a sistemas de lodos activados que funcionen a bajas condiciones de Oxígeno Disuelto, análisis del daño celular en bacterias ejercido por el aumento de la presión y una sobresaturación de la mezcla. Es importante obtener datos relevantes sobre enfoques teóricos y prácticos referentes al tema, con el fin de no cometer errores en la investigación y tener en cuenta parámetros operacionales de los sistemas de lodos activados.

Recientemente en el 2014 se hizo una investigación experimental que busco demostrar la efectividad de una comunidad de lodos activados nitrificantes aclimatadas, el cual operó a condiciones bajas de Oxígeno Disuelto (OD) con un rendimiento similar y logro obtener un 20% menos de requerimiento de oxígeno para su operación. La investigación se llevó a cabo por medio de dos reactores que operaron durante 220 días, uno con baja disponibilidad de OD y otro con condiciones de alto OD casi saturado en el reactor. Como conclusión, los investigadores determinaron que este cultivo de lodos activados pudo operar con una mayor eficiencia y con un menor requerimiento de oxígeno en su operación (Arnaldos & Pagilla 2014).

En la misma labor de investigación, se encontró un artículo el cual evaluó el efecto que tiene un sistema de aumento de presión HPJD en las bacterias Gram positivas (*Bacillus subtilis*) y Gram negativas (*Escherichia coli*) en la magnitud de disrupción celular ejercido por este sistema, la presión que se aplicó fue de 6 MPa, se utilizó 10L de suspensión bacteriana aplicada y estas se sometieron a cinco ciclos de tratamiento. Posteriormente, se evaluó la mortalidad de las bacterias y se obtuvo que la magnitud del tratamiento de la reducción de lodos va a depender de las bacterias utilizadas, por consiguiente, la bacteria más resistente fue *B. subtilis* (Gram-negativa) debido a su capa de peptidoglucano más gruesa y su capa de limo incrustada compuesta por glicoproteínas, la cual ejerce persistencia contra el daño (Xie et al., 2016).

Para ejercer un diseño efectivo en un proceso biológico de lodos activados se tienen en cuenta diferentes parámetros como, las necesidades nutricionales, los factores ambientales, el metabolismo de los microorganismos y la relación entre crecimiento biológico y utilización de sustrato (Alviz & Cueto, 2012). Las condiciones ambientales, hacen alusión a dinámicas operacionales en los reactores que generen condiciones óptimas de pH, temperatura y oxigenación, por lo tanto, es relevante por medio de ecuaciones y coeficientes medir la transferencia de oxígeno en el reactor (Romero, 2000). El metabolismo de las bacterias es un factor clave para la investigación, ya que, la magnitud de disrupción celular es afectada por una presión de 6 MPa (Xie et al, 2016), ocasionando mortalidad en bacterias, por lo tanto, es importante obtener los equipos correctos y presión específicas que no afecte la función de las bacterias.

En Colombia actualmente la mayoría de los sistemas de tratamiento de aguas residuales son anaerobios, ya que son de fácil aplicabilidad por su bajo costo, aplicable a pequeña, mediana y gran escala, demandan un poco espacio y una baja producción de lodos, sin embargo, este tiene unos menores porcentajes de remoción, malos olores y sensibilidad en cambio bruscos en su pH, temperatura y oxígeno disuelto (Orjuela & Lizarazo, 2013). Los sistemas de lodos activados convencionales que hay en Colombia para tratar efluentes Domésticos, son los implementados por la empresa E.P.M (Empresa pública de Medellín), en donde, sus 3 plantas de tratamiento de aguas residuales limpian las aguas residuales doméstica de algunos municipios de Antioquia. (González, 2017).

La Planta de tratamiento de San Fernando, entro en operación en mayo de 2000 con un valor en su construcción y operación US\$ 130 millones de dólares, trata un caudal de 1.3 m³/s y comprende el municipio de Itagüí. La planta de tratamiento del Retiro, la cual renovó su permiso

de vertimientos en el 2014, entro en operación con un caudal 22 l/s y un 80 % de remoción en su proceso, la cual comprende los municipios aledaños al Valle de Aburra y la planta de tratamiento de Bello que va a entrar en vigencia en el año 2018, la cual tuvo una inversión de US\$ 450 millones de dólares, con un caudal 5 m³/s y comprende los Municipios de Medellín y Bello (González, 2017).

La intencionalidad de la investigación se basó en optimizar la operatividad de los reactores de lodos activados, ejerciendo pruebas experimentales aumentando la presión del sistema, para que se genere una mayor disponibilidad de oxígeno disuelto en el agua, así proponiendo un desarrollo tecnológico nuevo e innovador. “El rendimiento del proceso depende del suministro de energía constante para el funcionamiento de los sopladores de aire, bombas de recirculación y licores mezclados” (Romero, 2000), por consecuencia al disminuir las necesidades de oxígeno se disminuyen los costos en gastos energéticos y mantenimiento de partes obsoletas. Por otra parte, la implementación de los biorreactores de lodos activados en Colombia es mínima, no hay mucha documentación al respecto sobre el tema, ya sea por una falta de conocimiento por las industrias, empresas e instituciones o por su costo en la operatividad de estos sistemas de tratamiento.

7 Marco referencial

7.1 Marco teórico.

Los lodos activados es un tratamiento biológico ampliamente utilizado para tratar las aguas residuales domésticas e industriales, debido a sus grandes ventajas como su fácil operación, alta eficiencia y bajo costo de operación, su composición básica son una masa floculenta de microorganismos, materia orgánica muerta y materiales inorgánicos; el cual posee una superficie activa que absorben materiales coloidales y suspendidos. La remoción se debe a la adsorción, puesto que el material sintetizado es proporcional a la oxidación biológica, dando como resultado compuestos inorgánicos y materia orgánica transformada en lodo activado adicional. (Romero, 2000).

El medio ambiental común de los reactores de lodos activados está compuesto por bacterias, protozoos y metazoos pequeños en un medio acuático con una constante agitación y recirculación de lodos. Los géneros de bacterias más comunes en un reactor son *Alcaligenes*, *Flavobacterium*, *Bacillus* y *Pseudomonas*; bacterias nitrificantes como *Nitrosomas*, *Nitrobacter* y *Zooglea ramigera*, importantes para la purificación y formación de floc. Los protozoos contenidos comúnmente en lodos activados son los flagelados, estos ejercen una competencia con las bacterias por el material orgánico sólido (Romero, 2000)

Este tratamiento biológico comprende, la conversión de materia orgánica carbonacea disuelta y en estado coloidal en diferentes gases y tejidos celulares, formación de flocs biológicos compuestos de materia celular y coloides orgánicos presentes en aguas residuales, y su subsecuente remoción por medio de la sedimentación. Este proceso aerobio que se basa en la respiración, en el cual el oxígeno es reducido y la materia orgánica o inorgánica es oxidada, el oxígeno libre cumple la función como el aceptor de electrones (Bejarano Novoa & Escobar Carvajal, 2015). (Vease Figura 4).

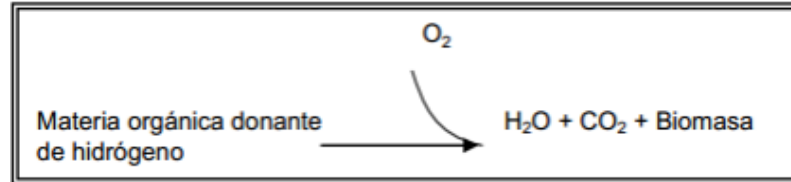


Figura 4. Reacción de proceso aerobio. Adaptado de “eficiencia del uso de microorganismos para el tratamiento de aguas residuales domésticas en una planta de tratamiento de agua residual”, por Bejarano ME, Escobar M, 2015.

Es importante tener en cuenta para la aplicación del proceso los nutrientes y las reacciones que requieren los microorganismos para generar el proceso de descomposición y entender las fases de crecimiento de las bacterias para predecir el comportamiento en el proceso de lodos activados. En este sentido, “Las bacterias aerobias ejercen un proceso de respiración, este proceso se ejecuta con el propósito de obtener energía necesaria para la síntesis de tejido celular nuevo. En ausencia de materia orgánica, el tejido celular será respirado endógenamente y convertido en productos gaseosos, se puede notar en la Figura 5 metabolismo microbiano en el proceso de respiración aerobio.” (Bejarano Novoa & Escobar Carvajal, 2015).

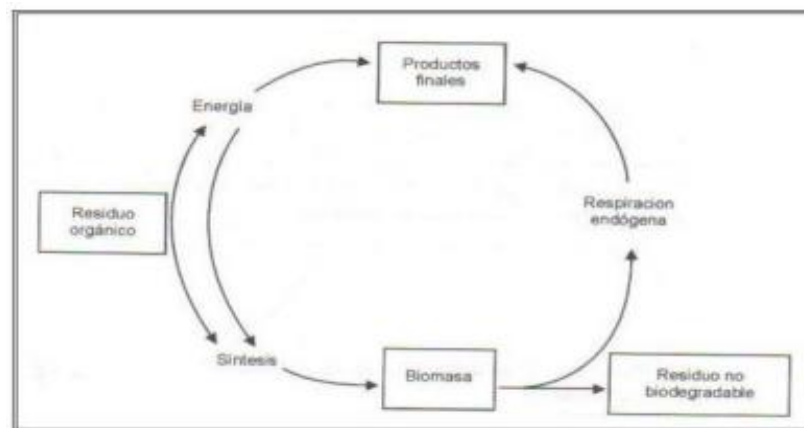


Figura 5. Metabolismo microbiano en el proceso de respiración aerobia. Adaptado de “eficiencia del uso de microorganismos para el tratamiento de aguas residuales domésticas en una planta de tratamiento de agua residual”, por Bejarano ME, Escobar M, 2015.

Normalmente los microorganismos consumen sustrato y llevan a cabo las reacciones de oxidación- reducción, el crecimiento de estos ocurre por la producción de células adicionales, de la mano, estas reacciones suceden 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 biodegradada. Las bacterias se reproducen por fisión binaria, en la cual la célula original se convierte en dos nuevos microorganismos, el tiempo requerido puede durar de varios días hasta menos de 20 minutos, en los tratamientos biológicos, esta división bacteriana no es indefinida, este va a depender de la disponibilidad de sustrato, nutrientes y de diversos factores ambientales. (Metcalf & Eddy, 2014).

Esta respiración y reproducción bacteriana, como se dijo anteriormente va a depender del sustrato presente en el sistema de tratamiento, en conjunto la determina la curva de crecimiento bacteriana, la cual abarca unas fases en donde se denota el comportamiento de estas bacterias. En la figura 6 se ilustra las diferentes fases de crecimiento de una población bacteriana, se divide en cuatro denominadas fase de latencia, fase exponencial o logarítmica, fase estacionaria y fase de muerte. La fase de latencia representa a un periodo de transición para los microorganismos cuando son transferidos a una nueva condición, la fase exponencial o logarítmica, es el periodo en el cual el cultivo de microorganismos crece exponencialmente, es decir se duplica, las condiciones ambientales afectan a la velocidad del cultivo, la fase estacionaria es aquella que se denota las limitaciones de crecimiento, ya sea por agotamiento de nutrientes, sustrato, por acumulación de componente tóxicos, por la disponibilidad del espacio o por combinación de las causas anteriores y por último la fase de muerte es cuando ocurre la disminución progresiva del número de células viables. (Lopez & Bejarano, 2013). Véase el comportamiento de estas fases a lo largo del tiempo en la figura 6 curva de crecimiento bacteriano.

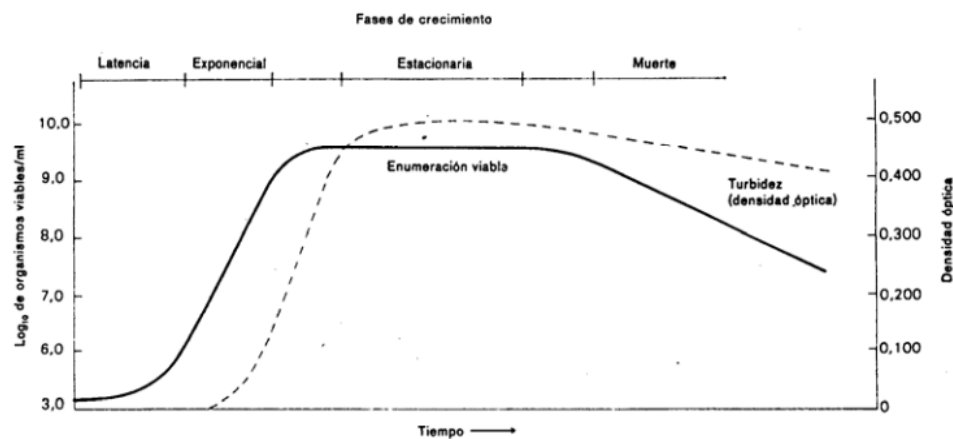


Figura 6. Curva de crecimiento bacteriano. Adaptado de “Variabilidad de la inactivación microbiana y de la fase de latencia de los microorganismos supervivientes a un proceso de acidificación” por Rodríguez MR, 2016.

El rol de los microorganismos en el tratamiento de aguas tanto domésticas e industriales, son (1) transformar las partículas y constituyentes biodegradable en productos finales aceptables, (2) captura e incorporar solidos coloidales suspendidos e inestables en floc biológico, (3) transformar o remover nutrientes, como el nitrógeno y fósforo, (4) y en algunos casos, remover todo rastro de componentes y constituyentes orgánicos. Para aguas industriales, es necesario tratamiento primarios debido a la incidencia de constituyentes y componentes tóxicos que afectan el proceso de remoción de componentes orgánicos e inorgánicos de los microorganismos. (Metcalf & Eddy, 2014)

Una planta de lodos activados consta de un sistema que garantiza una mezcla completa, de recirculación y eliminación. El uso de aireadores brinda el estado de mezcla completa y las necesidades de oxígeno para la multiplicación de los microorganismos, después la mezcla de células nuevas y antiguas se conducen a un tanque de sedimentación donde los lodos pueden ser recirculados al tanque como simiente y el exceso, se purga del sistema (López et al 2016).

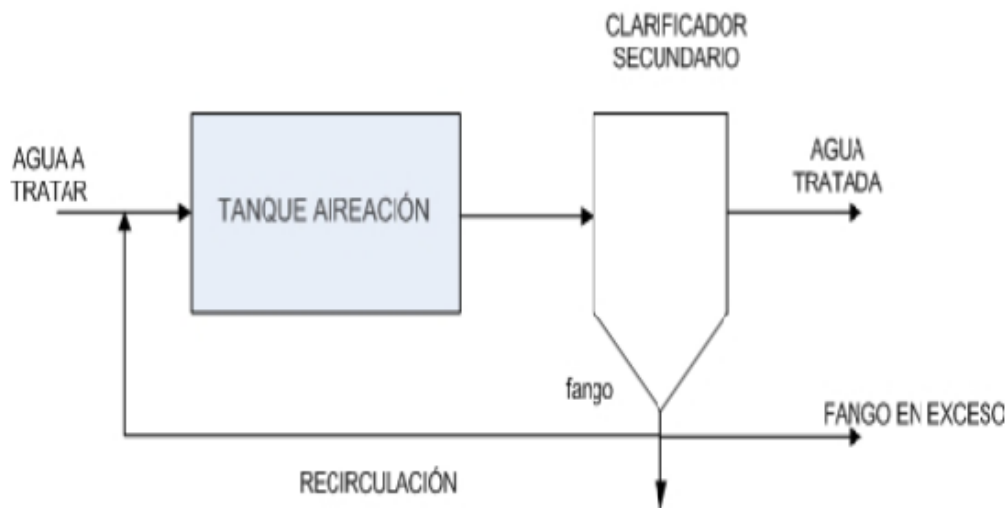


Figura 7. Esquema del proceso convencional de lodos activados. Adaptado de “Diseño de un reactor biológico de fangos activos” por Jiménez N, 2014.

El tiempo promedio de retención celular se define con base “en el volumen del tanque de aireación, es interpretada como una medida del tiempo promedio de residencia de los organismos

en el sistema” (Romero, 2000). La ecuación más recomendada para el cálculo del tiempo de retención celular es la siguiente:

$$\Theta_c = \frac{V X}{Q_w X_r + Q_e X_e} \quad \text{Ecuación (1) (Romero, pp 445-448. 2000)}$$

Donde, Θ_c = Tiempo promedio de retención celular con base en el volumen del tanque de aireación, d

V= Volumen del tanque de aireación, m³

X= concentración de SSV en el tanque de aireación, SSVLM mg/l

Q_w = caudal de lodo dispuesto, m³/d

X_r = concentración de SSV en el lodo dispuesto, mg/l

Q_e= caudal efluente tratado, m³/d

X_e= concentración de SSV en el efluente tratado, mg/l

La eficiencia del tratamiento de lodos activados con recirculación de lodos se mide mediante la siguiente ecuación:

$$E = \frac{S_o - S}{S_o} \quad \text{Ecuación (2) (Romero, pp 445-448. 2000)}$$

Donde, E: Eficiencia.

S: DBO del efluente.

S_o: DBO del afluente.

Las condiciones ambientales de los lodos activados nos determinan que la operatividad va a depender de diferentes factores como el pH, la temperatura y la solubilidad del oxígeno. La ciudad de Villavicencio cuenta con unas temperaturas promedio entre 20 y 30°C (IDEAM, 2017), el pH óptimo debe ser entre 7-8,5 (Bitton, 2013) y el oxígeno disuelto debe ser óptimo para su funcionalidad (Romero, 2000), la siguiente tabla nos muestra la relación de la temperatura respecto a la concentración de Oxígeno Disuelto en el agua:

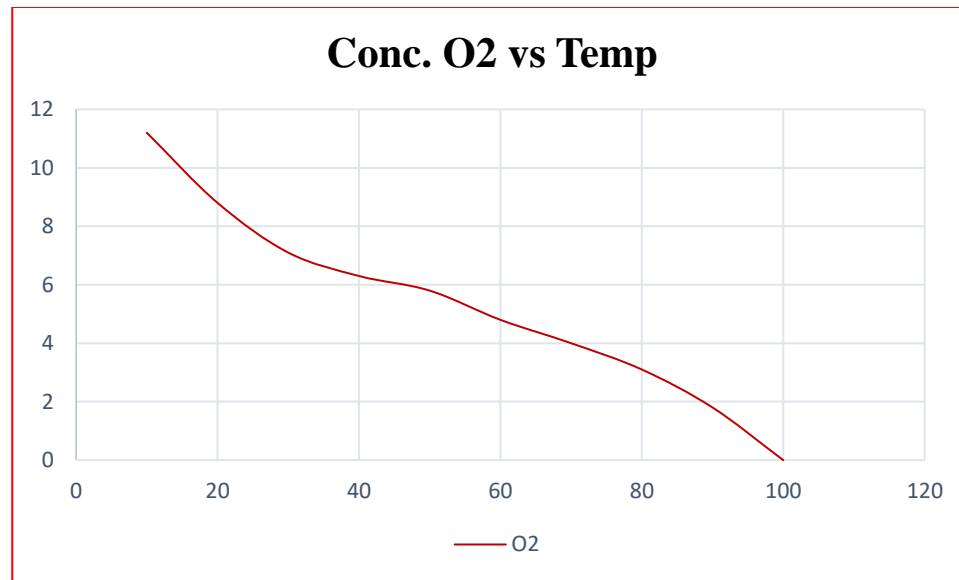


Figura 8. Curva del comportamiento del Oxígeno Disuelto respecto a la variación de la Temperatura. Adaptado de (Engineering, 2004), donde se muestra la relación que tiene la temperatura respecto a la solubilidad del oxígeno en mg/l a una presión atmosférica constante en el agua, evidenciando que a mayor temperatura se genera una menor solubilidad del oxígeno.

La aireación en el sistema de lodos activados brinda una transferencia de oxígeno y condiciones de mezcla, se requieren unas concentraciones de oxígeno disuelto generalmente de 0,2-2,0 mg/L que aseguren un suministro apropiado para obtener la correcta remoción de los microorganismos. El suministro adecuado de oxígeno tiene que brindar una demanda eficiente, para que los productos en descomposición sean estables, de lo contrario, se presentan condiciones turbias, asentamiento de sólidos dentro del tanque e inhibición de la floculación dificultando el tratamiento de las bacterias (López et al 2016).

Un principio fundamental que estima la concentración de los gases en el agua, se calcula mediante la ley parcial de los gases o ley de Henry:

$$P = HX \quad \text{Ecuación (3) (Romero, pp 358-363. 2005)}$$

$$X = \frac{ng}{ng+nw} \quad \text{Ecuación (4) (Romero, pp 358-363. 2005)}$$

Donde P= presión parcial del gas (atm).

H= constante de la ley de Henry para el gas a la temperatura de cálculo.

X= fracción molar de equilibrio del gas disuelto.

n_g = moles de gas.

n_w = moles de agua.

La relación entre la solubilidad del oxígeno respecto a la temperatura (véase Figura 5) nos determina la solubilidad que tiene el oxígeno respecto a la temperatura a presión atmosférica. De acuerdo con la ley de Henry (véase Ecuación 3), se interpreta que la concentración de un gas a una temperatura constante va a ser proporcional a la presión atmosférica, por lo tanto, al aumentar la presión en el sistema de lodos activados, la solubilidad del gas es mayor.

7.2 Marco Legal.

En el transcurso de los últimos años se ha notado un avance en la normativa ambiental en términos de vertimiento a cuerpos de aguas superficiales en Colombia, el **Decreto 1594 de 1984** con vigencia hasta el 2015, establecía en sus Artículos 74 y 75 del presente, que toda actividad que emitiera desechos domésticos e industriales, debía cumplir un porcentaje en la remoción de carga contaminante proveniente de los efluentes vertidos a cuerpos superficiales de agua (Gobierno Nacional de Colombia 1984). Esta norma no estimaba el daño a los cuerpos de aguas superficiales, ya que las exigencias se medían en la eficiencia del proceso y no controlaban la carga contaminante emitida.

Con la actualización de la norma ambiental en vertimientos, se estableció la **Resolución 0631 del 2015**, en la cual se establecen los parámetros y los valores máximos permisibles en vertimientos puntuales de aguas superficiales y al alcantarillado público, este clasifica las actividades industriales, comercial o servicios y fija parámetros para cada una de ellas (Ministerio Ambiente y Desarrollo Sostenible 2013). Al pasar del porcentaje de remoción de carga contaminante a valores fijos permisibles y de mediciones de kg/día a mg/l, se evalúa el impacto que se está descargando al cuerpo de agua y por consiguiente genera una mayor exigencia en el control.

La **NTC ISO 5667-1** es una norma técnica colombiana que se basa en técnicas de muestreo, preservación y manejo de muestras, “establece los principios generales de muestreo para el control

de la calidad, la caracterización de la calidad e identificación de las fuentes de contaminación de agua, incluyendo los sedimentos y lodos” (ICONTEC 1995). La efectividad de la calidad de las muestras, va a depender de la correcta aplicación de estas técnicas de muestreo establecida en la norma.

El reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico, **RAS 2000- Sección II**, Título E-Tratamiento de aguas residuales, E-4.6, nos habla sobre los tratamientos secundarios y el Título E.4.6.2 hace alusión a los lodos activados; generalidades, requisitos, consideraciones de diseño, requerimientos y demás disposiciones (Dirección de agua potable y saneamiento básico 2000). **La Resolución 0330 de 2017**, actualiza el RAS y nos establece los parámetros actualizados de los sistemas de lodos activados. La siguiente tabla nos muestra los parámetros de diseño para el proceso de lodos activados:

Tabla 1. *Parámetros empíricos de diseño para el proceso de lodos activados.*

Tipo de proceso	Carga orgánica kgDBO/KG SSVLM/d (f/m)	Carga Volumétrica kgDBO/m ³ /d (LV)	Tiempo de retención (horas)(td)	Edad de lodos (días)	SSV mg/L (XT)
Convencional	0,2 - 0,4	0,3 – 0,7	4 - 8	3 - 15	1000 - 3000
Completamente mezclado	0,2 – 0,6	0,3 – 1,6	3 - 5	3 - 15	1500 - 4000
Aireación escalonada	0,2 - 0,4	0,7 – 1,0	3 - 5	3 - 15	1500 - 4000
Alta tasa	1,5 - 2	1,2 – 2,4	1,5 - 3	0,5 - 2	200 - 1000
Estabilización por contacto estabilizado	0,2 - 0,6 N/A	1,0-1,3	0,5 – 1,0 2 - 4	5 – 15 N/A	1000 –3000 6000-10000
Aireación extendida	0,04 – 0,1	0,1 – 0,3	20 - 30	20 - 40	2000-5000
Oxígeno puro	0,5 – 1,0	1,3 - 3,2	1 - 3	1 - 4	2000-5000
Zanjón de oxidación	0,04 – 0,10	0,1 – 0,3	15 - 30	15 - 30	3000-5000
Reactor SBR	0,04 – 0,10	0,1 – 0,3	15 - 40	10 - 30	2000-5000

Nota: Adaptado de Resolución 0330 Sección 4: Tratamientos centralizados - Artículo 193: Requisitos mínimos de diseño para procesos de lodos activados - Tabla 36 parámetros de lodos activados. Copyright por J. Cuadrado, & C. Cuartas, 2018.

8 Metodología

8.1 Área de estudio.

El reactor de lodos activados a escala piloto, se ubicó dentro de las instalaciones de la Universidad Santo Tomas, sede Villavicencio, Campus Aguas Claras.

8.2 Temporalidad del estudio.

El montaje del reactor operado bajo presión, se realizó en un periodo aproximado de 7 meses desde enero-agosto del año 2018, hasta lograr obtener las presiones de estudio. Posteriormente los muestreos fisicoquímicos, se ejecutaron en un periodo de 2 meses; iniciando a mediados de septiembre y finalizando a mediados de noviembre, tiempo en el cual se evaluó la eficiencia de remoción de materia orgánica en el reactor de lodos activados, con base en diferentes presiones aplicadas al sistema.

Para llevar a cabo el desarrollo de la investigación, se ejecutaron las siguientes fases:

8.3 Fase 1: modelo experimental y variables monitoreadas.

Las variables independientes en este caso, se indican a continuación, y también su relevancia: **La presión**, puesto que, es la variable que se controló para obtener unos resultados. Debido a que, al aumentar la presión en el sistema de lodos activados, se espera que la solubilidad del gas sea mayor, en este caso el oxígeno se va a homogenizar en la mezcla y por ende las bacterias van a brindar una mayor eficiencia en la depuración de aguas residuales. Asimismo, se midió el **tiempo de retención hidráulico (TRH)**, determinado por la siguiente ecuación: $TRH = Vr/Q$, (donde Vr = Volumen del reactor y Q = caudal) (Ecuación 5) (Riera, 2013), puesto que, es el tiempo que

las bacterias están en contacto con el agua residual, es un factor importante de diseño y operación. Se debe tener el tiempo necesario para que las bacterias asimilen la materia orgánica que contiene el agua residual. Si no se tiene un tiempo de retención adecuado no se logrará remover toda la materia orgánica y la DBO del efluente será alta (Arguedas, 2013). En este sentido, se realizará también la medición del Caudal, puesto que, tiene una relación con TRH, por lo tanto, estará sujeto al volumen del reactor (160 L/s) y a unos tiempos de retención de 6, 4 y 3 horas respectivamente.

Por las consideraciones anteriores, se realizó un método experimental del diseño factorial. Puede considerarse como un proceso en el cual ingresan diversas variables que interactúan para producir un resultado. “Las variables que ingresan al proceso se denominan variables de entrada, y el resultado, variable de salida. El nivel de la variable de salida depende de los niveles y variaciones de las variables de entrada. La búsqueda de combinaciones óptimas de las variables de entrada da lugar al diseño experimental, que es una prueba (o un conjunto de pruebas) durante la cual se realizan cambios sistemáticos y controlados a las variables de entrada para medir el efecto sobre la variable de salida. El diseño experimental utiliza técnicas como la regresión múltiple, la respuesta superficial y varias extensiones del análisis de varianza” (Yacuzzi et al, 2016)

De esta manera, se usó el método experimental denominado **diseño factorial 3x3**, mediante el cual se realizaron pruebas con variaciones de la presión y los tiempos de retención hidráulicos (asociados a diferentes caudales), cabe resaltar que, la presión máxima que se trabajó fue de 8 psi, para no alterar la estructura de las bacterias, asimismo el TRH máximo será de 3 horas, de esta manera, se forzó el reactor de lodos, para obtener un mayor contacto de las bacterias con el agua residual; es crucial mencionar que las constantes fueron: la inyección de aire suministrada al sistema y su carga contaminante, como se indica en la tabla a continuación:

Tabla 2. Variables a medir y método de muestreo de diseño factorial 3x3.

MODELO EXPERIMENTAL DISEÑO FACTORIAL 3X3			
Presión	Tiempo de retención Hidráulico		
	T1 (6 horas)	T2 (4 horas)	T3 (3 horas)
P1 (3 psi)	P1-T1	P1-T2	P1-T3
P2 (5 psi)	P2-T1	P2-T2	P2-T3

Continuación tabla 2.

P3 (8 psi) P3-T1 P3-T2 P3-T3

Inyección de aire constante

Carga constante

Nota. Adaptado de Microsoft Office Excel 2016 por J. Cuadrado, & C. Cuartas 2018.

Consecuentemente, para cada prueba experimental y muestreo tomo un tiempo aproximado de 1 día, en el cual, se varió los niveles de presión con un tiempo de retención fijo, asimismo, en la variación del tiempo de retención se dejó una semana para la correcta adaptación de las bacterias, debido a que al cambiar el tiempo de retención cambiaban considerablemente los caudales en el sistema y es necesario que adapten correctamente, por lo tanto el tiempo otorgado para las pruebas experimentales y su correspondiente muestreo fue de 1 mes exactamente del 9 de octubre al 9 de noviembre.

8.4 Fase 2: realizar el montaje del reactor de lodos activados a escala piloto.

El agua residual de entrada con el cual se operó el biorreactor a escala piloto, fue agua residual sintética (ARS), con el fin de obtener parámetros constantes a la entrada al reactor (DQO, DBO, pH, Sólidos Totales), los cuales permiten una mayor facilidad de monitoreo en el estudio. Además, este sustrato propuesto contiene insumos económicos y de fácil obtención, a su vez, es de fácil preparación en laboratorio, evita el uso excesivo de ingredientes presentes en otros sustratos que, en ocasiones, de difícil o restringido acceso (Arguedas 2013). Por tal razón, con base en los referentes teóricos, se opta por utilizar ARS como sustrato de alimentación del reactor, como se muestra a continuación:

Tabla 3. *Características del agua residual sintética propuesta.*

PARÁMETRO	VALOR MEDIO (mg/L)
DQO	374
Sólidos disueltos totales	40
pH	7,2

Continuación tabla 3.

Nitrógeno Amoniacal (NH₃)	1,7
Nitritos (NO₂)	0
Nitratos (NO₃)	0
Fósforo libre (P)	5,3
Fosfatos (PO₄)	16,9
Pentóxido de fósforo (P₂O₅)	11,8

Nota. Adaptado de Preparación, composición y uso de agua residual sintética para alimentación de reactores prototipo y de laboratorio, por W. Lozano, I. Rodríguez. Copyright 2019 por J. Cuadrado, & C. Cuartas, 2018.

Tabla 4. *Compuestos para generar ARS.*

Compuesto	Cantidad (mg/L)
Leche en polvo	100
Gelatina sin sabor	35
Almidón	170
Sal común	7
Azúcar	28
Urea	3
Fosfato Bicálcico	40
Sulfato de Magnesio	2,5
Inóculo de microorganismos	70 ml/L
Jabón de tocador	3 gotas
Aceite de soya	15 gotas

Nota. Adaptado de Preparación, composición y uso de agua residual sintética para alimentación de reactores prototipo y de laboratorio, por W. Lozano, I. Rodríguez. Copyright 2019 por J. Cuadrado, & C. Cuartas, 2018.

El reactor de lodos activados propuesto está conformado por: un tanque de alimentación con una capacidad de 1000 L, el cual está conectado al Venturi que ejerce la succión de agua residual artificial con características constantes, dirigido hacia un tanque con lámina de acero de calibre 14 que tiene un volumen de 160 L (reactor de lodos). Esta succión de agua se realiza mediante el funcionamiento de una motobomba con capacidad de 1.2 HP, la cual ejerce una recirculación constante de agua, por medio de una salida del reactor y entrada al mismo, el cual mediante un flujo constante y la adaptación de dos Venturi conectados simultáneamente funcionan de manera eficiente para el sistema, uno para la alimentación del agua residual artificial mencionado anteriormente para alimentar el tanque, y el otro que efectúa una succión de aire y

agua de un sedimentador con el ánimo de recircular los lodos del sistema y mantener una población microbiana efectiva para el sistema (Véase Figura 9). Así mismo, se instaló un manómetro en la parte superior del biorreactor, con el objetivo de conocer y variar la presión de trabajo como se mencionó anteriormente para las correctas corridas operacionales. Se adecuó una entrada de aire al sistema de una manera alterna en la parte inferior del biorreactor, con esto se puede conectar un compresor que inyecte aire, esto con el objetivo de aumentar la presión del sistema cuando se requiera, para tener una mayor claridad véase la siguiente Figura:

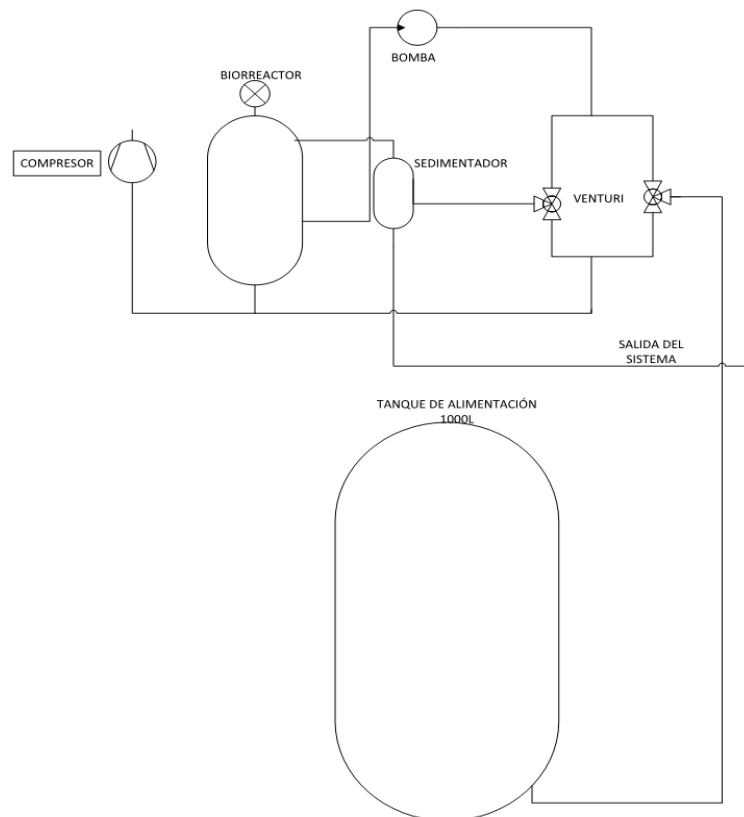


Figura 9. Diseño esquemático del reactor de lodos activados a escala piloto. Adaptado de Microsoft Power Point 2016 por J. Cuadrado, & C. Cuartas, 2018. El uso del compresor no fue necesario, puesto que, el reactor al ser completamente hermético generó presión dentro del sistema, y logró mantenerla para operar correctamente.

En este sentido, y con base en el Volumen del reactor y los tiempos de retenciones hidráulicas establecidas para operar, se determinaron los caudales de agua residual sintética para generar la alimentación del reactor de lodos, los cuales se muestran a continuación:

Tabla 5. *Determinación de caudales de operación del reactor.*

VOL (L)	TRH (h)	Q (m³ /día)
160	6	0,64
160	4	0,96
160	3	1,28

Nota. Adaptado de Microsoft Office Word 2016 por J. Cuadrado, & C. Cuartas, 2018.

8.5 Fase 3: corridas operacionales.

Inicialmente, el periodo de adaptación de la población microbiana (bacterias), fue de 2 semanas de adaptación, arranque y estabilización después de realizar el montaje del sistema de lodos activados (véase fase 2). Las corridas operacionales fueron operadas de la siguiente forma: a un tiempo de retención de 3 horas, se corrió con diferentes variaciones de presión 8, 5 y 3 psi, asimismo, se ejecutaron las próximas corridas con variaciones de tiempo de retención de 4 y 6 horas con sus respectivos cambios de presión mencionados anteriormente (8, 5 y 3 psi), ejerciendo una variación en los caudales del sistema, ya que están sujetos a los tiempos de retención de trabajo; indicando así, que son relacionadas las diferentes presiones con los tiempos de retención (véase Tabla 1), por tal razón, se realizaron las mediciones de los parámetros que se relacionan con la operación y funcionalidad del reactor, en este sentido, se indican a continuación las variables dependientes a tener en cuenta en la investigación:

Tabla 6. *Variables dependientes a tener en cuenta en la investigación.*

PARÁMETRO	FRECUENCIA	OBSERVACIONES	MÉTODO DE MEDICIÓN
pH	Una vez por día	Esta relacionado con los lodos activados, debido al comportamiento en el crecimiento y eficiencia de las bacterias, siendo un pH entre 7-8 óptimo para la remoción contaminante	Equipo multiparámetro
OD	Una vez por día	Estrictamente determina el oxígeno disponible que se disuelve en la mezcla de agua, el cual es captado por las bacterias como fuente funcional	Equipo multiparámetro

Continuación tabla 6.

T°	Una vez por día	La temperatura incide directamente en la concentración de OD en el agua	Equipo multiparámetro
DBO	Dos veces por corrida (realizar duplicado, o testigo)	En términos de eficiencia de remoción de carga contaminante, la DBO será el parámetro determinante para conocer la misma.	Inoculación de materia orgánica (DBO5)
DQO	Dos veces por corrida (realizar duplicado, o testigo)	Permite corroborar la eficiencia del proceso, así como los datos de la DBO.	Espectrofotometría
SSV	Dos veces por corrida (realizar duplicado, o testigo)	Técnicamente la población de microorganismos disponibles como biomasa en el reactor de lodos	Gravimetría

Nota. Adaptado de Microsoft Office Word 2016 por J. Cuadrado, & C. Cuartas, 2018.

8.6 Fase 4: análisis de resultados.

Normalmente para el análisis estadístico de un diseño experimental que involucran dos factores con 3 niveles, se utiliza un análisis de la varianza, el cual plantea un modelo matemático y una hipótesis de interés. Un diseño experimental abarca las interacciones entre sus niveles, es decir, se determinan los factores y su combinación entre ellos, en este caso, el diseño experimental de bloques al azar, plantea el siguiente modelo matemático:

$$Y_{ij} = \mu + T_i + \beta_j + \epsilon_{ij} \text{ (Gutierrez \& De la Vara, 2008) (Ecuación 4)}$$

Y_{ij} : Respuesta

μ : Media general

T_i : efecto de tratamiento

β_j : efecto de bloque

ϵ_{ij} : error.

Este modelo matemático dependerá del número de factores que contengan el diseño experimental, de sus interacciones y se deben estudiar conjuntamente, ya que, si se hace por separado, el resultado puede variar y es más difícil describir su comportamiento o encontrar el proceso más óptimo (Gutierrez & De la Vara 2008).

El ANOVA (técnica de análisis de una varianza), se utilizan para analizar datos de diseños experimentales, el cual permite construir modelos estadísticos para el análisis de estas variables experimentales, los modelos que permite construir el ANOVA, se pueden establecer mediante la siguiente forma:

$$(\text{Valor Observado}) = \Sigma (\text{efectos atribuibles}) + \Sigma \text{efectos no atribuibles o residuales}.$$

(Gutierrez & De la Vara 2008) (Ecuación 5)

Mediante una tabla ANOVA, se puede determinar las diferentes interacciones que se presentan cuando se ejerce un aumento en la presión en el reactor de lodos activados y cuando se disminuye el tiempo de retención hidráulico, con estas interacciones se determina la variación de resultados entre cada variable y se infiere a determinar cuál es la combinación más significativa para que se ejerza una mayor eficiencia en el proceso. El R^2 ajustado, es una herramienta necesaria para estimar el ajuste de regresión lineal, es decir, permite ajustar que variable mejora o no el modelo matemático.

El software que se va a utilizar es el IBM SPSS, este es un software estadístico que abarca todas las etapas del proceso analítico y provee funciones para el acceso, gestión, preparación y análisis de datos. Este incluye estadísticas descriptivas como la tabulación, frecuencia de cruces, estadísticas de dos variables, pruebas T, ANOVA y de correlación. Este software es relevante para el análisis de datos del estudio ya que involucra tablas ANOVA y otras herramientas estadísticas que abarcan dentro de su funcionalidad importante para el desarrollo del proyecto. (IBM SPSS Statistics 2017).

8.7 Fase 5: recomendaciones y consideraciones de diseño.

8.7.1 Comparaciones.

Mediante la comparación entre las 9 pruebas experimentales, se determinó cual es la presión óptima y tiempo de retención hidráulico óptimo para lograr una mayor remoción de carga contaminante, asimismo la concentración y disponibilidad de oxígeno disuelto en la mezcla de agua a determinadas presiones, de modo que, permitan evaluar la eficiencia de remoción del reactor de lodos operado bajo presión, con respecto a los referentes teóricos en cuanto a reactores de lodos convencionales, con el fin de proponer consideraciones de diseño tendientes a la optimización de la efectividad del tratamiento biológico. La cual será posible hallar mediante la ecuación de eficiencia (véase Ecuación 2).

8.7.2 Consideraciones de diseño.

Finalmente, teniendo en cuenta las diferentes presiones de trabajo establecidas, y encaminado para lograr la optimización de la eficiencia de remoción de carga contaminante en reactores de lodos activados, se recomendó, con base en la investigación: un reajuste en las diferentes condiciones operacionales que se diseñaron mediante la variación de la presión, con el objetivo de tener unas mayores porcentajes de remoción con un menor tiempo de contacto con las bacterias, con un menor espacio e inversión en el sistema por los equipos robustos de aireación.

9. Resultados

9.1 Evaluación de la eficiencia del biorreactor de lodos activados operado bajo presión.

Los porcentajes de remoción generados en las diferentes pruebas experimentales (corridas operacionales), se determinaron por medio de la eficiencia de remoción de materia orgánica a partir de los parámetros fisicoquímicos involucrados en las mediciones, presentados en la memoria de cálculo. En este sentido, se exponen los resultados obtenidos a continuación:

9.1.1 Potencial de Hidrógeno (pH).

En la Figura 10 se observa una oscilación del potencial de hidrógeno entre 6,5 y 7,8 para las diferentes presiones y tiempos de retención de operación para el reactor de lodos activados. Cabe resaltar, que el crecimiento óptimo de bacterias ocurre generalmente a pH entre 6,5 y 7,5 y la mayoría no toleran valores de pH mayor de 9,5 o inferior a 4,0 (Bejarano, 2015). Se infirió que el medio de desarrollo bacteriano, se mantuvo estable dentro del rango esperado durante la operación del reactor, debido al control en las recargas e insumos de agua residual sintética, como fuente de alimentación del afluente el cual tiene teóricamente un pH de 7,2 (véase Tabla 3). No obstante, las pequeñas variaciones que se presentan a la salida del reactor, siendo mayor que en la entrada, están condicionados a que la variación del pH en los reactores biológicos se debe a una liberación de dióxido de carbono CO_2 , el cual es eliminado en la fase de aireación. La eliminación del gas ácido (CO_2) disminuye la concentración del ion hidronio $[\text{H}^+]$ y en consecuencia aumenta el pH a la salida del reactor. (Carrasquero, 2018)

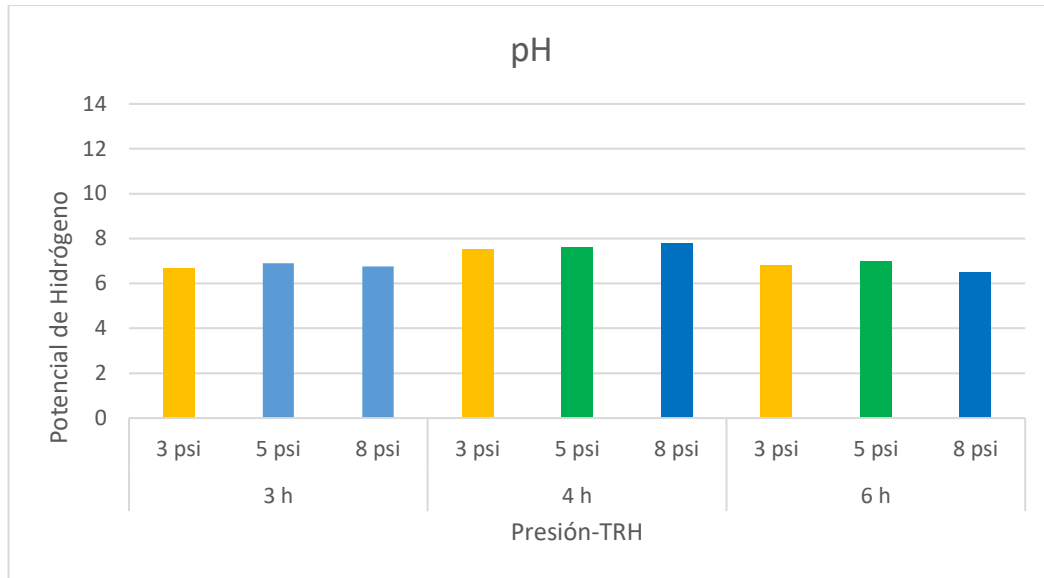


Figura 10. Resultados de pH en relación con el tiempo de retención hidráulico y presión en el biorreactor. Adaptado de Microsoft Excel 2016 por J. Cuadrado, & C. Cuartas, 2018.

9.1.2 Temperatura.

En la Figura 11 se muestra que el valor mínimo de temperatura fue de 26,2°C y el mayor fue de 31,1°C, a su vez, la temperatura media del proceso fue de 28,65°C, según (Romero, 2000) el rango adecuado de la temperatura para un correcto funcionamiento de biorreactores aerobios debe estar entre 20°C y 30°C, así se dedujo que la operatividad del biorreactor fue eficiente en la mayoría de sus muestras.

A pesar de lo anterior, en algunos muestreos, debido a la incidencia solar que presentaba el biorreactor, específicamente a las 12 pm, la temperatura fue mayor a 30°C la cual influyó en la solubilidad de los gases según la Ley de Henry, la cual enuncia que a una temperatura constante, la cantidad de gas disuelto en un líquido es directamente proporcional a la presión parcial que ejerce ese gas sobre el líquido (Santander, 2009). Cabe recalcar que, inicialmente se contempló una Temperatura constante teóricamente, como lo plantea la Ley de Henry, sin embargo, en el desarrollo de las corridas operacionales, la variación de la Temperatura especialmente entre las 12 pm a 3 pm, ejerce una modificación en la presión parcial del gas, incidiendo en la solubilidad del mismo, por tanto, en la capacidad efectiva de remoción del sistema.

Con respecto a lo antes mencionado, “al aumentar la temperatura, siempre se favorece el estado más desordenado (molecularmente). Esto significa que la solubilidad de los gases debe disminuir al aumentar la temperatura, ya que el gas es menos denso que el líquido” (Dietz, 1973), incidiendo de esta manera en variaciones de diferentes parámetros del biorreactor, tales como la concentración del OD en el licor de mezcla, y finalmente en la eficiencia de remoción.

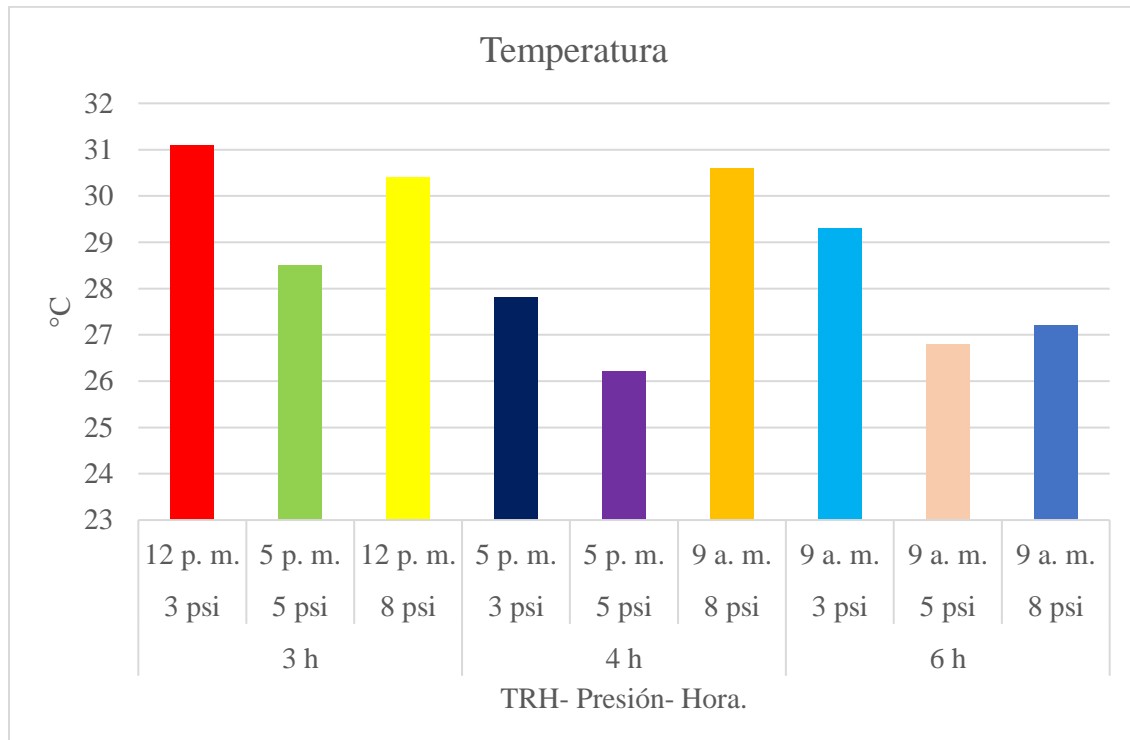


Figura 11. Resultados de la temperatura en relación con el tiempo de retención hidráulico, la presión y hora de muestreo. Adaptado de Microsoft Excel 2016 por J. Cuadrado, & C. Cuartas, 2018.

9.1.3 Oxígeno Disuelto.

El valor de oxígeno disuelto promedio fue de 3,32 mg/L en el efluente del reactor, durante todo el desarrollo de las corridas, se obtuvo un comportamiento dentro de los rangos efectivos para soportar una adecuada actividad bacteriana, ya que los procesos de tratamientos biológicos aerobios, como el de lodos activados, requieren de concentraciones de determinadas cantidades de oxígeno disuelto, (generalmente de 0,2 a 2,0mg/L) con el fin de asegurar un suministro adecuado

de oxígeno para el consumo de los microorganismos responsables del tratamiento (Cueto, 2012). “En síntesis, el contacto del agua residual con una cantidad óptima de floc biológico activo y en presencia adecuada de oxígeno, durante un periodo de tiempo prudente, seguido de una separación eficiente de los organismos y del líquido purificado, son los prerrequisitos del proceso” (Gonzales, 2016).

Es notorio que los datos de mayor relevancia se registraron en los tiempos de retención 4 y 6 horas, con presiones de 5 y 8 psi respectivamente, teniendo un comportamiento por encima de los valores mínimos requeridos para la operatividad del reactor, asimismo, se apreció que la más baja concentración de oxígeno disuelto en el tiempo de retención de 3h. Estas bajas concentraciones que presentó el biorreactor se relacionaron directamente con el aumento de la temperatura dentro del mismo, siendo mayor a 30°C, ocasionado por la incidencia solar presentada por la hora en que se tomó el muestreo *in situ*, la cual fue a las 12 pm. Asimismo, se afectó la operatividad del biorreactor por las bajas concentraciones del parámetro OD, por consiguiente, se limitó la degradación de materia orgánica de las bacterias presentes en el biorreactor.

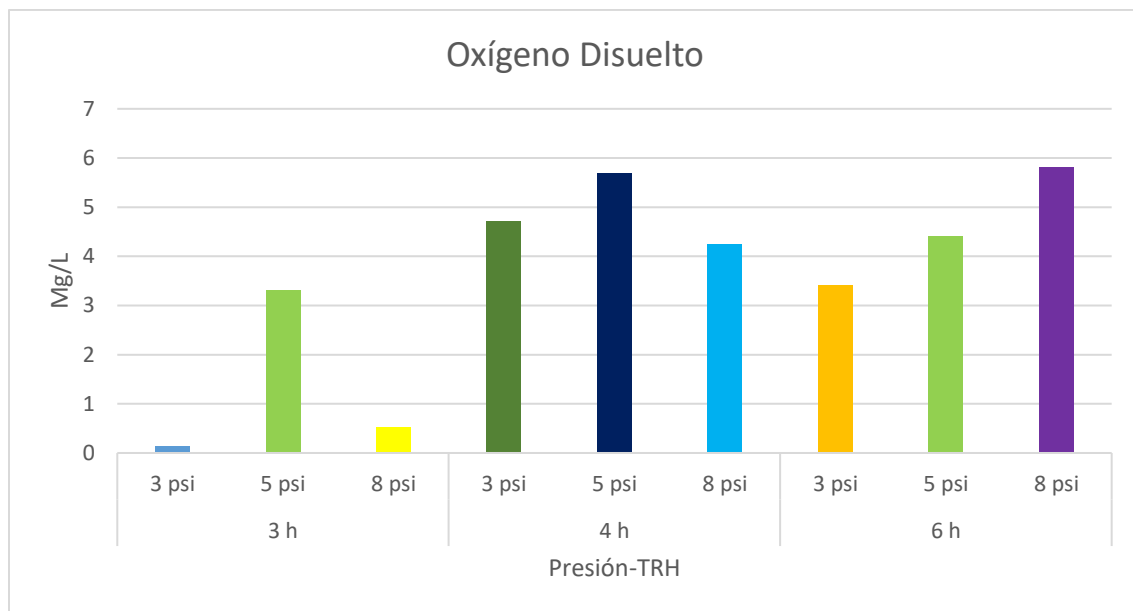


Figura 12. Resultados del Oxígeno Disuelto en relación con la presión en biorreactor y tiempo de retención hidráulico. Adaptado de Microsoft Excel 2016 por J. Cuadrado, & C. Cuartas.

9.1.4 Demanda Química de Oxígeno.

En los resultados de la Figura 13 se reflejó una significativa variación en los datos de DQO en la entrada del reactor, respecto a los datos de salida del mismo, los valores de entrada oscilan entre 310-364 mg/L, de esta manera, teniendo una pequeña variación frente a las características teóricas del agua residual sintética propuesta (ver Tabla 3); y los de salida entre 12,15-166,08 mg/L.

Consecuentemente, los valores registrados más significativos se encontraron en el tiempo de retención de 4 horas, y a sus diferentes presiones de operatividad. Contrariamente, los resultados con menor relevancia se registraron en los tiempos de retención de 3 y 6 horas, y a una presión de 3 psi. Lo anterior indica que; a una mayor presión, se consiguen valores más bajos a la salida del reactor, debido a la presión parcial del oxígeno gaseoso, afectado por la incidencia solar a las diferentes horas de muestreo, de esta manera, limitando la homogenización del oxígeno o permitiendo una mayor solubilidad en el licor de mezcla, por consiguiente, una mayor concentración de oxígeno disuelto disponible para las bacterias (Santander, 2009). No obstante, el tiempo de retención, no se comporta de forma exponencial, por lo cual los valores de DQO no presentan una gran variación según incrementan las horas de retención en el reactor, al oscilar en un rango pequeño entre las mismas. De hecho, los valores de la réplica permiten afirmar lo anteriormente mencionado, ya que tuvieron un comportamiento ligeramente similar, por consiguiente, generando mayor veracidad a la investigación.

En este contexto, es crucial mencionar que, la Demanda Química de Oxígeno según (Romero, 2000) “se usa para medir el oxígeno equivalente a la materia orgánica oxidable químicamente mediante un agente químico oxidante fuerte, por lo general dicromato de potasio, la DQO es útil como parámetro de concentración orgánica en aguas residuales”. Este parámetro nos indica junto con la DBO el sustrato que tiene el sistema a lo largo de las corridas operacionales, ya sean en las variables de entrada o salida del sistema, normalmente se espera que la DQO sea aproximadamente igual a la DBO, pero pueden existir varios factores que hacen que dicha afirmación no se cumpla. En este caso, la relación DBO/DQO fue de un 80/100, lo cual indica que el licor de mezcla es de mayor contenido materia orgánica, permitiendo una mayor biodegradabilidad por parte de las bacterias. No obstante, puede ocurrir que sustancias orgánicas fácilmente oxidables por el dicromato no puedan ser degradadas por las bacterias que están en el biorreactor debido a

diferentes compuestos presenten en aguas residuales industriales, tales como sulfuros, sulfitos, cloruros e hidrocarburos aromáticos, los cuales alteran el resultado debido a que estos interactúan con el dicromato de potasio generando contradicciones en estos análisis de laboratorio. (Romero, 2000).

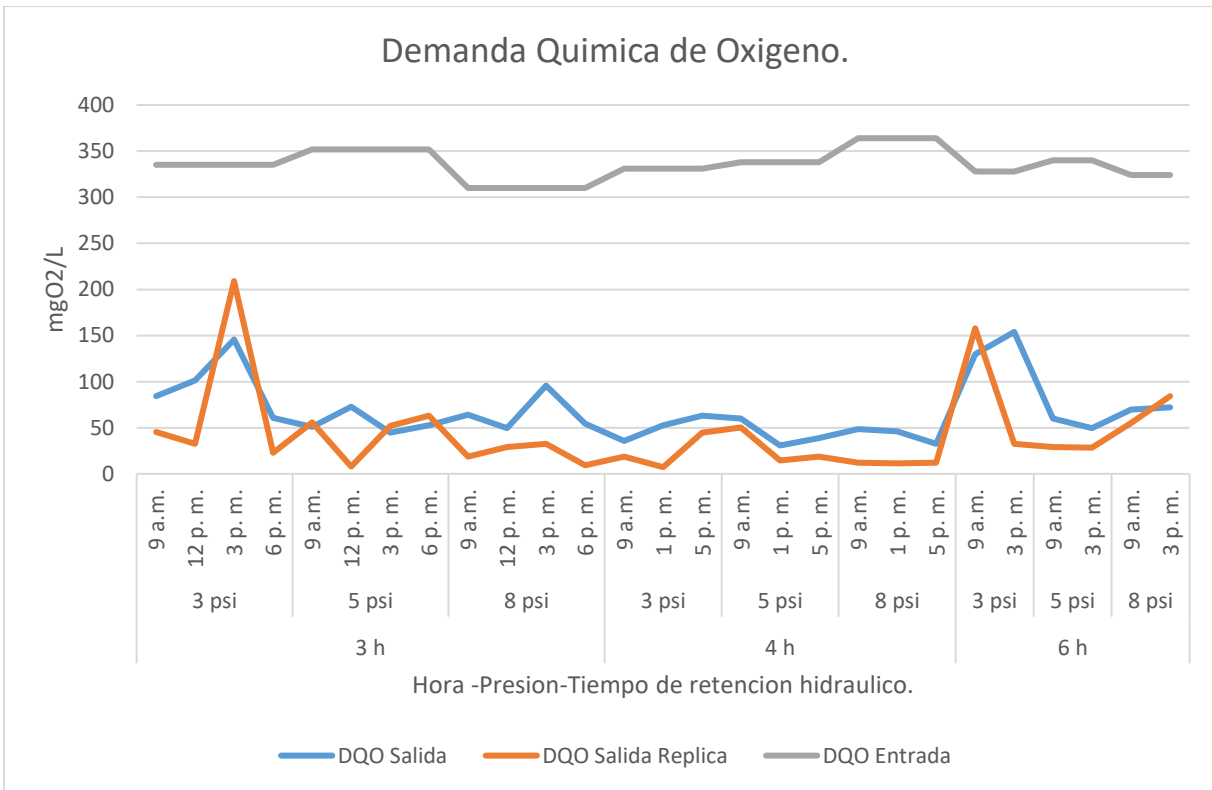


Figura 13. Valores de la Demanda Química de Oxígeno en la entrada y salida del biorreactor, respecto a los tiempos de retención hidráulico y diferentes presiones, medidos a determinadas horas. Adaptado de Microsoft Excel 2016 por J. Cuadrado, & C. Cuartas, 2018.

9.1.5 Demanda Biológica de Oxígeno.

En la Figura 14 el valor de DBO de entrada más alto al reactor fue de 300 mg/L, y el más bajo 250 mg/L; del mismo modo, en la salida del reactor fueron de 150 mg/L y 10 mg/L respectivamente. Las variaciones en los valores de entrada, se infieren a partir de una diferencia en la marca de la compra de los insumos que componen el ARS (véase Tabla 4), debido al agotamiento de las mismas. No obstante, los valores se encuentran dentro de rangos cercanos, lo cual no afecta el

experimento. Seguidamente, para una mayor veracidad de los datos, la corrida con la que evidenció un dato más alto en los valores de DBO de 110 mg/L en la réplica cuando la presión estaba en 3 psi y el tiempo de retención en 6 horas, así mismo la que menor valor obtuvo fue de 10 mg/L cuando la presión estaba en 8 y el tiempo de retención en 4 horas.

De lo antes planteado, es válido mencionar que, “la DBO es uno de los parámetros de mayor importancia en el estudio y caracterización de las aguas no potables. La determinación de DBO además de indicar la presencia y biodegradabilidad del material orgánico presente, es una forma de estimar la cantidad de oxígeno que se requiere para estabilizar el carbono orgánico y saber la rapidez con que este material va a ser metabolizado por las bacterias que normalmente se encuentran presentes en este tipo de agua” (Flores, 2013).

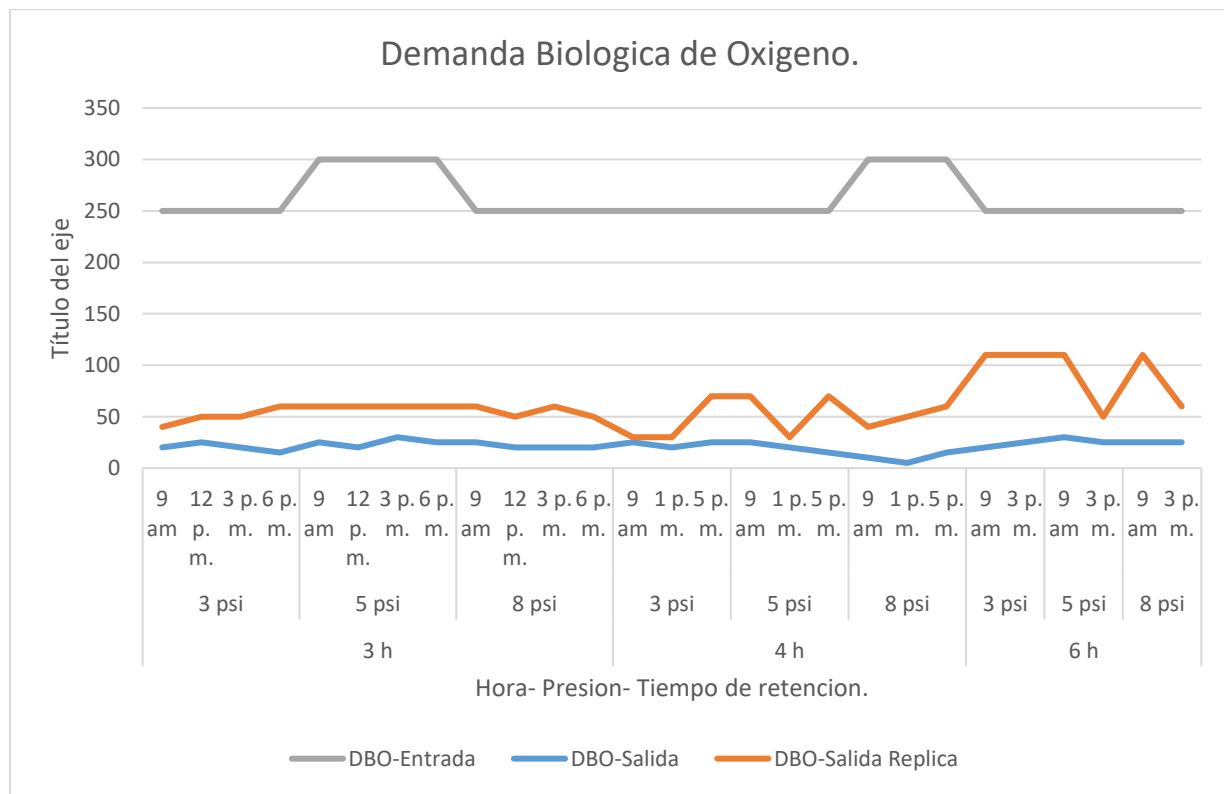


Figura 14. Valores de la Demanda Biológica de Oxígeno en la entrada y salida del biorreactor, respecto a los tiempos de retención hidráulico y diferentes presiones, medidos a determinadas horas. Adaptado de Microsoft Excel 2016 por J. Cuadrado, & C. Cuartas, 2018.

Recapitulando, las condiciones de operatividad óptimas para obtener valores más bajos en la salida del reactor son: el tiempo de retención de 4 horas, a una presión de 8 psi. Contrariamente, los resultados menos favorables se registran en el tiempo de retención 6 horas, con 3 psi de presión. Estas condiciones obedecen a que, “el TRH es uno de los parámetros más importantes en el sistema de lodos activados, determina el tiempo en que el agua residual es sometida al tratamiento y tiene influencia directa sobre el desempeño del sistema” (Rodríguez, 2014). En operatividad convencional, un TRH muy bajo no permite el contacto suficiente entre el agua residual y la masa de lodo, resultando en una deficiente adsorción (principal mecanismo de remoción en este tipo de sistemas) y un efluente de mala calidad; mientras que con TRH elevados disminuye la capacidad de adsorción y sedimentabilidad del lodo al inhibir la producción de sustancias poliméricas extracelulares (SPE) (Rodríguez, 2014). Sin embargo, al tener una nueva variable de estudio, como lo es la presión, el desempeño del sistema se ve sometido a modificaciones, debido a una mayor concentración del Oxígeno Disuelto en el reactor, permite operar con diferentes condiciones, y logrando obtener datos favorables en condiciones que en reactores de lodos convencionales comúnmente no son favorables.

9.1.6 Sólidos Suspendidos Volátiles.

En la Figura 15 se muestra un valor inicial de 1511 mg/L en la entrada del reactor, ya que en este punto se implementó la recarga de agua residual sintética para dar inicio a las pruebas experimentales y evaluar la operatividad del biorreactor. A medida que pasa el tiempo la actividad biológica de las bacterias remueve sustancias orgánicas biodegradables, coloidales o disueltas, mediante su conversión en gases que escapan a la atmósfera y en biomasa extraíble mediante sedimentación, (Metcalf & Eddy, 2014) por esta razón, los valores de los SSV disminuyen considerablemente para después mantenerse constante (véase Figura 15). Asimismo, los microorganismos crecieron en proporción constante y la biomasa activa del biorreactor operó de una manera eficiente.

En este contexto, esta variable de estudio resultó siendo una de las más importantes dentro de la investigación, puesto que los sólidos suspendidos volátiles son básicamente la fracción orgánica de los sólidos que está suspendida en el agua, es decir, la biomasa disponible en el reactor.

“Normalmente, estas pruebas junto con la de los sólidos suspendidos totales son usadas rutinariamente para evaluar la efectividad de procesos de tratamiento y en la necesidad de hacer una reutilización, esta es una de las dos pruebas (junto con la DBO) que es usada para evaluar el rendimiento de las plantas de tratamiento a efectos de un control regulatorio”. (Metcalf & Eddy, 2014).

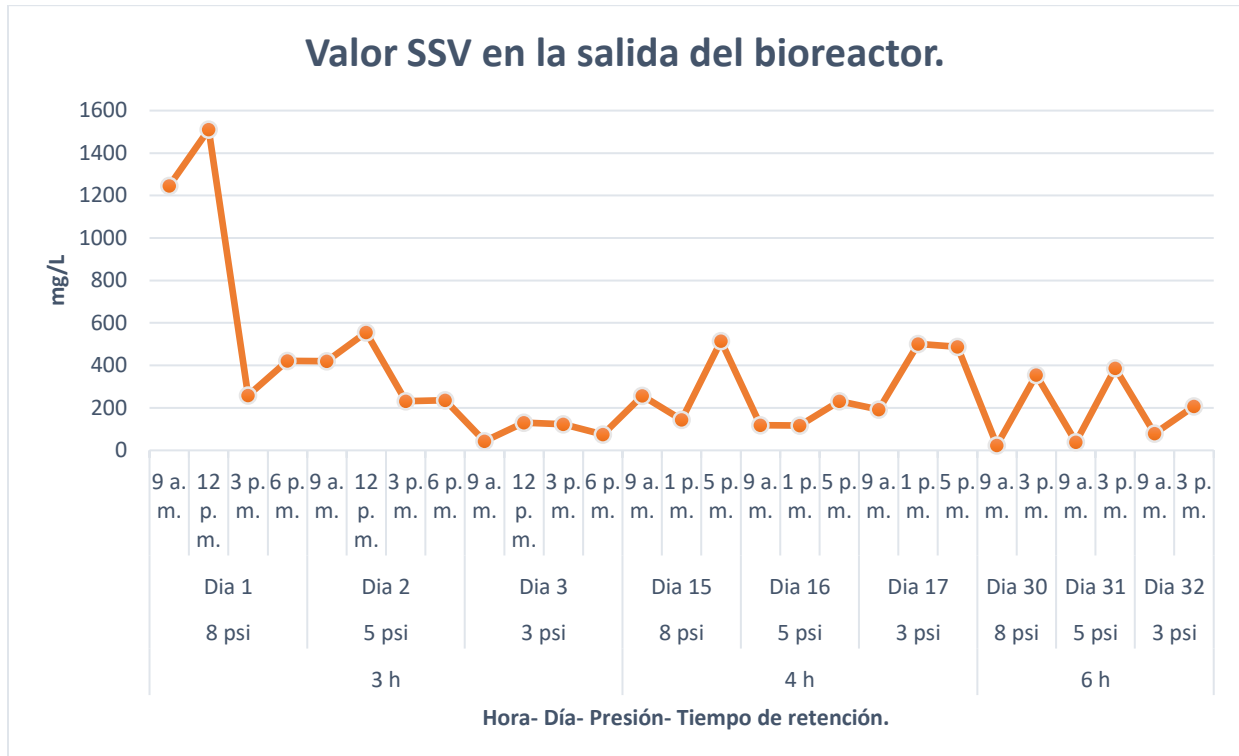


Figura 15. Resultados de Sólidos Suspendidos Volátiles en la salida del Biorreactor al sedimentador en el transcurso de las corridas operacionales. Adaptado de Microsoft Excel 2016 por J. Cuadrado, & C. Cuartas, 2018.

Reafirmando lo dicho anteriormente, en un proceso de lodos activados este crecimiento bacteriano produce un floc biológico y este es separado mediante la sedimentación y recirculación al tanque de aireación, esta recirculación del floc biológico concentrado hace que la concentración de microorganismos sea mayor que la inicial (Metcalf & Eddy, 2014). Mediante un sedimentador se separa y recircula los lodos del experimento, en la Figura 15 se presentan los resultados obtenidos en la salida del sedimentador, es decir los datos de la recirculación de lodos.

En la figura 15 se presentó valores con una concentración inicial alta y se presentó unos picos en los SSV a medida que fueron recirculados, este es el floc que produce el sedimentador por acción del crecimiento de las bacterias y la sedimentación del proceso; se presentó decaimientos y picos a la par, que concuerdan con la Figura 14, indicando que a medida que las bacterias consumen el sustrato se produce floc biológico, el cual es recirculado por el sedimentador, indicando un buen estado operacional y eficiencia del biorreactor al transcurso de las semanas de desarrollo del experimento.

Por último, “en un reactor convencional, los SSV tienen valores de concentración entre 1500 - 5000 mg/L” (Metcalf & Eddy, 2014) para operar en condiciones estables, por tanto, es crucial mencionar que el reactor de lodos bajo presión, operó eficientemente con bajas concentraciones de SSV, la cual se mantuvo en un rango entre 1040-2038 mg/L, aproximadamente de 47,35% respecto a las concentraciones en reactores convencionales.

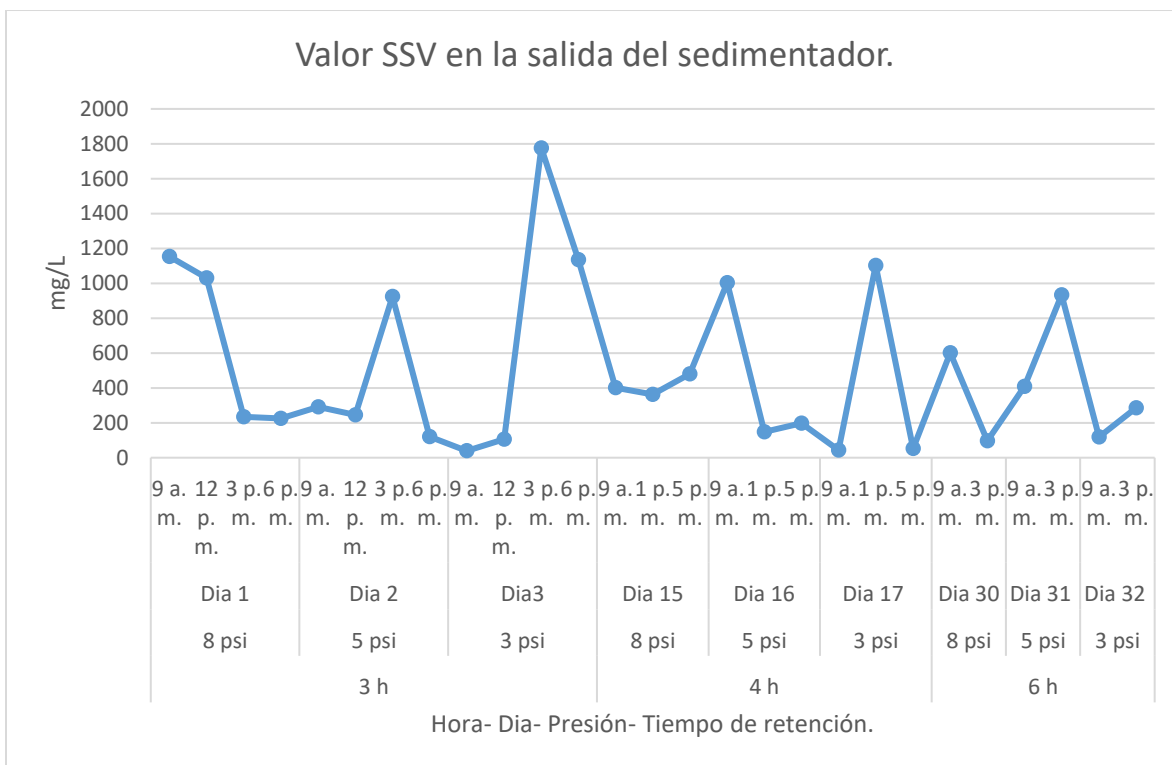


Figura 16. Resultados de Sólidos Suspendedos Volátiles en la salida del Biorreactor al sedimentador en el transcurso de las corridas operacionales. Adaptado de Microsoft Excel 2016 por J. Cuadrado, & C. Cuartas, 2018.

9.1.7 Eficiencia de remoción de materia orgánica.

En la Figura 17 se presentaron los porcentajes de remoción de materia orgánica mediante las 9 diferentes pruebas experimentales, las cuales estuvieron sometidas a variaciones de presión y tiempos de retención de operación, dando como resultado la eficiencia (ver Ecuación 2) del reactor durante el periodo de estudio. De manera coherente, se expresa una relación directa entre la eficiencia de remoción de DBO y DQO, ya que la composición del agua residual sintética de entrada, en su mayoría es orgánica debido a la composición en su mayoría de compuestos orgánicos en la mezcla (véase Tabla 3).

El valor promedio de remoción materia orgánica para DQO fue 79,77% se obtuvo una desviación estándar de un 10 % y para DBO 83,6% con una desviación estándar del 5% durante el desarrollo de las corridas, indicando así que la mayoría de los datos se encuentran en dentro de este rango, respecto a las medias de remoción. Asimismo, la mayor eficiencia de la investigación fue del 91,09% para DQO y 96,66% para DBO con una presión de 8, un tiempo de retención de 4 horas y un OD de 4,7 mg/L conjuntamente. Contrariamente, la menor eficiencia se dio en 53,07% con una presión de 3 un tiempo de retención de 6 horas y un OD de 3,4 mg/L y 76% con una presión de 8, un tiempo de retención de 6 horas y un OD 5,8 mg/L de respectivamente. Por lo tanto, las presiones de operación en el reactor (3, 5 y 8 psi), presentaron un comportamiento ascendente en el tiempo de estudio, demostrando que mientras mayor sea la presión, mayor es la eficiencia de remoción, como se observa en la figura 17. No obstante, a diferentes tiempos de retención hidráulica, la variación en la eficiencia es significativa, evidenciando una relación inversamente proporcional respecto a la remoción de materia orgánica.

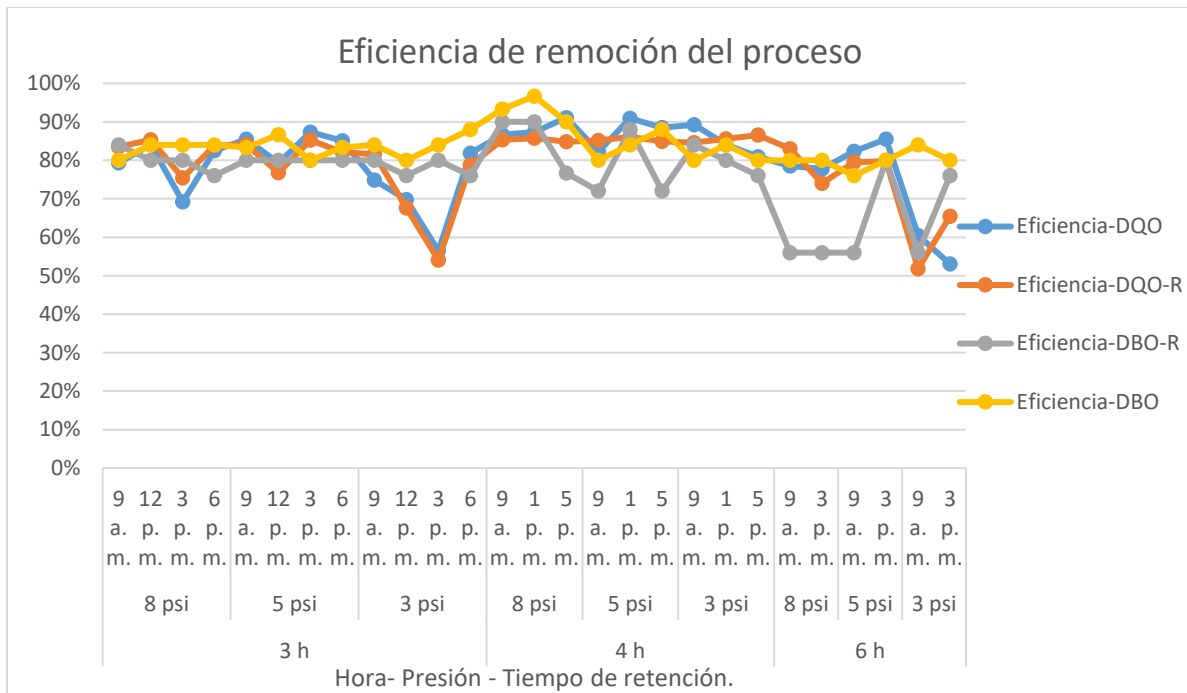


Figura 17. Eficiencia de remoción de materia orgánica (DBO-DQO) en el reactor en el transcurso de las corridas operacionales, respecto a los tiempos de retención hidráulico y diferentes presiones, medidos a determinadas horas. Adaptado de Microsoft Excel 2016 por J. Cuadrado, & C. Cuartas, 2018.

9.2 Análisis estadístico de las variables.

Se planteó un análisis de regresión, ya que, es una técnica estadística para modelar e investigar la relación entre dos o más variables, tiene que presentarse una relación inherente y se pretende para evaluar cómo se comporta la actividad microbiana mediante un aumento de la presión (Montgomery & Runger, 2012). El análisis de regresión en conjunto con dos variables, es utilizado para modelar en forma matemática el comportamiento de una variable de respuesta, es usado para propósitos de predicción, optimización o control. En este caso, mediante este análisis se analizó con dos variables independientes, las cuales son la presión y el tiempo de retención, como se comporta la eficiencia de remoción de materia orgánica, por otro lado, el resultado del R^2 que este más cercano a 1 representa un mejor ajuste del modelo de predicción, es decir que el mejor R^2 nos indica que variable de respuesta aumenta positivamente y predice cual es la mejor corrida experimental (Gutierrez & De la Vara, 2008).

De esta manera, el análisis de varianza permite determinar cuál es la variabilidad entre las diferentes interacciones del proceso (Garrido, 2008), por ende se evaluó la interacción entre la presión y la eficiencia del sistema, el tiempo de retención y la eficiencia del sistema y la interacción entre la presión y el tiempo de retención hidráulico, indicando así cuál de estos parámetros es más significativo para que el experimento sea más eficiente, en este caso cuál de estas interacciones entre variables independientes es más significativa para que se logre una mayor eficiencia de remoción de la materia orgánica (Montgomery & Runger, 2012).

9.2.1 Análisis de regresión lineal.

9.2.1.1 Análisis de regresión lineal DQO.

En la Figura 18, se muestra las líneas de tendencia y el R^2 en relación con las variables del porcentaje de remoción de DQO y la presión, en esta se muestra la correlación lineal a medida que aumenta la presión en cada corrida experimental relacionándolo con cada uno de los tiempos de retención hidráulicos evaluados. Se notó que, para un tiempo de retención de 4 horas, es el que mejor muestra una correlación positiva para el experimento, debido a que presenta los valores más altos de remoción, se apreció que el aumento de la presión en el biorreactor influye en la actividad microbiana aumentando los porcentajes de remoción de la DQO considerablemente. Asimismo, se debe tener en cuenta que el tiempo de contacto de las bacterias debe encontrarse dentro de rangos cercanos a 4 horas de retención hidráulica, para que se presente una mayor eficiencia de remoción de materia orgánica, estableciendo una relación óptima en el proceso cuando se aumenta la presión.

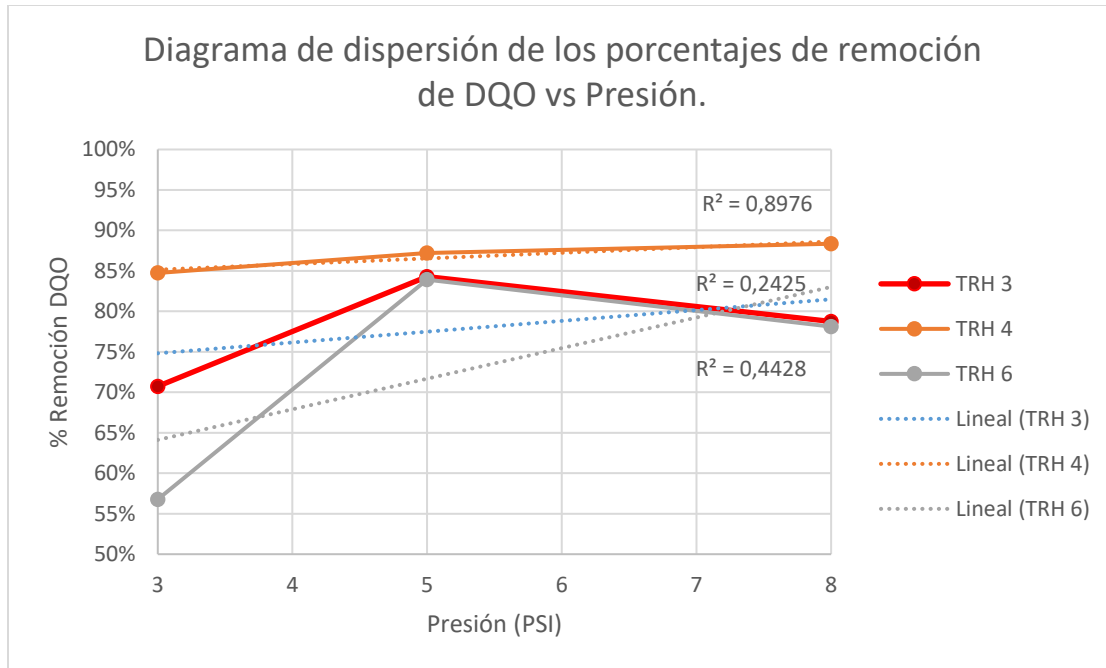


Figura 18. Diagrama de dispersión de la Eficiencia DQO vs Presión, correlación lineal entre las variables y su R2 en relación con el tiempo de retención hidráulico. Adaptado de Microsoft Excel 2016 por J. Cuadrado, & C. Cuartas, 2018.

En la Figura 18 se ilustra la expresión de R^2 para cada relación y tiempo de retención hidráulico a medida que aumenta la presión con respecto a la variable de respuesta que son los porcentajes de remoción de DQO, este coeficiente de determinación se usa con frecuencia para juzgar la adecuación de un modelo de predicción (línea recta), este se interpreta como la proporción de la variabilidad en los datos del eje (Y) y se explican las variables entre más se acerquen a 1 mayor será el ajuste del modelo y así mismo, de forma inversa, entre más se acerque a 0 menos ajustado estará el modelo y menos fiable será. (Montgomery & Runger, 2012).

Se observó que para un tiempo de retención de 4 horas el R^2 es de 0,89 es decir que un 89% de la variación observada en la presión es explicada por el modelo (línea de tendencia TRH 4 horas), lo cual muestra que la calidad del ajuste es satisfactoria en este caso, porque la relación entre los resultados obtenidos es descrita por una línea recta ascendente, indicando así que a medida que aumenta la presión aumenta los porcentajes de remoción para este tiempo de retención hidráulico. Contrariamente, para los tiempos de retención de 3 horas y 6 horas los R^2 son 0,24 y 0,44 respectivamente, es decir que la variación observada se comporta en un 24% y un 44%, por

ende, el comportamiento del modelo (línea de tendencia TRH 3 horas y 6 horas) no es tan ajustado y esta variabilidad no se comporta como una línea recta ascendente.

9.2.1.2 Análisis de Regresión lineal DBO.

En la Figura 19 muestra las líneas de tendencia de los resultados obtenidos y su R^2 correspondiente, la cual relaciona la presión con la eficiencia de remoción de DBO, en este sentido se relacionan los resultados de la eficiencia por cada tiempo de retención evaluado en las pruebas experimentales y como varía a medida que va aumentando la presión. Se infiere gracias a los altos porcentajes y a la línea de tendencia positiva para un tiempo de retención de 4 horas y tendencias constantes en los otros tiempos de retención, que a una mayor presión se efectuó un aumento en la remoción de materia orgánica, debido a la homogenización del oxígeno en el reactor, mediante la eliminación de productos de anaerobiosis y zonas muertas, a su vez generando una mayor solubilidad del oxígeno en la mezcla, por consiguiente, aumentando la disponibilidad del mismo para una mayor eficiencia en la actividad microbiana.

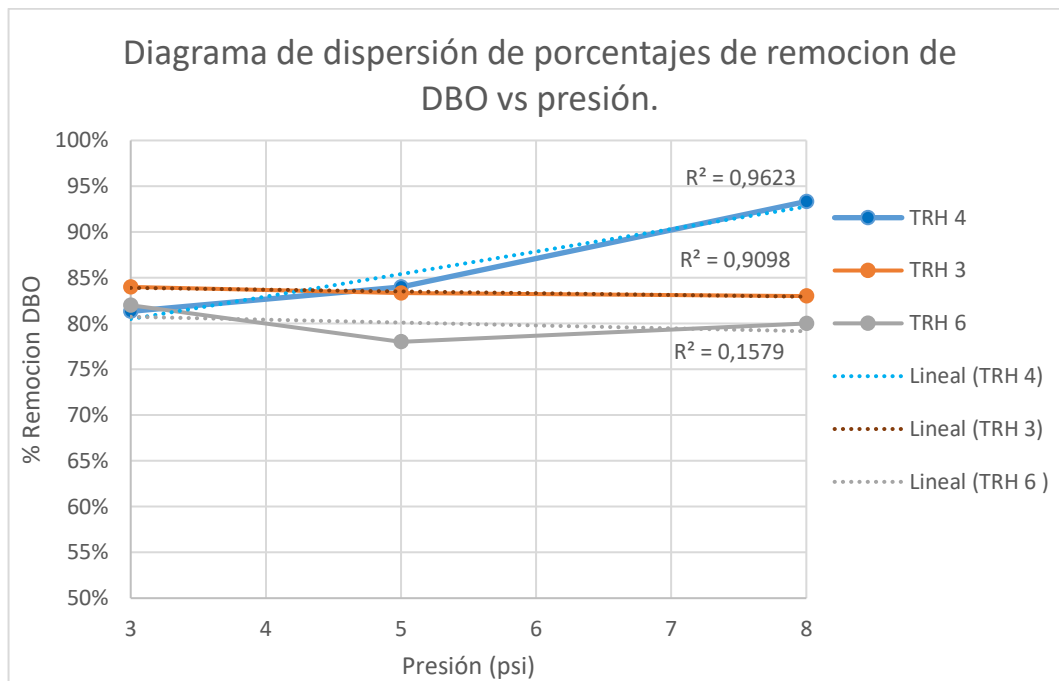


Figura 19. Diagrama de dispersión de la Eficiencia DBO vs Presión, correlación lineal entre las variables y su R^2 en relación con el tiempo de retención hidráulico. Adaptado de Microsoft Excel 2016 por J. Cuadrado, & C. Cuartas.

Seguidamente el R^2 que más cercano a 1 estuvo, fue el del tiempo de retención de 4 horas con 0,96 es decir un 96% de ajuste del modelo de predicción (línea de tendencia TRH4), notando así que los mejores resultados obtenidos por las corridas experimentales se dieron cuando se aumentaba la presión a 8 psi, y el tiempo de retención de 4 horas. Asimismo, se predijo que a medida que se presenta un aumento de la presión se aumenta los porcentajes de remoción en más de un 10%, valor que es notable recalcar para la optimización de la operatividad de los biorreactores de lodos, por alcanzar valores mayores del 90% para la remoción de materia orgánica por parte de la actividad microbiana.

Por otro lado, el resultado de R^2 obtenido para un tiempo de retención de 3 horas y 6 horas fue de 0,90 y 0,15 respectivamente, como se puede apreciar en la figura 19, indicando unos valores de respuesta más constantes con un tiempo de retención de 3 horas, y unos valores menos tendenciosos a aumentar para un tiempo de retención de 6 horas, apreciando de esta manera que estos valores son menos ajustados al modelo de predicción o hipótesis planteada en la investigación en comparación con el tiempo de retención de 4 horas que presenta una mejor respuesta por parte de las variables evaluadas en las corridas experimentales.

9.2.2 Análisis de Varianza.

El análisis de varianza mediante parcelas divididas de los porcentajes de remoción de la demanda biológica de oxígeno se observa en la Tabla 7. Los valores de presión obtenidos (F_c : 19196% y f_t : 67%) demuestran que existe una diferencia significativa entre los porcentajes de remoción obtenidos con las presiones ejercidas durante las pruebas experimentales al notar que $f_c > f_t$. Por otro lado, la interacción de los porcentajes remoción obtenidos con los tiempos de retención, en los resultados de TRH (f_c : 3% y f_t : 33%) indican que no existe una diferencia significativa al notar que $f_c < f_t$. Así mismo, se asocia con los resultados de $P \times TRH$ (F_c : 223% y f_t : 67%) que existe una interacción entre la presión y el tiempo de retención debido a que $f_c > f_t$.

Tabla 7. *Análisis de varianza de los porcentajes de remoción de demanda biológica de oxígeno (DBO) para el esquema de parcelas divididas.*

	GL	SC	CM	Fc	Ft
P	2	2237%	1119%	19196%	67%
Error P	3	17%	6%		
Total P	5	2255%			
TRH	5	13%	3%	3%	33%
P X TRH	10	2233%	223%	223%	67%
Error TRH	15	15%	1%		
TOTAL	35	32%			

Nota: GL: Grados de libertad, SC: Suma de cuadrados, CM: Cuadrados medios, Fc: Estadístico calculado y Ft: F teórico. Adaptado de Microsoft Office Excel 2016 por J. Cuadrado, & C. Cuartas, 2018.

Tabla 8. *Análisis de varianza de los porcentajes de remoción de demanda química de oxígeno (DQO) para el esquema de parcelas divididas.*

	GL	SC	CM	Fc	Ft
P	2	2232%	1116%	3735%	67%
Error P	3	90%	30%		
Total P	5	2322%			
TRH	5	8%	2%	2%	33%
P X TRH	10	3356%	336%	471%	67%
Error TRH	15	1069%	71%		
TOTAL	35	26%			

Nota: GL: Grados de libertad, SC: Suma de cuadrados, CM: Cuadrados medios, Fc: Estadístico calculado y Ft: F teórico. Adaptado de Microsoft Office Excel 2016 por J. Cuadrado, & C. Cuartas, 2018.

En la Tabla 8 según los resultados obtenidos se analizó que existe una diferencia significativa entre presión y los porcentajes de remoción de DQO, los resultados (Fc: 3735% y Ft: 67%) indican que $F_c > F_t$ afirmando lo dicho anteriormente. En continuidad con el análisis, con los valores (Fc: 2% y Ft: 33%) es notorio que $F_c < F_t$, por ende, no existe una diferencia significativa concerniente al tiempo de retención hidráulico y los porcentajes de remoción de la DQO. Por último, la interacción entre las variables de presión y tiempos de retención existe, debido a que en la tabla 8 se evidencio que $F_c > F_t$ con unos valores de (Fc:471% y Ft: 67%).

Basándonos en lo dicho, el análisis de varianza afirma que la variable que más influye en las corridas operacionales es el aumento de presión en el reactor de lodos activados, tanto como para la eficiencia de DBO y DQO, el nivel de presión va a determinar una mayor eficiencia en el proceso, por otro lado, el tiempo de retención no tiene significancia en los experimentos, para una mejor evaluación de esta variable independiente, se tendría que aumentar las horas para los muestreos con el objeto que se note la diferencia y se denote una significancia entre las diferentes variables.

9.4 Comparación del biorreactor de lodos operado bajo presión con biorreactor de lodos activados convencionales.

Las mayores eficiencias de remoción obtenidas del proceso 91,09% para DQO y 96,66% para DBO con una presión de 8, un tiempo de retención de 4 horas y un OD de 4,7 mg/L, como se ha mencionado hasta el momento. Asimismo, es de recalcar que para obtener los altos porcentajes de remoción las condiciones del biorreactor deben ser óptimas, con una buena proporción de sustrato en el tanque de aireación y disponibilidad del oxígeno disuelto. En la Figura 20, se mantienen los porcentajes de remoción constantes en la semana 1 presentando un decaimiento en la DQO al inicio de la semana 3 y posteriormente en el transcurso de esta se presentan unos picos en donde encontramos los mayores porcentajes de remoción del experimento. Así mismo, en el transcurso de las últimas semanas se presentan un decaimiento en los porcentajes de remoción del proceso cuando los tiempos de retención son de 6 horas y las presiones son de 5 psi y 3 psi.

En la Figura 20, se puede ilustrar una relación entre los porcentajes de remoción con los sólidos suspendidos volátiles (SSV) al transcurrir las semanas, notando así la presencia de picos a lo largo del proceso en los SSV del sedimentador, indicando una buena recirculación del floc biológico al tanque de aireación a lo largo del proceso, y una operación óptima por parte de las bacterias debido a los altos porcentajes de remoción con bajos SSV en el biorreactor gracias a la acción microbiana.

Asimismo, se puede apreciar que cuando se presentan una buena recirculación del floc y una buena presencia de SSV en el tanque de aireación, al transcurrir un día se presenta un

incremento en los porcentajes de remoción y un decaimiento en los SSV en el tanque de aireación, indicando así que las bacterias están consumiendo este sustrato de manera eficiente y por ende las concentraciones en el tanque de aireación se mantienen constantes y bajas con respecto al proceso convencional de los activados.

Normalmente, las condiciones operacionales de los lodos activados condicionales (véase Tabla 1 de parámetros empíricos de diseño de la resolución 0330 de 2017), se manejan unos sólidos de 1000-3000 SSV, un tiempo de retención de 4-8 horas y una relación alimento microorganismo (f/m) de 0,2 -0,4 kgDBO/kg SSVLM/d. Por tanto, se puede considerar que se logró operar el biorreactor con unas altas eficiencias de remoción con menores concentraciones de SSV que las convencionales de un biorreactor de lodos, un menor tiempo de retención de 3 horas operando de manera eficiente y una mayor relación alimento microorganismos (f/m) de 0,8 kgDBO/kg SSVLM/d.

La operatividad del biorreactor de lodos activados propuesto determinó que los microorganismos presentes son menores a los de reactores convencionales, esto se debe a que esta relación alimento microorganismo (f/m) es más alta que lo que normalmente esta propuesto en un proceso convencional, y con este resultado y las eficiencias alcanzadas en el proceso se puede determinar que se trata el agua logrando altas tasas de eficiencia con un menor espacio y por ende menos microorganismos presentes en el licor de mezcla, así mismo, se corrobora que la disponibilidad del oxígeno en el agua es mucho mayor que en los procesos convencionales y no es un factor limitante como cuando se realiza el tratamiento a una presión atmosférica.

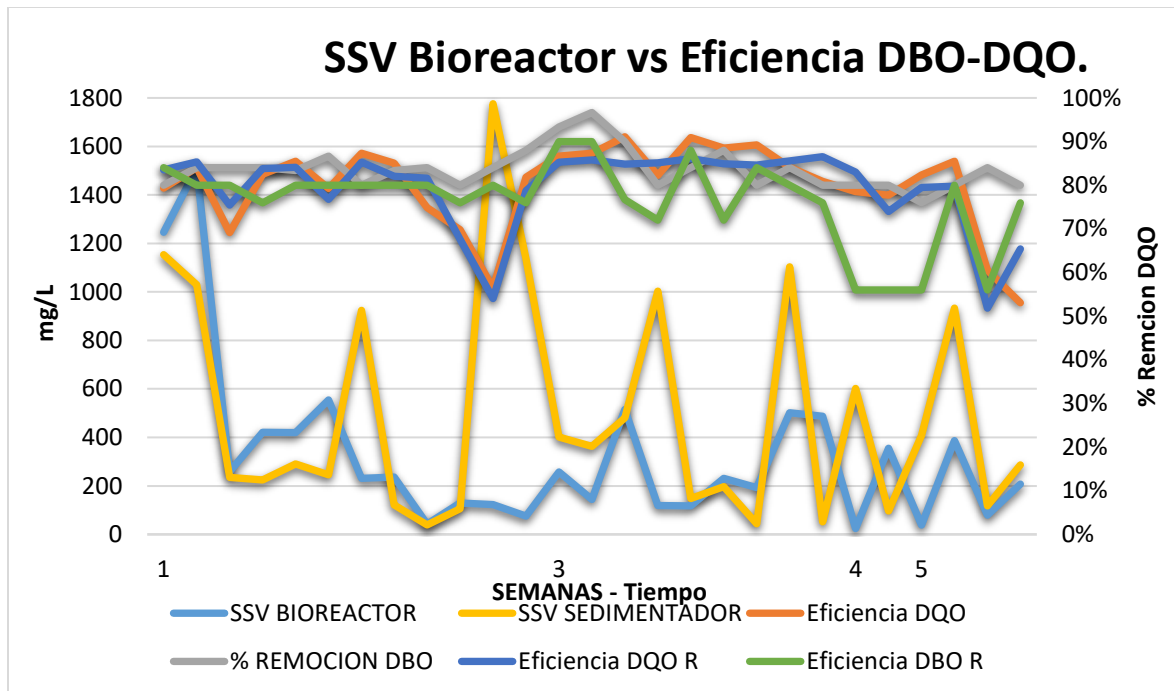


Figura 20. Resultados relacionados entre los Sólidos Suspendedos Volátiles (SSV) del tanque de aireación y el sedimentador, eficiencia de remoción de la Demanda Química de Oxígeno (DQO) y Demanda Biológica de Oxígeno (DBO). Adaptado de Microsoft Excel 2016 por J. Cuadrado, & C. Cuartas, 2018.

La Figura 21 expresa los porcentajes de remoción obtenidos del proceso relacionándolo con el Oxígeno Disuelto (OD) del tanque. El OD a lo largo del experimento presentó en la primera semana dos decaimientos y por ende también influyó considerablemente en los porcentajes de remoción del proceso, estos decaimientos se vieron influenciados por la temperatura (véase Figura 11) debido a que se presentaban unas temperaturas mayores a 30°C, lo que afectó la solubilidad del oxígeno. Seguido a esto, se presentó picos en el OD con valores de 4,7 mg/L y 5,68 mg/L y por consiguiente se evidencian los porcentajes de remoción más altos del experimento, por último, finalizando el experimento se presentaron altos valores de Oxígeno Disuelto, pero disminuyeron los porcentajes de remoción a lo largo de las últimas semanas de muestreo.

Cabe resaltar que se obtuvieron concentraciones altas de Oxígeno Disuelto desde 3,34 mg/L hasta 5,68 mg/L en el biorreactor sin necesidad que se le inyectara aire mediante un compresor, esto es debido a que el proceso de recirculación mediante la bomba hidráulica de 1.2 hp y la hermeticidad del sistema, aumentaba la presión considerablemente en el tanque y así mismo se aumentó la solubilidad del oxígeno disuelto. Las variables que más influyeron para que el

oxígeno disuelto aumentara o disminuyera fueron la temperatura y la presión, obtenida por los factores operacionales anteriormente mencionados.

Actualmente, para los reactores de lodos convencionales se recomiendan concentraciones de oxígeno disuelto mayores a 2,0 mg/L en el tanque de aireación, de lo contrario el proceso de remoción de materia orgánica no es eficiente (Metcalf & Eddy, 2014). Las concentraciones de OD de las corridas operacionales respecto a lodos activados operados bajo presión sobrepasan el límite que plantea los lodos activados convencionales, como se puede apreciar en la Figura 21 a comienzos de la semana 3 presenta un pico en el Oxígeno Disuelto manteniéndose por encima del estándar, cabe resaltar que en algunos días el Oxígeno Disuelto en el proceso es menor que este estándar debido a la acción de la temperatura, como se apreció en la semana 1 con presión 8 psi y tiempo de retención 3 horas, a su vez, con presión 3 psi y tiempo de retención de 3 horas, en este caso se pudo evidenciar que afectó considerablemente la acción microbiana disminuyendo los porcentajes de la remoción de materia orgánica.

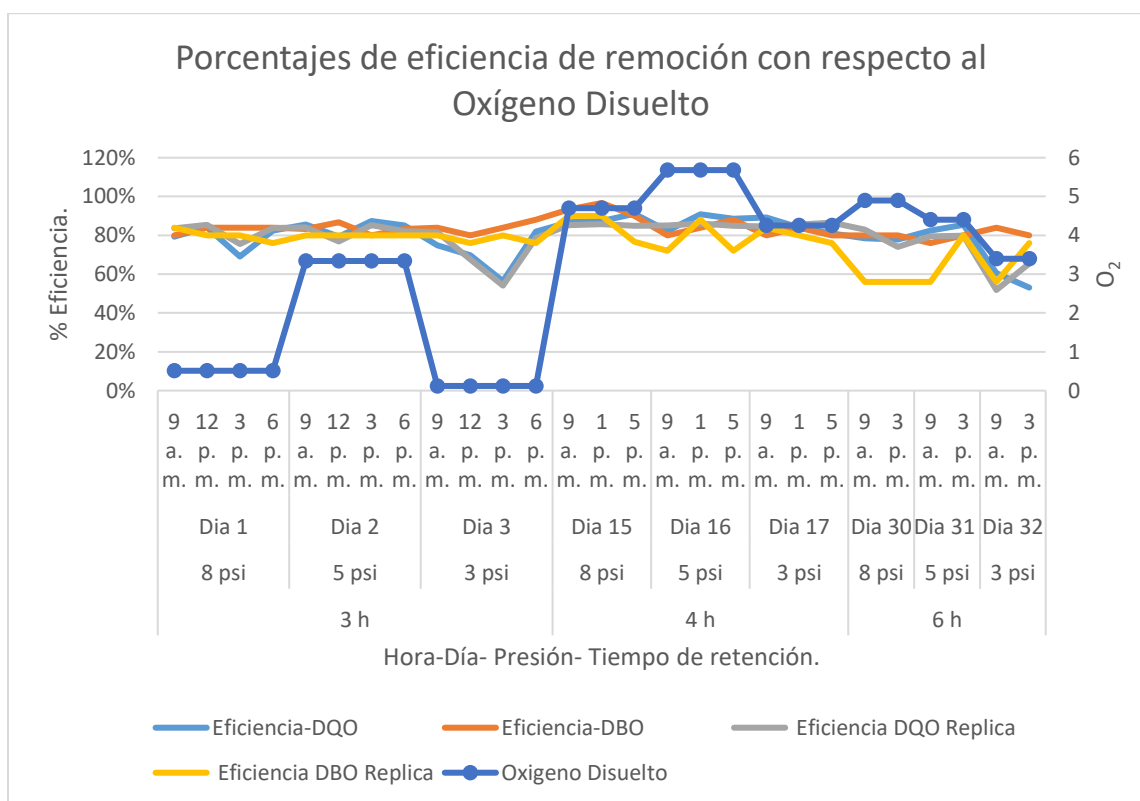


Figura 21. Resultados relacionados entre el Oxígeno Disuelto (OD) del tanque de aireación con la eficiencia de remoción de la Demanda Química de Oxígeno (DQO) y Demanda Biológica de Oxígeno (DBO). Adaptado de Microsoft Excel 2016 por J. Cuadrado, & C. Cuartas.

9.5 Proponer consideraciones de diseño tendientes a la optimización de la efectividad del tratamiento.

Analizando el apartado anterior, se puede inferir que el biorreactor de lodos activados operado bajo presión puede operar bajo unas condiciones de SSV bajos, normalmente, los reactores de lodos activados operan con sólidos suspendidos volátiles entre 1000 -3000, el experimento logró unas altas tasas de remoción de materia orgánica presentando a una media de sólidos suspendidos volátiles de 330 mg/L en el tanque de aireación y una proporción de sólidos suspendidos volátiles recirculados de 500 mg/L. Aunque cabe recalcar que el experimento se presentó a una escala piloto, influyendo considerablemente en las proporciones y dimensiones de los reactores lodos activados convencionales.

Por otro lado, se debe tener en cuenta que la temperatura no debe ser mayor a 30°C en el tanque de aireación para que las concentraciones del OD sean eficientes y se mantengan en el sistema, es importante que en climas cálidos se mantenga la operación del biorreactor con temperaturas controladas, es decir, en una parte donde la incidencia solar no sea tan alta para que la temperatura dentro del tanque de aireación no afecte considerablemente la solubilidad del oxígeno disuelto. Es importante también obtener una hermeticidad óptima para que se logren dar los aumentos en la presión del sistema y con esto lograr las altas concentraciones de oxígeno disuelto.

En cuanto a los tiempos de retención, se obtuvo una operatividad óptima para el tiempo de retención de 3 horas, normalmente en los lodos activados convencionales se manejan tiempos de 4-8 horas, considerando unas dimensiones de mayor proporción en cuanto al diseño del tanque de aireación. Con la operatividad de 3 horas, se puede ahorrar un espacio considerable, ya que los diseños de estos reactores ocuparían menos espacio por la disminución del volumen en el tanque de aireación, resaltando la relación directamente proporcional entre el volumen y tiempo de retención para el diseño de los biorreactores de lodos activados.

En este sentido, debido a unas menores dimensiones del sistema asociada a la disminución del tiempo de retención y resaltando una mayor solubilidad del oxígeno disuelto debido al aumento de la presión por la hermeticidad y buena recirculación sin necesidad de equipos de aireación dentro del sistema, es evidente mencionar que los costos asociados en la operatividad del sistema

de lodos activados aumentando la presión, disminuyen considerablemente con respecto a los lodos activados convencionales que necesitan unos difusores de aire robustos y que generan gastos energéticos considerables. Cabe resaltar que, para lograr una hermeticidad, la inversión inicial es alta por el material en el que se debe diseñar el reactor, el cual debe ser más resistente que el plástico normal, con la finalidad de que la presión en el sistema se conserve y/o aumente según la necesidad del proyecto, para generar una mayor solubilidad del oxígeno disuelto.

Así mismo, es importante resaltar la relación alimento microorganismo (F/M) que se obtuvo en el experimento fue de 0,8 kgDBO/kg SSVLM/d, normalmente el proceso de lodos activados está dentro de estos rangos de valor de 0,2 -0,4 kgDBO/kg SSVLM/d, esta relación es sumamente importante para determinar la eficiencia de los biorreactores, ya que determina la cantidad de sustrato que está consumiendo cada microorganismo. El experimento mostro una mayor relación (f/m) indicando así que las bacterias están siendo más eficientes que un proceso convencional, por ende, se intuye que la solubilidad del oxígeno disuelto en el licor de mezcla es más alta y no hay una limitación de este parámetro, lo que hace que la actividad bacteriana aumente y que los microorganismos demanden mayores concentraciones de DBO y DQO; y por consecuente la degradación de materia orgánica sea mucho más rápida que un proceso de lodos activados convencional.

Finalmente, se establecen las condiciones de operatividad, bajo las cuales funcionó efectivamente el reactor de lodos operado bajo presión, resaltando así modificaciones en los parámetros de diseño de los reactores de lodos convencionales.

Tabla 9. *Avances en parámetros de diseño de reactores de lodos activados, para lograr una mayor eficiencia de remoción de materia orgánica.*

Parámetro	Lodos convencionales	<u>Lodos bajo presión</u>
<u>Presión</u>	Atmosférica	<u>8 psi</u>
<u>Tiempo de retención (horas)</u>	<u>4-6</u>	<u>3-6</u>
<u>Sólidos en el licor de mezcla (mg/L)</u>	<u>1000-3000</u>	<u>1000-2100</u>
Relación A/M (KgDBO/KgSSVLM/día)	0,2-0,4	0,8
Recirculación (%)	25-75	25
Edad de lodos (días)	3-15	10
Oxígeno disuelto (mg/L)	2	3,08

Nota. Adaptado de Microsoft Office Word 2016 por J. Cuadrado, & C. Cuartas, 2018.

10. Análisis de Resultados

En cuanto a los resultados obtenidos de los parámetros fisicoquímicos de control operacional, se muestra unas condiciones óptimas para que el biorreactor opere de una manera eficiente, con un promedio del Oxígeno Disuelto durante todo el experimento de 3,47 mg/L, un pH entre 6,5 y 7,8, una Temperatura media del proceso fue de 28,65°C.

La media y la desviación estándar obtenida para los porcentajes de remoción de DQO fue de 80% y un 10% respectivamente y de DBO fue de 84% y 5% respectivamente, el resultado obtenido por la desviación es el que mejor nos indica la relación directa con la dispersión de los datos, es decir, la variación de los datos con respecto a la media o promedio (Montgomery & Runger, 2012). Por ende, podemos inferir que el rango de los porcentajes de remoción del proceso de lodos activados fue de 70 – 90 % de DQO y de 79 – 89% de DBO, notando así una relación significativa entre estas dos remociones en el sistema.

La relación alimento/ microorganismo (F/M) presentó un valor de 0,8 indicando así la masa de sustrato aplicada diariamente al tanque de aireación contra la masa de Sólidos Suspendidos, está en una proporción óptima para la operación de los microorganismos. El licor de mezcla en el tanque de aireación se debe mantener en suspensión por métodos apropiados de mezcla (Metcalf & Eddy, 2014), en el biorreactor operado bajo presión mediante la constante recirculación y su capacidad hermética que garantiza el aumento de la presión, se mantuvo una buena aeración y de la mano una suspensión microbiana óptima para su correcta operación.

Se puede notar que los valores de porcentajes de remoción de DBO y DQO se relacionan directamente presentando picos y decaimientos a la par, de la mano se puede ver los Sólidos Suspendidos Volátiles en el reactor que presentan una entrada alta en el inicio, posteriormente un decaimiento para que se mantenga constante a lo largo del proceso, y los Sólidos Suspendidos Volátiles del sedimentador los cuales presentan una buena recirculación del floc biológico, debido a la presencia de picos a lo largo del proceso.

Anteriormente, se evidenció un buen crecimiento de los microorganismos a lo largo del tiempo, infiriendo una relación directa del experimento con las fases de crecimiento bacteriano.

“Sí un cultivo que está creciendo en fase exponencial es inoculado al mismo medio de cultivo bajo las mismas condiciones de crecimiento, no se observa fase de latencia y el crecimiento exponencial sigue a la misma velocidad” (Lopez & Bejarano, 2013), en el experimento en la semana 1 no se presenta una fase de latencia, ya que el inóculo fue implantado una semana antes del muestreo, por lo tanto se notó, que el cultivo de microorganismos ya estaba en su fase exponencial, debido a que al momento en que se recargó el agua residual sintética se presenta un exceso en la cantidad del alimento y de la mano un consumo de este alimento creciendo exponencialmente las bacterias, así mismo presentando porcentajes de remoción de DBO y DQO constantes y en aumento.

Seguido a esto, se presenta una fase estacionaria en la semana 3 en la cual las bacterias y su crecimiento se mantiene constante, esto es debido a la constante recarga de agua residual artificial por los tiempos de retención bajos evaluados y a la recirculación constante del proceso, presentando porcentajes de remoción constante y en decaimiento posteriormente (véase Figura 20) En la semana 4 y 5 comienza de la fase endógena, debido al aumento exponencial de las bacterias, ya no hay tanta disponibilidad de alimento para la capacidad del biorreactor, por lo tanto, los porcentajes de remoción de DBO y DQO disminuyen drásticamente. Se hace necesario una recarga de inóculo de microorganismos para continuar con la correcta operación del biorreactor de lodos activados operado bajo presión.

En cuanto a la DQO en la semana 3 se presentó un decaimiento de su remoción, se puede inferir que es debido a la recirculación de una cantidad considerable de floc biológico en la semana 3, por lo tanto, afecto drásticamente estos valores por la presencia de un cambio brusco en las condiciones de alimento, estas cargas de choque los sistemas de tratamiento biológico no los toleran muy bien, afectando considerablemente en estos porcentajes de remoción de la DQO (Russell, 2015).

11 Discusión de resultados

A partir de los hallazgos encontrados, se acepta la hipótesis principal de la investigación, mediante la cual, se encontró que un aumento de presión en el reactor de lodos activados, aumenta considerablemente la solubilidad del oxígeno disuelto en la mezcla de agua residual artificial. De esta manera, al disponer de más oxígeno se incrementan los porcentajes de remoción de materia orgánica para los parámetros DBO y DQO. Asimismo, permite operar con menor tiempo de retención respecto a los reactores de lodos convencionales, el montaje del reactor de lodos será más compacto, ocupando menos espacio de instalación, el cual se ve reflejado por la disminución en el uso de equipos de inyección de aire por una mayor disponibilidad de oxígeno en el agua.

Los reactores de lodos activados operados en escala laboratorio presentan similitudes significativas respecto al reactor de lodos activados operado bajo presión del experimento, las condiciones operacionales del reactor de lodos activados a escala laboratorio fueron de pH promedio de 6.47, temperaturas entre 20 y 24°C, un oxígeno disuelto entre 4,2 y 4,8 mg/L, alcanzando como mayor eficiencia de DQO de 90% y una concentración y comportamiento de los sólidos suspendidos volátiles en el tanque de aireación similares a las obtenidas variando en decaimiento desde 1000 hasta 500 mg/L a lo largo del tiempo (Varilla Quiroga & Diaz López, 2008).

Este referente teórico expone que el comportamiento de los parámetros operacionales del biorreactor de lodos activados a escala laboratorio son similares al experimento, aunque variando considerablemente con temperaturas menores debido a que controlaban esta variable mediante calentadores y que el biorreactor se encontraba en un clima frío y relacionan también el decaimiento de los Sólidos Suspendidos Volátiles a medida del tiempo debido al crecimiento microbiano y que en un punto el crecimiento bacteriano fue interrumpido por la falta de sustrato, por lo tanto se ven en la necesidad de consumir su propia biomasa y por ende bajando considerablemente los porcentajes de remoción por esta fase de latencia al finalizar su proceso. Por otro lado, las eficiencias fueron similares, aunque el experimento operado bajo presión presentó mayores eficiencias de remoción de DQO con un 91,06% de remoción.

12. Recomendaciones

Implementar un reactor de lodos activados diseñado con características operacionales, tales como: un tiempo de retención hidráulica de 4 horas, y operado con 8 psi de presión, con el objetivo de incrementar la concentración de Oxígeno Disuelto en el agua, para reducir la carga contaminante evidenciada en los parámetros analizados en este estudio, obteniendo una mayor eficiencia de remoción de materia orgánica respecto a los reactores convencionales.

Los interesados en implementar este tipo de sistema deben tener en cuenta la Temperatura promedio del lugar en donde se ejecutará, puesto que, para este estudio las temperaturas oscilaron entre 26,2 a 31,1°C, es recomendable realizar el montaje de un reactor enchaquetado y/o asilado para controlar la Temperatura dentro del sistema. Asimismo, un pH entre 6,5 y 7,8 unidades de hidronio, características las cuales garantizan un ambiente adecuado para el crecimiento y desarrollo de las bacterias.

Por otra parte, respecto a las recargas de agua residual sintética, utilizar las medidas exactas de los insumos, y de la misma marca en cada recarga, para no alterar los parámetros de control de entrada para operar el reactor.

Se recomienda inicialmente operar con un tanque (reactor) de material acero calibre 14 (ver Figura 22 B), para garantizar la hermeticidad del sistema, ya que, el material plástico tiende a expandirse con facilidad cuando es operado bajo presión (ver Figura 22 A). Asimismo, utilizar en lo posible piezas de acero, puesto que, permiten con mayor facilidad el enrosque al tanque, evitando que se quiebren por el uso de herramientas para apretarlas, a su vez, eliminando todas las posibles fugas en el sistema.



(A)



(B)

Figura 22. (A). Caneca inicial para uso como reactor. (B). Tanque final para montaje del reactor.

Finalmente, se recomienda utilizar como sedimentador un recipiente que permita fácilmente la extracción de lodos, así como su visualización dentro del mismo, con el cual se pueda establecer un equilibrio en los SSV, dentro del sistema.

Conclusiones

- El reactor de lodos activados operado bajo presión, presenta mayores eficiencias de remoción de materia orgánica en términos de la Demanda Química de Oxígeno, y la Demanda Bioquímica de Oxígeno, respecto a los reactores de lodos convencionales (de 91,09% para DQO y 96,67% para DBO). De esta manera, reduciendo el costo asociado por requerimiento de equipos para inyección de aire, y los espacios necesarios al implementar un sistema biológico para el tratamiento de agua residual con características similares, es decir, domésticas. Por tanto, se corrobora la hipótesis planteada, obteniéndose mayores capacidades efectivas de remoción que los reactores de lodos convencionales mediante el diseño experimental, y con características operativas de fácil acceso, tales como el Tiempo de Retención Hidráulica de 4 horas y una Presión de 8 psi.
- El reactor operado bajo presión, tiene la capacidad de operar con tiempos de retención de 3 horas, y bajas concentraciones de SSV oscilantes entre 1000 y 1500 mg/L con respecto a los convencionales, aunque no presentó la mejor eficiencia de la investigación, aun así, logra una alta tasa de remoción de materia orgánica, de 87,34% para DQO con 5 psi de presión, y 88% para DBO con 3 psi respectivamente.
- Las concentraciones más elevadas de oxígeno disuelto obtenidas en el licor de mezcla, son mayores que en los reactores de lodos convencionales, siendo estos 4,7 mg/L y 5,68 mg/L, durante todo el desarrollo de las corridas operacionales, debido a la intervención de la nueva variable de estudio la presión (3, 5 y 8 psi).
- El reactor de lodos operados bajo presión, a su vez, al disponer de una mayor concentración de oxígeno disuelto, permite realizar modificaciones en los parámetros de diseño y operación respecto a los reactores convencionales, asimismo, garantizando una mayor efectividad en el sistema. Es decir, el rango del tiempo de retención hidráulico varía de 4-10 horas a 3-6 horas, de esta manera, reduciendo el espacio necesario para la adecuación

de equipos para la instalación y operación del reactor; la concentración de SSV se diferencia de 1000-3000 mg/L a 1000-2100 mg/L, la relación A/M varía de 0,2-04 a 0,8 (KgDBO/KgSSVLM/día), en otras palabras, con una menor concentración en la población microbiana dentro del reactor, se puede consumir mayor materia orgánica, al aumentar demanda de DBO-DQO de los microorganismos, debido a una mayor disponibilidad de oxígeno presente en el licor de mezcla, es decir, sin parámetros limitantes para el desarrollo y crecimiento de la actividad microbiana.

Referencias bibliográficas.

- Alviz, A. & Cueto, D., (2012). *Diseño de un sistema de aireación para una planta de lodos activados en zofranca mamonal. Tesis de pregrado.* Universidad de Cartagena, Cartagena, Colombia. Recuperado de: <http://repositorio.unicartagena.edu.co:8080/jspui/bitstream/11227/131/1/DISE%C3%91O%20DE%20UN%20SISTEMA%20DE%20AIREACI%C3%93N%20PARA%20UNA%20PLANAT%20DE%20LODOS%20ACTIVADOS%20EN%20ZOFRANCA%20MAMONAL..pdf>.
- Arango, C., Dorado, J., Guzmán, D., & Ruiz, J. (2012). Informe análisis compuesto según el índice enso oni, para la temperatura media trimestral de colombia. Recuperado el 20 de octubre de 2018 de: <http://www.ideam.gov.co/documents/21021/21789/Variabilidad+Climatica+Trimestral+Temperatura+%28Ruiz%2C+Guzman%2C+Arango%2C+Dorado%29.pdf/a2b3f5ff-2d8a-4436-be46-8459ced500cb>.
- Arguedas, A., (2013). Parámetros de control de un sistema biológico. Recuperado el 14 de septiembre de 2018, de: <https://es.scribd.com/document/366282826/Parametros-de-Control-de-Un-Sistema-Biologico>.
- Arnaldos, M., & Pagilla, K., (2014), Implementation of a demand-side approach to reduce aeration requirements of activated sludge systems: Directed acclimation of biomass and its effect at the process level. *Water Research*, vol. 62(1), pp. 147–155. Recuperado de: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0043135414004011>.
- Bejarano, M., & Escobar, M., (2015). *Eficiencia del uso de microorganismos para el tratamiento de aguas residuales domesticas en una planta de tratamiento de agua residual. Tesis de pregrado.* Universidad de la Salle, Bogotá D.C., Colombia. Recuperado de: <http://repository.lasalle.edu.co/handle/10185/18014>.
- Bitton, G. (2013). *Wastewater Microbiology.* (978-0-470-63033-4) Florida, Gainesville: Wiley-Blackwell. Recuperado de: <https://books.google.com.co/books?id=VhPmtHjRnPcC&printsec=frontcover#v=onepage&q&f=false>.
- Carrasquero, S., Rodriguez, M., Bernal, J., & Díaz, A., (2018). Eficiencia de un reactor biológico secuencial en el tratamiento de efluentes de una planta procesadora de productos cárnicos. *Revista Facultad De Ciencias Básicas*, 1(1), 23-33. Recuperado de: <https://doi.org/10.18359/rfcb.3017>.

- Curt, M., Muñoz, J., Beascochea, E., & Fernandez, J., (s.f). Método Analíticos para aguas residuales. En J. Fernandez (Ed), *Manual de fitodepuración, filtros de macrofitas en flotación*. (117-128). Madrid: Catedrático de Producción Vegetal. Recuperado de: <https://fundacionglobalnature.org/macrophytes/Manual%20sobre%20fitodepuracion.htm>.
- Dietz, P., Parry, R., Steiner, L., & Tellefsen, R., (1974). Química: fundamentos experimentales. (842917468-0) España: Reverté, S.A. Recuperado de: https://books.google.com.co/books?hl=es&lr=&id=qYRCOe8LifgC&oi=fnd&pg=PR5&dq=Qu%C3%ADmica,+fundamentos+experimentales&ots=rQcuMprVbu&sig=32s_Ucxge7YlnpULQPr10JVZ6bU#v=onepage&q=Qu%C3%ADmica%2C%20fundamentos%20experimentales&f=false.
- Engineering ToolBox, (2004). Air Solubility in Water. Recuperado el 22 de octubre de 2018, de: https://www.engineeringtoolbox.com/air-solubility-water-d_639.html.
- Flores, D. & Lozano, A., (2013). *Disminución de dbo y color en el licor negro de la industria papelería trupal mediante ozonización catalizada con carbón activado. Tesis de pregrado*. Universidad nacional de Trujillo, Trujillo, Perú. Recuperado de: http://dspace.unitru.edu.pe/bitstream/handle/UNITRU/3448/FloresGalvez_D%20-%20LozanoHerrera_A.pdf?sequence=1&isAllowed=y.
- Garrido, M., Pardo, A., Ruiz, M., & Martín, R., (2007). La interacción entre factores en el análisis de varianza: errores de interpretación. *Psicothema*, 19(2), 343-349. Recuperado de: <http://www.psicothema.com/pdf/3369.pdf>.
- Decreto 1594 de 1984 [con fuerza de Ley]. Por el cual se reglamenta parcialmente el Título I de la Ley 9 de 1979, así como el Capítulo II del Título VI -Parte III- Libro II y el Título III de la Parte III -Libro I- del Decreto - Ley 2811 de 1974 en cuanto a usos del agua y residuos líquidos. Junio 26 de 1984. D.O.Nº. 36.700.
- Gómez, K., & Gonzales, J., (2016). *Optimización de la planta de tratamiento de aguas residuales del municipio de Boyacá-Cundinamarca. Tesis de pregrado*. Universidad Católica de Colombia, Bogotá Colombia. Recuperado de: https://www.ani.gov.co/sites/default/files/decreto_1594_de_1984_usos_del_agua_y_residuos_liquidos.pdf.
- Goyenola, G., (2007). Guía para la utilización de las Valijas Viajeras – Oxígeno Disuelto. Recuperado el 1 de noviembre de 2018, de: http://imasd.fcien.edu.uy/difusion/educamb/propuestas/red/curso_2007/cartillas/tematicas/OD.pdf.

- González, M. , Plantas de tratamiento de aguas residuales para descontaminación del rio del Valle de Aburra-2017. Adaptado de: <http://www.grupoepm.com/aguasnacionales/esco/nuestrosproyectos/plantadetramientodeaguasresiduales.aspx>
- Guevara, A., & León, G., (1996). *Propuesta metodológica evaluación de lagunas de estabilización*. Recuperado el 16 de Septiembre de 2018, de: <http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/scan2/031278/031278-a.pdf>.
- Gutierrez, H., y De la Vara, R., (2012). Diseño factoriales con dos factores. Factorial dos factores. (121-124).Mexico: Mc Graw Hill. Recuperado de: <http://wpd.ugr.es/~bioestad/wp-content/uploads/Factorial-dos-factores.pdf>.
- IBM SPSS Statistics (2015). IBM Market place. Recuperado el 30 de octubre de 2017, de <https://www.ibm.com/co-es/marketplace/spss-statistics/details#product-header-top>.
- ICONTEC, (1995). Calidad del Agua. Muestreo. Directrices para el diseño de programas de muestreo. (ISO 5667-1) Bogota: Instituto Colombia de normas tecnicas y certificacion (ICONTEC). Recuperado de: <http://files.control-ambiental5.webnode.com.co/200000145-d5b44d6af9/NTC-ISO%205667-01-1995.%20Directrices%20para%20el%20dise%C3%B1o%20de%20planes%20de%20muestreo.pdf>.
- IDEAM. (2017). Boletín diario del estado del tiempo. Recuperado el 15 de noviembre de 2018, de: bart.ideam.gov.co/boletin/boletin.xls.
- Jimenes, N., (2014). *Diseño de un reactor biológico de fangos activos*. Tesis de pregrado. Universidad de Almeria, Escuela Politécnica Superior y Facultad de Ciencias Experimentales, Almería, España. Recuperado de: <https://studylib.es/doc/4945114/dise%C3%B1o-de-un-reactor-biol%C3%B3gico-de-fangos-activos>.
- Lopez, J., & Bejarano, L. (2013). *Microbiología de crecimiento bacteriano*. Bogota: Facultad de farmacia. catedra micro, Universidad del Bosque.
- Lopez, J., Juarez, J., Romero, M., Herrera, A., Solis, F., Zlatev, R., Gallegos, R., & Stoyvcheva, M. (2016). Tratamiento biológico de agua residual domestica: evaluación del proceso de una planta en la ciudad de Mexicali. (ISBN 978-607-607-331-5), Mexicali, Baja california, México: Universidad Autónoma de Baja California. Recuperado de: https://www.researchgate.net/publication/307924201_Tratamiento_biologico_del_agua_residual_domestica_Evaluacion_del_proceso_en_una_planta_en_la_ciudad_de_Mexicali.
- Metcalf, & Eddy. (2013). wastewater engineering treatment and resource recovery. (ISBN 1259250938) New york: Mc Graw Hill. Recuperado de:

https://books.google.com.co/books/about/Wastewater_Engineering_Treatment_and_Res.html?id=6KVKMAEACAAJ&redir_esc=y.

Ministerio de Desarrollo Economico Direccion de Agua potable y Saneamiento Basico. (2000). Reglamento tecnico del sector de agua potable y saneamiento basico. RAS-2000. Titulo E-Tratamiento de aguas residuales. Recuperado de: http://www.minvivienda.gov.co/Documents/ViceministerioAgua/010710_ras_titulo_e.pdf.

Montgomery, D., & Runger, G., (2012). Probabilidad y estadística aplicada a la ingeniería. Mexico. D.F.: Limusa SA y Jhon Wiley y Sons. Recuperado de: <https://es.scribd.com/doc/148254430/Probabilidad-y-Estadistica-Aplicadas-a-la-Ingenieria-Montgomery-Runger-2%C2%BA-Edicion-Cap-1-8>.

Noyola, A., Morgan, J., & Guereca, L., (2013). Selección de tecnologías para el tratamiento de aguas residuales municipales. México: Instituto de ingeniería UNAM. Recuperado de: http://www.pronatura-sur.org/web/docs/Tecnologia_Aguas_Residuales.pdf.

Orjuela, M., & Lizarazo, J., (2013), *Sistemas De Plantas De Tratamiento de Aguas Residuales en Colombia. Tesis de posgrado*. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia. Recuperado de: <http://www.bdigital.unal.edu.co/11112/1/marthaisabelorjuela2013.pdf>.

Resolucion 0631 de 2015 [Ministerio de medio ambiente y desarrollo sostenible]. Por la cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones. Marzo 17 de 2015. Recuperado de: https://docs.supersalud.gov.co/PortalWeb/Juridica/OtraNormativa/R_MADS_0631_2015.pdf.

Riera, A., (2013). Índice de cálculos, Recuperado el 9 de octubre de 2018, de: <http://art-de-pierre.eu/20535/c%C3%A1lculos-de-dise%C3%B1o-del-secador-de-arena/>.

Rodriguez, R., & Osorio, G., (2014). *Estudio de la influencia del tiempo de retención celular sobre la reducción de materia orgánica carbonácea y nitrógeno en una nueva configuración del sistema de estabilización por contacto tratando agua residual doméstica. Tesis de pregrado*. Universidad del Valle, Santiago de Cali, Colombia. Recuperado de: <http://bibliotecadigital.univalle.edu.co/bitstream/10893/7749/1/3754-0446436.pdf>.

Rodríguez, I., & Lozano, W., (2012). Preparación, composición y uso de agua residual sintética para alimentación de reactores prototipo y de laboratorio. *Didáctica Ambiental* (11), 10-16. Recuperado de: https://www.researchgate.net/publication/235955396_Preparacion_composicion_y_uso_de_agua_residual_sintetica_para_alimentacion_de_reactores_prototipo_y_de_laboratorio.

- Romero, J., (2004). Tratamiento de aguas residuales teoría y principios de diseño. (ISBN: 9588060133) Bogotá: Escuel Colombiana de Ingeniería. Recuperado de: <https://www.libreriapensar.com/tienda/tratamiento-de-aguas-residuales-teoria-y-principios-de-diseno-lemoine/>.
- Riera, A., (2013), Índice de cálculos. Recuperado el 4 de septiembre de 2018 de: <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/13058/C%C3%A0lculs.pdf?sequence=5&isAllowed=y>.
- Russell, D., (2012). Tratamiento de aguas residuales-un enfoque practico. Barcelona: Jhon Wilwy Y Sons. Recuperado de: https://www.academia.edu/3695214/TRATAMIENTO_DE_AGUAS_RESIDUALES_-_ENFOQUE_PRACTICO.
- Salazar, D., (2015). *Estudio del impacto ambiental generado por vertimientos provenientes de un establecimiento penitenciario de orden nacional al recurso hídrico. "Estudio de caso". Tesis de posgrado.* Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá D.C., Colombia. Recuperado de: <https://repository.unimilitar.edu.co/bitstream/handle/10654/6463/ARTICULO%20ESPECIALIZACION%20FINAL.pdf;sequence=1>.
- Santander, F., (2009). Ley de Henry. Recuperado el 30 de septiembre de 2018, de: <http://www.ingenieriaquimica.org/foros/ley-henry>.
- Sanz, M. (2016). *Diseño del tratamiento biológico de fangos activos para la eliminación de materia orgánica y nutrientes para una población de 60 000 habitantes equivalentes. Tesis de pregrado.* Universidad politécnica de València, Valencia, España. Recuperado de: https://riUNET.upv.es/bitstream/handle/10251/87739/22591162x_TFG_14998174084294922424859822320433.pdf?sequence=2.
- Villota, G. , (2015). *Desarrollo de un reactor de mezcla completa para el estudio de los coeficientes cinéticos en lodos activados en el tratamiento de aguas residuales. Tesis de pregrado.* Universidad de Nariño, San Juan de Pasto. Recuperado de: <http://biblioteca.udenar.edu.co:8085/atenea/biblioteca/91274.pdf>.
- Xie, L., Bao, Q., Terada, A., & Hosomi, M., (2016). Single-cell analysis of the disruption of bacteria with a high-pressure jet device: An application of atomic force microscopy. *Chemical Engineering Journal*, (306), 1099–1108. Recuperado de: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2016.07.112>
- Yacuzzi, E., Martín, F., Quiñones, H., & Popovsky. M., (2004). El diseño experimental y los métodos de taguchi: conceptos y aplicaciones en la industria farmacéutica. Argentina: Universidad del Cema. Recuperado de: <http://navarrof.orgfree.com/Docencia/Calidad/UT2/TaguchiFarmaceutica.pdf>.