



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE
MÉXICO**



CENTRO INTERAMERICANO DE RECURSOS DEL AGUA

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESTUDIO DE UN PROCESO DE MINIMIZACIÓN DE LODOS POR OZONACIÓN

TESIS

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRA EN CIENCIAS DEL AGUA**

PRESENTA:

BIÓLOGA BRENDA CITLALLI SILVA HERNÁNDEZ

DIRECTOR:

DR. CHEIKH FALL

TOLUCA, MÉXICO; DICIEMBRE DE 2015

AGRADECIMIENTOS

A mi Director de Tesis, Dr. Cheikh Fall por el tiempo, paciencia y enseñanzas.

A mis Maestros Y Revisores

Dr. Cheikh Fall, Dra. Ivonne Linares, Dra. Verónica Miranda, Dr. Daury García y Dr. Arturo Colín

Por el tiempo, comentarios, enseñanzas y entrega al revisar esta tesis.

A **CONACYT** (Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología) por las dos becas otorgadas durante el proceso de la Maestría.

Por el financiamiento de la investigación a través del proyecto a través del proyecto de Ciencias Básicas # 152943, "Reducción de los sólidos generados por el proceso de lodo activado: Mecanismos subyacentes y modelación dinámica de la degradación de la fracción del residuo endógeno (X_p) de los lodos", bajo la responsabilidad del Dr. Cheikh Fall.

Al laboratorio del CIRA, a Oscar y Elizabeth

Por su gran apoyo en el proceso de ésta tesis.

A mis amigos de laboratorio:

Ericka, Frida, Aranzazú, Lilia, Adriana, Sergio, Lupita, Sarai y Cristian

Gracias a ustedes el trabajo en el laboratorio fue agradable y por su amistad

A mis padres

Jesús y Joaquina

A mis hermanos

Yadira y Antonio

Por el apoyo y el amor incondicional que siempre me han brindado.

A Josué y Ángel

Por el cariño, la motivación y la amistad, algunas veces hay personas que llegan como ángeles a tu vida y te ayudan a volar con sus alas.

DEDICATORIA

A mi Familia:

Jesús, Joaquina, Yadira, Antonio, Jonathan y Yadith

A mis primos:

Yered y Cristian

A mis amigos:

Josué, Ángel, Norma, Bety, Eunice, Yaromir, Lupita,
Sarai, Frida, Lilia, Sergio, Aranzazú y Ericka

A mis alumnos:

Luis Ángel, Ángel Eduardo, Anahí, Gibrana, Jenny y Yency

ABREVIATURAS

AS	Lodo activado
DBO	Demanda Biológica de Oxígeno
Desv.Est	Desviación estándar
DQO	Demanda Química de Oxígeno
DQOsol	Demanda Química de Oxígeno soluble
DQOtotal	Demanda Química de Oxígeno total
IQV	Relación DQO/SSV
IVT	Relación SSV/SST
LM	Licor mixto
LMI	Lodo modelo uno
LMII	Lodo modelo dos
O ₃	Ozono
·OH	Radical hidroxilo
OH ⁻	Ión hidroxilo
PTN	Planta Toluca Norte
RBS	Reactor batch secuencial
rO ₂	Tasa de consumo de oxígeno
SS	Sólidos suspendidos fijos.
SST	Sólidos suspendidos totales
SSV	Sólidos suspendidos volátiles
T0	Tratamiento cero (muestra sin O ₃)
T1	Tratamiento uno (1 min de ozonación)
T2	Tratamiento dos (2 min de ozonación)
T3	Tratamiento tres (3 min de ozonación)
T4	Tratamiento cuatro (4 min de ozonación)
T5	Tratamiento cinco (5 min de ozonación)
TRC	Tiempo de retención celular
X _H	Microorganismos heterótrofos
X _I	Materia orgánica inerte
X _P	Producto endógeno del decaimiento de microorganismos heterótrofos

RESUMEN

Una gran cantidad de lodo es producida a partir de procesos de tratamiento biológico aerobio de aguas residuales, lo cual se ha convertido en un serio problema. El tratamiento y la eliminación del exceso de lodo producido a partir de este proceso requieren de altos costos, que pueden representar hasta 65% del total de operación de la planta. Con el fin de reducir el exceso de producción de lodo, nuevos procesos de desintegración que implican métodos mecánicos, químicos, térmicos y biológicos, han sido desarrollados. El objetivo general de este estudio fue caracterizar y optimizar un proceso de minimización de lodo por ozonación en un reactor Batch con tres tipos de lodo: lodo modelo I- X_H , lodo modelo II - X_P y lodo modelo III Planta Toluca Norte- X_I . El lodo modelo uno (mayor X_H , microorganismos heterótrofos): cultivado en el laboratorio del CIRA, se instalaron dos reactores que funcionaron como batch secuencial, los cuales se alimentaron con agua sintética, funcionando con un tiempo de retención celular de 15 días y teniendo un volumen útil de 30 L. La purga de estos reactores se recolectó para las pruebas de ozonación. El lodo modelo dos (mayor X_P , producto de decaimiento de microorganismos): lodo que fue aerobicamente digerido durante 3 meses Lodo de la Planta Toluca Norte (presencia adicional de X_I , materia orgánica inerte). Para las pruebas de ozonación de lodo se determinaron las dosis y concentración de O_3 correspondiente a 1, 2, 3, 4 y 5 minutos de tratamiento; utilizando el Método Colorimétrico Índigo y el Método Yodométrico, el segundo método se utilizó para determinar la concentración de O_3 en el gas que proviene del generador con un medidor en línea el cual permitió cuantificar O_3 aplicado y capturado en dos trampas de KI al 2%. Para los tres tipos de lodo y para los diferentes tratamientos con y sin O_3 (T0, T1, T2, T3, T4 y T5), se determinaron los siguientes parámetros físico-químicos como: temperatura, conductividad eléctrica, turbidez, y potencial de hidrógeno (pH); además se determinaron: SST, SSV, DQO total y DQO soluble. Se incluyeron análisis como diámetro de partícula, fosfatos y respirometría para los tratamientos con O_3 . La concentración de O_3 incrementó de acuerdo al tiempo de tratamiento. Con la ozonación directa el lodo modelo II- X_P presentó una concentración específica de 0.04 a 0.22 g O_3 /g SSV y el lodo de la PTN- X_I tuvo valores de 0.08 a 0.27 g O_3 /g SSV. El ozono causó lisis celular y la cantidad de sólidos disminuyó al aumentar la concentración de O_3 , en los tres tipos de lodo. La DQO soluble y la turbidez aumentaron de acuerdo a la concentración de O_3 en los tres tipos de lodo ya que, la desintegración y la solubilización de los flóculos generan un gran número de micropartículas dispersas en el

sobrenadante, además de sustancias orgánicas solubles. La DQO soluble alcanzó hasta 700% de su valor inicial en los tres tipos de lodo. El tamaño de partícula no se vio afectado por el proceso de ozonación. La actividad biológica para el LMI- X_H fue mayor en los tratamientos T0 y T1, debido a que la cantidad de bacterias fue mayor y el alimento estimuló el crecimiento de estas; sin embargo para el T3 y T5 la actividad inicio horas más tarde porque el ozono eliminó una gran cantidad de bacterias y las que sobrevivieron a las dosis de O_3 tuvieron actividad, se alimentaron y crecieron. Para el LMII- X_P la actividad biológica inicial fue nula debido a que el lodo ya estaba digerido y a las dosis de O_3 ; sin embargo, horas después se presentó actividad y crecimiento microbiano. La actividad biológica para el lodo de la PTN- X_I inició horas después de la aplicación de ozono.

ABSTRACT

A big mass of sludge is produced from aerobic biological wastewater treatment processes, which has become a serious problem. The treatment and elimination of excess sludge produced by this process requires high cost which can represent up to 65% of the total of the plant's operation. In order to reduce excess solids production, new disintegration processes were developed, which involve mechanical, chemical, thermal and biological methods.

The overall objective of this study was to characterize and optimize a sludge minimizing process by ozonation in a Batch reactor with three kinds of biological solids: Sludge model I- X_H , Sludge model II- X_P and sludge III North Toluca Plant- X_I . The sludge model one (mainly X_H , heterotrophic microorganisms) was cultivated in CIRA laboratory where were installed two sequential batch reactors fed with synthetic wastewater, working with a solid retention time of 15 days and having a volume of 30 L. The waste activated sludge (WAS) from those two reactors was collected and submitted to the ozonation treatment. The sludge model two (mainly X_P endogenous products from decay) was obtained by aerobically digesting an aliquot of sludge I for 3 months. Sludge III was from the local municipal wastewater treatment plant (WWTP) of Toluca (presence of X_I , particulate inert organic matter, additionally to X_H and X_P).

For the ozonation tests, first, the ozone concentrations and doses were determined for each of the 1, 2, 3, 4 and 5 minutes of treatment, by using the Indigo colorimetric, as well as the Iodometric Method. An on-line O_3 gas meter was used to determinate the O_3 concentration in the gas which comes from the ozone generator, which allowed quantifying the applied mass. The O_3 escaping from the ozonation reactor was captured in two bottles that were filed with KI at 2%, and measured by ozone Iodometric method. For the three types of sludge and for the different treatments with or without O_3 (T0, T1, T2, T3, T4 and T5), the following physicochemical parameters were determined: temperature, electrical conductivity, turbidity and hydrogen potential (pH); also were determined the SST, SSV, total COD and soluble COD. Some other measurements such as particle size distribution phosphates concentrations and respirometry (biomass activity) were performed in the O_3 treated sludge samples.

The O_3 concentrations increased with the treatment times. With direct ozonation, the sludge model II- X_P presented a specific concentration from 0.04 to 0.22 g O_3 / g VSS, compared to 0.08 - 0.27 g O_3 / g VSS for the PTN- X_I solids. Ozone caused cell lysis and

the amount of TSS decreased while the O_3 concentrations were increased, for the three types of sludge. The soluble COD and turbidity also increased according to the O_3 concentrations in the three types of sludge, due to the disintegration and solubilization of the flocs, which generate a large number of microparticles dispersed in the supernatant, as well as soluble organic substances. The soluble COD reaches up to > 700% of its beginning value, for the three kinds of biological solids treated. The particle size was not affected by the ozonation process. The biological activity for the LMI - X_H (sludge I) was greater in the treatments T0 and T1, because the amount of bacteria was higher; during the activity tests, adding food (acetate) to the remaining microorganisms of T0 and T1 stimulated the growth of those bacteria; however after the T3 and T5 O_3 -treatments, the activity began hours later because ozone destroyed a large amount of bacteria and the survived microorganisms showed a much more high growth velocity compared to T0. For the LMII- X_P , the initial biological activity was almost nil because the sludge was digested for 3 months, additionally to the O_3 doses received after; however, even so, many hours later, microbial growth was detected. Meanwhile, the biological activity in the O_3 -treated PTN- X_I sludge began hours after the ozone application. Apparently, the ozonation process promoted the selection of fast growing bacteria.

INDICE GENERAL

ABREVIATURAS.....	I
RESUMEN.....	..II
ABSTRACTIV
INTRODUCCIÓN.....	1
1. ANTECEDENTES	4
1.1. Características del ozono	4
1.2. El proceso de ozonación como medio de minimización de lodos	7
1.3. Rango en la dosis de ozono y su eficiencia	9
1.4. Efecto del ozono sobre los componentes del lodo (X_H y X_P)	10
2. PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN	13
2.1. Justificación contextual y científica.....	13
2.2. Hipótesis.....	14
2.3. Objetivos	15
2.3.1. Objetivo general.....	15
2.3.2. Objetivos particulares	15
3. METODOLOGÍA	17
3.1. Tipos de lodo utilizados en tratamiento con O_3	17
3.1.1. Cultivo del lodo modelo I (mayor X_H)	18
3.1.2. Producción del lodo modelo II (mayor X_P : decaimiento de microorganismos autótrofos y heterótrofos)	20
3.1.3. Lodo III, Planta Toluca Norte- X_i (materia orgánica inerte)	20
3.2. Tratamiento con ozono	21
3.2.1. Ozonación indirecta	23
3.2.2. Método Colorimétrico Índigo.....	24
3.2.3. Concentración de ozono en el gas	25
3.2.4. Método Yodométrico	27
3.3. Análisis de parámetros fisicoquímicos.....	28
4. RESULTADOS.....	32
4.1. Seguimiento de reactores (producción del lodo modelo)	32
4.2. Ozonación indirecta	36
4.3. Ozonación directa	39

4.3.1.	Concentración de O ₃	39
4.4.	Lodo Modelo I-X _H	40
4.4.1.	Parámetros fisicoquímicos LMI-XH	40
4.4.2.	Sólidos suspendidos	42
4.4.3.	Demanda Química de Oxígeno (DQO).....	45
4.4.4.	Fosfato.....	47
4.4.5.	Tamaño de partícula.....	49
4.4.6.	Respirometría.....	50
4.5.	Lodo modelo II-X _P	53
4.5.1.	Sólidos suspendidos	54
4.5.2.	Demanda Química de Oxígeno.....	56
4.5.3.	Fosfatos	59
4.5.4.	Tamaño de partícula.....	60
4.5.5.	Respirometría.....	61
4.6.	Lodo de la Planta Toluca Norte-X _I	63
4.6.1.	Sólidos suspendidos	64
4.6.2.	Demanda química de oxígeno (DQO).....	66
4.6.3.	5.6.3. Fosfatos	68
4.6.4.	Diámetro de partícula	69
4.6.5.	Respirometría.....	70
5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	72
5.1.	Conclusiones.....	72
5.2.	Recomendaciones	73
6.	REFERENCIAS.....	74
7.	ANEXOS	77

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Aplicación de ozono en dos diferentes etapas para la reducción de lodos (Chu et al. 2009).....	8
Figura 2. Esquema simplificado de los principales mecanismos que conducen a la acumulación de lodos orgánicos cuando el tratamiento de agua residual es mediante una ruta biológica ASM1 (Paul y Debellebontaine, 2007).	10
Figura 3. Estructura de los tres tipos de lodo utilizados en ozonación: a) lodo modelo I-X _H , b) lodo modelo II-X _P y c) lodo de la Planta Toluca Norte-X _I	17
Figura 4. Producción del lodo modelo I-X _H . Reactor A (lado derecho) y reactor B (lado izquierdo).....	19
Figura 5. Planta Toluca Norte (reactores).	20
Figura 6. Generación de ozono residual en un reactor de vidrio, conectado a trampas de KI al 2% y a un destructor de ozono.	21
Figura 7. Cinco diferentes dosis de ozono (g O ₃ / g SST) aplicadas a 100 mL de licor mixto del lodo modelo I-X _H	23
Figura 8. Reactivo índigo II; se consideró como blanco (lado izquierdo) y reactivo índigo II con la muestra uno de agua ozonada (lado derecho), por triplicado cada uno.....	24
Figura 9. Procedimiento para determinar la concentración de O ₃ en cada tratamiento (T1, T2, T3, T4 y T5) y tipo de lodo: X _H , X _P y X _I (Rakness et al. 1996).	25
Figura 10. Equipo de respirometría para evaluar la actividad biológica.....	29
Figura 11. SST, SSV, SSF para cada uno de los tratamientos en el lodo modelo uno.....	37
Figura 12. DQO total, soluble y particulada para cada uno de los tratamientos en el lodo modelo uno.....	38
Figura 16. Parámetros fisicoquímicos del lodo modelo I-X _H con diferentes dosis de O ₃ ..	41
Figura 17. Sólidos suspendidos del lodo modelo I-X _H antes y después de cinco tratamientos con O ₃	43
Figura 18. Sólidos suspendidos del lodo modelo I-X _H (segunda prueba) a cinco diferentes dosis de O ₃	44
Figura 19. DQO total, soluble y particulada del lodo modelo I-X _H a cinco diferentes dosis de O ₃	45
Figura 20. DQO soluble, total y particulada con cinco tratamientos de O ₃ y un blanco para el lodo modelo I-X _H	46

Figura 21. Fósforo total y Ortofosfatos para el lodo modelo I-X _H antes y después de las diferentes dosis de O ₃	47
Figura 22. Fósforo total y Ortofosfatos para el lodo modelo I- X _H	48
Figura 23. Diámetro de partícula del lodo modelo I-X _H , ozonado a diferentes tratamientos.	49
Figura 24. Patrón on-off para los tratamientos T0, T1, T3 y T5 del lodo modelo I-X _H	50
Figura 25. Actividad biológica (rO ₂) de cuatro tratamientos (T0, T1, T3 y T5) del lodo modelo I-X _H	51
Figura 26. rO ₂ máxima para el lodo modelo I-X _H	52
Figura 27. pH, conductividad eléctrica y turbiedad del lodo modelo II-X _P antes y después de la aplicación de O ₃	53
Figura 28. SSV, SSV y SSF del lodo modelo II-X _P para cinco tratamientos (T0: blanco, T1: 1min, T2: 2min, T3: 3 min, T4: 4min, T5: 5 min).....	54
Figura 29. Sólidos suspendidos a cinco diferentes dosis de O ₃	55
Figura 30. DQO total, soluble y particulado para el lodo modelo II-X _P antes y después de cuatro tratamientos de ozono (T1: 1min, T2: 2 min, T3: 3min, T4: 4min y T5: 5 min).....	57
Figura 31. Demanda química de oxígeno, segunda prueba para el lodo modelo II-X _P	58
Figura 32. Fósforo total y Ortofosfatos para el lodo modelo II-X _P antes y después de ozonación.	59
Figura 33. Diámetro de partícula para el lodo modelo II-X _P , antes y después de diferentes tratamientos de O ₃	60
Figura 34. Actividad biológica para el lodo modelo II-X _P . Modelo F/M alto (mucha comida y mínima cantidad de bacterias).	61
Figura 35. rO ₂ máxima para el lodo modelo II-X _P	62
Figura 36. pH, conductividad y turbiedad del lodo de la PTN-X _I a diferentes dosis de O ₃ . 63	
Figura 37. Sólidos suspendidos para la PTN-X _I , antes y después de cinco tratamientos de O ₃	64
Figura 38. Sólidos suspendidos para la PTN-X _I	65
Figura 39. DQO total, soluble y particulada de la PTN-X _I antes y después de cinco diferentes dosis de O ₃	66
Figura 40. Demanda Química de Oxígeno antes y después de la aplicación de O ₃ para la PTN-X _I	67
Figura 41. Fósforo total y Ortofosfatos para una muestra de la PTN-X _I a cinco diferentes tratamientos de O ₃	68

Figura 42. Diámetro de partícula para el lodo de la PTN- X_1 antes y después de diferentes tratamientos de O_3	69
Figura 43. rO_2 del lodo de la PTN- X_1	70
Figura 44. rO_2 máximo inicial en % y en mg/L.h para el lodo de la PTN- X_1	71

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Elementos traza y componentes principales para la elaboración de agua residual sintética concentrada (garrafón de 20 L).....	19
Tabla 2. Ozonación indirecta, dosis de 10, 20, 30, 40 y 50 mg O ₃ /mg SST aplicadas al lodo modelo I-X _H	23
Tabla 3. Temperatura, pH y conductividad eléctrica promedio del efluente para los reactores A y B.	33
Tabla 4. DQO total, soluble y particulada del licor mixto para los reactores A y B.....	34
Tabla 5. SST, SSV y SSF del lodo modelo I-X _H para el reactor A y B.	35
Tabla 6. Concentración inicial de ozono	36
Tabla 7. SST, SSV y SSF del licor mixto a diferentes dosis de ozono.	36
Tabla 8. DQO total, DQO soluble y DQO particulada en diferentes tratamientos con ozono.....	37
Tabla 9. Concentración específica de O ₃ (g O ₃ /g SSV)	39
Tabla 10. Promedio de los parámetros fisicoquímicos del lodo modelo I-X _H con diferentes tratamientos de O ₃	41
Tabla 11. Sólidos suspendidos y porcentaje de cambio para el lodo modelo I-X _H a cinco diferentes tratamientos de O ₃	42
Tabla 12. Segunda prueba de sólidos suspendidos para el lodo modelo I-X _H	43
Tabla 13. Demanda Química de Oxígeno del lodo modelo I-X _H para un tratamiento blanco (T0) y cinco diferentes dosis de O ₃	45
Tabla 14. Segunda prueba de DQO para el lodo modelo I-X _H	46
Tabla 15. Fósforo total y Ortofosfatos para el LMI-X _H	47
Tabla 16. Fosfato para el lodo modelo I-X _H	48
Tabla 17. Porcentaje acumulativo de diámetro de partícula (10, 25, 50, 75 y 90 %) para el lodo modelo I-X _H	49
Tabla 18. rO ₂ inicial y su porcentaje para el T0, T1, T3 y T5 del lodo modelo I-X _H	52
Tabla 19. Parámetros fisicoquímicos del lodo modelo II-X _p	53
Tabla 20. Porcentaje de cambio de sólidos suspendidos del lodo modelo II-X _p	54
Tabla 21. Sólidos suspendidos a cinco diferentes dosis de O ₃ para el lodo modelo II- X _p . 55	
Tabla 22. DQO total, soluble y particulada del lodo modelo II-X _p	56
Tabla 23. Segunda prueba de DQO total, soluble y particulada para el lodo modelo II-X _p	57

Tabla 24. Fosfatos para el lodo modelo II-X _P con cinco tratamientos de O ₃	59
Tabla 25. Porcentaje acumulativo del diámetro de partícula para el lodo modelo II-X _P , a cinco diferentes dosis de O ₃	60
Tabla 26. rO ₂ inicial y su porcentaje para el T0, T1, T3 y T5 del lodo modelo I-X _H	61
Tabla 27. Parámetros fisicoquímicos de la Planta Toluca Norte-X _I	63
Tabla 28. Sólidos suspendidos para la PTN-X _I , el porcentaje de cambio entre los diferentes tratamientos mostró una disminución en la cantidad de sólidos.	64
Tabla 29. Segunda prueba de sólidos suspendidos para la PTN-X _I	65
Tabla 30. Demanda química de oxígeno para el lodo de la PTN-X _I	66
Tabla 31. Segunda prueba de DQO para cinco diferentes tratamientos de O ₃ de la PTN-X _I	67
Tabla 32. Fosfatos para la PTN-X _I con cinco tratamientos de O ₃	68
Tabla 33. Porcentaje acumulativo de diámetro de partícula para el lodo de la PTN-X _I	69
Tabla 34. rO ₂ máximo antes y después de ozonación	70

INTRODUCCIÓN

INTRODUCCIÓN

Una gran cantidad de lodo es producido a partir de procesos de tratamiento biológico aerobio de aguas residuales, lo cual se ha convertido en un serio problema. El tratamiento y la eliminación del exceso de lodo producido a partir de este proceso requiere de altos costos, que pueden representar hasta 65% del total de operación de la planta (Liu, 2003; Zhang et al. 2009).

Dentro de las variantes de los procesos químicos, existen tratamientos de oxidación como la cloración, el peróxido de hidrógeno (H_2O_2) y la ozonación que pueden ser utilizados para reducir la producción de lodos (Marco et al., 1997; Saby et al., 2002; Liu, 2003; Wei et al., 2003). El proceso de ozonación de lodos es generalmente descrito por la secuencia de reacciones en descomposición de la desintegración de flóculos, la solubilización y la subsiguiente oxidación de los compuestos orgánicos a dióxido de carbono, agua, iones y energía (mineralización) (Ahn et al. 2002; Lee et al. 2005).

El sistema de lodo activado combinado con ozonación (AS- O_3) es una solución eficiente para la reducción de lodo desde su origen (Deleris, 2001; Chu et al., 2009), que tiene un alto costo cuando se compara con un tratamiento de lodo convencional y con trenes de eliminación (Bohler y Siegrist 2004; Nagare et al., 2008). Sin embargo; Chu et al. (2009) mencionaron que las dosis de ozono deben ser de 0.03 y 0.05 g O_3 /g SST, para lograr un balance entre la eficiencia en la reducción de lodos y el costo.

Las aguas residuales, además de tener compuestos minerales, presentan varias fracciones de materia orgánica: *DQO soluble*, en forma biodegradable (S_s), o en forma no biodegradable (S_i) y *DQO particulada*, en forma biodegradable (X_s) y una parte refractaria a la biodegradación (X_i) (Paul y Debellefontaine, 2007). En un licor mixto como el lodo activado, la acción del ozono puede ser dirigida a cualquiera de los dos compuestos recalcitrantes (particulados o solubles). Se ha reportado, que primero el ozono puede reaccionar con la fracción soluble del lodo activado y después ataca la fracción particulada (Cesbron et al., 2003).

Los procesos biológicos utilizan modelos matemáticos en el campo de tratamiento de aguas residuales. El desarrollo de un modelo matemático sirve para describir el

comportamiento actual y previsible de un proceso mediante bases teóricas (Jiménez, 2010). Uno de los modelos más conocidos y más utilizados para diseñar las plantas de tratamiento por lodos activados es el de MacCarty y Lawrence (1970), el cual es una simplificación utilizada para diseñar plantas, considerando un régimen estacionario (DBO y DQO total son parámetros de caracterización).

Esta tesis forma parte de un proyecto para obtener estrategias biológicas y fisicoquímicas para reducir la cantidad de lodo generado en el proceso de lodo activado. Y el objetivo general de este estudio es la reducción de lodo por ozonación, utilizando tres tipos de lodo considerados como modelos.

CAPITULO I: ANTECEDENTES

1. ANTECEDENTES

El lodo activado (AS) es un proceso de aplicación universal para el tratamiento de aguas residuales, el cual tiene alta eficacia, sin embargo; el proceso genera un exceso de lodo y esto se ha convertido en una carga cada vez mayor para el medio, especialmente en centros urbanos densamente poblados (Weemaes et al., 2000; Park et al., 2003; Bougrier et al., 2007; Chu et al., 2009a). Por lo tanto, la reducción en el exceso de producción de lodo es uno de los retos en el tratamiento biológico de aguas residuales (Wei et al., 2003; Perez-Elvira et al., 2006; Chu et al., 2008).

1.1. Características del ozono

El ozono puede oxidar un amplio rango de compuestos orgánicos e inorgánicos. Tiene una fuerte actividad lítica celular y puede matar a los microorganismos que se encuentren en lodos activados y además oxidar las sustancias orgánicas liberadas por las células (Cui y Jahng 2004; Saktaywin et al. 2005).

El ozono es aproximadamente diez veces más soluble en agua que en oxígeno y esto permite tener concentraciones más altas de ozono por saturación de agua con una mezcla de ozono/oxígeno a partir de un generador que todavía es rico en oxígeno.

La solubilidad del ozono depende fuertemente de la temperatura y es aproximadamente dos veces mayor a 0°C que a temperatura ambiente. En soluciones básicas, el ozono es muy inestable. Esto se debe a la formación de radicales hidroxilo ($\cdot\text{OH}$) por (OH^-) y de la reacción de $\cdot\text{OH}$ con ozono. Esta reacción procede incluso en soluciones neutras, donde la concentración de OH^- es muy baja (1×10^{-7} M). La acidificación y la adición de secuestradores de $\cdot\text{OH}$ tales como el bicarbonato incrementan la estabilidad del ozono en soluciones acuosas, (von Sonntag y von Gunten, 2012); ya que aumenta la vida media del ozono.

Dos de los oxidantes químicos más fuertes son el ozono ($E^\circ = +1.03$) y los radicales hidroxilo ($E^\circ = +2.31$). El ozono puede reaccionar directamente con un compuesto o éste puede producir radicales hidroxilo que después reaccione. Los radicales hidroxilo también se pueden producir en otras vías. Los procesos de oxidación avanzada son técnicas alternativas para catalizar la producción de estos radicales.

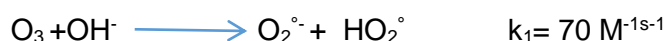
La oxidación de ozono es una de las técnicas de oxidación avanzada usadas comúnmente. A través de la implementación de la ozonación de lodo, las estructuras orgánicas refractarias son oxidadas y convertidas a compuestos de bajo peso molecular biodegradables. Básicamente los procesos de desintegración están acoplados mediante la aplicación de ozono para romper las paredes celulares. Así, las paredes celulares son fragmentadas y los compuestos intracelulares son liberados (Vranitzky y Lahnsteiner, 2005).

El ozono puede reaccionar con sustancias en dos diferentes vías, la indirecta y la directa. Estas dos vías de reacción llevan a diferentes productos de oxidación y son controlados por diferentes tipos de cinéticas (Gottschalk et al. 2010).

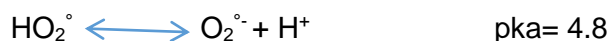
Reacción indirecta: esta vía implica radicales, los cuales son moléculas que tienen un electrón no apareado. El mecanismo en cadena de radicales ozono puede ser dividido en tres diferentes pasos: inicio, propagación en cadena y terminación.

El primer paso es el decaimiento de ozono, acelerado por iniciadores como OH⁻ para formar oxidantes secundarios tales como radicales hidroxilo (OH[°]).

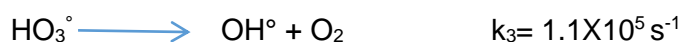
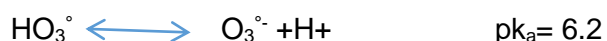
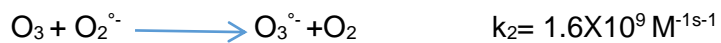
Inicio: la reacción entre iones hidroxilo y ozono permite la formación de un anión superóxido O₂^{°-} y un radical hidroperoxilo HO₂[°]



El radical hiperoxilo está en equilibrio ácido-base con el anión superóxido



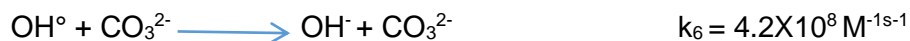
Reacción en cadena de radicales: el anión superóxido O₂^{°-} después reacciona con ozono para formar un anión ozónido (O₃^{°-}). Es se descompone inmediatamente vía trióxido de hidrógeno HO₃[°] a un radical OH[°].



El OH[°] puede reaccionar con ozono en la siguiente vía



Etapa de terminación: algunas sustancias orgánicas e inorgánicas reaccionan con OH° para formar radicales secundarios que no producen radicales superóxido $\text{HO}_2^\circ/\text{O}_2^\circ$. Estos inhibidores (secuestradores) generalmente terminan la reacción en cadena e inhiben el decaimiento de ozono



Otra posibilidad para terminar la reacción en cadena es la reacción de dos radicales

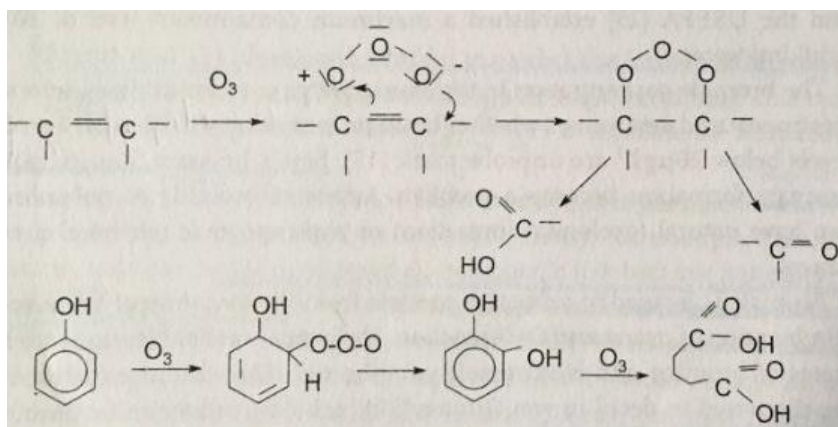


Reacción total: muestra que tres moléculas de ozono producen dos OH°



Reacción directa: La oxidación directa ($\text{M} + \text{O}_3$) de componentes orgánicos por ozono es una reacción selectiva con constantes de velocidad de una reacción lenta. La molécula del ozono reacciona con un enlace insaturado debido a esta estructura dipolar y conduce a una división del enlace, el cual se basó en el mecanismo llamado Criegee (soluciones acuosas).

El ozono puede reaccionar rápidamente con ciertos tipos de compuestos aromáticos y alifáticos, por ejemplo, estos llevan sustituyentes de electrones de suministro tales como grupos amino e hidroxilo. Si no hay tales sustituyentes la tasa de ozonación es mucho más baja (Gottschalk et al. 2010).



1.2. El proceso de ozonación como medio de minimización de lodos

La ozonación es aplicada en plantas de tratamiento de agua potable para desinfección, oxidación de materia orgánica natural, degradación de micro-contaminantes orgánicos y para mejorar la calidad del color y el sabor (von Gunten, 2003).

En tratamiento de lodos, la solubilización de sólidos por ozono es el resultado de la lisis celular y de la reducción del peso molecular de las fracciones particuladas (Yan et al., 2009). La eficiencia de la solubilización por ozonación es afectada por muchos parámetros tales como: la naturaleza de los lodos, la eficiencia de transferencia del ozono (continua o intermitente), las dosis aplicadas, la concentración de ozono en la fase gaseosa, la vía de reacción del ozono, la interferencia de compuestos solubles inicialmente presentes, la distribución de las partículas, el tamaño de los flóculos y de las reacciones con partículas o materia orgánica disuelta actuando como secuestradores (Labelle et al. 2011).

El ozono puede ser aplicado en diferentes etapas del tratamiento de aguas residuales. En la línea de recirculación de lodos activados [ruta I] o en la línea de digestión de lodos [ruta II] (figura 1). Para la ruta I, un sistema combinado con un proceso de lodo activado y ozonación ha sido desarrollado exitosamente para reducir la producción de lodos en exceso mediante la inducción del crecimiento críptico. Una fracción de lodo reciclado pasa a través del proceso de ozonación y su fracción solubilizada se descompone durante el tratamiento biológico. Para la ruta II, la ozonación puede ser adoptada como pre-tratamiento antes de la digestión aerobia/anaerobia, o como un post-tratamiento de la digestión de lodos (Chu et al., 2009).

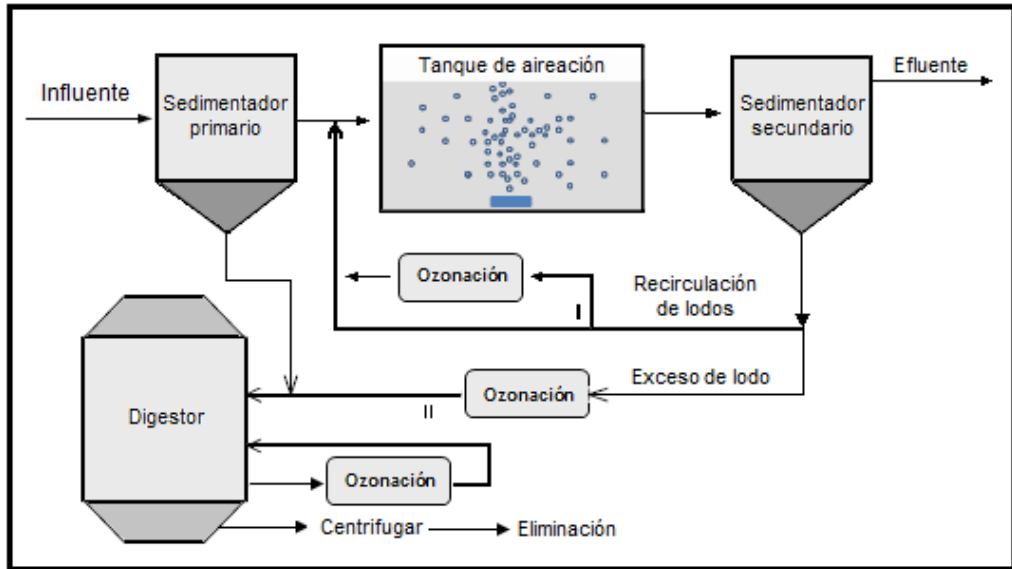


Figura 1. Aplicación de ozono en dos diferentes etapas para la reducción de lodos (Chu et al. 2009).

1.3. Rango en la dosis de ozono y su eficiencia

Huysmans et al. (2001) realizaron una ozonación intermitente de dos tercios de lodo reciclado, dos veces a la semana en un reactor batch secuencial (RBS) a escala de laboratorio con una dosis de ozono de 0.01 a 0.03 g O₃/g SST y con una concentración de ozono de 33 mg L⁻¹ en la fase de gas, obteniendo una disminución en la producción de lodos de alrededor de 50%; y se observó una ligera disminución en la calidad del efluente durante un periodo de 33 días.

Richardson et al. (2009) realizaron un estudio con O₃ en un reactor de secuenciación Batch para la reducción de sólidos residuales. Los resultados indicaron que la aplicación de bajas dosis de ozono con tres ciclos por día (un poco menos de dos horas por ciclo) redujeron la producción de masa de lodos residuales a un promedio de 29%, aplicando 0.0106 mg O₃/mg SST.h.

Después de la ozonación, las características de los lodos cambian. La desintegración y la solubilización de flóculos generan un gran número de micro-partículas dispersas en el sobrenadante, además de sustancias orgánicas solubles. El destino de los lodos después de la ozonación es examinado por cuatro tipos de DQO (DQO total, DQO soluble, micro-partículas suspendidas de DQO y DQO residual).

1.4. Efecto del ozono sobre los componentes del lodo (X_H y X_P)

De acuerdo a la figura 2, mediante la simplificación de los procesos biológicos complejos, se puede considerar que durante la ozonación una parte de la biomasa activa (X_H) entra en lisis, produciendo X_S y X_P ; después la fracción particulada X_S es hidrolizada a soluble S_S , antes de la bio-asimilación. El crecimiento biológico produce nuevas células de biomasa activa (X_H), que consiste principalmente de organismos heterótrofos X_H . (Paul y Debellebontaine, 2007). Así, los lodos producidos son una combinación compleja que resulta de la acumulación de la biomasa neta activa X_H y de las fracciones refractarias X_I y X_P . Es importante observar que las fracciones X_I y X_P pueden ser más grandes que las fracciones X_H . Los fenómenos anteriores son considerados en el modelo ASM1 (Henze et al. 1987), el cual podría ser modificado para incluir los efectos de la ozonación en los modelos (hidrólisis de X_I y X_P).

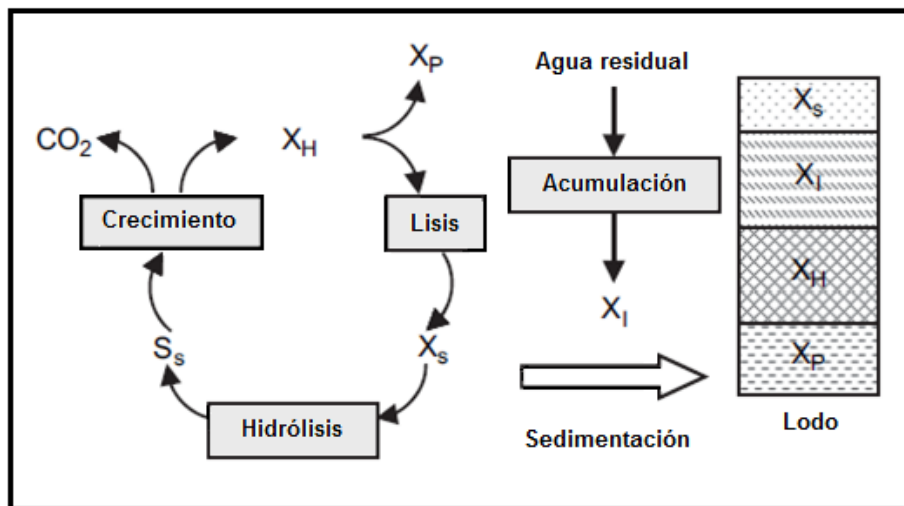


Figura 2. Esquema simplificado de los principales mecanismos que conducen a la acumulación de lodos orgánicos cuando el tratamiento de agua residual es mediante una ruta biológica ASM1 (Paul y Debellebontaine, 2007).

Labelle et al. 2011 determinaron la biodegradabilidad de residuos endógenos ($X_{U,E}$), después de la solubilización mediante ozono, el efecto del ozono en la biomasa activa (X_H) y el rendimiento de solubilización de estas dos fracciones principales de lodo. Por lo tanto, cultivaron un lodo sintético y prepararon la parte endógena del lodo.

Lodo sintético: El lodo fresco fue tomado de una escala piloto (215 L) de un biorreactor de membrana alimentado con acetato como único recurso de carbono y operado bajo condiciones de estado estacionario por un periodo de 250 días.

Residuo endógeno: Los lodos frescos fueron digeridos aeróbicamente en un tanque mezclado de 18 L protegido de la luz por 40 días para convertir la biomasa activa a residuo endógeno. La pared del tanque fue cepillado diariamente y agua fue adicionada de 2 a 3 tiempos por semana para balancear la evaporación.

La solución estándar de ozono fue preparada en una columna de difusión de hielo sumergido por burbujeo de ozono en agua antes de la inyección dentro de las muestras de lodo. El ozono generado fue alimentado con oxígeno. La concentración de ozono en la solución estándar (0.5 a 1 mM) fue determinada mediante el método índigo carmín. La dosis de ozono aplicada fue expresada como la proporción de ozono transferido a concentración total inicial (CODi).

Como resultados obtuvieron que la biodegradabilidad del residuo endógeno ozonado ($X_{U,E}$) incrementó linealmente ($r^2=.95$) con una dosis de 450 mg O_3 /g DQO y obtuvieron un grado de solubilización de 95% ($r^2=0.98$). La biodegradabilidad máxima fue de 0.27 g DBO_5 /g DQO. Con respecto a la solubilización del residuo endógeno el O_3 causó en la biomasa activa con una eficiencia de 40 g X_H /g O_3 y 80% de células lisadas como materia particulada.

El rendimiento de solubilización de residuos endógenos fue de 1.9 a 3.6 g DQO/ g O_3 y proporcional a la dosis entre 0 y 450 mg O_3 / g DQO y para el lodo fresco fue de 9.6 ± 3.3 g DQO/g O_3 con DQO solubilizado compuesto principalmente de polisacáridos y proteínas.

CAPITULO II:
PLANTEAMIENTO DE LA
INVESTIGACIÓN
(JUSTIFICACIÓN, HIPÓTESIS Y
OBJETIVOS)

2. PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN

2.1. Justificación contextual y científica

Durante años recientes, han surgido dos enfoques con respecto a la biomasa producida en plantas de tratamiento: 1) incrementar el valor de los biosólidos para beneficiar su reuso y 2) reducir la cantidad de biomasa producida. Debido al incremento de biosólidos, no hay mercados suficientes para hacer del reuso una alternativa atractiva y uno de los mayores problemas que enfrenta la mayoría de las plantas de tratamiento es la disposición de las cantidades de biosólidos residuales y los volúmenes de biomasa generados han ido incrementando (Richardson et al. 2009).

Por lo tanto, el desarrollo de procesos de mineralización que reduce la cantidad de lodo desde la fuente, deben considerarse como una prioridad.

Entre los diferentes pre-tratamientos físicos y químicos, el ozono ha demostrado ser una alternativa eficiente para la minimización de lodos activados; sin embargo, su uso masivo es frenado por los costos de las dosis de O_3 durante el proceso y el impacto del oxidante sobre la actividad de la biomasa, por lo tanto; en este trabajo se utilizarán diferentes dosis de O_3 para valorar la eficiencia alcanzable y tener las bases para su modelación en un futuro. Además la literatura menciona que se puede alcanzar un equilibrio en cuanto a bajas dosis de O_3 (0.01-0.05 mg O_3 / mg SST) y una reducción de lodo de 50% (Huysmans et al. 2001).

2.2. Hipótesis

Cuando se incrementa la dosis de O_3 ésta afecta la solubilización de la DQO, sólidos, pH, tamaño de partícula y la fracción de biomasa activa; en función del tipo de lodo (X_H , X_P y X_I).

2.3. Objetivos

2.3.1. Objetivo general

- Caracterizar y optimizar un proceso de minimización de lodo por ozonación en un reactor Batch con tres tipos de lodo: lodo modelo I- X_H , lodo modelo II $-X_P$ y lodo modelo III Planta Toluca Norte- X_I

2.3.2. Objetivos particulares

- Evaluar la relación entre la dosis de O_3 y la reducción de masa de sólidos, para determinar la cantidad de ozono óptima y económicamente factible para generar una disminución en la producción de lodos activados en un reactor Batch para tres tipos de lodos.
- Determinar el efecto de las diferentes dosis de O_3 sobre la actividad de los microorganismos por respirometría
- Determinar las diferentes fracciones de DQO_{total} , $DQO_{mineralizada}$, $DQO_{soluble}$, $DQO_{particulada}$, fósforo antes y después de cada ozonación.
- Evaluar el cambio en las características de lodo (pH, tamaño de los flóculos) tratado con O_3 .

CAPITULO III: METODOLOGÍA

3. METODOLOGÍA

3.1. Tipos de lodo utilizados en tratamiento con O₃

El proyecto se realizó con tres tipos de lodo:

- a) **Lodo modelo uno** (mayor X_H , microorganismos heterótrofos): En el laboratorio de Calidad del Agua del Centro Interamericano de Recursos del Agua (CIRA) se instalaron dos reactores (A y B), los cuales se alimentaron con agua sintética, funcionando con un tiempo de retención celular (TRC) de 15 días y teniendo un volumen útil de 30 L. Se recolectó una purga de cuatro litros, la cual se mezcló y además se agregó 1.2 L de agua de la llave para tener una cantidad suficiente de muestra.
- b) **Lodo modelo dos** (mayor X_P decaimiento de microorganismos heterótrofos): lodo digerido durante tres meses (purga del reactor A y B: lodo modelo I- X_H), con aireación diaria. La mezcla de las purgas se colocó en un garrafón con aireación continua, cada semana se realizó DQO total y soluble para monitorear la calidad del lodo.
- c) **Lodo de la Planta Toluca Norte** (presencia de X_I , materia inerte): se tomó una muestra de agua residual (aproximadamente 20 L) a la salida de los reactores. El agua se llevó al laboratorio y se eliminó basura y material como arena; para tener mayor limpieza y realizar los análisis de ozonación.

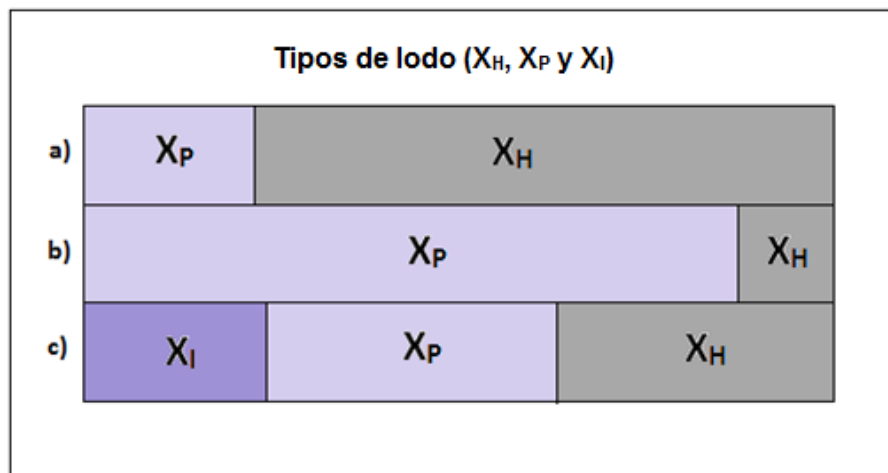


Figura 3. Estructura de los tres tipos de lodo utilizados en ozonación: a) lodo modelo I- X_H , b) lodo modelo II- X_P y c) lodo de la Planta Toluca Norte- X_I .

3.1.1. Cultivo del lodo modelo I (mayor XH)

Los reactores (A y B) se operaron como un Batch Secuencial (RBS), en los cuales el agua residual se mezcla con un lodo biológico en un medio aireado; el proceso combina en un mismo tanque: homogenización, aireación y clarificación. La alimentación se realizó con agua sintética, la cual presentó 500 mg/L de DQO después de una dilución (influyente) y se elaboró con elementos traza y componentes principales (tabla 1). Una vez por semana se prepararon dos garrafones de 20 L de agua residual sintética. Los elementos traza se mezclaron con agua de la llave y se aforaron en un matraz volumétrico de 1 L. Se pesó la cantidad de componentes principales mostrado en la tabla 1 y se disolvieron en cuatro litros de agua de la llave; los cuatro litros de macroelementos y 600 mL de elementos traza se agregaron y se aforaron en un garrafón de 20 L.

Cada mañana, se tomó una purga de dos litros de cada reactor y posteriormente el resto del licor mixto se dejó sedimentar durante una hora para quitar el sobrenadante (aproximadamente 18 L) en cada uno, posteriormente se alimentó a los reactores con dos litros de agua sintética, la cual se encuentra conservada en un refrigerador

Durante la alimentación; los reactores permanecen en una fase anaerobia y en continuo mezclado durante una hora, para que bacterias floculantes se alimentaran de una forma eficiente. Al finalizar esta etapa se agregó agua de la llave (cantidad retirada de sobrenadante) y se conectaron las bombas de aireación para que los reactores tuvieran una etapa aerobia hasta el día siguiente, y se cubrieron con una pieza de acrílico para evitar alguna contaminación externa (figura 4).

Para llevar un control en el funcionamiento de los reactores, una vez a la semana se evaluaron los siguientes parámetros: temperatura, pH, conductividad eléctrica, sólidos suspendidos totales (SST), sólidos suspendidos volátiles (SSV), sólidos suspendidos fijos (SSF), DQO total y DQO soluble. Para el efluente sólo se determinó SST, SSV, SSF, DQO total y soluble. Sin embargo, para la prueba de ozonación se realizó el análisis de diámetro de partícula.

Tabla 1. Elementos traza y componentes principales para la elaboración de agua residual sintética concentrada (garrafón de 20 L).

Componentes principales	Composición	g / 20L
Fosfato de potasio monobásico	KH_2PO_4	2.4
Allythiourea	$\text{C}_4\text{H}_8\text{N}_2\text{S}$	1
Cloruro de calcio bi-hidratado	$(\text{CaCl}_2) \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	2.8
Extracto de levadura		0.2
EDTA	$(\text{HOCOCH}_2)_2 \text{NCH}_2)_2$	0.2
Acetato sódico	$\text{CH}_3\text{CO}_2\text{Na}$	128.2
Cloruro de amonio	NH_4Cl	21.4
Sulfato de magnesio mono-hidratado	MgSO_4	11.3
Cloruro de potasio	KCl	7.2
Cloruro de fierro hexa-hidratado	$(\text{FeCl}_3) \cdot 6 \text{H}_2\text{O}$	1.0
Solución de elementos traza		600 mL
Elementos traza	Composición	g/ 1 L
Acido bórico	H_3BO_3	0.15
Sulfato de zinc hepta-hidratado	$\text{ZnSO}_4 \cdot 7(\text{H}_2\text{O})$	0.12
Cloruro de magnesio tetrahidratado	$\text{MnCl}_2 \cdot 4(\text{H}_2\text{O})$	0.12
Sulfato cúprico pentahidratado	$\text{CuSO}_4 \cdot 5(\text{H}_2\text{O})$	0.03
Yoduro de potasio	KI	0.18
Moldibato de sodio bi-hidratado	$\text{Na}_2\text{MoO}_4 \cdot 2(\text{H}_2\text{O})$	0.06
Cloruro de cobalto hexa-hidratado	$\text{CoCl}_2 \cdot 6(\text{H}_2\text{O})$	0.15



Figura 4. Producción del lodo modelo I-XH. Reactor A (lado derecho) y reactor B (lado izquierdo).

3.1.2. Producción del lodo modelo II (mayor X_P : decaimiento de microorganismos autótrofos y heterótrofos)

Se tomaron tres litros del licor mixto almacenado en el refrigerador (mezcla de las purgas del reactor A y B: lodo modelo I- X_H) posteriormente se agregaron trece litros de agua de la llave. Estos dieciséis litros se colocaron en un garrafón con aireación constante durante tres meses. El lodo se digirió y se obtuvo mayor X_P . Aproximadamente cada semana se realizaron pruebas de DQO total y DQO soluble, para monitorear la digestión.

3.1.3. Lodo III, Planta Toluca Norte- X_I (materia orgánica inerte)

Se realizaron dos visitas a la PTN para recolectar muestra del licor mixto a la salida de los reactores aerobios. En cada visita se tomaron aproximadamente 20 L y se realizó una limpieza del licor (cantidad de arena). Se colocó en agua en cubetas y se dejó sedimentar durante 15 minutos, después se retiró basura y se colocó el agua en otra cubeta evitando que residuos del fondo (arena) pasaran a la siguiente cubeta.

La Planta Toluca Norte presenta un sistema de Tratamiento Biológico, el agua residual pasa por filtros y reactores biológicos para remover la carga orgánica, donde se desarrollan microorganismos. El agua biológicamente tratada es sometida a procesos de desinfección química, donde se le inyecta una solución de cloro con el fin de destruir los microorganismos patógenos aún presentes (figura 5).

El agua tratada finalmente puede ser de reuso para servicios públicos o riego en zonas agrícolas, mediante métodos modernos, ya que cumple con la norma NOM-003-SEMANART-1998.



Figura 5. Planta Toluca Norte (reactores).

3.2. Tratamiento con ozono

Se instaló un ozonador el cual tiene una capacidad de 10 g/h y una concentración máxima de gas ozono de 45 g/m³ en su corriente de salida. El generador de ozono se conectó a un tanque de oxígeno puro y a un monitor API M454 basado en un microprocesador para analizar la concentración de ozono gaseoso. También, se colocó un reactor de vidrio para ozonar la muestra y se conectó a dos trampas de Yoduro de Potasio (KI) al 2% y a un destructor de ozono para disminuir la toxicidad en el laboratorio (figura 6).

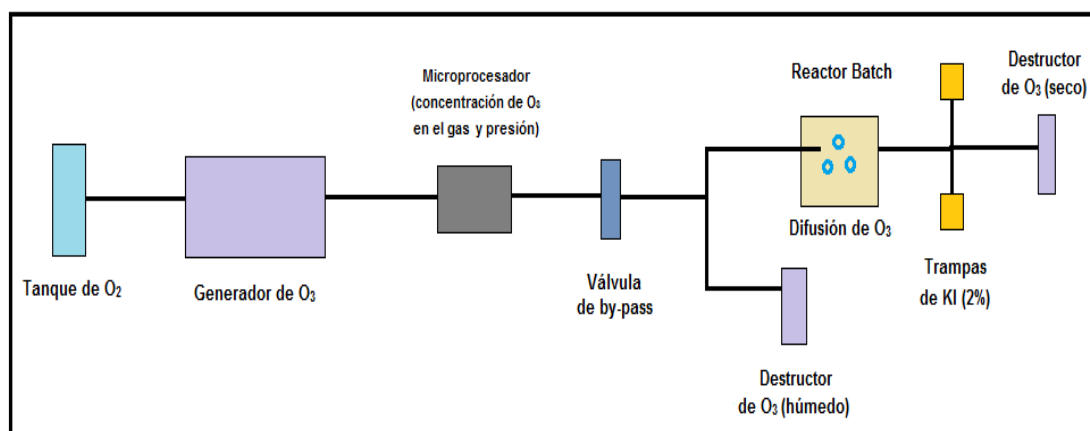


Figura 6. Generación de ozono residual en un reactor de vidrio, conectado a trampas de KI al 2% y a un destructor de ozono.

En este proyecto se realizaron dos pruebas diferentes de aplicar el O_3 en las muestras de lodo. La primera fue un método indirecto, en el cual el O_3 se agregó a un volumen de agua destilada y posteriormente se colocaron diferentes volúmenes de agua ozonada a la muestra del LMI- X_H . A partir de este método indirecto y del Método Colorimétrico Indigo (descrito en la sección 3.2.2) se determinó la concentración de O_3 disuelta en agua destilada.

En la segunda prueba se realizó un método directo, el O_3 se aplicó directamente en el LMI- X_H contenido en una botella de vidrio utilizada como reactor (con un volumen útil de 900 mL). La dosis de O_3 se relacionó con el tiempo de ozonación de cada muestra y se determinó mediante un método llamado “Yoduro de Potasio” (Rakness, 1996) el cual permitió cuantificar un balance de masa entre el O_3 aplicado (medido con línea de gas), el saliente del reactor y el captado en las dos trampas de KI al 2% (descrito en la sección 3.2.4).

3.2.1. Ozonación indirecta

La primera prueba se realizó mediante la ozonación de agua destilada, la cual se agregó en vasos de precipitado que contenían 100 mL de la muestra del LMI-X_H (figura 7). El volumen de agua ozonada varió de acuerdo a la dosis aplicada en cada uno; volumen de agua ozonada por g de SSV (masa de ozono entre la masa de sólidos).

La tabla 2 muestra las dosis aplicadas al LMI-X_H, 0.01, 0.02, 0.03, 0.04 y 0.05 g O₃/g SSV (Huysmans et al. 2001 y Chu et al. 2009).

Tabla 2. Ozonación indirecta, dosis de 10, 20, 30, 40 y 50 mg O₃/mg SST aplicadas al lodo modelo I-X_H.

Variables	T1	T2	T3	T4	T5
Volumen del LMI-X _H (mL)	100	100	100	100	100
Volumen de agua ozonada (mL)	50	70	100	150	200
Dosis de ozono (g O ₃ /g SST)	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05

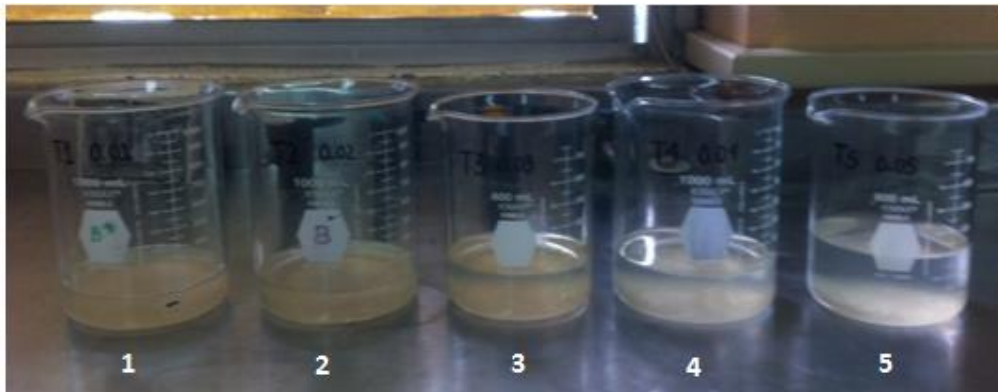


Figura 7. Cinco diferentes dosis de ozono (g O₃/g SST) aplicadas a 100 mL de licor mixto del lodo modelo I-X_H.

3.2.2. Método Colorimétrico Índigo

Para el método de ozonación indirecta, la concentración inicial de ozono en el agua destilada (disolución) se cuantificó por el método colorimétrico índigo y para esto se preparó la solución estándar índigo y el reactivo índigo II descrito en el manual de Métodos Estándar para el Análisis de Agua y Aguas Residuales (APHA, 2005).

Para determinar la concentración de ozono en agua destilada, al inicio de cada prueba se agregó 10 mL de reactivo II en un matraz de 100 mL y después de cinco minutos de ozonación en el reactor se agregaron cinco mililitros de agua ozonada en el matraz y se aforó con agua destilada (figura 8); la prueba se realizó por duplicado, después se determinó la absorbancia y se consideró la siguiente fórmula (1):

$$mg \frac{O_3}{L} = \frac{(100)(\Delta A)}{(f)(b)(V)}$$

Fórmula 1

ΔA : Diferencia entre la absorbancia del blanco y la muestra de agua destilada ozonada.

b : Longitud de la celda (10 mm).

V : Volumen de la muestra de agua ozonada (5 mL).

f : 0.42, constante de pérdida de absorbancia (cm/ mg O_3 /L).

En este caso el 100 es el volumen final (mL)



Figura 8. Reactivo índigo II; se consideró como blanco (lado izquierdo) y reactivo índigo II con la muestra uno de agua ozonada (lado derecho), por triplicado cada uno.

3.2.3. Concentración de ozono en el gas

Este método se realizó mediante ozonación directa del LM y de acuerdo con Rakness (et al. 1996) se determinó la concentración de O_3 en el gas que proviene del generador; se registraron valores de presión en el sistema y se cambiaron las trampas de KI al 2% (900 mL en cada una) al inicio de cada tratamiento de O_3 . Después de cada tratamiento 100 mL de la primer trampa de KI al 2% se valoraron con tiosulfato de sodio 0.1 N ($Na_2S_2O_3$); la segunda trampa ya no se valoró debido a que no se atrapó O_3 . (Figura 9). Estos valores se utilizaron en las siguientes fórmulas para obtener la cantidad de ozono que entró en el sistema, que escapó de este y el que permaneció.

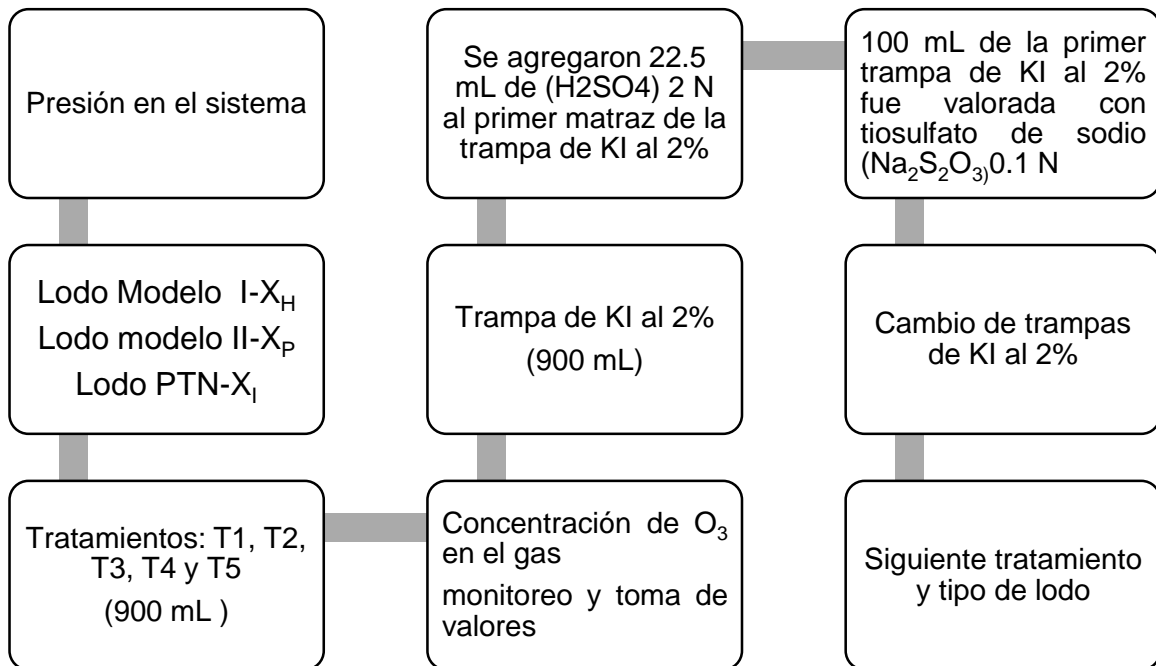


Figura 9. Procedimiento para determinar la concentración de O_3 en cada tratamiento (T1, T2, T3, T4 y T5) y tipo de lodo: X_H , X_P y X_I (Rakness et al. 1996).

<p>Cantidad de ozono que entró en el sistema (mg)</p> <p><i>Entrada (ozono)</i></p> <p>= (k)</p> <p>* (g)/(h)</p>	<p>O₃ que escapó del sistema (mg)</p> <p><i>Escape de ozono</i></p> <p>= (c)</p> <p>* (b)/(a)</p>	<p>O₃ que permaneció en el sistema (mg)</p> <p><i>permaneció = (m) – (I)</i></p>
<p>Dosis de ozono por litro de lodo (mg/L lodo)</p> <p><i>Dosis = (n)/(f)/(1000)</i></p>	<p>Producción del ozonador (g/h)</p> <p><i>Producción = $\left(\frac{m}{1000}\right) * \left(\frac{60}{a}\right)$</i></p>	
<p>a = Tiempo de ozonación (min)</p> <p>b = Flujo de O₂ (estándar)</p> <p>c = Concentración de O₃ en el gas, estándar (mg O₃/LSt O₂)</p> <p>d = Concentración de O₃ en el gas (% w/w)</p> <p>e = Presión del gas (Psi = Pa/po₂)</p> <p>f = Volumen de agua residual ozonado (mL)</p> <p>g = Volumen de la trampa de KI (mL)</p> <p>h = Volumen de la muestra de KI titulada (mL)</p> <p>i = Normalidad del tiosulfato de potasio (0.1 N)</p> <p>j = Volumen utilizado de Tiosulfato de potasio (mL)</p> <p>k = Masa de O₃ atrapado en trampa uno de KI (mg)</p> <p>l = Masa total de O₃ atrapado en los 900 mL (mg)</p> <p>m = Masa total M de O₃ inyectada (mg)</p> <p>n = Masa de O₃ consumido en el reactor (mg)</p> <p>ñ = Dosis de O₃ por litro de lodo (mg/L)</p> <p>o = Producción del ozonador (g/h)</p>		

3.2.4. Método Yodométrico

De acuerdo con Rakness et al. 1996 se determinó la concentración de O₃ en cada uno de los diferentes tratamientos. Se prepararon los siguientes reactivos:

Solución estándar de KI al 2%

Ácido sulfúrico (2 N)

Solución estándar de Tiosulfato de Sodio (1 N)

Indicador de almidón

Valorante de Tiosulfato de Sodio (0.1 N)

Dicromato de Potasio (0.1000 N)

Se estandarizó el Tiosulfato de Sodio 0.1 N; en 150 mL de agua destilada y con agitación constante se agregó 1 mL de ácido sulfúrico concentrado, 20 mL de Dicromato de Potasio 0.1000 N y 2 g de KI. Se cubrió el matraz y se dejó mezclar durante 6 minutos en la oscuridad, se agregó 1 mL de la solución indicador (almidón) y se valoró con Tiosulfato de Sodio 0.1 N hasta que el color amarillo virará a transparente. Para evaluar la estandarización del Tiosulfato de Sodio se aplicó la siguiente fórmula:

Normalidad del valorante = 2.0 / mililitros consumidos de Tiosulfato de sodio

Al inicio de cada tratamiento (T1, T2, T3, T4 y T5) se colocaron dos trampas de KI al 2%, después de cada ozonización a la primer trampa se le agregó 22.5 mL de Ácido Sulfúrico 2 N y de esa solución se tomaron 100 mL de muestra, la cual se valoró con Tiosulfato de Sodio 0.1 N hasta alcanzar un vire de azul a transparente.

3.3. Análisis de parámetros fisicoquímicos

Para los tres tipos de lodo (X_H , X_P y X_I), reactores (A y B) y para los diferentes tratamientos con y sin O_3 (T0, T1, T2, T3, T4 y T5) se realizaron parámetros físico-químicos como: temperatura, conductividad eléctrica, turbidez, y potencial de hidrógeno (pH); además se determinaron: SST, SSV, DQO total y DQO soluble. Sin embargo, se incluyeron análisis como diámetro de partícula, fosfatos y respirometría para los tratamientos con O_3 .

Parámetro	Método
Sólidos suspendidos totales (SST) y sólidos suspendidos volátiles (SSV)	De acuerdo a la norma NMX-AA-034-SCFI-2001.
Demanda Química de Oxígeno total y soluble	De acuerdo a la Norma NMX-AA-030-SCFI-2001
Fósforo total y ortofosfatos	De acuerdo a la norma NMX-AA-029-SCFI-2001
Diámetro de partícula	Se tomaron aproximadamente 20 mL de cada uno de los tipos de lodo (modelo I X_H , modelo II X_P y PTN- X_I) antes y después de los cinco diferentes tratamientos con O_3 . Parte de estos mililitros se colocaron en el equipo Coulter LS100Q, el cual permite conocer el diámetro de partícula mediante el programa CS100Q. Este programa aporta datos como: media, moda, desviación estándar y gráficas acumulativas de las partículas.
Respirometría	Para los tratamientos 0, 1, 3 y 5 se evaluó la actividad biológica de los tres diferentes tipos de lodo (X_H , X_P y X_I) antes y después de la aplicación de O_3 . Se colocaron 300 mL de cada

tratamiento en un frasco de DBO, se agregaron 300 mL de agua de la llave y 50 mL de agua residual sintética y se colocó una sonda, la cual se quedó dentro de los frascos durante 16 horas aproximadamente. De esta forma se obtiene un respirograma que determina la tasa de consumo de oxígeno (rO_2) en mg/L.h en función del tiempo. Después, los tratamientos se cambiaron para el lodo modelo II-X_P y para el lodo de la Planta Toluca Norte-X_I.

El equipo de respirometría presenta los siguientes elementos (figura 10): reactor, sonda de oxígeno, difusores de aire, dispositivo de control de temperatura, agitador magnético, bomba de aire, medidor de oxígeno, baño de control de temperatura, resistencia, relevador, conector analógico, convertidor analógico – digital, dispositivo de adquisición de datos y control (ADC) y una computadora con su programa de aplicación (Millán, 2007).

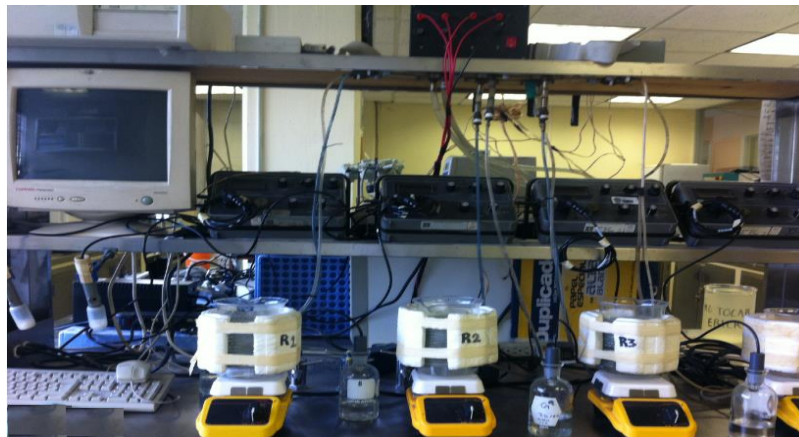
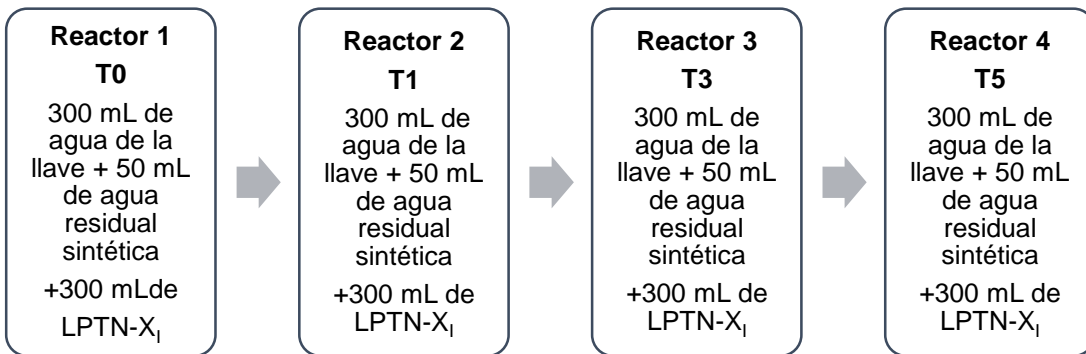
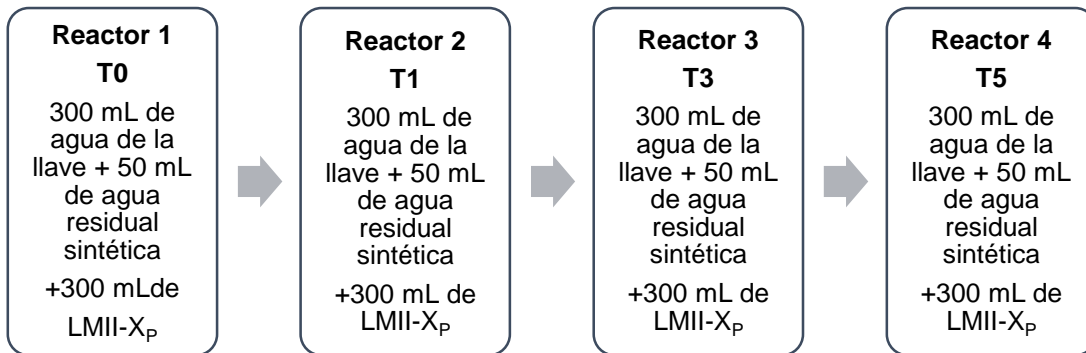
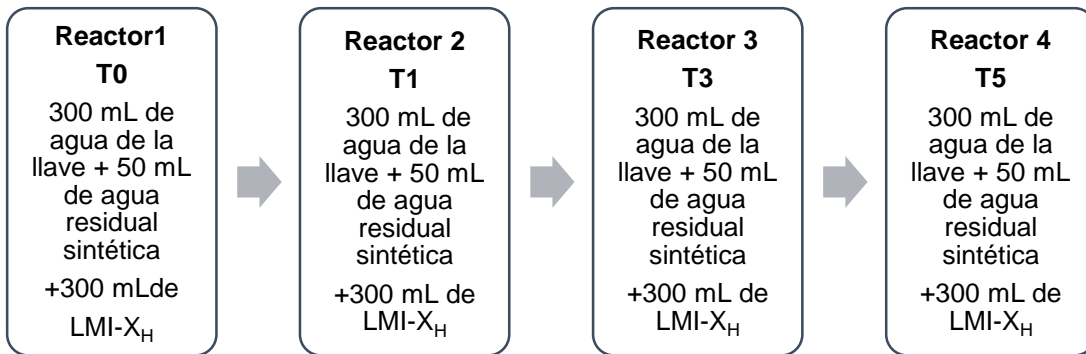


Figura 10. Equipo de respirometría para evaluar la actividad biológica



CAPITULO IV: RESULTADOS

4. RESULTADOS

4.1. Seguimiento de reactores (producción del lodo modelo)

El monitoreo semanal de los reactores permite conocer las condiciones en las que se encuentra el lodo residual que se produce en el laboratorio, ya que este es importante para diferentes proyectos adjuntos. Por lo tanto, los parámetros que se determinaron cada semana fueron: pH, temperatura, conductividad, turbiedad, DQO total, DQO soluble, DQO particulada, SST, SSV y SSF.

El pH es un factor muy importante en el metabolismo y la reproducción de las bacterias, ya que la variación en éste puede llegar a inactivar el sistema metabólico y destruir a la bacteria (Montoya, 2008). En este caso los reactores mostraron valores de pH muy alcalinos (tabla 5.1). De acuerdo con Montoya (2008) la mayoría de las bacterias comensales (saprofitas) y patógenas tienen un crecimiento óptimo en medios con un pH neutro o ligeramente alcalino (7.2-7.6). Sin embargo, el pH alcalino que presentan los lodos no afectó la calidad del tratamiento biológico, ya que las pruebas realizadas en el efluente muestran valores bajos y esto refleja una eficiencia del 95% de los reactores.

El objetivo principal es producir lodo para diferentes proyectos adjuntos y corregir el pH para un volumen de 30 L por cada reactor sería muy costoso. Algunas bacterias producen sustancias alcalinas y muchas otras producen ácidos en cantidad suficiente para modificar el pH (García, 2004). Sin embargo, el pH alto en los reactores se debe a la alcalinidad del agua de la llave local (pH 8.5), además los reactivos con los que se prepara el agua residual sintética y son alimentos los reactores forman las siguientes especies: Acetato de magnesio, Ión Monocloruro de Calcio, Acetato de Calcio, Sulfato de Calcio, Ión Cloruro de Calcio, Sulfato de Cobre, Cloruro de Potasio, Diamonio de Cobre, Tricloruro de Cobre, Hidróxido de Fosfato de Calcio, Amoniac y Cloruro de Potasio.

La temperatura es un factor importante en el crecimiento de las bacterias, ya que existen grupos bacterianos que crecen mejor a diferentes temperaturas. De esta manera, cada organismo tiene una temperatura mínima por debajo de la cual no se produce crecimiento, una temperatura óptima en la que se da el crecimiento más rápido y una temperatura máxima por encima de la cual no es posible el desarrollo (Montoya, 2008). De acuerdo a

la tabla 3 la temperatura osciló entre 20.2 y 22. 9 °C, la cual es óptima para el desarrollo de las bacterias mesófilas.

Con respecto a la turbidez (tabla 3) ambos reactores mostraron bajos niveles en el efluente y esto representa una buena sedimentación y tratamiento biológico.

La conductividad eléctrica, es un indicador de la presencia de sales disueltas en el agua, por lo tanto, la capacidad de una solución para conducir una corriente eléctrica está en función de la concentración de iones presentes en ella (Roldán y Ramírez, 2008).

Tabla 3. Temperatura, pH y conductividad eléctrica promedio del efluente para los reactores A y B.

Reactor A								
Mes	Temperatura °C	Desv. est.	pH	Desv. est.	Conductividad eléctrica (mS/cm)	Desv. est.	Turbidez (UTN)	Desv. est.
Septiembre	22.6	0.2	9.2	0.1	1306	62	0.8	0.4
octubre	22.2	0.8	8.9	0.3	1320	74	1.2	0.7
Noviembre	20.2	1.4	9.0	0.1	1390	73	2.1	0.8
Diciembre	18.2	0.5	8.8	0.1	1251	2.8	8.93	0.1
Promedio (2014)	20.8	0.7	9.0	0.1	1317	53.0	3.3	0.5
Reactor B								
Mes	Temperatura °C	Desv. est.	pH	Desv. est.	Conductividad eléctrica (mS/cm)	Desv. est.	Turbidez (UTN)	Desv. est.
Septiembre	22.9	0.3	9.2	0.02	1305	60	0.8	0.3
octubre	22.7	0.8	9.0	0.3	1313	89	1.2	0.7
Noviembre	20.2	1.5	8.9	0.1	1388	88	1.4	0.4
Diciembre	18.2	0.4	9.0	0.06	1251	0.1	2.2	0.0
Promedio (2014)	21.0	0.8	9.0	0.1	1314	59.3	1.4	0.4

DQO es la medida de oxígeno necesario para oxidar la materia orgánica e inorgánica susceptible de oxidación contenida en una muestra y de acuerdo a la tabla 4 la DQO total fue disminuyendo a través del tiempo en ambos reactores. El IQV es un índice de equivalencia de $DQO_{particulada}/SSV$, este índice es un parámetro de control, el cual representa 1.4 gramos de oxígeno consumido por cada gramo de célula oxidada (1.4 g O₂/L g cel = 1 mg/L DQO). Y se obtuvieron valores de IQV dentro del rango esperado, teniendo un valor de 1.4 como promedio anual para 2014.

Tabla 4. DQO total, soluble y particulada del licor mixto para los reactores A y B.

Reactor A							
Mes	DQO total (mg/L)	Desv. est.	DQO soluble (mg/L)	Desv. est.	DQO particulada (mg/L)	Desv. est.	IQV
Enero	2753	---	42	---	2711	---	1.9
Febrero	1192	869	26	0.7	1165	870	1.00
Abril	1470	---	41	5	1433	5	1.20
Mayo	1526	---	33	---	1493	---	1.40
Junio	1199	---	19	---	1180	---	1.30
Agosto	2410	---	27	---	2383	---	1.90
Septiembre	1500	334	20	14	1479	336	1.30
Octubre	1744	706	16	9	1728	128	1.50
Noviembre	1467	78	30	6	1437	84	1.30
Diciembre	1352	---	32	---	1320	---	1.20
Promedio anual (2014)	1661	358	29	5	1633	349	1.4
Promedio anual de efluente	23	13					

Reactor B							
Mes	DQO total (mg/L)	Desv. est.	DQO soluble (mg/L)	Desv. est.	DQO particulada (mg/L)	Desv. est.	IQV
Enero	1818	---	40	---	1778	---	1.3
Febrero	1507	747	39	14.0	1469	1006	1.10
Abril	1447	66	23	8	1424	74	1.30
Mayo	1524	---	32	---	1492	---	1.30
Junio	1232	---	24	---	1208	---	1.30
Agosto	2462	814	22	---	2440	814	1.70
Septiembre	1735	70	16	12	1719	81	1.30
Octubre	1674	686	14	4	1660	198	1.40
Noviembre	1498	20	20	8	1478	12	1.40
Diciembre	1421	---	20	---	1401	---	1.20
Promedio anual (2014)	1632	384	25	4	1607	431	1.3
Promedio anual de efluente	26	13					

SST y SSV, representan la cantidad de biomasa en los reactores. La tabla 5 muestra valores de 1060 a 1510 mg/L de sólidos para el reactor A, en cuanto al reactor B los la cantidad de sólidos fue de 1303 a 1753 mg/L.

IVT es un índice de equivalencia de SSV/ SST, presenta un valor de 0.9 para una biomasa que es alimentada con acetato. La equivalencia promedio para 2014 fue de 0.87, por lo tanto; este valor cumple con el índice de equivalencia IVT.

Tabla 5. SST, SSV y SSF del lodo modelo I-X_H para el reactor A y B.

Reactor A							
Mes	SST (mg/L)	Desv. est.	SSV (mg/L)	Desv. est.	SSF (mg/L)	Desv. est.	IVT
Enero	1510	14	1400	28	110	42	0.93
Febrero	1407	64	1167	81	240	40	0.83
Abril	1360	20	1160	20	200	20	0.85
Mayo	1217	109	1100	116	117	49	0.90
Junio	1060	53	913	46	147	12	0.86
Agosto	1453	31	1227	23	12	227	0.84
Septiembre	1320	27	1151	42	169	30	0.87
Octubre	1377	61	1168	256	208	283	0.85
Noviembre	1253	430	1073	424	180	25	0.86
Diciembre	1287	27	1097	23	190	27	0.85
Promedio anual	1324	125	1146	133	157	96	0.87

Reactor B							
Mes	SST (mg/L)	Desv. est.	SSV (mg/L)	Desv. est.	SSF (mg/L)	Desv. est.	IVT
Enero	1500	0	1380	28	120	28	0.92
Febrero	1513	23	1333	23	180	40	0.88
Abril	1310	9	1100	16	210	33	0.84
Mayo	1327	61	1170	63	157	65	0.88
Junio	1080	53	900	35	180	20	0.83
Agosto	1753	151	1467	127	287	31	0.84
Septiembre	1520	47	1318	27	202	37	0.87
Octubre	1407	395	1170	328	237	79	0.83
Noviembre	1273	24	1077	23	197	14	0.85
Diciembre	1303	16	1153	63	150	76	0.88
Promedio anual	1399	119	1207	95	192	23	0.86

4.2. Ozonación indirecta

La concentración de O₃ fue de 7.0 (tabla 6), sin embargo; la concentración disminuyó en las últimas pruebas debido a que la viabilidad del reactivo índigo II tuvo una absorbancia de 0.1742.

Tabla 6. Concentración inicial de ozono

Muestra	Absorbancia (600 nm)	Desv. est.	Tiempo (min)	Vol. Muestra con O ₃ (mL)	Concentración mg O ₃ /L
Blanco	0.1742				
Blanco	0.176				
Promedio	0.1751	0.0013			
M1	0.0239		5	5	7.2
M1	0.0379		5	5	6.5
Promedio	0.0309	0.0099	5	5	6.9

De acuerdo a la tabla 7 los sólidos disminuyeron al incrementar la cantidad de agua ozonada. La dosificación de ozonación y el tiempo de contacto son factores primarios que incrementan la solubilización de los lodos (Chu et al. 2009a).

Tabla 7. SST, SSV y SSF del licor mixto a diferentes dosis de ozono.

Tratamiento	SST (mg/L)	SSV (mg/L)	SSF (mg/L)
T0	1380	1167	213
T1 (0.01)	1340	1130	210
T2 (0.02)	1305	1102	203
T3 (0.03)	1200	960	240
T4 (0.04)	1250	1025	225
T5 (0.05)	1020	990	30

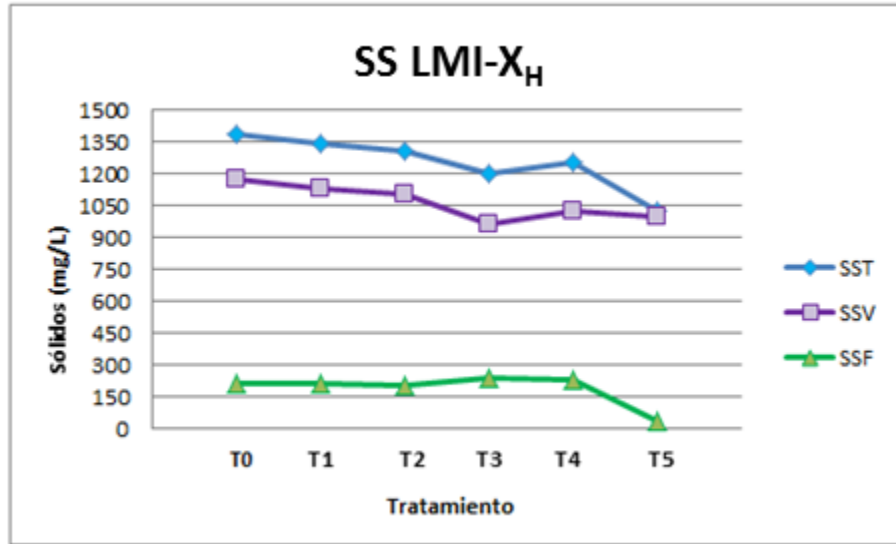


Figura 11. SST, SSV, SSF para cada uno de los tratamientos en el lodo modelo uno.

Con respecto a la DQO total y particulada los valores muestran una disminución al aumentar la dosis de O_3 (tabla 8). Sin embargo; la DQO soluble aumentó con respecto a la dosis de O_3

Tabla 8. DQO total, DQO soluble y DQO particulada en diferentes tratamientos con ozono.

Muestra	DQO total (mg/L)	DQO soluble (mg/L)	DQO particulada (mg/L)
T0	1510	45	1465
T1	1445	32	1413
T2	1484	44	1440
T3	1478	54	1424
T4	1423	125	1298
T5	1425	150	1275

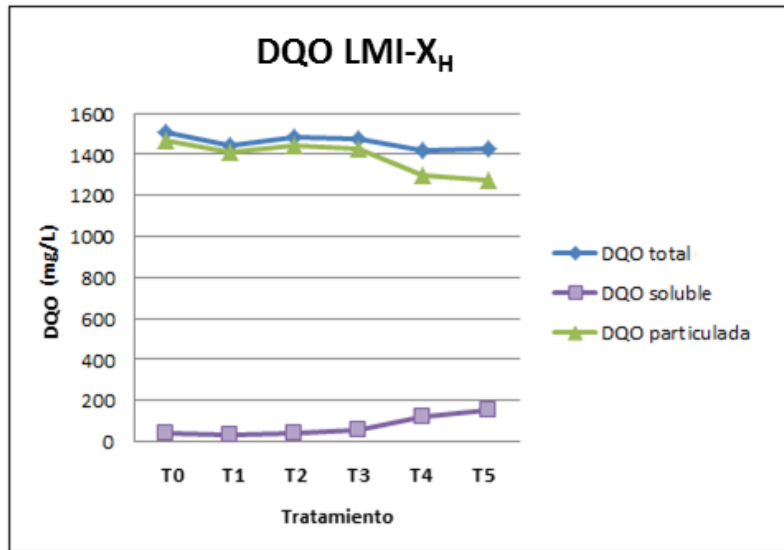


Figura 12. DQO total, soluble y particulada para cada uno de los tratamientos en el lodo modelo uno.

4.3. Ozonación directa

4.3.1. Concentración de O₃

Se determinó la concentración de O₃ aplicada a los cinco diferentes tratamientos (T1, T2, T3, T4 y T5). La tabla 9 muestra la concentración específica (g O₃/g SSV) y la concentración en mg/L lodo en de cada tipo de lodo. La concentración específica de O₃ para el lodo modelo I-X_H no incrementó de acuerdo al tratamiento, sin embargo, la cantidad fue considerable y en promedio se obtuvo un valor de 0.12 (g O₃/ g SSV). La concentración para el lodo modelo II-X_P incrementó de acuerdo al tipo de tratamiento, de 0.04 a 0.22 g O₃ / g SSV y para el lodo de la Planta Toluca Norte también aumentó de acuerdo a la cantidad de O₃ de 0.08 a 0.27 (g O₃/ g SSV).

Para la concentración en mg/L lodo se presentó el mismo patrón. El lodo modelo I-X_H no presentó variación en los valores a través de los tratamientos. Sin embargo, el lodo modelo II-X_P presentó una concentración de 34.2 mg/L lodo para el T1, la cual fue aumentando hasta 153.9 mg/L para el T5. Para el lodo de la PTN-X_I la concentración aumento de 33.4 a 108.6 mg/L.

Tabla 9. Concentración específica de O₃ (g O₃/g SSV)

Tratamiento	Tiempo de ozonacion (min)	Lodo modelo I-X _H			Lodo modelo II-X _P			Lodo PTN-X _I		
		Conc. (mg/L lodo)	SSV inicial (mg/L)	Conc. (g O ₃ / g SSV)	Conc. (mg/L lodo)	SSV inicial (mg/L)	Conc. (g O ₃ / g SSV)	Conc. (mg/L lodo)	SSV inicial (mg/L)	Conc. (g O ₃ / g SSV)
T1	1	71.6	680	0.11	34.2	867	0.04	33.4	440	0.08
T2	2	76.3	600	0.13	23.5	780	0.03	47.5	350	0.14
T3	3	66.9	580	0.12	25.5	787	0.03	74.1	400	0.19
T4	4	66.7	533	0.13	45.2	733	0.06	137.8	347	0.40
T5	5	65.0	553	0.12	153.9	700	0.22	108.6	407	0.27

4.4. Lodo Modelo I-X_H

4.4.1. Parámetros fisicoquímicos LMI-XH

Los tres tipos de lodo se ozonaron a cinco diferentes dosis de O₃ y se realizaron parámetros fisicoquímicos como pH, conductividad y turbidez. La gráfica c) y la tabla 10 muestran los promedios de la prueba 1 y 2 de cada uno de los parámetros para el lodo modelo I-X_H.

Los valores de pH variaron de 8.6 a 8.4 antes y después de la aplicación de las diferentes dosis de O₃. En soluciones básicas, el ozono es especialmente inestable. Esto se debe a la formación de °OH mediante OH⁻ y la reacción de °OH con ozono. Esta reacción procese incluso en soluciones neutrales, donde las concentraciones de OH⁻ son muy bajas (1x10⁻⁷ M). La acidificación y la adición de secuestradores de °OH tales como el bicarbonato incrementan la estabilidad del ozono en soluciones acuosas (von Sonntag y von Gunten, 2012). La conductividad eléctrica se mantuvo constante de 1.10 a 1.14 mS/cm. Por lo tanto, el ozono no modificó la cantidad de sales inorgánicas presentes en el LM, además el lodo modelo I-X_H al ser cultivado en el laboratorio no presentó una cantidad mayor de iones en solución.

La turbiedad presentó un valor de 0.89 para el T0 y 8.41 para el T5. Este valor aumento de forma exponencial debido a que las dosis de ozono fueron más grandes (figura 13); la materia orgánica se desintegró y eso generó mayor turbiedad en cada uno de los tratamientos.

Tabla 10. Promedio de los parámetros fisicoquímicos del lodo modelo I-X_H con diferentes tratamientos de O₃.

Tratamiento	pH		Conductividad eléctrica (mS/cm)		Turbidez (UTN)	
	Promedio	Desv. est.	Promedio	Desv. est.	Promedio	Desv. est.
T0	8.63	0.11	1.10	0.10	1.39	0.89
T1	8.50	0.14	1.11	0.12	3.14	0.80
T2	8.30	0.00	1.11	0.12	6.19	1.17
T3	8.35	0.07	1.11	0.12	11.60	2.55
T4	8.23	0.11	1.11	0.11	10.66	3.31
T5	8.40	0.14	1.14	0.10	17.75	8.41

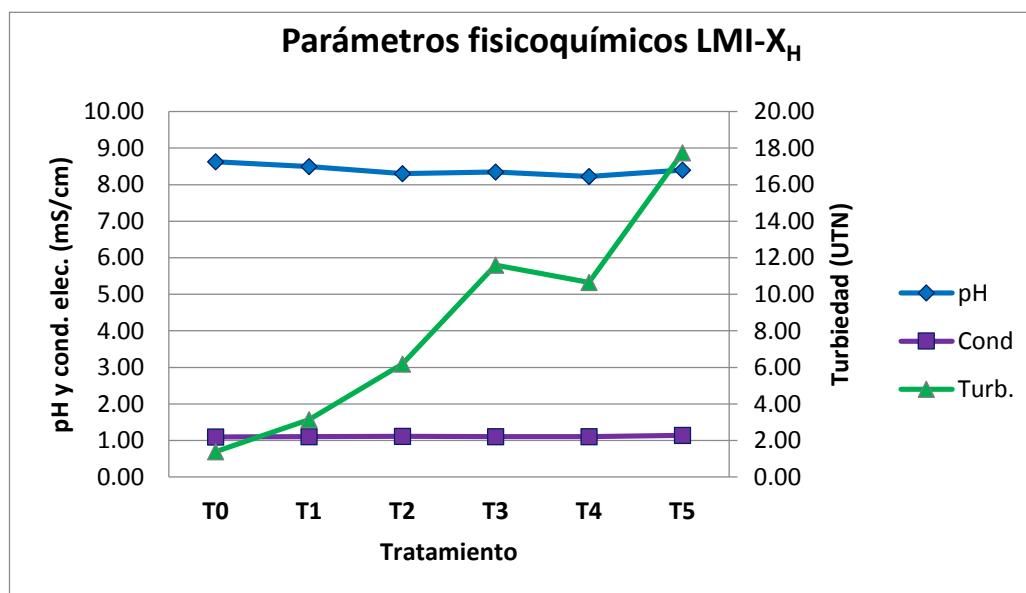


Figura 13. Parámetros fisicoquímicos del lodo modelo I-XH con diferentes dosis de O₃.

4.4.2. Sólidos suspendidos

La cantidad de sólidos suspendidos en los diferentes tratamientos disminuyó de acuerdo a la cantidad de O₃. La tabla 11 y la figura 14 muestran que el T0 presentó 887 mg/L de SSTy el T5 620 mg/L. El O₃ desintegró la materia orgánica presente en la biomasa del lodo modelo I-X_H, y se ve reflejado en la cantidad de sólidos al inicio después de la última dosis. La ozonación de lodos conduce a la disminución en la proporción de sólidos suspendidos volátiles SSV/SST. De acuerdo con Bougrier et al. 2006, la proporción de SSV/SST disminuyó 73% en un lodo ozonado con una dosis de 0.16 g O₃/ g de sólidos totales. Las dosis de O₃ que se aplicó en el Lodo modelo I-X_H fue de 0.11 a 0.13 g O₃/ g SST.

Tabla 11. Sólidos suspendidos y porcentaje de cambio para el lodo modelo I-X_H a cinco diferentes tratamientos de O₃.

Tratamiento	SST (mg/L)	Desv. est.	SSV (mg/L)	Desv. est.	SSF (mg/L)	Desv. est.	IVT	% de cambio		
								SST	SSV	SSF
T0	927	11.55	793	12	133	12	0.86			
T1	947	14.14	680	20	267	----	0.72	2.2%	-14.3%	100.00%
T2	693	11.55	600	20	93	23	0.87	-25.2%	-24.4%	-30.00%
T3	700	20.00	580	40	120	20	0.83	-24.5%	-26.9%	-10.00%
T4	633	30.55	533	31	100	----	0.84	-31.7%	-32.8%	-25.00%
T5	620	----	553	31	70	50	0.89	-33.1%	-30.3%	-47.50%

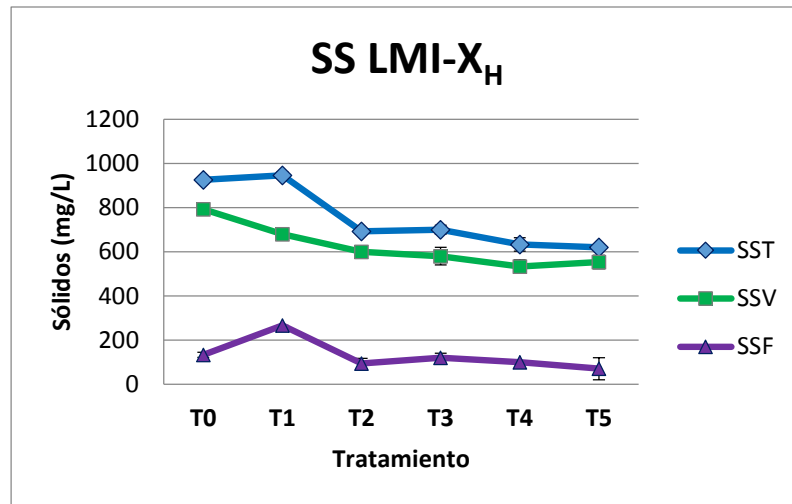


Figura 14. Sólidos suspendidos del lodo modelo I-XH antes y después de cinco tratamientos con O₃.

Se realizó una segunda prueba para el lodo modelo I-X_H y se determinó la cantidad de sólidos suspendidos antes y después de cada tratamiento de O₃. La tabla 12 muestra una relación entre la cantidad de sólidos sedimentables y no sedimentables con la dosis de ozono aplicado en cada tratamiento. Los valores obtenidos de SST fueron de 887 a 660 mg/L. Para SSV los valores tuvieron el mismo patrón, ya que el T0 presentó mayor cantidad de sólidos en suspensión que el T5 (figura 15).

Tabla 12. Segunda prueba de sólidos suspendidos para el lodo modelo I-X_H.

Tratamientos	SST	Desv. est.	SSV	Desv.est.	SSF	Desv. est.	IVT	% de cambio		
								SST	SSV	SSF
T0	887	23	767	31	120	20	0.86			
T1	807	31	673	12	133	31	0.83	-9.0%	-12.2%	11.11%
T2	767	12	667	12	100	20	0.87	-13.5%	-13.0%	-16.67%
T3	707	42	580	20	127	23	0.82	-20.3%	-24.3%	5.56%
T4	707	31	587	12	120	20	0.83	-20.3%	-23.5%	0.00%
T5	660	28	530	14	130	14	0.80	-25.6%	-30.9%	8.33%

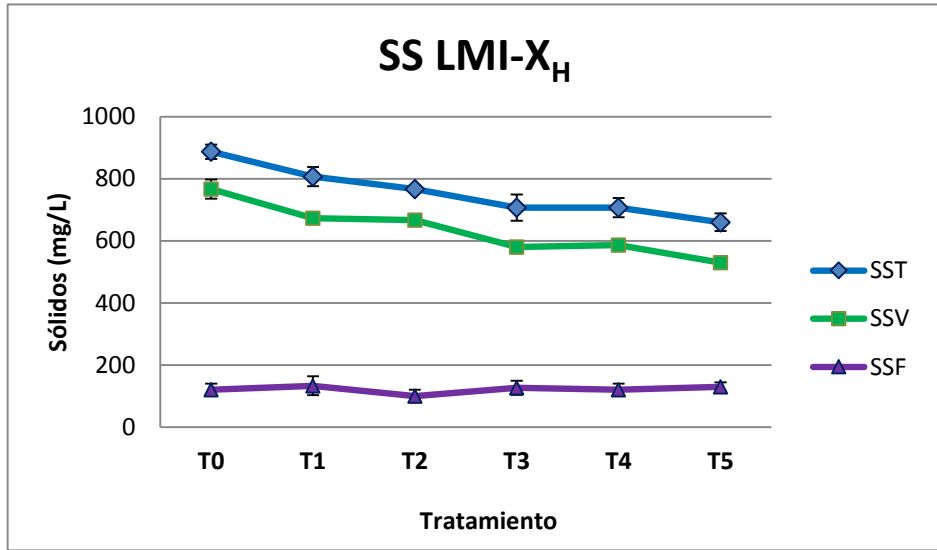


Figura 15. Sólidos suspendidos del lodo modelo I-XH (segunda prueba) a cinco diferentes dosis de O3.

4.4.3. Demanda Química de Oxígeno (DQO)

La tabla 13 y la figura 16 representan la prueba uno para el lodo modelo I-X_H. El DQO total presentó valores de 953 a 1023 mg/L. En cuanto a DQO soluble aumentó de acuerdo a la dosis de O₃, siendo mayor para el T5. El porcentaje de cambio de una dosis con respecto a otra varió considerablemente; de 153 para el T1 y 753% para el T5.

Tabla 13. Demanda Química de Oxígeno del lodo modelo I-X_H para un tratamiento blanco (T0) y cinco diferentes dosis de O₃.

Muestra	DQO soluble	DQO total	Desv. est.	DQO particulada	% de cambio		
					DQO total	DQO particulada	DQO soluble
T0	19	1023	4	1004	---	---	---
T1	48	975	11	956	-4.7	-4.8	153
T2	84	952	7	952	-6.9	-5.2	342
T3	117	1010	5	1010	-1.3	0.6	516
T4	134	953	4	905	-6.8	-9.9	605
T5	162	967	28	967	-5.5	-3.7	753

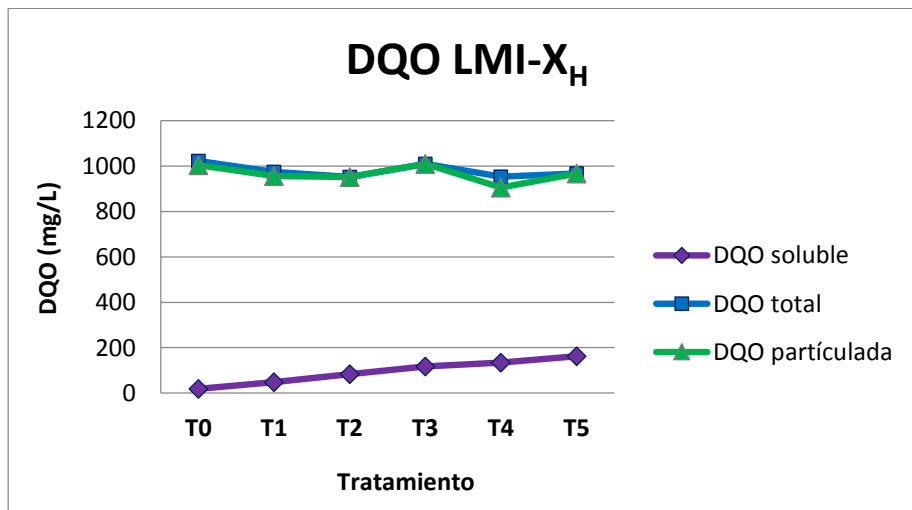


Figura 16. DQO total, soluble y particulada del lodo modelo I-X_H a cinco diferentes dosis de O₃.

La segunda prueba de DQO para el lodo modelo I-X_H. DQO soluble aumentó con base a la cantidad de O₃ aplicado (13-190 mg/L). Los valores de DQO total disminuyeron al aumentar la dosis de O₃ y el porcentaje de cambio aumento considerablemente (tabla 14).

Tabla 14. Segunda prueba de DQO para el lodo modelo I-X_H.

Tratamiento	DQO soluble	DQO total	Desv. Est.	DQO particulada	% de cambio		
					DQO total	DQO particulada	DQO soluble
T0	13	998	1	985	---	---	---
T1	49	870	29	821	-12.8	-16.6	277
T2	83	893	28	810	-10.5	-17.7	538
T3	111	868	16	757	-13.0	-23.1	754
T4	132	846	6	714	-15.2	-27.5	915
T5	190	887	17	697	-11.1	-29.2	1362

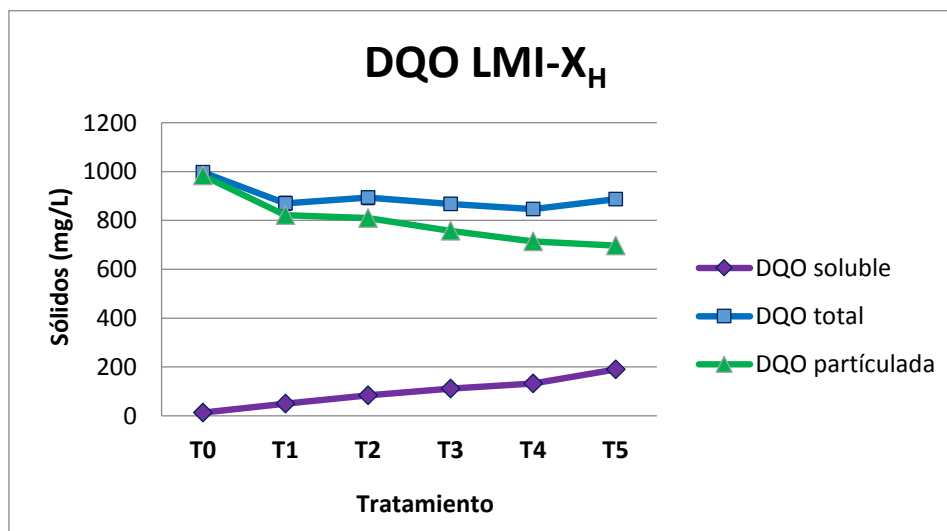


Figura 17. DQO soluble, total y particulada con cinco tratamientos de O₃ y un blanco para el lodo modelo I-X_H

4.4.4. Fosfato

De acuerdo a la tabla 15 y a la figura 18 la cantidad de fósforo total fue de 40 mg/L antes y después de los tratamientos y los ortofosfatos aumentaron de 5.2 para el T0 a 9.1 para el T5.

Tabla 15. Fósforo total y Ortofosfatos para el LMI-X_H

Tratamiento	Fósforo total (mg/L)	Desv. est.	Ortofosfatos (mg/L)	Desv. est.
T0	42	0.6	5.2	0.03
T1	40	1.5	6.8	0.12
T2	41	0.4	7.3	0.16
T3	42	0.14	8.7	0.01
T4	42	0.6	8.4	0.08
T5	41	0.6	9.1	0.02

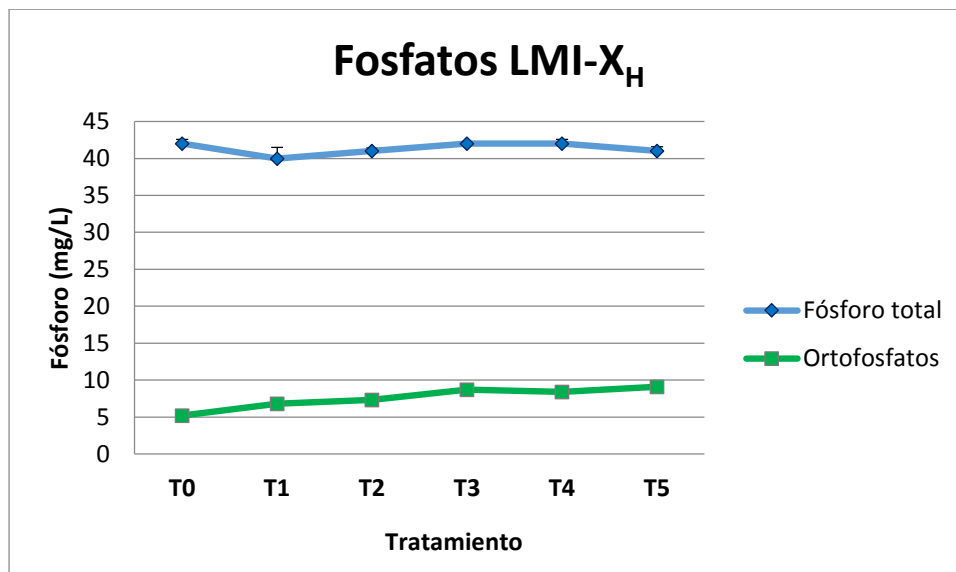


Figura 18. Fósforo total y Ortofosfatos para el lodo modelo I-X_H antes y después de las diferentes dosis de O₃

Se realizó una segunda prueba para determinar la cantidad de fósforo total y ortofosfatos. El valor obtenido fue de 30 mg/L y ortofosfatos de 2.3 a 5.1 (tabla 16).

Tabla 16. Fosfato para el lodo modelo I-X_H

Tratamiento	Fósforo total	Desv. est.	Ortofosfatos	Desv. est.
T0	37	0.35	2.3	0.01
T1	32	0.64	2.7	0.04
T2	37	0.42	2.9	0.01
T3	35	0.35	3.6	0.12
T4	31	0.35	3.5	0.08
T5	36	0.14	5.1	0.05

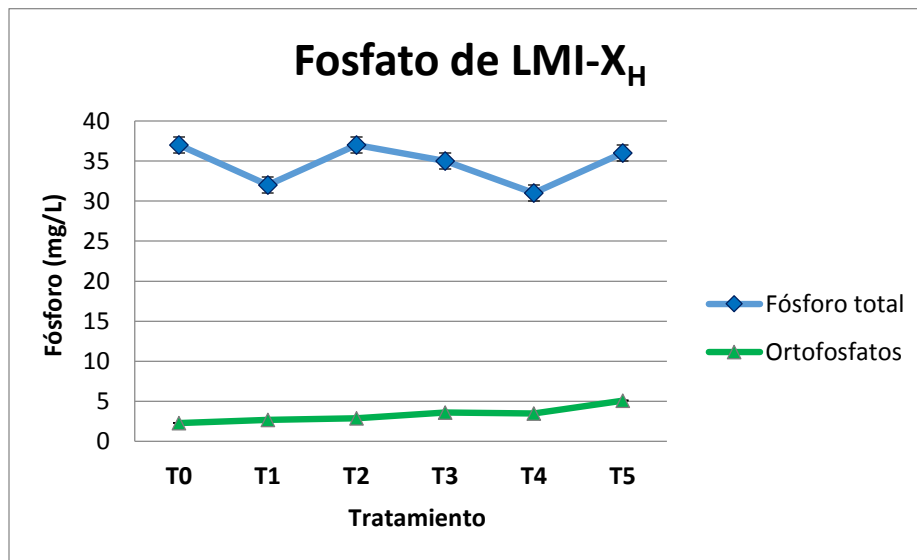


Figura 19. Fósforo total y Ortofosfatos para el lodo modelo I- X_H

4.4.5. Tamaño de partícula

El tamaño de partícula para los diferentes tratamientos de O₃ se muestra en la tabla 17. La cual muestra valores acumulativos para 10, 25, 50, 75 y 90 %. Los datos en cada porcentaje se mantuvieron uniformes, ya que la cantidad de O₃ no afecto el tamaño de partícula. Esta variable es importante para la estabilidad física de una suspensión.

Tabla 17. Porcentaje acumulativo de diámetro de partícula (10, 25, 50, 75 y 90 %) para el lodo modelo I-X_H.

Tratamiento	% acumulativo de diámetro de partícula LMI-X _H				
	10%	25%	50%	75%	90%
T0	25.04	50.58	86.42	129.5	169.1
T1	25.64	51.59	87.15	130.2	169.4
T2	25.57	51.67	88.32	132.3	171.6
T3	27.98	58.38	101.1	147.3	182.5
T4	24.77	51.47	91.44	140.1	179.4
T5	22.29	50.39	92.01	141.5	177

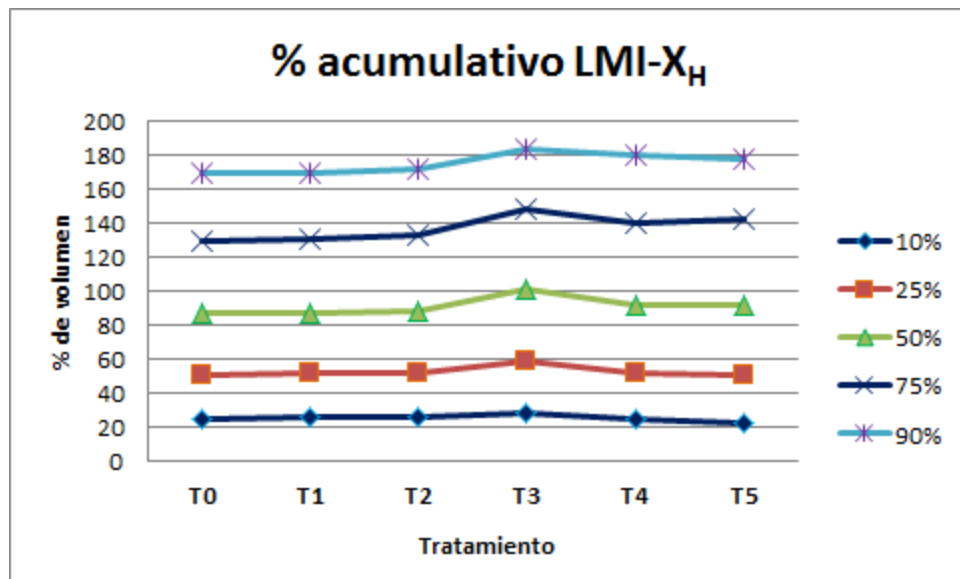


Figura 20. Diámetro de partícula del lodo modelo I-X_H, ozonado a diferentes tratamientos.

4.4.6. Respirometría

Mediante la respirometría se puede evaluar la actividad biológica del lodo activo en su relación con la biomasa, el nivel de contaminación del agua residual, nitrificación y toxicidad.

La figura 21 muestra el patrón on-off durante el proceso de medición de rO_2 para cuatro diferentes tratamientos (T0, T1, T3 y T5). Se presentan ciclos de aireación para cada uno de los tratamientos. Aproximadamente después de 12 horas decae el rO_2 debido a que las bacterias ya no se están alimentando. En la gráfica K) se muestra que el rO_2 para el T0 (a_YS_1) ya había llegado un punto en el que las bacterias ya no se estaban alimentando.

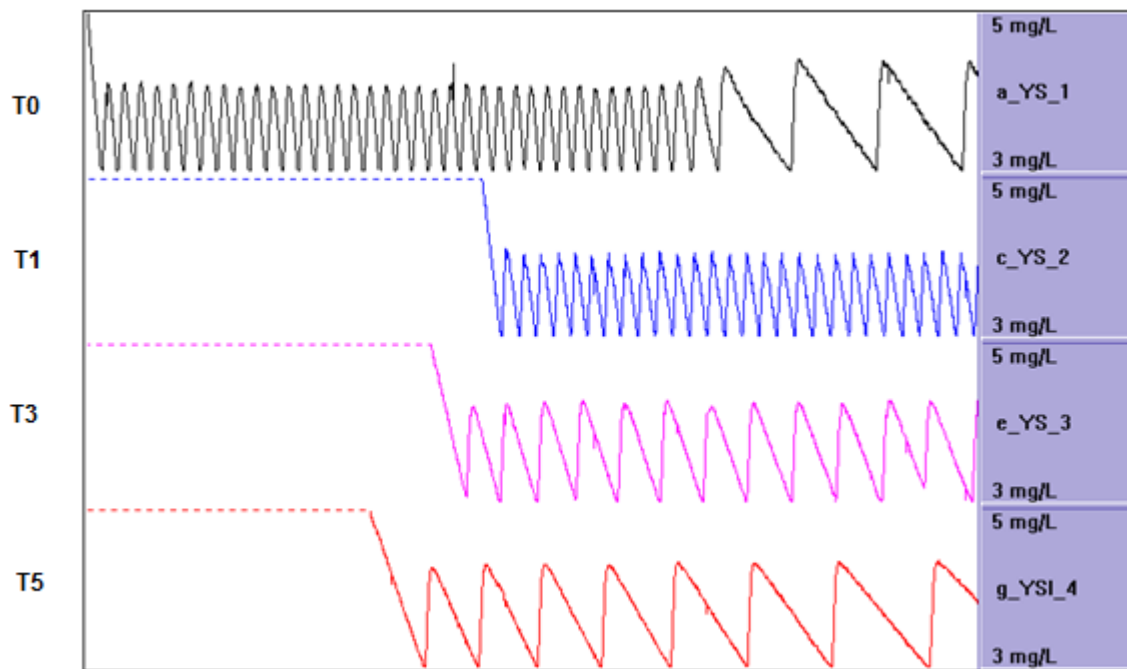


Figura 21. Patrón on-off para los tratamientos T0, T1, T3 y T5 del lodo modelo I-X_H

Se calcula rO_2 en función del tiempo y se obtiene una gráfica para determinar la actividad biológica para cuatro tratamientos (T0, T1, T3 y T5) y cada uno muestra tres puntos importantes: Actividad inicial, exponencial y actividad final.

a) Actividad inicial: Es la cantidad relativa de bacterias que quedo a partir de la cantidad de O_3 aplicada en cada tratamiento o de la cantidad inicial (T_0).

b) Exponencial: el crecimiento de las poblaciones bacterianas sigue un crecimiento exponencial en el tiempo. La concentración de substrato disponible limita la velocidad de crecimiento de las poblaciones bacterianas.

c) Actividad final: rO_2 disminuye porque ya no hay alimento (agua residual sintética).

La figura 22 muestra que el T_0 y el T_1 , tuvieron una población bacteriana mayor F/M bajo (mayor cantidad de bacterias/ mínima cantidad de comida). Al inicio de la gráfica se observa un rO_2 alto debido al número de bacterias y a la cantidad de alimento disponible; estas características permitieron una actividad biológica considerable al inicio de la prueba de respirometría; posteriormente muchas bacterias murieron y la cantidad de comida disminuyó.

Para el T_3 y T_5 la dosis de O_3 contribuyó a que la cantidad de bacterias disminuyera. Por lo tanto, el rO_2 fue bajo, sin embargo, la actividad fue aumentando debido a que algunas bacterias sobrevivieron a la dosis de O_3 y al tener una cantidad suficiente de alimento (agua residual sintética) la población bacteriana se incrementó.

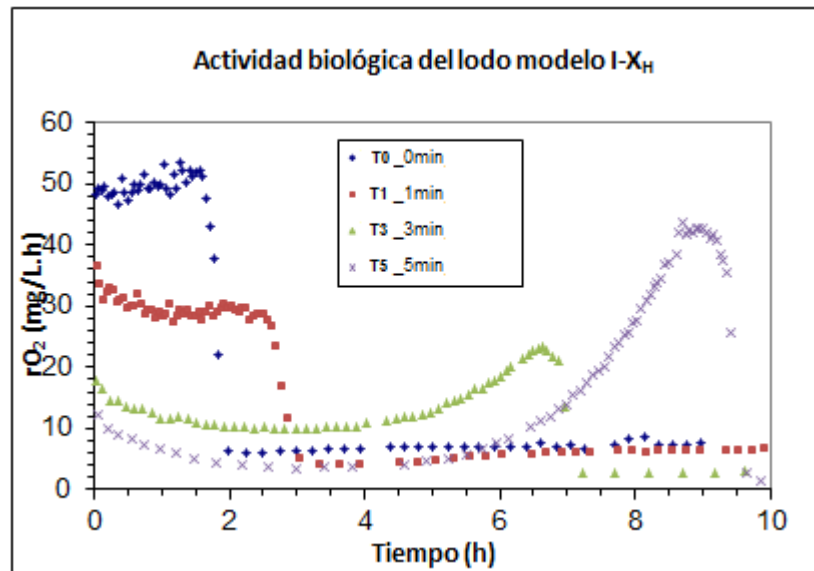


Figura 22. Actividad biológica (rO_2) de cuatro tratamientos (T_0 , T_1 , T_3 y T_5) del lodo modelo I- X_H .

De acuerdo a la tabla 18 el rO_2 máximo se presentó para el T0 con un valor de 49.9 mg/L.h debido a la cantidad de bacterias, que a este tratamiento no se le aplicó O_3 . El rO_2 inicial fue disminuyendo en el T3 y T5 debido a que la dosis de O_3 se incrementó y la cantidad inicial de bacterias fue muriendo.

Tabla 18. rO_2 inicial y su porcentaje para el T0, T1, T3 y T5 del lodo modelo I-X_H

Tiempo de ozonación (min)	rO_2 inicial (mg/L.h)	Desv. est.	rO_2 (%)
0	49.9	1.7	1.0
1	29.9	1.7	0.6
3	12.0	2.2	0.2
5	7.0	2.7	0.1

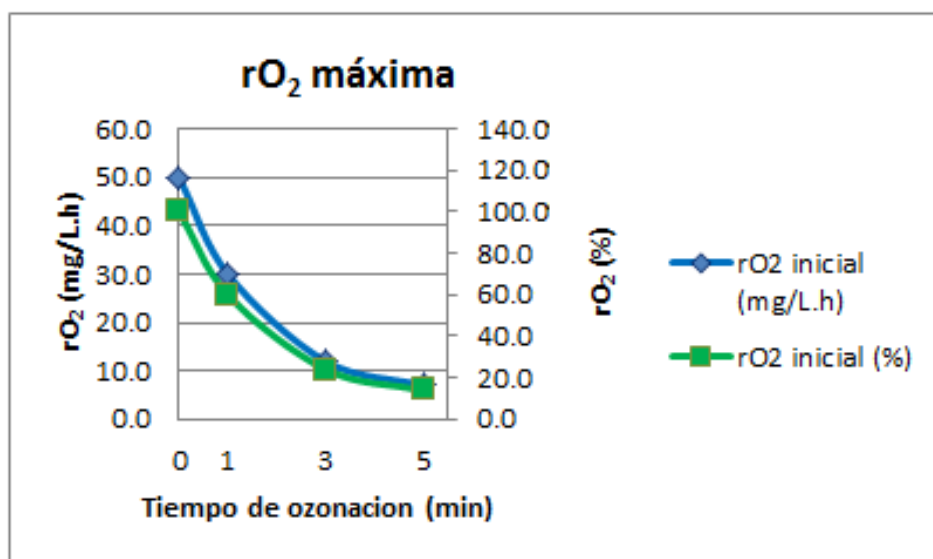


Figura 23. rO_2 máxima para el lodo modelo I-X_H

4.5. Lodo modelo II-X_p

Los parámetros fisicoquímicos para el lodo modelo II-X_p se muestran en la tabla 19 y en la figura 24. De acuerdo a la dosis de O₃ el pH disminuyó de 5.15 a 4.25. Sin embargo, la conductividad eléctrica presentó valores parecidos en los diferentes tratamientos (Valor de 2.17-2.58). La turbidez aumentó con respecto a la cantidad de O₃ de 197 para el T0 a 254 UTN para el T5. Este aumento se relaciona con la concentración de O₃, ya que éste causa lisis celular y algunos componentes celulares quedan en suspensión.

Tabla 19. Parámetros fisicoquímicos del lodo modelo II-X_p

Tratamiento	pH		Conductividad (ms/cm)		Turbidez (UTN)	
	Promedio	Desv. est.	Promedio	Desv. est.	Promedio	Desv.est.
T0	5.15	0.02	2.58	3.63	197	121.62
T1	4.99	0.08	2.54	3.47	279	4.24
T2	4.58	0.04	2.31	3.21	278	0.71
T3	4.42	0.00	2.21	3.12	276	21.21
T4	4.25	0.09	2.17	2.94	272	8.49
T5	4.33	0.11	2.22	2.98	254	8.49

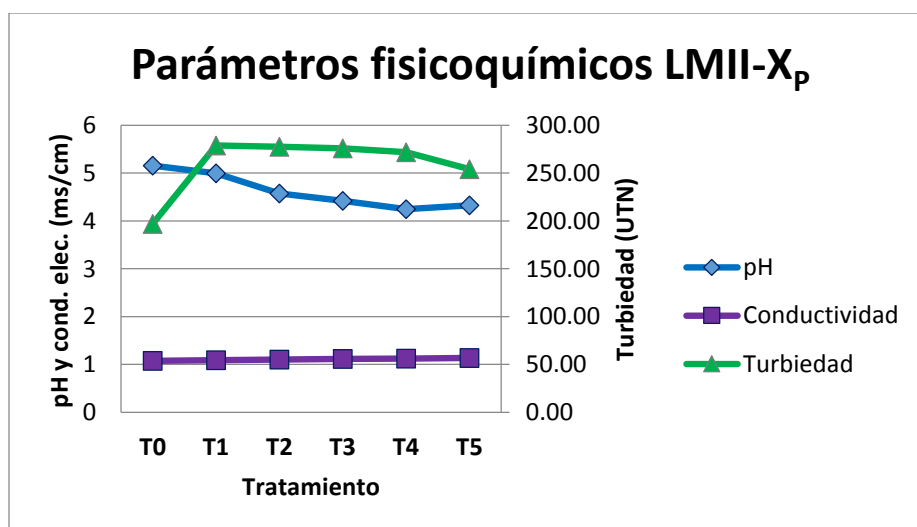


Figura 24. pH, conductividad eléctrica y turbiedad del lodo modelo II-X_p antes y después de la aplicación de O₃.

4.5.1. Sólidos suspendidos

De acuerdo a las diferentes dosis de O₃ aplicadas al lodo modelo II-X_P los sólidos suspendidos totales disminuyeron de 1040 a 813 mg/L. El T0 presentó 1040 mg/L y el T5 813 mg/L (tabla 20).

Tabla 20. Porcentaje de cambio de sólidos suspendidos del lodo modelo II-X_P

Tratamiento	SST (mg/L)	Desv. est.	SSV (mg/L)	Desv. est.	SSF (mg/L)	Desv. est.	IVT	% de cambio	
								SST	SSV
T0	1040	35	907	23	133	12	0.87	---	---
T1	1013	23	867	12	147	31	0.86	-2.60	-4.41
T2	900	20	780	35	120	20	0.87	-13.46	-14.00
T3	900	20	787	31	113	12	0.87	-13.46	-13.23
T4	860	72	733	61	127	12	0.85	-17.31	-19.18
T5	813	31	700	20	113	23	0.86	-21.83	-22.82

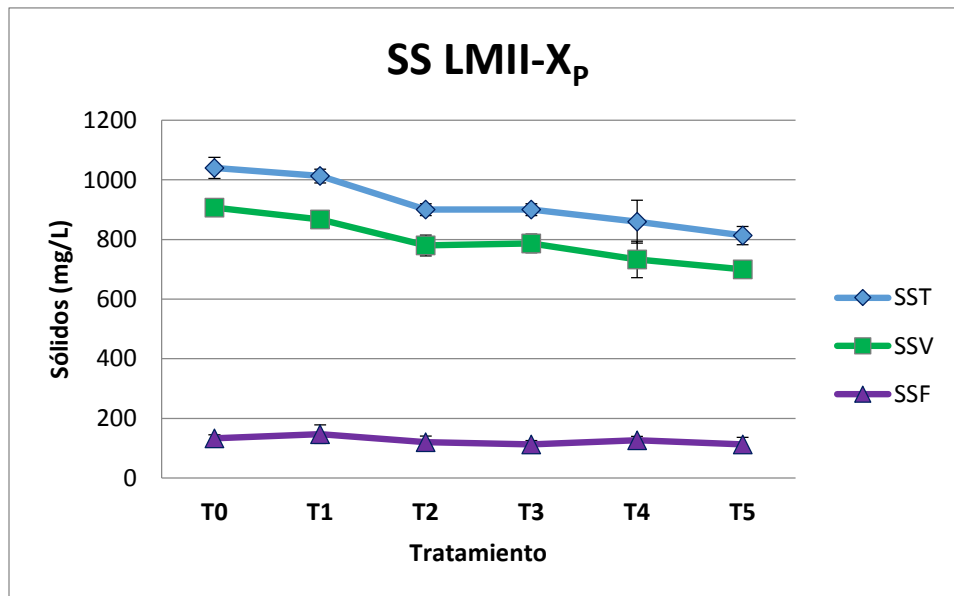


Figura 25. SSV, SSV y SSF del lodo modelo II-X_P para cinco tratamientos (T0: blanco, T1: 1min, T2: 2min, T3: 3 min, T4: 4min, T5: 5 min).

La segunda prueba, muestra valores similares ya que, de acuerdo al incremento en la dosis de O₃ la cantidad de sólidos suspendidos totales disminuyo (tabla 21).

Tabla 21. Sólidos suspendidos a cinco diferentes dosis de O₃ para el lodo modelo II- X_p.

Tratamiento	SST (mg/L)	Desv. est.	SSV (mg/L)	Desv. est.	SSF (mg/L)	Desv. est.	IVT	% de cambio	
								SST	SSV
T0	1000	28	880	28	120	0	0.88	0.0	0.0
T1	980	20	840	20	140	0	0.86	-2.0	-4.5
T2	900	20	773	31	127	31	0.86	-10.0	-12.2
T3	927	12	793	23	133	12	0.86	-7.3	-9.9
T4	913	31	807	23	107	12	0.88	-8.7	-8.3
T5	873	23	740	20	133	31	0.85	-12.7	-15.9

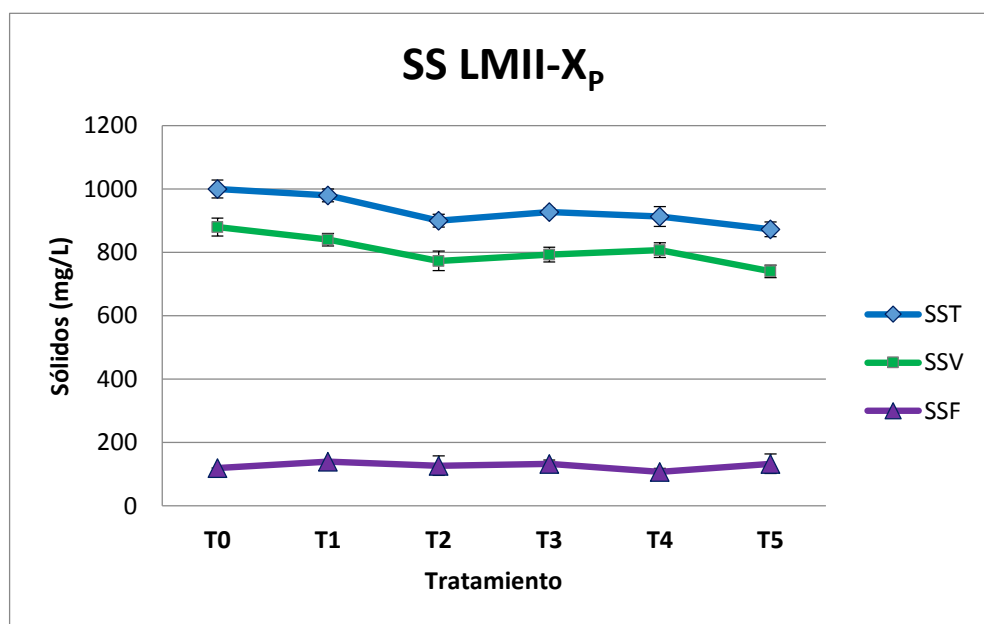


Figura 26. Sólidos suspendidos a cinco diferentes dosis de O₃.

4.5.2. Demanda Química de Oxígeno

La DQO soluble aumentó de acuerdo a la dosis de O₃, ya que el porcentaje de cambio fue de 27 a 198. Para la DQO total se presentó un valor inicial (T0) de 1910 mg/L, sin embargo; para el T5 fue de 966 mg/L (tabla 22).

La biomasa activa y las fracciones endógenas expuestas a ozono tienen un rendimiento de solubilización y biodegradabilidad diferente; además se tiene una parte significativa de biomasa lisada como materia particulada en el lodo (Labelle et al. 2011).

De acuerdo con Dogruel et al. 2007 bajas dosis entre 4 y 11 mg de ozono/ g SST mostraron un incremento en la biodegradabilidad del lodo durante una prueba escala piloto y con un rendimiento de solubilización de 2.7 a 5.9 g DQO / g O₃.

Tabla 22. DQO total, soluble y particulada del lodo modelo II-X_P

Tratamiento	DQO total (mg/L)	Desv. est.	DQO soluble (mg/L)	DQO particulada (mg/L)	% de cambio		
					DQO total	DQO particulada	DQO soluble
T0	1910	56	55	1855	---	---	---
T1	1078	6	70	1008	-43.6	-45.7	27
T2	1142	138	96	1046	-40.2	-43.6	75
T3	1038	6	108	930	-45.7	-49.9	96
T4	1112	1	150	962	-41.8	-48.1	173
T5	966	7	164	802	-49.4	-56.8	198

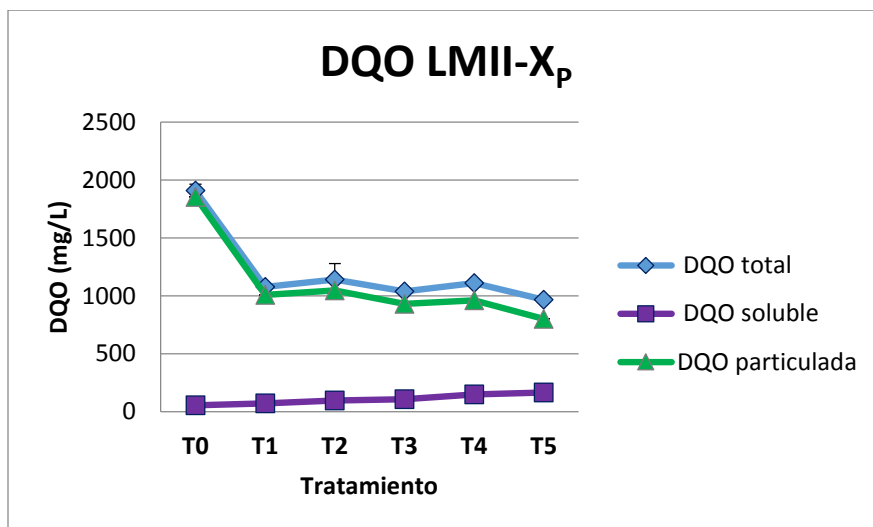


Figura 27. DQO total, soluble y particulado para el lodo modelo II-X_P antes y después de cuatro tratamientos de ozono (T1: 1min, T2: 2 min, T3: 3min, T4: 4min y T5: 5 min).

La segunda prueba para el lodo modelo II-X_P muestra que los valores de DQO presentaron el mismo patrón de comportamiento, ya que; la DQO soluble aumentó su valor de acuerdo a la dosis de O₃ y la DQO total la disminuyó.

Tabla 23. Segunda prueba de DQO total, soluble y particulada para el lodo modelo II-X_P.

Tratamiento	DQO total (mg/L)	Desv. est.	DQO soluble (mg/L)	DQO particulada (mg/L)	% de cambio		
					DQO total	DQO soluble	DQO particulada
T0	1059	8	21	1038	---	---	---
T1	1027	5	12	1003	-3.0	-42.9	-3.4
T2	962	2	33	896	-9.2	57.1	-13.7
T3	979	7	47	885	-7.6	123.8	-14.7
T4	973	6	53	867	-8.1	152.4	-16.5
T5	972	22	64	845	-8.2	204.8	-18.6

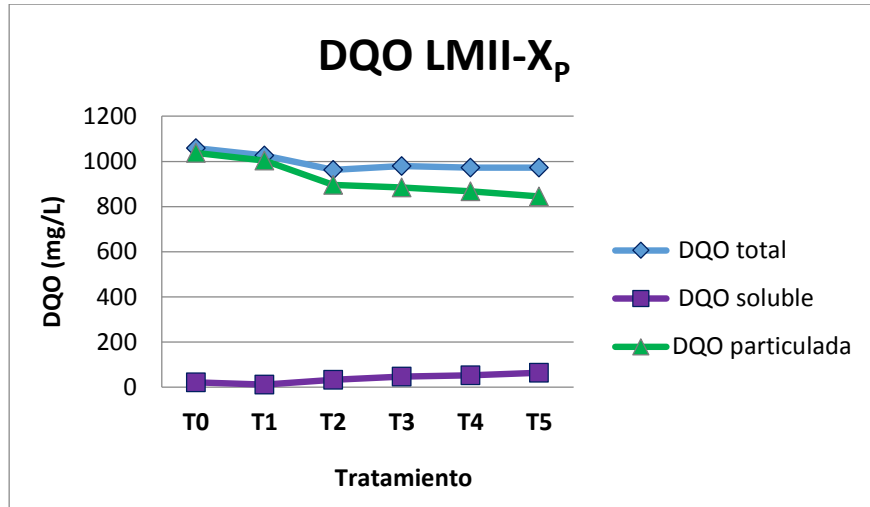


Figura 28. Demanda química de oxígeno, segunda prueba para el lodo modelo II-X_p.

4.5.3. Fosfatos

La tabla 24 muestra los valores de fósforo total y ortofosfatos, los cuales presentan un patrón uniforme ya que; estos no cambiaron en los diferentes tratamientos con O₃.

Tabla 24. Fosfatos para el lodo modelo II-X_P con cinco tratamientos de O₃

Muestra	Fósforo total	Desv. est.	Ortofosfatos	Desv. est.
T0	79	2	43	0
T1	82	0	42	1
T2	76	0	43	0
T3	98	1	46	0
T4	80	1	46	0
T5	84	0	46	0

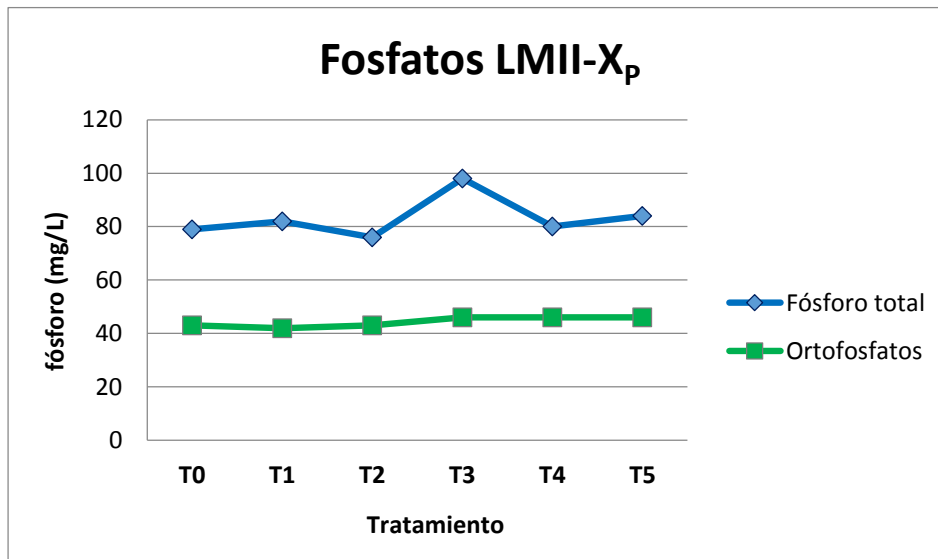


Figura 29. Fósforo total y Ortofosfatos para el lodo modelo II-X_P antes y después de ozonación.

4.5.4. Tamaño de partícula

El diámetro de partícula se presenta en porcentaje acumulativo en cinco diferentes tamaños. El 10% de los flóculos presentó valores de 14.32 μm para el T0 y 20.57 μm . Se esperaría que el tamaño disminuyera con la cantidad de O_3 sin embargo, el tamaño aumentó. Para el 25% el tamaño varió de 32.13 a 39.78 μm y se presentó el mismo patrón, el tamaño aumento de acuerdo a la dosis de O_3 . El 50% tuvo valores de 70.2 (T0) y 75.1 μm (T5). 75% y 90% presentaron valores más grandes, sin embargo; entre tratamientos no hubo gran variación y se mantuvieron uniformes (tabla 25).

Tabla 25. Porcentaje acumulativo del diámetro de partícula para el lodo modelo II- X_P , a cinco diferentes dosis de O_3 .

Tratamiento	% acumulativo de diámetro de la partícula LMII- X_P				
	10%	25%	50%	75%	90%
T0	14.32	32.13	70.2	107.8	140.1
T1	14.93	32.73	70.16	107.5	139.6
T2	15.26	33.48	71.2	108.4	140.1
T3	17.6	35.91	72.1	108.9	141
T4	19.68	38.87	74.01	110.4	141.6
T5	20.57	39.78	75.1	111.4	142.2

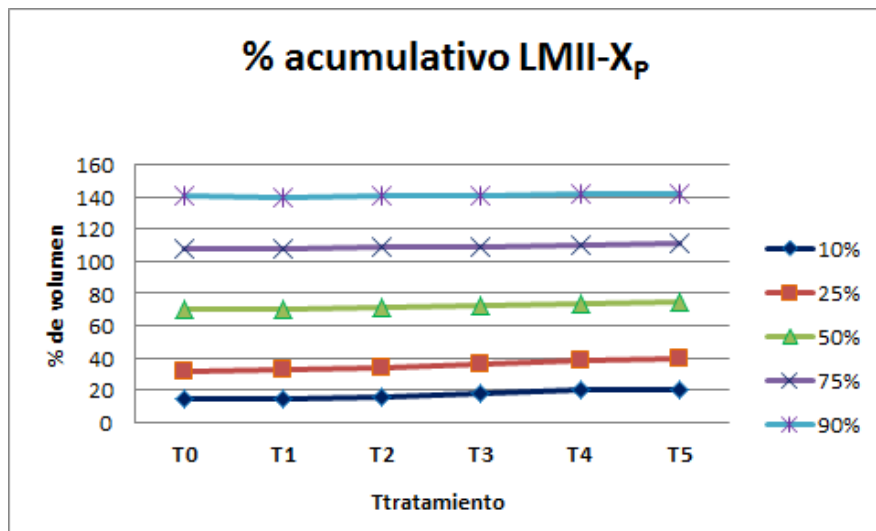


Figura 30. Diámetro de partícula para el lodo modelo II- X_P , antes y después de diferentes tratamientos de O_3

4.5.5. Respirometría

Para el lodo modelo II-X_p la actividad biológica en los diferentes tratamientos con O₃ presenta un patrón F/M alto (muchas comida y mínima cantidad de bacterias). La población bacteriana fue mínimo al inicio de todos los tratamientos debido a la cantidad de O₃ y a las condiciones en las que se generó el lodo, ya que; este lodo se almaceno en un garrafón, no se alimentó y sólo se aireo durante 3 meses (figura 31).

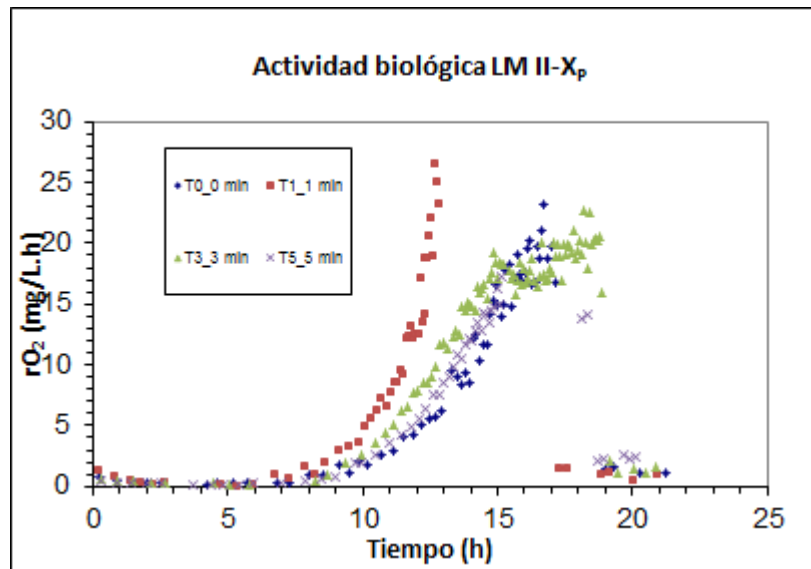


Figura 31. Actividad biológica para el lodo modelo II-X_p. Modelo F/M alto (muchas comida y mínima cantidad de bacterias).

El rO₂ se incrementó después de algunas horas, ya que; algunas bacterias sobrevivieron a las dosis de ozono y al tener alimento se incrementó la población bacteriana (tabla 26).

Tabla 26. rO₂ inicial y su porcentaje para el T0, T1, T3 y T5 del lodo modelo I-X_H

Tiempo de ozonación (min)	rO ₂ inicial (mg/L.h)	Desv. est.	rO ₂ inicial (%)
0	0.3	0.2	100.0
1	0.7	0.5	205.6
3	0.4	0.2	108.0
5	0.3	0.1	89.0

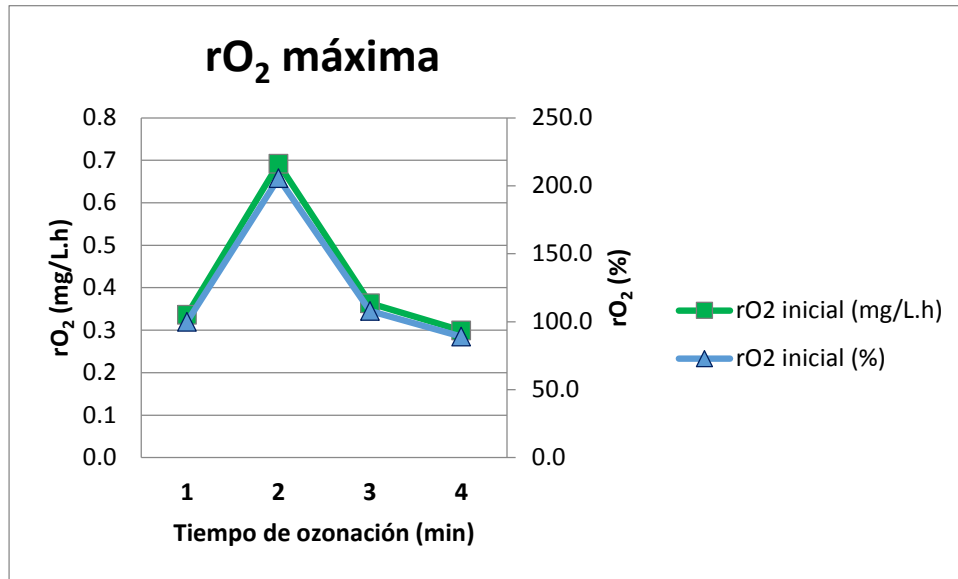


Figura 32. rO_2 máxima para el lodo modelo II- X_p

La rO_2 máxima inicial para el lodo modelo II- X_p se presentó en el T1 y fue disminuyendo en el T3 y T5.

Para el T1 el modelo F/M fue bajo debido a que la cantidad de bacterias era mayor en relación con el alimento (agua residual sintética), por lo tanto; la actividad biológica fue mayor al inicio, después disminuyó (figura 32).

4.6. Lodo de la Planta Toluca Norte-X₁

Los parámetros fisicoquímicos como pH, conductividad y turbiedad se analizaron para la PTN. Se obtuvo un pH neutro y una conductividad eléctrica con valores muy altos, debido a que el contenido del agua residual de la PTN tiene restos de aguas municipales (tabla 27).

Tabla 27. Parámetros fisicoquímicos de la Planta Toluca Norte-X₁

Tratamiento	pH		Conductividad eléctrica (ms/cm)		Turbiedad (UTN)	
	Promedio	Desv. est.	Promedio	Desv. est.	Promedio	Desv. est.
T0	7.58	0.3	564.00	11.1	11.89	7.51
T1	7.85	0.1	567.00	8.7	99.75	35.71
T2	7.81	0.1	566.30	6.9	112.20	19.52
T3	7.76	0.1	573.80	11.6	131.00	29.70
T4	7.61	0.1	567.50	10.2	134.00	38.18
T5	7.56	0.1	581.70	2.5	126.25	42.07

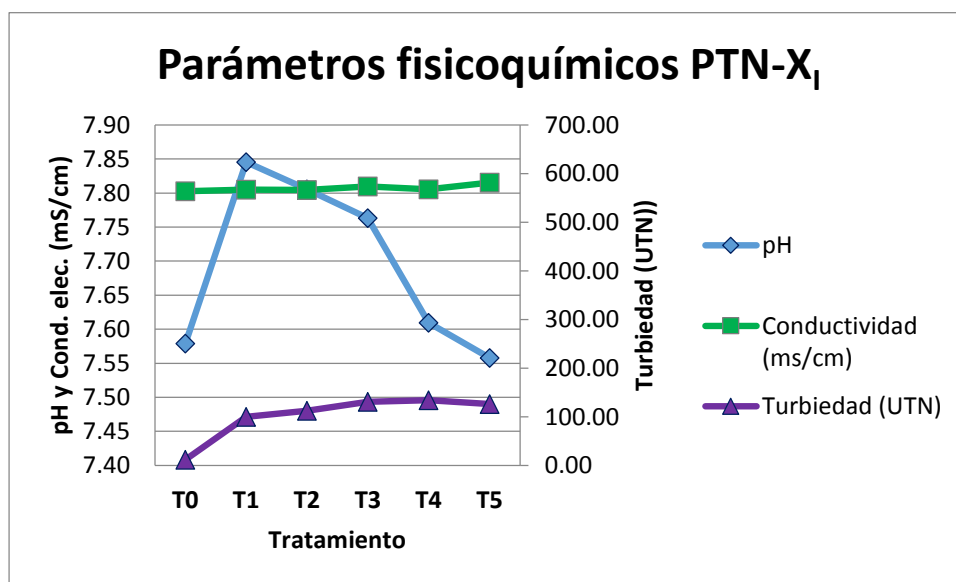


Figura 33. pH, conductividad y turbiedad del lodo de la PTN-X₁ a diferentes dosis de O₃.

4.6.1. Sólidos suspendidos

El porcentaje de cambio para los sólidos de la PTN-X₁ presentó una disminución. Por lo tanto; la cantidad de O₃ aplicada en cada tratamiento influyó en la cantidad de sólidos en suspensión (tabla 28).

Tabla 28. Sólidos suspendidos para la PTN-X₁, el porcentaje de cambio entre los diferentes tratamientos mostró una disminución en la cantidad de sólidos.

Tratamiento	SST (mg/L)	Desv. est.	SSV (mg/L)	Desv. est.	SSF (mg/L)	Desv. est.	IVT	% de cambio		
								SST	SSV	SSF
T0	827	58	560	53	267	12	0.68			
T1	740	60	480	20	260	40	0.65	-10.5	-14.3	-2.62
T2	613	61	387	31	227	31	0.63	-25.9	-30.9	-14.98
T3	620	20	367	12	253	31	0.59	-25.0	-34.5	-5.24
T4	640	20	393	12	247	12	0.61	-22.6	-29.8	-7.49
T5	647	12	407	12	240	20	0.63	-21.8	-27.3	-10.11

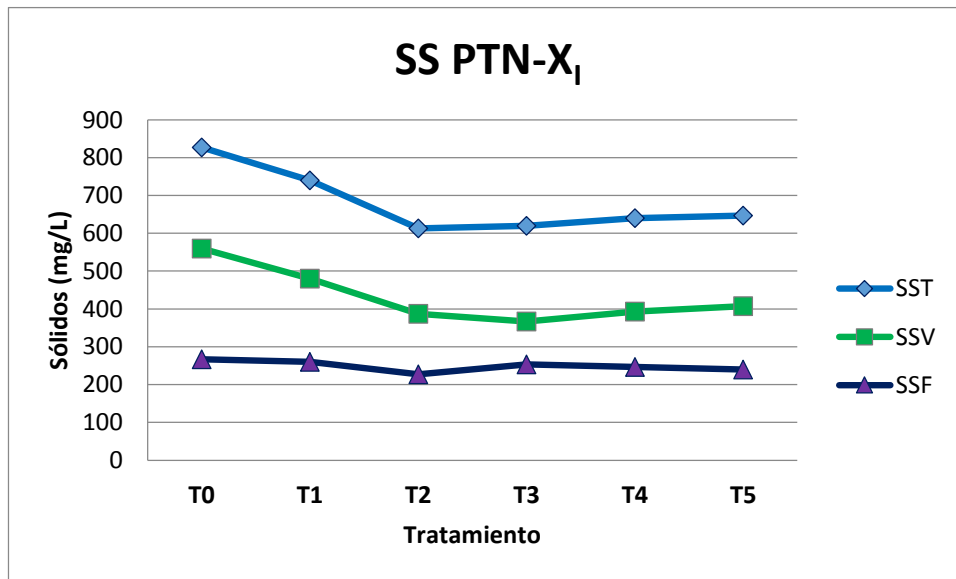


Figura 34. Sólidos suspendidos para la PTN-X₁, antes y después de cinco tratamientos de O₃

La segunda prueba de sólidos suspendidos, mostró una disminución con relación a la cantidad de O₃. Fue un patrón similar a la prueba uno ya que, la cantidad de materia orgánica se desintegró y los SSV disminuyeron de 553 a 407 mg/L.

Tabla 29. Segunda prueba de sólidos suspendidos para la PTN-X₁

Tratamientos	SST (mg/L)	Desv. est.	SSV (mg/L)	Desv.est.	SSF (mg/L)	Desv. est.	IVT	% de cambio	
								SST	SSV
T0	840	20	553	12	287	12	0.66		
T1	690	14	440	28	250	14	0.64	-17.9	-0.20
T2	540	28	350	14	190	14	0.65	-0.5.7	-0.37
T3	627	23	400	20	227	12	0.64	-25.4	-0.28
T4	560	0	347	12	213	12	0.62	-33.3	-0.37
T5	647	46	407	46	240	0	0.63	-23.0	-0.26

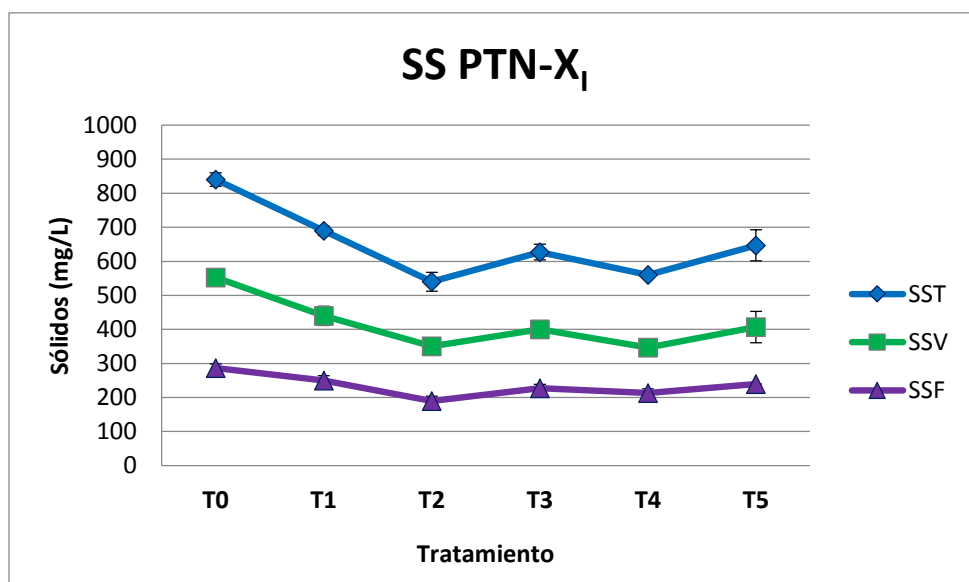


Figura 35. Sólidos suspendidos para la PTN-X₁

4.6.2. Demanda química de oxígeno (DQO)

De acuerdo a la tabla 30 la DQO soluble presentó un aumento con respecto a la cantidad de O_3 aplicado a un lodo de la PTN- X_1 . La cantidad de sólidos en suspensión disminuyó; el T0 tuvo 1023 mg/L y el T5 tuvo 967 mg/L.

Tabla 30. Demanda química de oxígeno para el lodo de la PTN- X_1

Tratamiento	DQO total (mg/L)	Desv. est.	DQO soluble (mg/L)	DQO particulada (mg/L)	% de cambio		
					DQO total	DQO soluble	DQO particulada
T0	1023	32	19	1004	---	---	---
T1	975	85	48	956	-4.7	152.6	-4.8
T2	952	122	160	952	-6.9	742.1	-5.2
T3	1010	8	189	1010	-1.3	894.7	0.6
T4	953	7	184	905	-6.8	868.4	-9.9
T5	967	73	110	967	-5.5	478.9	-3.7

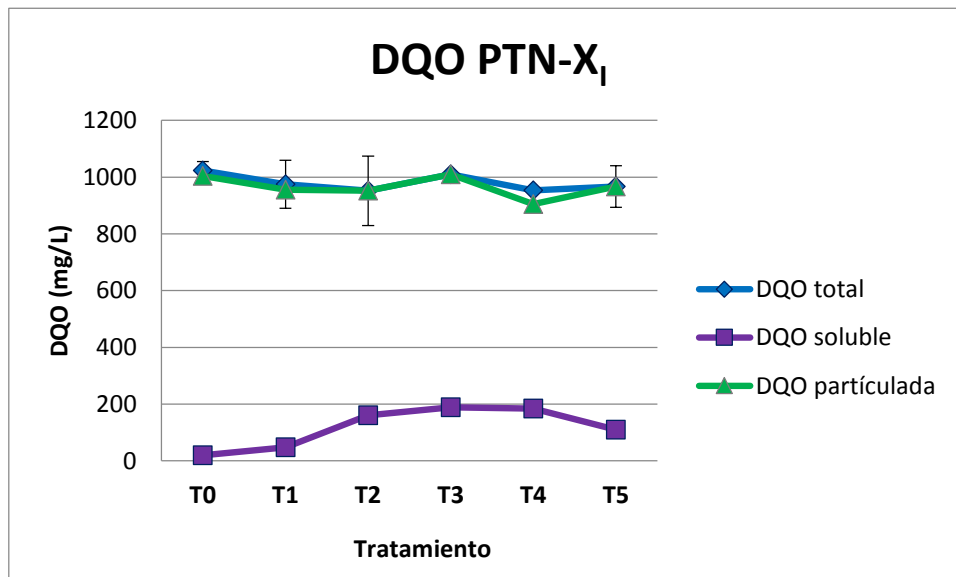


Figura 36. DQO total, soluble y particulada de la PTN- X_1 antes y después de cinco diferentes dosis de O_3 .

La segunda prueba realizada al lodo de la PTN-X₁ mostró un comportamiento similar a la primera prueba. El porcentaje de cambio en DQO soluble aumento con la dosis de O₃ y a DQO total disminuyó de 912 mg/L a 887 mg/L.

Tabla 31. Segunda prueba de DQO para cinco diferentes tratamientos de O₃ de la PTN-X₁

Tratamiento	DQO total (mg/L)	Desv. Est.	DQO soluble (mg/L)	DQO particulada (mg/L)	% de cambio		
					DQO total	DQO soluble	DQO particulada
T0	912	1	46	985	---	---	---
T1	870	141	131	739	-4.6	184.8	-24.9
T2	893	6	150	743	-2.1	226.1	-24.5
T3	868	66	215	653	-4.8	367.4	-33.7
T4	846	9	207	639	-7.2	350.0	-35.1
T5	887	45	195	692	-2.7	323.9	-29.7

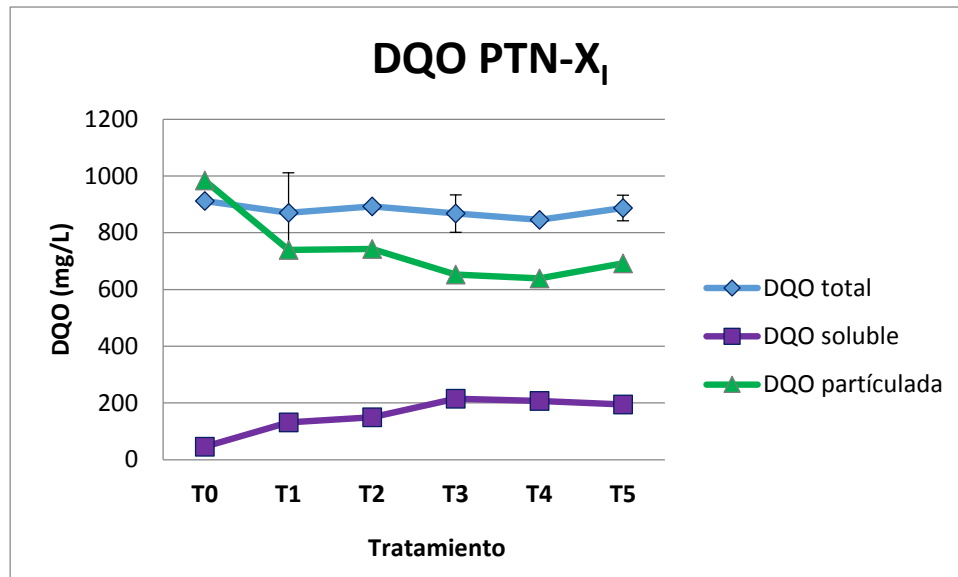


Figura 37. Demanda Química de Oxígeno antes y después de la aplicación de O₃ para la PTN-X₁

5.6.3. Fosfatos

La cantidad de Fosforo total no presentó una variación importante en los diferentes tratamientos con O_3 , el T0 tuvo 51 mg/L y el T5 55 mg/L.

Los Ortofosfatos también tuvieron un comportamiento uniforme, se presentaron valores de 14 mg/L (T0) y 13 mg/L (T5).

Tabla 32. Fosfatos para la PTN- X_1 con cinco tratamientos de O_3

Muestra	Fósforo total	Desv. est.	Ortofosfato	Desv. est.
T0	51	0.21	14	0.42
T1	52	0.42	12	0.14
T2	49	0.07	12	0.28
T3	50	0.28	13	0.99
T4	53	0.64	12	0.00
T5	55	0.57	13	0.00

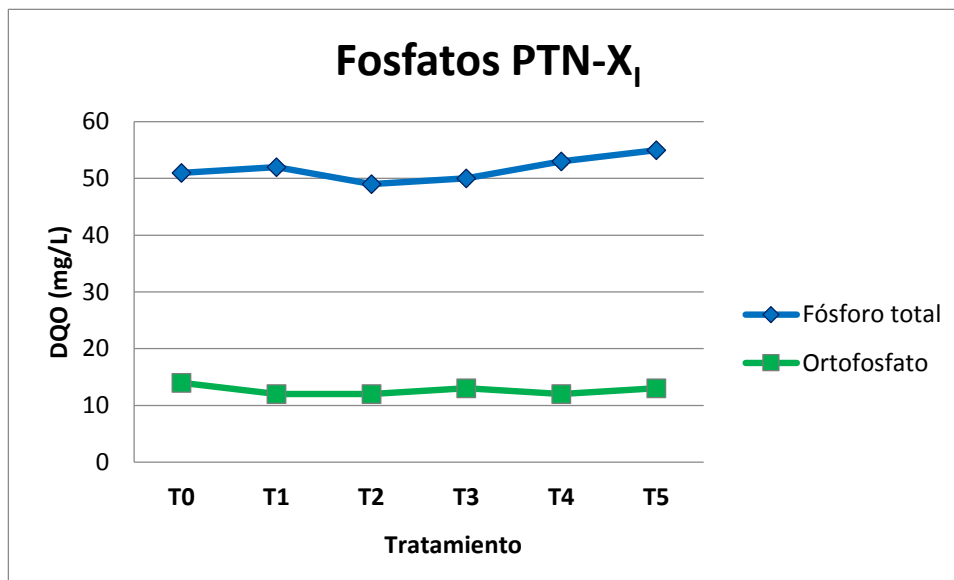


Figura 38. Fósforo total y Ortofosfatos para una muestra de la PTN- X_1 a cinco diferentes tratamientos de O_3 .

4.6.4. Diámetro de partícula

El 10% de los flocúlos presentó valores de 20.54 μm para el T0 y 13.48 μm . Por lo tanto; la cantidad O_3 aplicada disminuyó el tamaño de partículas. Para el 25% el tamaño varió de 36.46 a 32.96 μm y se presentó el mismo patrón, el tamaño disminuyó de acuerdo a la dosis de O_3 . El 50% tuvo valores de 61.04 (T0) y 86.21 μm (T5), el tamaño aumentó ligeramente al aumentar la dosis de O_3 . 75% y 90% presentaron valores más grandes, sin embargo; el tamaño aumentó considerablemente en cada tratamiento (tabla 33).

Tabla 33. Porcentaje acumulativo de diámetro de partícula para el lodo de la PTN-X₁

Tratamiento	% acumulativo de tamaño de partícula PTN-X ₁				
	10%	25%	50%	75%	90%
T0	20.54	36.46	61.04	118.4	379.3
T1	16.65	38.24	96.18	274	624.9
T2	17.91	40.77	104.8	303.8	642.2
T3	15.1	34.07	82.28	252.5	601.9
T4	14.66	35.8	95.57	295.1	641.7
T5	13.48	32.96	86.21	274.8	596.5

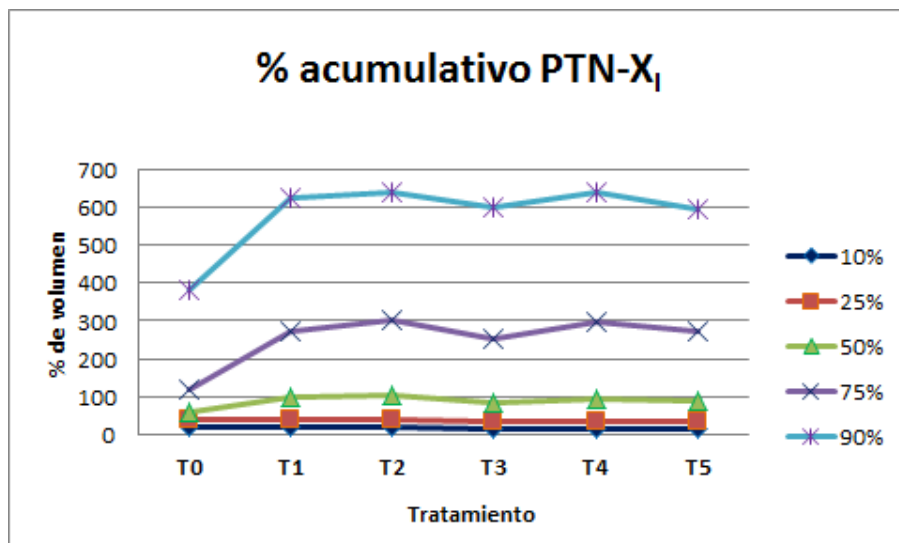


Figura 39. Diámetro de partícula para el lodo de la PTN-X₁ antes y después de diferentes tratamientos de O_3 .

4.6.5. Respirometría

La actividad biológica para la PTN inició horas después, algunas bacterias resistieron las diferentes dosis de O_3 e iniciaron la alimentación; así la población bacteriana se incrementó y la actividad biológica se presentó para cada uno de los tratamientos (figura 40).

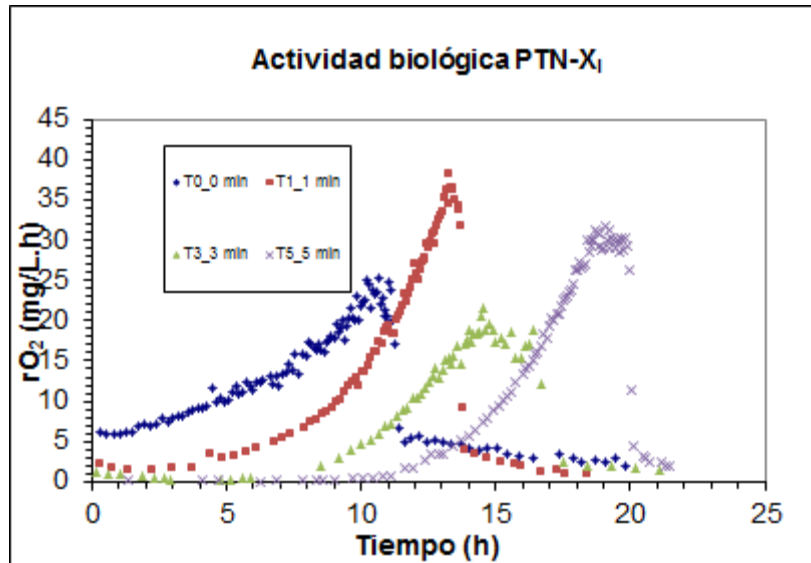


Figura 40. rO_2 del lodo de la PTN- X_1

El rO_2 máximo para el lodo de la PTN X_1 se presentó en el T0. La cantidad de bacterias al inicio fue mayor para este. Por lo tanto; el O_3 causó lisis celular y la actividad biológica inicio después de la recuperación de algunas bacterias que pudieron alimentarse y reproducirse (tabla 34).

Tabla 34. rO_2 máximo antes y después de ozonación

Tiempo de ozonación min	rO_2 inicial	Desv. est.	rO_2 inicial%
0	6.2	0.4	100.0
1	2.2	0.8	35.4
3	0.6	0.3	9.4
5	0.2	0.1	3.3

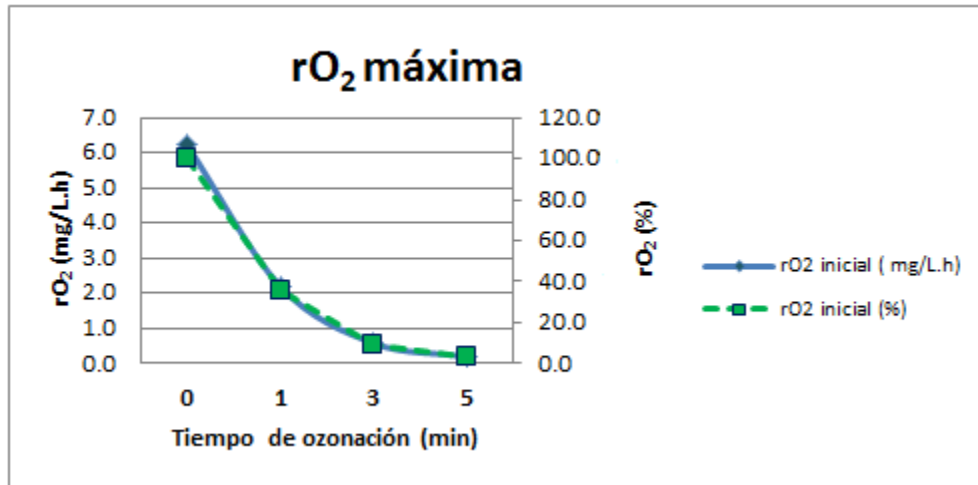


Figura 41. rO₂ máximo inicial en % y en mg/L.h para el lodo de la PTN-X₁.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

- ✓ El lodo modelo I- X_H cultivado en el laboratorio (RA y RB) presentó valores bajos en el efluente (DQO total de 23 mg/L) por lo tanto, tuvieron una buena eficiencia en el tratamiento biológico. La cantidad de SSV tuvo un promedio anual de 1661 mg/L.
- ✓ Debido a la buena sedimentación del lodo y a la cantidad de sólidos en suspensión se obtuvieron valores de turbiedad de 3.3 y 1.4 (UTN) promedio anual para 2014.
- ✓ La concentración de O_3 incrementó de acuerdo al tiempo de tratamiento. El lodo modelo II- X_P presentó una concentración específica de 0.04 a 0.22 g O_3 /g SSV y el lodo de la PTN- X_I tuvo valores de 0.08 a 0.27 g O_3 /g SSV.
- ✓ El ozono causó lisis celular y la cantidad de sólidos disminuyó al aumentar la concentración de O_3 , en los tres tipos de lodo (X_H , X_P y X_I).
- ✓ La DQO soluble y la turbidez aumentó de acuerdo a la concentración de O_3 en los tres tipos de lodo (X_H , X_P y X_I).
- ✓ La actividad biológica fue alta en el T0 para los tres tipos de lodo (X_H , X_P y X_I); para el T3 y T5 ésta actividad inició horas después ya que, el número de bacterias disminuyó debido a la lisis celular causada por el O_3 .

5.2. Recomendaciones

- ✓ Realizar una caracterización del agua de llave y así tener las bases para mantener un control en parámetros fisicoquímicos, ya que; el agua de llave se utilizó en el cultivo del LMI- X_H y en la elaboración del agua residual sintética.
- ✓ Organizar un sistema de ozonación para evitar fugas debido a que es muy tóxico y también para no tener errores en la determinación de la concentración de O_3 .
- ✓ Realizar un análisis estadístico para poder comprobar que existen diferencias significativas entre los diferentes tratamientos y entre los tipos de lodo.

6. REFERENCIAS

- Ahn, K.H., Park, K.Y., Maeng, S.K., Hwang, J.H., Lee, J.W., Song, K. G. & Choi, S. (2002). Ozonation of wastewater sludge for reduction and recycling. *Water Science and Technology* 46 (10), 71–77.
- APHA (2005). Standard methods for the examination of water and wastewater, 21th ed. American Public Health Association Washington D.C., APHA.
- Bohler, M. & Siegrist, H. (2004). Partial ozonation of activated sludge to reduce excess sludge, improve denitrification and control scumming and bulking. *Water Science and Technology*, 49(10), 41–49.
- Bougrier, C., Albasi, C., Delgenes, J.P., Carre, H., 2006. Effect of ultrasonic, thermal and ozone pre-treatments on waste activated sludge solubilisation and anaerobic biodegradability. *Chemical Engineering and Processing* 45 (8), 711–718.
- Chu, L., Yan, S., Xing, X-H., Sun, X. & Jurcik, B. (2009). Progress and perspectives of sludge ozonation as a powerful pretreatment method for minimization of excess sludge production. *Water Research*, 43(7), 1811–1822.
- Cesbron, D., Deleris, S., Debellefontaine, H., Roustan, M. & Paul, E. (2003). Study of competition for ozone between soluble and particulate matter during activated sludge ozonation. *Chemical Engineering Research and Design*, 81 (A9), 1165–1170.
- Chu, L., Wang, J., Wang, B., Xing, X.-H., Yan, S., Sun, X., Jurcik, B., 2009a. Changes in biomass activity and characteristics of activated sludge exposed to low ozone dose. *Chemosphere* 77, 269–272.
- Chu, L.B., Yan, S.T., Xing, X.H., Yu, A.F., Sun, X.L. & Jurcik, B. (2008). Enhanced sludge solubilization by microbubble ozonation. *Chemosphere*, 72 (2), 205–212.
- Chu, L., Yan, S., Xing, X-H., Sun, X. & Jurcik, B. (2009). Progress and perspectives of sludge ozonation as a powerful pretreatment method for minimization of excess sludge production. *Water Research*, 43(7), 1811–1822.
- Cui, R., Jahng, D., 2004. Nitrogen control in AO process with recirculation of solubilized excess sludge. *Water Research* 38 (5), 1159–1172.
- Deleris, S. (2001). Réduction de la production de boues par couplage d'un procédé chimique et d'une boue activée (Sludge minimization by coupling chemical and activated sludge processes), Ph.D. Thesis, INSA de Toulouse, France.

- García, C. V. (2004). *Introducción a la Microbiología*. Segunda edición. México. 58-59.
- Huysmans, A., Weemaes, M., Fonseca, P.A. & Verstraete, W. (2001). Ozonation of activated sludge in the recycle stream. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology* 76 (3), 321–324.
- Jiménez, D. E. (2010). *Modelación matemática del proceso de nitrificación en dos etapas. Desarrollo de metodologías de calibración del modelo para un reactor SHARON y un proceso de lodos activados*. Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente. Universidad Politécnica de Valencia. Memoria de Tesis Doctoral publicada. Valencia.
- Kobayashi, T., Arakawa, K., Katu, Y. & Tanaka, T. (2001). Study on sludge reduction and other factors by use of an ozonation process in activated sludge treatment. In: 15th Ozone World Congress Conference, London.
- Labelle, M., Ramdani, A., Deleris, S., Gadbois, A., Dold, P. & Comeau, Y. (2011). Ozonation of endogenous residue and active biomass from a synthetic activated sludge. *Water Science and Technology*, 63.2, 297-302.
- Lee, J.W., Cha, H.Y., Park, K.Y., Song, K.G. & Ahn, K.H. (2005). Operational strategies for an activated sludge process in conjunction with ozone oxidation for zero excess sludge production during winter season. *Water Research*, 39 (7), 1199–1204.
- Liu, Y. (2003). Chemically reduced excess sludge production in the activated sludge process. *Chemosphere*, 50 (1), 1–7.
- Montoya, V. H. H. (2008). *Microbiología básica para el área de la salud y afines*. Segunda edición. Universidad de Antioquia. Colombia. 67-68.
- Nagare, H., Tsuno, H., Saktaywin, W. & Soyama, T. (2008). Sludge ozonation and its application to a new advanced wastewater treatment process with sludge disintegration. *Ozone: Science and Engineering*, 30 (2), 136–144.
- Paul, E. & Debellefontaine, H. (2007). Reduction of excess sludge produced by biological treatment processes: effect of ozonation on biomass and on sludge. *Ozone: Science and Engineering*, 29, 415-427.
- Park, K.Y., Ahn, K.-H., Maeng, S.K., Hwang, J.H. & Kwon, J.H. (2003). Feasibility of sludge ozonation for stabilization and conditioning. *Ozone Science & Engineering*. 25, 73–80.
- Rakness, K; Gordon, G; Langlais, B; Masschelein, W; Matsumoto, N; Richard, Y; Robson, M & Somiya, I. (1996). Guideline for measured of ozone concentration in the

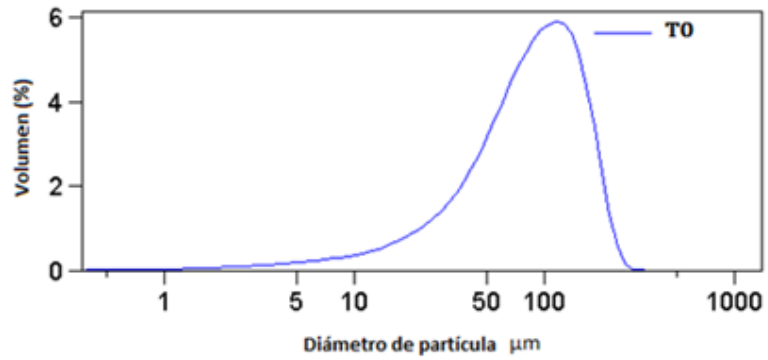
- process gas from an ozone generator. *Ozone Science & Engineering*, (18), 209-229.
- Richardson, E. E., Edwards, F., & Hernandez, J. (2009). Ozonation in sequencing batch reactors for reduction of waste solids. *Water Environment Research*, 81 (5), 506-513.
- Roldán, P. G. & Ramírez, R. J. J. (2008). *Fundamentos de limnología neotropical. segunda edición*. Universidad de Antioquia. Academia colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Colombia. 224-225.
- Saby, S., Djafer, M. & Chen, G.-H. (2002). Feasibility of using a chlorination step to reduce excess sludge in activated sludge process. *Water Research*, 36, 656–666.
- Saktaywin, W., Tsuno, H., Nagare, H., Soyama, T., Weerapakkaron, J., 2005. Advanced sewage treatment process with excess sludge reduction and phosphorus recovery. *Water Research* 39 (5), 902–910.

7. ANEXOS

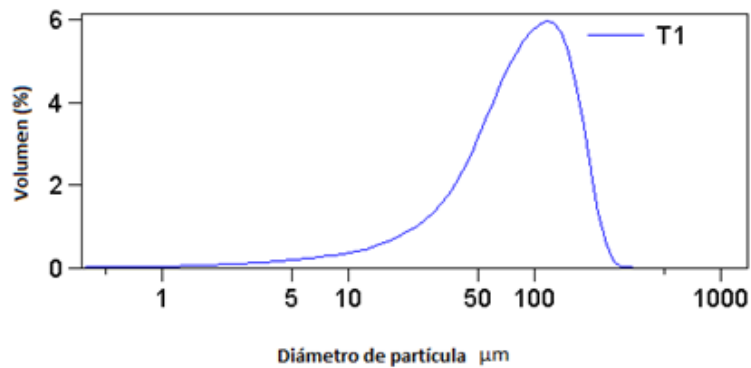
ANEXO A: Tamaño de partícula para los tres tipos de lodo (X_H , X_P y X_I)

Gráficas del LMI- X_H

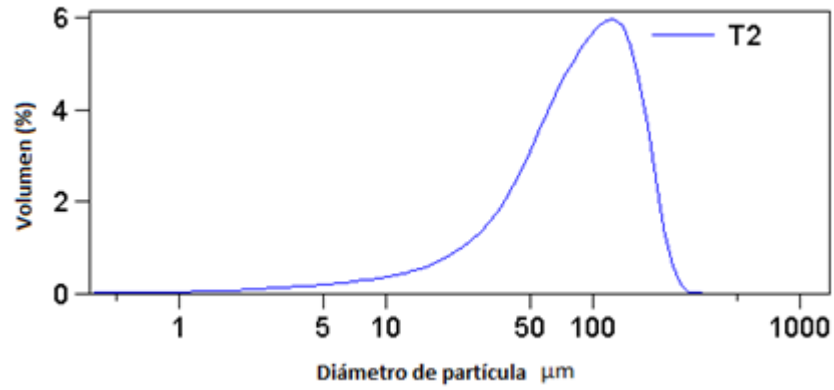
LMI- X_H (T0)		
Media	Mediana	Moda
72.19 μm	86.42 μm	116.3 μm



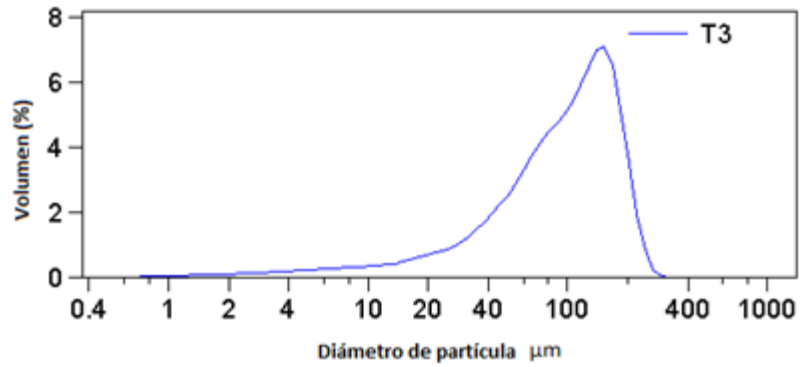
LMI- X_H (T1)		
Media	Mediana	Moda
72.88 μm	87.15 μm	116.3 μm



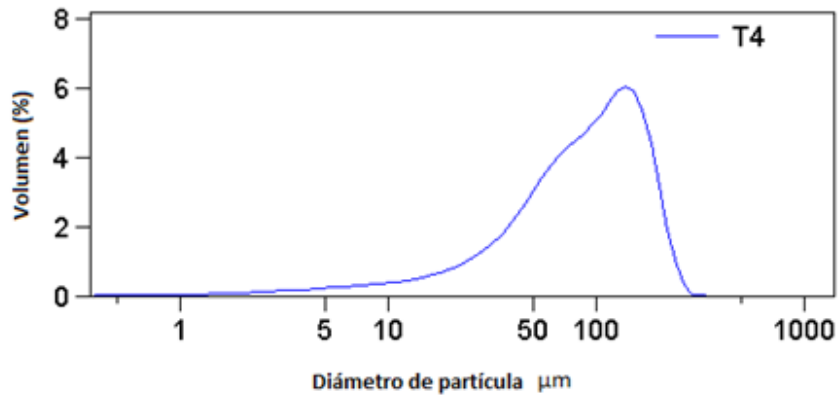
LMI-X _H (T2)		
Media	Mediana	Moda
73.39 μm	88.32 μm	127.6 μm



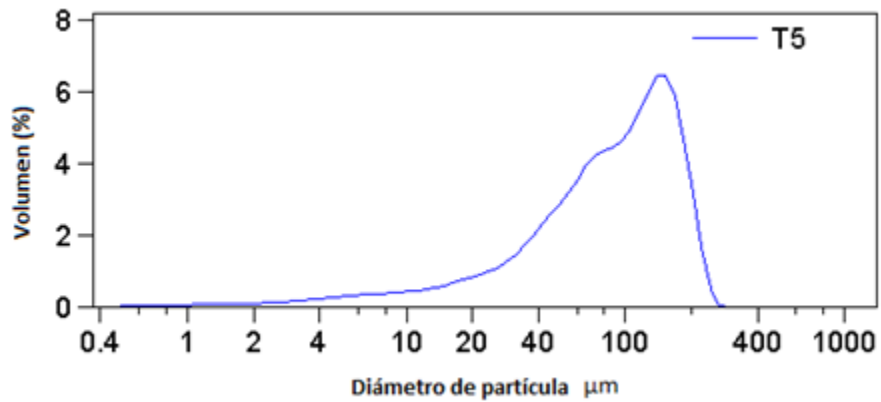
LMI-X _H (T3)		
Media	Mediana	Moda
81.10 μm	101.1 μm	153.8 μm



LMI-X _H (T4)		
Media	Mediana	Moda
74.71 μm	91.44 μm	140.1 μm

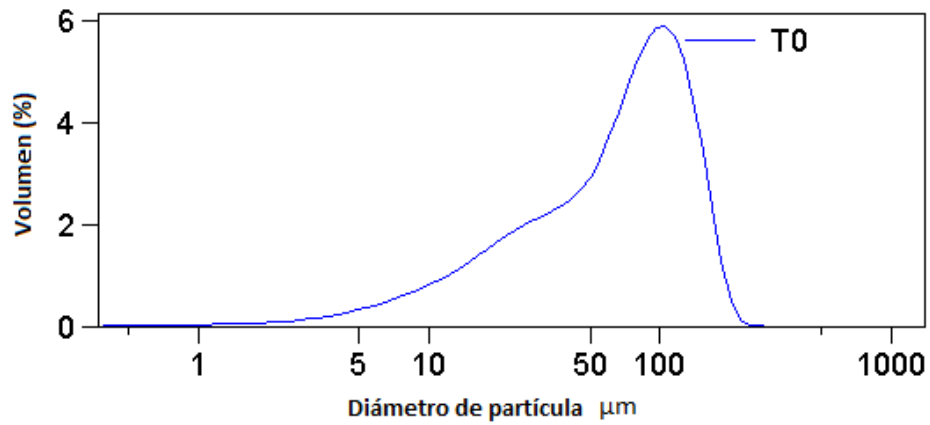


LMI-X _H (T5)		
Media	Mediana	Moda
73.12 μm	92.01 μm	153.8 μm

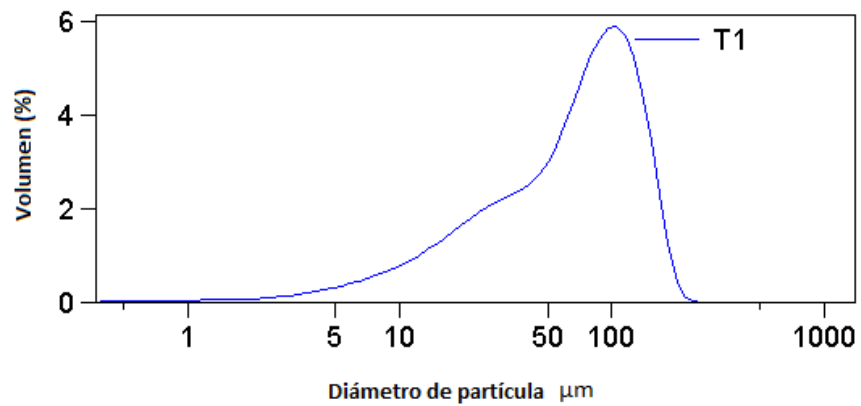


Gráficas del LMII-X_P

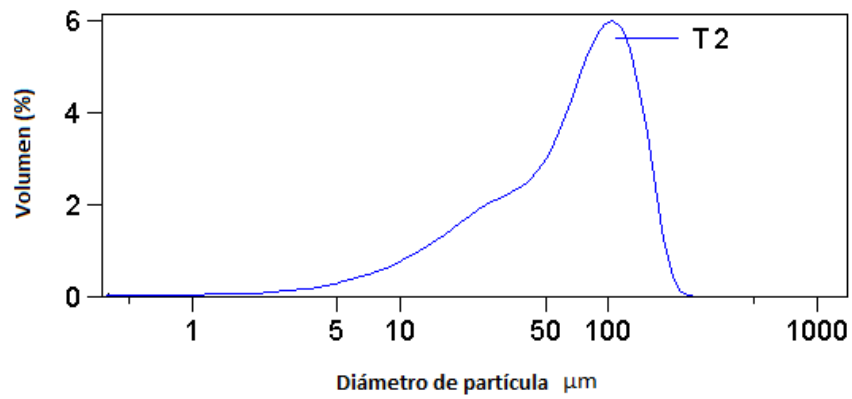
LMII-X _P (T0)		
Media	Mediana	Moda
73.12 μm	92.01 μm	153.8 μm



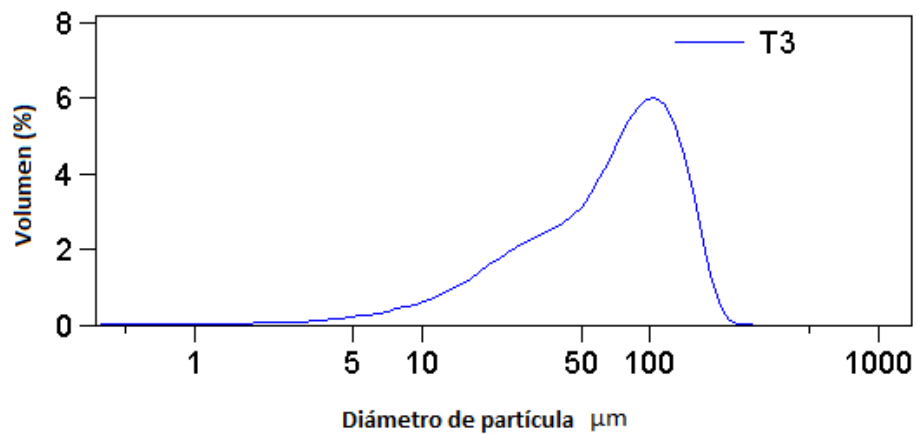
Lodo Modelo II (T1)		
Media	Mediana	Moda
54.41 μm	70.16 μm	105.9 μm



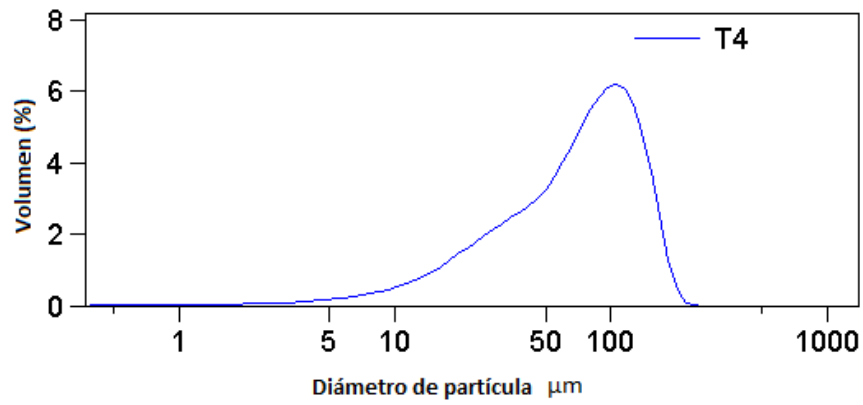
LMII-X _P (T2)		
Media	Mediana	Moda
55.20 μm	71.20 μm	105.9 μm



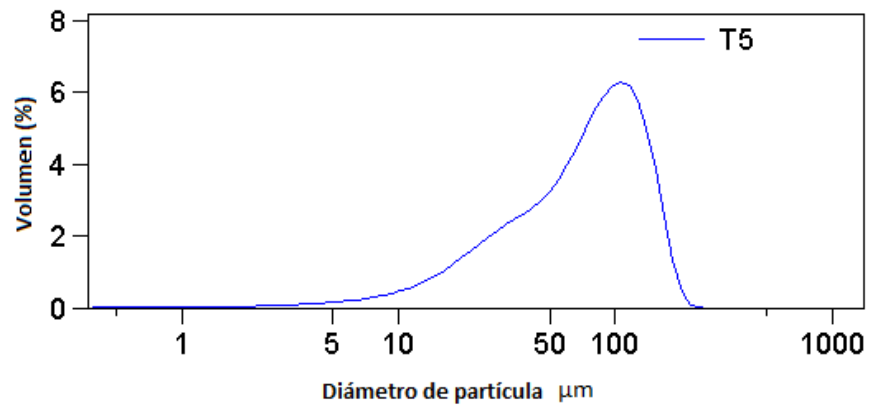
LMII-X _P (T3)		
Media	Mediana	Moda
57.63 μm	72.10 μm	105.9 μm



LMII-X _P (T4)		
Media	Mediana	Moda
60.28 μm	74.01 μm	105.9 μm

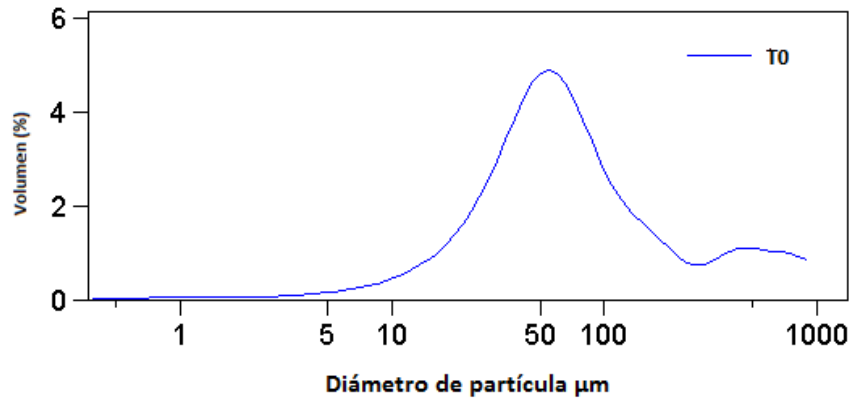


LMII-X _P (T5)		
Media	Mediana	Moda
61.42 μm	75.10 μm	105.9 μm

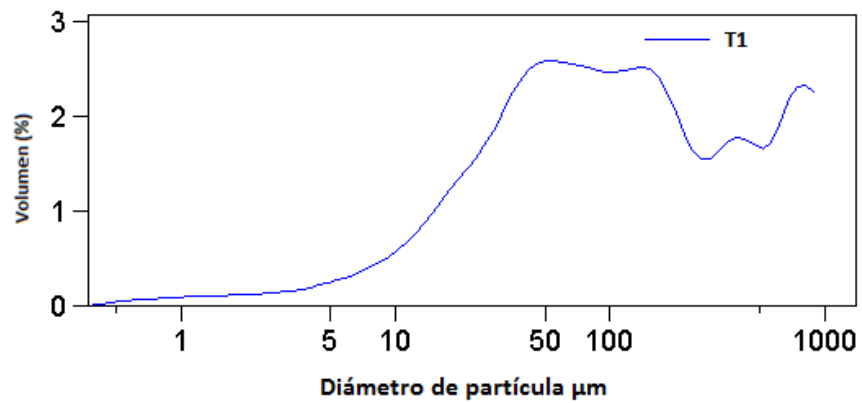


Gráficas del Lodo de la PTN-X_i

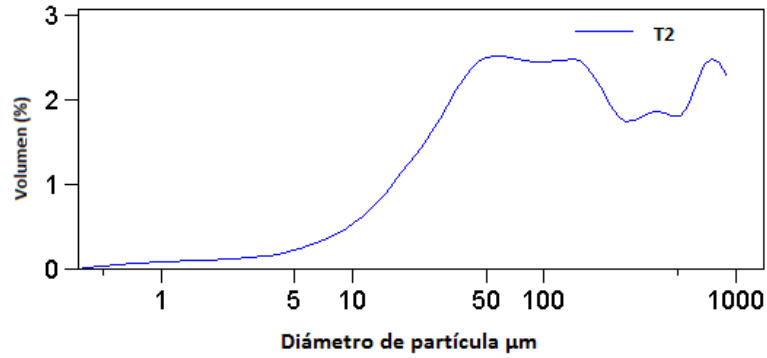
Lodo PTN-X _i (T0)		
Media	Mediana	Moda
68.18 μm	61.04 μm	55.13 μm



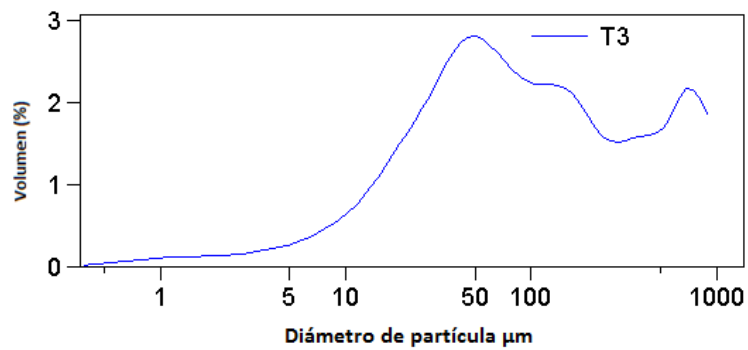
Lodo PTN-X _i (T1)		
Media	Mediana	Moda
93.68 μm	96.18 μm	55.13 μm



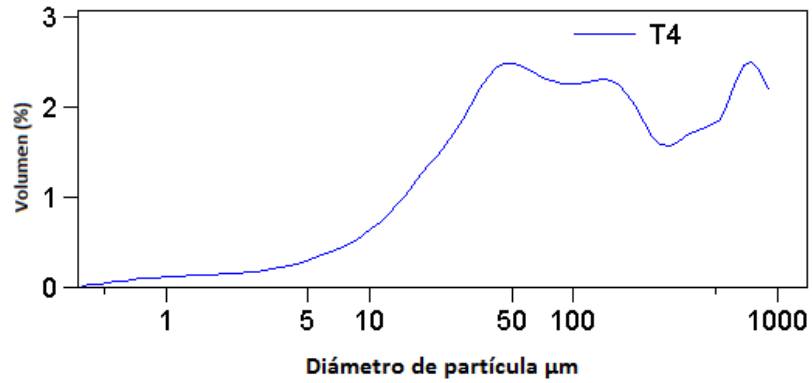
Lodo PTN-X ₁ (T2)		
Media	Mediana	Moda
100.7 μm	104.8 μm	60.52 μm



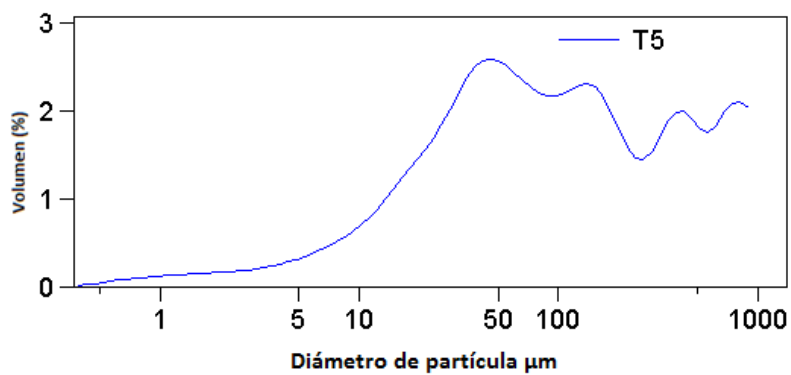
Lodo PTN-X ₁ (T3)		
Media	Mediana	Moda
84.67 μm	82.28 μm	50.22 μm



Lodo PTN-X ₁ (T4)		
Media	Mediana	Moda
91.41 μm	95.57 μm	751.1 μm



Lodo PTN-X ₁ (T5)		
Media	Mediana	Moda
84.11 μm	86.21 μm	45.75 μm



ANEXO B: Seguimiento de DQO y Nitratos para el LMII-X_P

Lodo Modelo II-X _P				
Fecha	Tratamiento	DQO soluble (mg/L)	DQO total (mg/L)	DQO particulada (mg/L)
04/12/2014	T0	----	1760	----
21/01/2015	T0	42	1406	1364
14/02/2015	T0	64	1125	1061
04/03/2015	T0	62	1067	1005
Nitratos (NO ₃ ⁻)				
04/03/2015	T0		120	