



**UNIVERSIDAD MICHOACANA
DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO**



FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

FACULTAD DE BIOLOGÍA

**MAESTRÍA EN CIENCIAS EN INGENIERÍA
AMBIENTAL**

**Evaluación de un proceso de filtración y oxidación
avanzada con ozono para el tratamiento de las
aguas residuales municipales**

Tesis

Que para obtener el grado de:

**MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA
AMBIENTAL**

Presenta

ING. DAVID PIÑA VALENTIN

Asesor

DR. JOSÉ APOLINAR CORTÉS

Morelia, Michoacán

septiembre del 2024

Resumen

Las descargas continuas de aguas residuales municipales a los cuerpos de agua sin ningún tipo de tratamiento, los ha contaminado a tal nivel que se ha sobrepasado su capacidad de autodepurarse. Con la finalidad de coadyuvar en el proceso de autodepuración de los cuerpos de agua, se evaluó el efecto de un tratamiento combinado de filtración y oxidación avanzada con ozono, para la oxidación de la materia orgánica en aguas residuales municipales. El desarrollo experimental de las pruebas se realizó considerando 4 factores (filtración, flujo de ozono, caudal de agua residual y temperatura) en dos niveles (alto y bajo) teniendo como variable respuesta la remoción de la materia orgánica medida como STV; el seguimiento de las pruebas se realizó a través de los parámetros de: pH, conductividad, oxígeno disuelto, y ozono ambiental. La implementación del diseño de experimentos permitió identificar los factores que influyen en el sistema de tratamiento, los cuales en orden de importancia son el uso de filtración, el flujo de ozono de 2.11 L/min, el flujo de agua residual de 2 L/min y la temperatura de 15 °C. Los resultados indicaron que el uso del sistema de tratamiento combinado filtración-ozonización logró una remoción de los STV del 30.09 %, de la DQO del 18.15 % y DBO del 30.24 %, además de un incremento en la concentración de oxígeno disuelto pasando de 0.34 mg/L a 3.61 mg/L durante un tiempo de tratamiento de 5 minutos.

Palabras clave: autodepuración, biodegradabilidad, flujo de ozono, materia orgánica, ozonización.

Abstract

The continuous discharges of municipal wastewater into water bodies without any treatment has polluted them to such an extent that their self-purification capacity has been exceeded. In order to support the self-purification process of these water bodies, the effect of a combined treatment of filtration and advanced oxidation with ozone for the oxidation of organic matter in municipal wastewater was investigated. The experimental development of the tests was carried out considering 4 factors (filtration, ozone flux, wastewater flow, and temperature) at two levels (high and low), where the response variable was the removal of organic matter measured as TVS; the tests were monitored by the parameters pH, conductivity, dissolved oxygen, and ambient ozone. The implementation of the experimental design allowed the identification of the factors affecting the treatment system. In order of importance, these are the use of filtration, an ozone flux of 2.11 L/min, a wastewater flow of 2 L/min, and a temperature of 15°C. The results showed that the use of the combined filtration-ozonation treatment system resulted in a TVS removal of 30.09%, a reduction in chemical oxygen demand (COD) of 18.15%, and a biochemical oxygen demand (BOD) was reduced by 30.24%, together with an increase in dissolved oxygen concentration from 0.34 mg/L to 3.61 mg/L during a treatment time of 5 minutes.

Dedicatoria

A mis padres, quienes han estado a mi lado con su apoyo constante en cada etapa de mi vida. Es su esfuerzo incansable el que se refleja en cada uno de mis éxitos.

A mi hermano cuyo apoyo incondicional ha sido una fortaleza en los momentos desafiantes que nos presenta la vida.

A mis compañeros y amigos que me acompañaron a lo largo de este camino quienes convirtieron las horas de esfuerzo en tiempos llenos de alegría y compañerismo.

Índice

RESUMEN	II
ABSTRACT	III
DEDICATORIA	IV
ÍNDICE.....	V
ÍNDICE DE FIGURAS	IX
ÍNDICE DE FIGURAS ANEXO A.....	X
ÍNDICE DE FIGURAS ANEXO B.	XI
ÍNDICE DE FIGURAS ANEXO C.....	XI
ÍNDICE DE TABLAS	XIII
ÍNDICE DE TABLAS ANEXO C.....	XIV
ÍNDICE DE ECUACIONES	XV
ABREVIATURAS	XVI
AGRADECIMIENTOS	XVII
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN	1
1.1. GENERALIDADES	1
1.2. ANTECEDENTES	2
CAPÍTULO II.....	7
MARCO TEÓRICO.....	7

2.1. AGUAS RESIDUALES	7
2.2. CUERPO RECEPTOR.....	8
2.3. PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES (PTAR).....	8
2.4. PROCESOS DE OXIDACIÓN AVANZADA	8
2.4.1. <i>Ventajas de los POA</i>	9
2.4.2. <i>POA basados en ozono</i>	10
2.4.3 <i>Química del ozono</i>	10
2.4.4. <i>Solubilidad del ozono en agua</i>	11
2.5. RELACIÓN DE BIODEGRADABILIDAD DBO ₅ /DQO	12
2.6. FILTRACIÓN	13
2.6.1. <i>Tipos de filtros</i>	13
2.7. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	15
2.8. JUSTIFICACIÓN.....	15
2.9. HIPÓTESIS.....	16
2.10. OBJETIVO GENERAL.....	16
2.11. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	16
CAPÍTULO III.	17
3. METODOLOGÍA.....	17
3.1. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN	17
3.1.1. <i>Alimentación del agua residual municipal</i>	17
3.1.2. <i>Filtro de lecho simple</i>	17
3.1.3. <i>Reactor</i>	18

3.1.4 Filtro de lecho doble.....	19
3.2. MEDIO FILTRANTE	19
3.3. RECOLECCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DEL AGUA RESIDUAL.....	21
3.4. SISTEMA DE OZONIZACIÓN.....	22
3.5. DISEÑO EXPERIMENTAL	23
3.5.1 Factores del diseño experimental.....	24
3.5.2. Corridas experimentales	25
3.6. ANÁLISIS DE DATOS	25
3.6.1. Evaluación del tratamiento	25
3.7. CONSUMO ELÉCTRICO Y COSTO DE TRATAMIENTO.....	26
3.8. EQUIPO EMPLEADO	26
CAPÍTULO IV.....	28
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	28
4.1. RESULTADOS DEL DISEÑO DE EXPERIMENTOS	28
4.1.1. Prueba 1	28
4.1.2. Prueba 2	31
4.1.3. Prueba 3	34
4.1.4. Prueba 4	36
4.1.5. Prueba 5	38
4.1.6. Prueba 6	41
4.1.7. Prueba 7	43
4.1.8. Prueba 8	46
4.2 MEJORES CONDICIONES DE OPERACIÓN	49

4.3 ANÁLISIS ESTADÍSTICO	50
4.4 FACTORES EN SU NIVEL DE MAYOR IMPORTANCIA: OZONIZACIÓN	52
4.4.1. <i>Remoción de la materia orgánica</i>	58
4.4.2. <i>Biodegradabilidad</i>	59
4.4.3. <i>Toxicidad</i>	59
4.4.4. <i>Consumo eléctrico y costo del sistema de ozonización</i>	60
5. CONCLUSIONES	62
5.1. RECOMENDACIONES	63
6. BIBLIOGRAFÍA	64
ANEXO A. RESULTADOS.....	69
ANEXO B. RESULTADOS.....	73
ANEXO C. RESULTADOS.....	75
ANEXO D. FORMATO DE DECLARACIÓN DE ORIGINALIDAD Y USO DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL	89

Índice de Figuras

FIGURA 1. SOLUBILIDAD DEL OZONO Y DEL OXÍGENO EN AGUA EN FUNCIÓN DE LA	
TEMPERATURA.	12
FIGURA 2. ALMACENAMIENTO Y BOMBEO DEL AGUA RESIDUAL MUNICIPAL.....	17
FIGURA 3. FILTRO DE TEZONTLE.	18
FIGURA 4. REACTOR DE OZONIZACIÓN.....	18
FIGURA 5. FILTRO DE LECHO DOBLE.	19
FIGURA 6. SISTEMA DE OZONIZACIÓN.	23
FIGURA 7. GRÁFICA DE OPERACIÓN DE LOS STV (PRUEBA 1).....	30
FIGURA 8. GRÁFICA DE OPERACIÓN DE LOS STV (PRUEBA 2).....	33
FIGURA 9. GRÁFICA DE OPERACIÓN DE LOS STV (PRUEBA 3).....	35
FIGURA 10. GRÁFICA DE OPERACIÓN DE LOS STV (PRUEBA 4).....	37
FIGURA 11. GRÁFICA DE OPERACIÓN DE LOS STV (PRUEBA 5).....	40
FIGURA 12. GRÁFICA DE OPERACIÓN DE LOS STV (PRUEBA 6).....	42
FIGURA 13. GRÁFICA DE OPERACIÓN DE LOS STV (PRUEBA 7).....	45
FIGURA 14. GRÁFICA DE OPERACIÓN DE LOS STV (PRUEBA 8).....	48
FIGURA 15. GRÁFICA DE EFECTOS PRINCIPALES PARA MEDIAS.....	51
FIGURA 16. GRÁFICA DE OPERACIÓN DE LOS STV (FACTORES EN SU NIVEL DE MAYOR	
IMPORTANCIA: OZONIZACIÓN).	54
FIGURA 17. MONITOREO DEL pH Y LA CONDUCTIVIDAD EN EL REACTOR DE OZONIZACIÓN. .	55
FIGURA 18. MONITOREO DEL OXÍGENO DISUELTO Y EL OZONO AMBIENTAL EN EL REACTOR DE	
OZONIZACIÓN.	55
FIGURA 19. MONITOREO DE LOS PARÁMETROS AL FINAL DEL TRATAMIENTO CON OZONO....	57

Índice de figuras anexo A.

FIGURA A. 1. MONITOREO DEL pH Y LA CONDUCTIVIDAD EN EL REACTOR DE OZONIZACIÓN (PRUEBA 1).....	69
FIGURA A. 2. MONITOREO DEL OXÍGENO DISUELTO Y EL OZONO AMBIENTAL EN EL REACTOR DE OZONIZACIÓN (PRUEBA 1)	69
FIGURA A. 3. MONITOREO DEL pH Y LA CONDUCTIVIDAD EN EL REACTOR DE OZONIZACIÓN (PRUEBA 2).....	69
FIGURA A. 4. MONITOREO DEL OXÍGENO DISUELTO Y EL OZONO AMBIENTAL EN EL REACTOR DE OZONIZACIÓN (PRUEBA 2)	69
FIGURA A. 5. MONITOREO DEL pH Y LA CONDUCTIVIDAD EN EL REACTOR DE OZONIZACIÓN (PRUEBA 3).....	70
FIGURA A. 6. MONITOREO DEL OXÍGENO DISUELTO Y EL OZONO AMBIENTAL EN EL REACTOR DE OZONIZACIÓN (PRUEBA 3)	70
FIGURA A. 7. MONITOREO DEL pH Y LA CONDUCTIVIDAD EN EL REACTOR DE OZONIZACIÓN (PRUEBA 4).....	70
FIGURA A. 8. MONITOREO DEL OXÍGENO DISUELTO Y EL OZONO AMBIENTAL EN EL REACTOR DE OZONIZACIÓN (PRUEBA 4)	70
FIGURA A. 9. MONITOREO DEL pH Y LA CONDUCTIVIDAD EN EL REACTOR DE OZONIZACIÓN (PRUEBA 5).....	71
FIGURA A. 10. MONITOREO DEL OXÍGENO DISUELTO Y EL OZONO AMBIENTAL EN EL REACTOR DE OZONIZACIÓN (PRUEBA 5)	71
FIGURA A. 11. MONITOREO DEL pH Y LA CONDUCTIVIDAD EN EL REACTOR DE OZONIZACIÓN (PRUEBA 6).....	71

FIGURA A. 12. MONITOREO DEL OXÍGENO DISUELTO Y EL OZONO AMBIENTAL EN EL	
REACTOR DE OZONIZACIÓN (PRUEBA 6)	71
FIGURA A. 13. MONITOREO DEL pH Y LA CONDUCTIVIDAD EN EL REACTOR DE OZONIZACIÓN	
(PRUEBA 7).....	72
FIGURA A. 14. MONITOREO DEL OXÍGENO DISUELTO Y EL OZONO AMBIENTAL EN EL	
REACTOR DE OZONIZACIÓN (PRUEBA 7)	72
FIGURA A. 15. MONITOREO DEL pH Y LA CONDUCTIVIDAD EN EL REACTOR DE OZONIZACIÓN	
(PRUEBA 8).....	72
FIGURA A. 16. MONITOREO DEL OXÍGENO DISUELTO Y EL OZONO AMBIENTAL EN EL	
REACTOR DE OZONIZACIÓN (PRUEBA 8)	72

Índice de figuras anexo B.

FIGURA B. 1. GRÁFICA DE EFECTOS PRINCIPALES PARA RELACIÓN SEÑAL A RUIDO.....	73
FIGURA B. 2. ANÁLISIS DE VARIANZA DE RELACIONES SEÑAL A RUIDO	73

Índice de figuras anexo C.

FIGURA C. 1. GRÁFICA DE OPERACIÓN DE LOS STV (FACTORES EN SU NIVEL DE MAYOR	
IMPORTANCIA: AIREACIÓN).....	77
FIGURA C. 2. MONITOREO DEL pH, LA CONDUCTIVIDAD Y EL OXÍGENO DISUELTO EN EL	
REACTOR DE AIREACIÓN.	78
FIGURA C. 3. MONITOREO DE LOS PARÁMETROS AL FINAL DEL TRATAMIENTO CON AIRE... 80	
FIGURA C. 4. GRÁFICA DE OPERACIÓN DE LOS STV FILTRACIÓN.....	84

FIGURA C. 5. MONITOREO DE LOS PARÁMETROS AL FINAL DEL TRATAMIENTO DE

FILTRACIÓN	85
------------------	----

Índice de Tablas

TABLA 1. CARACTERÍSTICAS DE LOS MEDIOS FILTRANTES.	21
TABLA 2. PARÁMETROS Y SUS RESPECTIVOS MÉTODOS O NORMAS.	22
TABLA 3. FACTORES DEL DISEÑO DE EXPERIMENTOS.	23
TABLA 4. DISEÑO ORTOGONAL TAGUCHI L ₈	25
TABLA 5. CONDICIONES DE OPERACIÓN DE LA PRUEBA 1.	28
TABLA 6. CARACTERIZACIÓN DEL AGUA RESIDUAL MUNICIPAL (PRUEBA 1).....	29
TABLA 7. CONDICIONES DE OPERACIÓN DE LA PRUEBA 2.	31
TABLA 8. CARACTERIZACIÓN DEL AGUA RESIDUAL MUNICIPAL (PRUEBA 2).....	32
TABLA 9. CONDICIONES DE OPERACIÓN DE LA PRUEBA 3.	34
TABLA 10. CARACTERIZACIÓN DEL AGUA RESIDUAL MUNICIPAL (PRUEBA 3).....	34
TABLA 11. CONDICIONES DE OPERACIÓN DE LA PRUEBA 4.	36
TABLA 12. CARACTERIZACIÓN DEL AGUA RESIDUAL MUNICIPAL (PRUEBA 4).....	36
TABLA 13. CONDICIONES DE OPERACIÓN DE LA PRUEBA 5.	38
TABLA 14. CARACTERIZACIÓN DEL AGUA RESIDUAL MUNICIPAL (PRUEBA 5).....	39
TABLA 15. CONDICIONES DE OPERACIÓN DE LA PRUEBA 6.	41
TABLA 16. CARACTERIZACIÓN DEL AGUA RESIDUAL MUNICIPAL (PRUEBA 6).....	41
TABLA 17. CONDICIONES DE OPERACIÓN DE LA PRUEBA 7.	43
TABLA 18. CARACTERIZACIÓN DEL AGUA RESIDUAL MUNICIPAL (PRUEBA 7).....	44
TABLA 19. CONDICIONES DE OPERACIÓN DE LA PRUEBA 8.	46
TABLA 20. CARACTERIZACIÓN DEL AGUA RESIDUAL MUNICIPAL (PRUEBA 8).....	47
TABLA 21. PORCENTAJES GLOBALES DE REMOCIÓN DE LOS STV PARA CADA PRUEBA DEL DISEÑO DE EXPERIMENTOS.....	49
TABLA 22. ANÁLISIS DE VARIANZA DE MEDIAS	50

TABLA 23. RESPUESTA PARA MEDIAS.....	51
TABLA 24. FACTORES EN SU NIVEL DE MAYOR IMPORTANCIA: OZONIZACIÓN.	52
TABLA 25. CARACTERIZACIÓN DEL AGUA RESIDUAL MUNICIPAL.....	53
TABLA 26. CONCENTRACIÓN DE LA MATERIA ORGÁNICA EN EL AGUA RESIDUAL MUNICIPAL.	58
TABLA 27. RELACIÓN DE BIODEGRADABILIDAD DEL AGUA RESIDUAL MUNICIPAL	59
TABLA 28. VALORES DE TOXICIDAD Y OZONO DISUELTO PRE Y POST TRATAMIENTO.	60
TABLA 29. CONSUMO ELÉCTRICO Y EL COSTO ASOCIADO PARA LA REMOCIÓN DE CADA GRAMO DE MATERIA ORGÁNICA.....	60

Índice de tablas anexo C.

TABLA C. 1. FACTORES EN SU NIVEL DE MAYOR IMPORTANCIA: AIREACIÓN.....	75
TABLA C. 2. CARACTERIZACIÓN DEL AGUA RESIDUAL MUNICIPAL.	76
TABLA C. 3. CONCENTRACIÓN DE LA MATERIA ORGÁNICA EN EL AGUA RESIDUAL MUNICIPAL.	81
TABLA C. 4. RELACIÓN DE BIODEGRADABILIDAD DEL AGUA RESIDUAL MUNICIPAL	82
TABLA C. 5. VALORES DE TOXICIDAD Y OXÍGENO DISUELTO PRE Y POST TRATAMIENTO ...	82
TABLA C. 6. FACTORES EN SU NIVEL DE MAYOR IMPORTANCIA: FILTRACIÓN.	83
TABLA C. 7. CARACTERIZACIÓN DEL AGUA RESIDUAL MUNICIPAL.	83
TABLA C. 8. CONCENTRACIÓN DE LA MATERIA ORGÁNICA EN EL AGUA RESIDUAL MUNICIPAL	86
TABLA C. 9. RELACIÓN DE BIODEGRADABILIDAD DEL AGUA RESIDUAL MUNICIPAL	87
TABLA C. 10. VALORES DE TOXICIDAD Y OXÍGENO DISUELTO PRE Y POST FILTRACIÓN.	87

Índice de ecuaciones

ECUACIÓN 1	9
ECUACIÓN 2	10
ECUACIÓN 3	11
ECUACIÓN 4	11
ECUACIÓN 5	11
ECUACIÓN 6	11
ECUACIÓN 7	20
ECUACIÓN 8	26
ECUACIÓN 9	26
ECUACIÓN 10	26

Abreviaturas

C/N:	Relación Carbono-nitrógeno
COD:	Carbono Orgánico Disuelto
COT:	Carbono Orgánico Total
DBO:	Demanda Bioquímica de Oxígeno
DQO:	Demanda Química de Oxígeno
mL	Mililitro
NMP:	Número Más Probable
pH:	potencial de Hidrógeno
POA:	Proceso de Oxidación Avanzada
PPM:	Partes Por Millón
PTAR:	Planta de Tratamiento de Aguas Residuales
PVC:	Del inglés: Polyvinyl Chloride, Policloruro de vinilo.
STV	Sólidos Totales Volátiles

Agradecimientos

A la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, al Posgrado de Ingeniería Química, la Facultad de Ingeniería Química, la Maestría en Ciencias en Ingeniería Ambiental y al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías.

Por brindarme la oportunidad de crecer profesionalmente.

Al Dr. José Apolinar Cortés por permitirme realizar esta tesis bajo su dirección y asesoría. Gracias por contribuir en mi formación humana y profesional.

A Hiram Bautista Zaragoza por su amistad e invaluable apoyo para la realización de este trabajo académico. Gracias por tu generosidad para el desarrollo de este proyecto.

A Gemma, Hiram, Carleni, Jaquelin, Roberto y Luis por su compañía y apoyo, han sido una fuente de alegrías durante el desarrollo de este trabajo.

A Lupita, Natalia, Paola y Oscar por su participación en este proyecto.

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

1.1. Generalidades

El agua es utilizada de diversas formas en todas las actividades humanas, ya sea para subsistir o para producir bienes y servicios (actividades socioeconómicas), como consecuencia de esas actividades se generan aguas residuales. Las descargas de aguas residuales se clasifican en dos categorías: municipales y no municipales; las primeras provienen de los núcleos de población y son recolectadas a través de redes de alcantarillado tanto en zonas urbanas como en rurales. Por otro lado, las no municipales se originan en fuentes distintas a las municipales, como la industria autoabastecida. Desafortunadamente, tanto las aguas residuales municipales como las no municipales son vertidas directamente en los cuerpos de agua sin pasar por sistemas de tratamiento, por lo tanto, es necesario contar con plantas de tratamiento de aguas residuales tanto para las aguas municipales como no municipales dependiendo de los contaminantes presentes, así como de los requerimientos específicos para la descarga permitiendo que el efecto sobre los ecosistemas acuáticos sea mínimo (CONAGUA, 2018).

En conjunto con las plantas de tratamiento, se puede utilizar la capacidad de resiliencia que tiene la naturaleza (autodepuración), para mejorar la calidad del agua. Los sistemas naturales son capaces de degradar sustancias que por lo general se encuentran en la naturaleza; como los nutrientes, sin embargo, la contaminación del agua crece día con día no sólo en cantidad; sino también en diferentes tipos de contaminantes generando fuertes perturbaciones que superan dicha capacidad depuradora (Aguilar, 2010).

El uso de procesos de oxidación avanzada (POA) puede coadyuvar a la capacidad depuradora de los cuerpos de agua ya que los POA al emplear oxidantes fuertes pueden oxidar los contaminantes orgánicos recalcitrantes presentes en las aguas residuales. Es por eso que en este

proyecto se pretende estudiar el efecto del suministro de ozono como tratamiento en las aguas residuales municipales para la disminución de la materia orgánica.

1.2. Antecedentes

Somensi *et al.* (2010) realizaron un pretratamiento con ozono a las aguas residuales textiles crudas en una planta a escala piloto y evaluaron la eficiencia de este pretratamiento con base en los parámetros de remoción de color y materia orgánica soluble medida como demanda química de oxígeno (DQO), a dos valores de pH (9.1 y 3.0). También identificaron los productos de degradación intermedios y finales del pretratamiento con ozono, así como la evaluación de la ecotoxicidad final (ensayo Lumistox). Después de 4 horas de pretratamiento con ozono recirculando las aguas residuales (caudal de $0.45 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$), las eficiencias promedio para la eliminación de color fueron del 67.5 % (pH 9.1) y del 40.6 % (pH 3.0), mientras que la reducción de DQO fue del 25.5 % (pH 9.1) y 18.7% (pH 3.0) para una capacidad de producción de ozono de 20 g h^{-1} . La prueba de inhibición de la luminiscencia bacteriana (prueba Lumistox) mostró una reducción significativa de la toxicidad al comparar las aguas residuales textiles crudas y tratadas.

Stalter *et al.* (2010) evaluaron en paralelo en una planta de tratamiento de aguas residuales municipales la toxicidad de las aguas residuales tratadas convencionalmente (después de la sedimentación final), las aguas residuales después de la ozonización y las aguas residuales ozonizadas después de la filtración con arena mediante la prueba de toxicidad FELST (por sus siglas en inglés: Fish Early Life Stage Toxicity Test) utilizando trucha arco iris (*Oncorhynchus mykiss*).

El FELST reveló un considerable retraso en el desarrollo de los organismos de prueba expuestos a agua caliente ozonizada. Esto fue acompañado por una disminución significativa en el peso corporal y la longitud en comparación con el agua de referencia, con el agua tratada convencionalmente y con el agua ozonizada después de la filtración con arena. Por lo tanto, la filtración con arena evita los efectos eco toxicológicos adversos de la ozonización. Los resultados indican que, en cualquier caso, la ozonización no debe aplicarse sin un tratamiento posterior adecuado para la eliminación de los subproductos de la oxidación (por ejemplo, filtración con arena).

Martínez *et al.* (2011) investigaron los efectos de la ozonización como tratamiento terciario de desinfección de aguas residuales, evaluando su potencial para ayudar a reutilizar estas aguas para el riego de cultivos en invernadero. La tasa de entrada de ozono ($11\text{-}13\text{ mg O}_3\text{ L}^{-1}$) se ajustó de acuerdo con el contenido de ozono residual en la salida del efluente ($0.2\text{-}0.4\text{ mg O}_3\text{ L}^{-1}$). Se obtuvo que el tratamiento de desinfección con ozono fue suficiente para inactivar los coliformes fecales logrando una reducción de alrededor del 89%, un 88% de remoción de DQO, un máximo de 68% de remoción de DBO_5 y hasta un 75% de eliminación de sólidos en suspensión.

Hansen *et al.* (2016) realizaron un estudio para evaluar las dosis de ozono requeridas para eliminar los productos farmacéuticos de un efluente proveniente de un sistema piloto experimental que consistía en tanques de reactor de biopelícula de lecho móvil (MBBR) por etapas. Debido a que el carbono orgánico disuelto (COD) y el pH en las muestras variaron considerablemente, de 6 a 20 mg-COD L^{-1} y de 5.0 a 9.0 respectivamente, se evaluaron los efectos de estos dos parámetros sobre la vida útil del ozono. Se concluyó que el pH en las aguas residuales investigadas fue muy relevante, ya que en el pH bajo (5.0) se prolongó drásticamente la vida útil del ozono (aproximadamente 10 minutos), en perspectiva, la vida útil observada del ozono a pH 7.75 fue

apenas mayor a 1 minuto dando como resultado aproximadamente una duplicación de la dosis de ozono requerida en el pH más alto para cada producto farmacéutico. Al igual que con el pH, el aumento en la COD requirió el aumento de la dosis de ozono, por lo que la dosis de ozono necesaria para la eliminación del 90% de un producto farmacéutico fue específica del compuesto y varió entre $0.50 \pm 0.06 \text{ mg-O}_3 \text{ mg}^{-1}\text{-COD}$ (sulfadiazina) y $4.7 \pm 0.6 \text{ mg-O}_3 \text{ mg}^{-1}\text{-COD}$ (ácido diatrizoico) para los compuestos investigados.

Ledakowicz *et al.* (2017) investigaron el tratamiento de aguas residuales de la industria textil utilizando procesos biológicos y de ozonización. Se investigaron tres combinaciones diferentes de ozonización y biodegradación: ozonización seguida de biodegradación, biodegradación seguida de ozonización y biodegradación seguida de ozonización más una segunda biodegradación. La ozonización se realizó en dos reactores: uno con un volumen de trabajo de 1 dm^3 (celda agitada) y el segundo con un volumen de trabajo de 20 dm^3 (columna de burbujas); mientras que la biodegradación se llevó a cabo en reactores discontinuos de secuencia (SBR, con volumen útil de 1.5 dm^3) y un biorreactor horizontal de flujo continuo (HCFB, con volumen útil de 12 dm^3). Se concluyó que, desde el punto de vista del proceso de ozonización, el sistema más eficiente fue el uso de ozono para las aguas residuales antes del tratamiento biológico. En el caso de la ozonización de aguas residuales después del tratamiento biológico, el consumo de ozono para la oxidación de 1 mg de DQO aumentó en un 30% en relación con el tratamiento de aguas residuales sin tratar. Sin embargo, al tener en cuenta el tratamiento combinado, la ozonización antes del proceso biológico dio las menores reducciones de las cargas contaminantes de las aguas residuales (62 % DQO, 81 % de toxicidad y 73 % de color); comparada con la biodegradación antes de la ozonización (66 % de DQO, 94 % de toxicidad y 89 % de color). La mayor eliminación de todos los parámetros relacionados con el contenido de carbono se obtuvo en el experimento de

3 pasos: biodegradación más ozonización más biodegradación (72 % DQO y 78 % COT). Además, los resultados obtenidos en la escala mayor fueron incluso mejores que los obtenidos en la escala menor, por lo que se concluyó que es posible el escalamiento del sistema de tratamiento.

Malik *et al.* (2019) estudiaron el efecto del pretratamiento con ozono de aguas residuales de destilería biometanadas evaluando la tasa de proceso de compostaje y la calidad del compost obtenido. El compostaje se realizó mezclando proporciones de peso fijo de lodo prensado y diferentes proporciones de aguas residuales pretratadas con ozono (1:3, 1:4 y 1:5). Se encontró que el proceso de compostaje ocurre más rápido en las aguas residuales pretratadas con ozono para todas las proporciones en comparación con las aguas residuales no pretratadas lo que resultó en la reducción de la relación C/N al valor deseable de 13.4, 14.6 y 17.6, respectivamente para relaciones de 1:3, 1:4 y 1:5 de lodo prensado en comparación con la relación C/N de 21.7 obtenida con aguas residuales sin tratar en un período de 40 días de compostaje. La mayor reducción de toxicidad con un valor de índice de germinación del 96 % se observó para una proporción de 1:3 de lodo prensado y aguas residuales pretratadas con ozono y solo un 21 % de germinación para aguas residuales no tratadas.

Mainardis *et al.* (2020) realizaron pruebas piloto de ozonización en modo discontinuo para evaluar la viabilidad de sustituir el tratamiento fisicoquímico terciario en la planta de tratamiento de aguas residuales analizada. La planta trató una mezcla de aguas residuales de pulpa y papel con una contribución menor de aguas residuales municipales. La efectividad del ozono fue mejor en el agua de proceso (60% de eliminación de DQO), en lugar del agua de blanqueo (28% de eliminación de DQO), el ozono mostró una eficiencia significativamente mayor en la mezcla de aguas residuales de pulpa y papel después del tratamiento biológico (hasta un 81% de eliminación de DQO) en lugar de antes del proceso biológico (46% de reducción media de DQO); también se

observó una buena reducción de sólidos suspendidos totales (20-30 mg L⁻¹). El análisis de toxicidad reveló que el tratamiento de ozonización no modificó las características de toxicidad del efluente tratado.

Irani *et al.* (2021) estudiaron el funcionamiento de un biorreactor aeróbico de lecho fijo de forma individual y en combinación con el proceso de ozonización para el tratamiento de aguas residuales municipales evaluando la eliminación de DQO, amonio y coliformes totales. El proceso biológico se llevó a cabo en un biorreactor aerobio de lecho fijo con una tasa de aireación de 6 L/min y un tiempo de retención hidráulica de 5 h. El proceso de ozonización se realizó simultáneamente en reactores de pre-ozonización y post-ozonización, con un flujo másico de ozono de 1 g h⁻¹ durante 30 min cada 8 h. Los resultados mostraron que la pre-ozonización simultánea, el proceso biológico y el tratamiento posterior a la ozonización redujeron el 94 % de la DQO total, más que la eficiencia de un solo reactor. La ozonización no tuvo ningún efecto sobre la eliminación de nitratos. La determinación de coliformes totales en el afluente y el efluente final mostró que la cantidad de coliformes se redujo de aproximadamente 240 x 10³ NMP/mL a 0.51 NMP/mL. El análisis del consumo de energía mostró que el proceso de ozonización era la fuente de consumo de energía dominante. Se concluyó que la combinación de un biorreactor de lecho fijo y un proceso de ozonización es una tecnología prometedora para el tratamiento de aguas residuales municipales reales.

CAPÍTULO II.

MARCO TEÓRICO

2.1. Aguas Residuales

Se consideran aguas residuales aquellas que han sido utilizadas y que provienen de una amplia variedad de fuentes incluyendo las descargas industriales, comerciales, de servicios, agrícolas, pecuarios, domésticos, fraccionamientos y en general de cualquier otro uso, así como la mezcla de ellas (SEMARNAT 2021).

De acuerdo con Metcalf y Eddy (2014) las fuentes comunes de aguas residuales pueden incluir:

Aguas residuales domésticas: aguas residuales descargadas de residencias, comercios, instituciones públicas. Las aguas residuales domésticas también se conocen como aguas residuales sanitarias.

Aguas residuales industriales: aguas residuales en las que predominan los residuos industriales.

Aguas de infiltración y entrada: se refiere al agua que ingresa al sistema de recolección de las aguas residuales por medios indirectos y directos. La infiltración, es agua que ingresa al sistema de recolección a través de fugas, grietas y roturas. La entrada, es agua pluvial que ingresa al sistema de recolección desde las conexiones de los desagües pluviales, las guías del techo y los desagües de los cimientos y sótanos.

Aguas pluviales: aguas resultantes de la lluvia y el deshielo.

2.2. Cuerpo Receptor

Los cuerpos receptores son las corrientes, depósitos naturales de agua, presas, cauces, zonas marinas o bienes nacionales, así como los terrenos en donde se infiltran o inyectan las aguas residuales (SEMARNAT 2021).

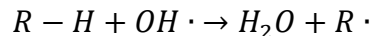
2.3. Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR)

Se denomina PTAR a la infraestructura física utilizada para el tratamiento de aguas residuales. Dichas plantas se clasifican en función de los tipos de aguas residuales a tratar. En muchos países industrializados, los sistemas de tratamiento de aguas residuales se componen de tratamientos primarios, secundarios y terciarios (Ameta 2018).

2.4. Procesos de Oxidación Avanzada

Los procesos de oxidación avanzada (POA) se definen como los procesos de oxidación que involucran la generación de radicales hidroxilo ($\text{OH}\cdot$) no selectivos en cantidades suficientes para depurar el agua. Los POA son capaces de atacar compuestos orgánicos a través de cuatro vías: extracción de hidrógeno, combinación o adición de radicales y transferencia de electrones. Cuando los POA se aplican para el tratamiento de aguas residuales, se espera que estos radicales actúen como agentes oxidantes que destruyan los contaminantes de las aguas residuales y los transformen en productos menos tóxicos e incluso no tóxicos. Los POA incluyen radiación UV, ozono, peróxido de hidrógeno, proceso fenton, foto-fenton, plasmas no térmicos, sonólisis, fotocátalisis, radiólisis, procesos de oxidación con agua supercrítica (Garrido-Cardenas *et al.* 2020).

Teóricamente, los POA podrían mineralizar completamente los compuestos orgánicos a dióxido de carbono y agua de acuerdo con la ecuación 1 (Rekhate y Srivastava, 2020).



Ecuación 1

La oxidación avanzada implica 2 pasos básicos:

El primer paso involucra la generación in-situ de especies altamente reactivas tal como el radical hidroxilo ($HO\cdot$), el cual es el oxidante primario en los POA, mientras que los otros radicales y especies activas de oxígeno son aniones como el radical superóxido (O_2^-), radicales hidroperoxil (HO_2) y radicales orgánicos peroxil ($ROO\cdot$) (CONAGUA, 2015 a).

En el segundo paso, los agentes oxidantes reaccionan con los contaminantes presentes en las aguas residuales convirtiéndolos en intermediarios biodegradables que conducen a una mineralización completa en agua, dióxido de carbono y sales inorgánicas (Ameta, 2018).

2.4.1. Ventajas de los POA

De acuerdo con Ameta (2018) los POA tienen varias ventajas respecto a otros procesos avanzados:

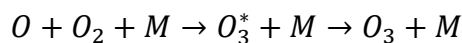
- Tienen un alto índice de reacción.
- Tienen potencial para reducir la toxicidad y mineralizar completamente los contaminantes orgánicos.
- No generan lodos residuales como en el caso de procesos físicos, químicos o biológicos.
- Su vía no selectiva permite el tratamiento de diferentes compuestos orgánicos a la vez.

2.4.2. POA basados en ozono

El ozono es un gas inestable producido cuando las moléculas de oxígeno se disocian en oxígeno atómico, se puede detectar en concentraciones de 2×10^{-5} a $1 \times 10^{-4} \text{ g m}^{-3}$ tiene un olor característico (generalmente puede ser detectado por el sistema olfativo humano), es explosivo cuando la concentración alcanza alrededor de 240 g m^{-3} (20 por ciento del peso en el aire). El ozono se puede producir por electrólisis, reacción fotoquímica y reacción radioquímica por descarga eléctrica; a menudo es producido por la luz ultravioleta y los rayos durante una tormenta eléctrica. El método de descarga eléctrica se utiliza para la producción de ozono empleado para la desinfección de aguas residuales (Metcalf y Eddy, 2014).

2.4.3 Química del ozono

La formación de ozono se facilita comprenderla a través de una reacción de tres cuerpos como se muestra en la ecuación 2, con M (O_2 , O_3 , O o en caso de aire, N_2) siendo un compañero de colisión. Donde O_3^* es el estado excitado transitorio inicial del ozono (von Sonntag y von Gunten, 2012).



Ecuación 2

De acuerdo con Metcalf y Eddy (2014) las propiedades químicas del ozono como oxidante pueden describirse mediante reacciones de descomposición como se muestra en las siguientes ecuaciones:



Ecuación 3



Ecuación 4



Ecuación 5



Ecuación 6

El punto (·) que aparece junto al hidroxilo indica que estas especies tienen un electrón desapareado. Los radicales libres formados, HO_2 y $HO\cdot$, tienen un gran poder oxidante y se encuentran activos en el proceso de desinfección. Estos radicales libres, además, pueden seguir reaccionando con otras impurezas en soluciones acuosas dando un beneficio adicional asociado con el uso de ozono para el tratamiento de agua.

2.4.4. Solubilidad del ozono en agua

La solubilidad del ozono depende enormemente de la temperatura. El ozono es aproximadamente diez veces más soluble en agua que el oxígeno, lo que permite obtener concentraciones bastante altas de ozono saturando el agua con una mezcla de ozono y oxígeno a partir de un generador de ozono que aún es rico en oxígeno (von Sonntag & von Gunten, 2012). En la Figura 1 se muestra la solubilidad del ozono y la solubilidad del oxígeno para gases puros en función de la temperatura.

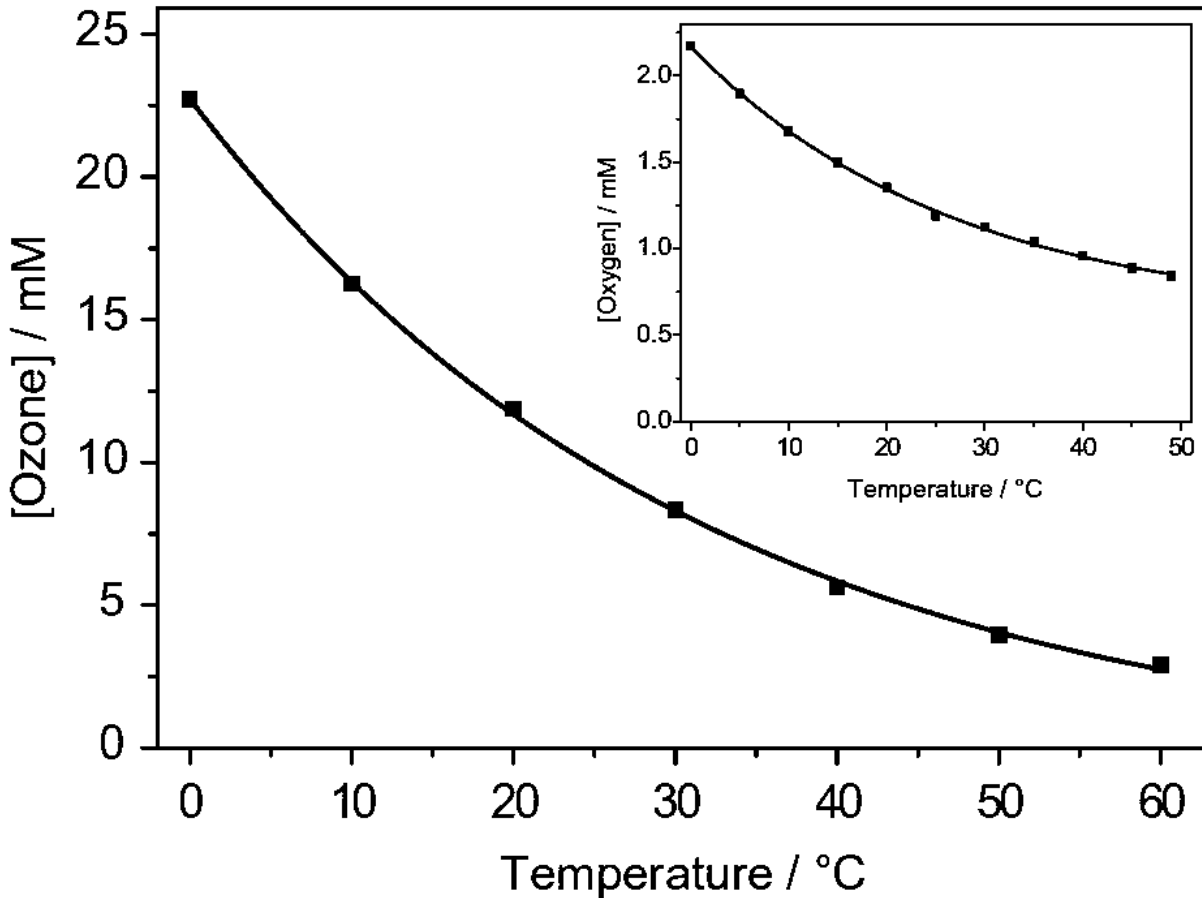


Figura 1. Solubilidad del Ozono y del Oxígeno en Agua en Función de la Temperatura.

Recuperado de von Sonntag & von Gunten (2012)

2.5. Relación de Biodegradabilidad DBO₅/DQO

La relación DBO₅/DQO es uno de los parámetros más simples y más utilizados para la estimación de la biodegradabilidad en las aguas residuales municipales.

Una relación DBO₅/DQO inferior a 0.2: las aguas residuales no son biodegradables;

DBO₅/DQO entre 0.2 y 0.6: aguas residuales biodegradables con microorganismos seleccionados;

DBO₅/DQO superior a 0.6: aguas residuales biodegradables (Ledakowicz *et al.* 2017).

2.6. Filtración

De acuerdo con Crittenden *et al.* (2012) la filtración se puede definir como cualquier proceso que permite la eliminación de partículas sólidas de un fluido a través de un medio poroso.

La filtración comúnmente es aplicada a las aguas residuales para eliminar los sólidos residuales del efluente secundario como pueden ser los flóculos biológicos o en el caso de que se aplique un tratamiento físico-químico a las aguas residuales la filtración ayuda a eliminar los precipitados que permanecen después de la coagulación química, también la filtración se usa como un proceso intermedio para acondicionar el agua residual antes de entrar a un tratamiento avanzado (Weber 2003).

2.6.1. Tipos de filtros

Los filtros se clasifican de acuerdo con la dirección del flujo del agua, el número de medios filtrantes, la fuerza impulsora y la tasa de filtración.

De acuerdo con la dirección del flujo los filtros pueden ser clasificados en tres tipos; de flujo ascendente, de flujo descendente y de biflujo que es una combinación de los anteriores (CONAGUA, 2015 b).

En relación con el medio filtrante, los filtros pueden ser de lecho simple si constan de un solo tipo de partícula, de lecho doble si se compone de dos tipos de material y de lecho múltiple si está formado por tres tipos de material. En cuanto a la fuerza impulsora o de transporte para el proceso de filtración se pueden categorizar en filtros de gravedad y filtros de presión aplicada a través de bombeo (Weber 2003).

Con respecto a la tasa de filtración, se clasifican como filtros rápidos y filtros lentos. La tasa de filtración lenta para filtros de arena de 0.9 a 1.5 m de espesor, soportado sobre una capa de

grava de 0.15 a 0.3 m de espesor es de aproximadamente 1 a 2 L/m² min, y para la filtración rápida de arena con una profundidad de 0.6 m soportada por un lecho de grava oscila entre 80 y 240 L/m² min (CONAGUA, 2015 b).

2.7. Planteamiento del Problema

El problema de esta investigación se centra en la creciente contaminación de los cuerpos de agua provocado por las constantes descargas de aguas residuales municipales sin ningún tipo de tratamiento. Esta práctica ha escalado hasta superar la capacidad de autodepuración natural de los ecosistemas acuáticos generando un impacto negativo en la biodiversidad, la salud pública y la calidad del agua.

2.8. Justificación

Debido a la excesiva producción y consumo de bienes y servicios se ha generado una mayor demanda de agua ocasionando mayor presión sobre las fuentes de abasto de este líquido, además de que se produce un mayor volumen de aguas residuales, de las cuales la gran mayoría se vierte sin tratamiento en los cuerpos de agua, principalmente en ríos, que transportan los contaminantes hacia los lagos, lagunas, mantos acuíferos y el mar que por lo general se convierten en los depósitos finales. La generación de aguas residuales hace necesario el desarrollo de procesos e inversiones económicas para su tratamiento (SEMARNAT, 2019).

Cuando un cuerpo de agua está contaminado, éste puede recuperar su pureza por medio de acciones físicas, químicas o biológicas como el flujo, la dilución, la deposición y la adsorción, lo que se denomina autodepuración. En un río, la capacidad de autodepuración se relaciona con las características del río, incluida la descarga del caudal, la carga de sedimentos y la parte biológica. Cuando la cantidad total de contaminantes supera la capacidad de autodepuración del río, éste se considera contaminado (Tian *et al.* 2011).

Por lo anterior el desarrollo de esta investigación se justifica en la implementación de un sistema de filtración y ozonización como una propuesta para disminuir la concentración de materia orgánica en las aguas residuales municipales y así coadyuvar a la capacidad natural de

autodepuración de los cuerpos de agua. Además, este proyecto no solo aborda un problema ambiental inmediato, sino que también tiene el potencial de servir como un precedente para el desarrollo de futuros sistemas de tratamiento de aguas residuales municipales.

2.9. Hipótesis

La implementación de un sistema combinado de filtración y ozonización en el tratamiento de aguas residuales municipales generará una disminución del contenido de materia orgánica y un aumento en los niveles de oxígeno disuelto, en comparación con aguas residuales municipales crudas.

2.10. Objetivo General

Evaluar un sistema integrado de filtración y ozonización como tratamiento de las aguas residuales municipales para la disminución de la materia orgánica y su impacto en la mejora de las condiciones de oxigenación del agua.

2.11. Objetivos específicos

- Conocer las características del agua residual municipal cruda.
- Diseñar y construir el sistema de filtración y ozonización.
- Evaluar la capacidad de la ozonización para reducir la concentración de materia orgánica en las aguas residuales, mediante la comparación de muestras pre y postratamiento.
- Evaluar los costos de tratamiento.

CAPÍTULO III.

3. Metodología

3.1. Diseño y Construcción

3.1.1. Alimentación del agua residual municipal

El agua residual cruda se colocó en 2 recipientes de 20 L cada uno, unidos por un tubo de CPVC de $\frac{1}{2}$ pulgada y se bombeo utilizando una bomba sumergible de 504 GPH (30W 2000 L/h) como se muestra en la Figura 2.

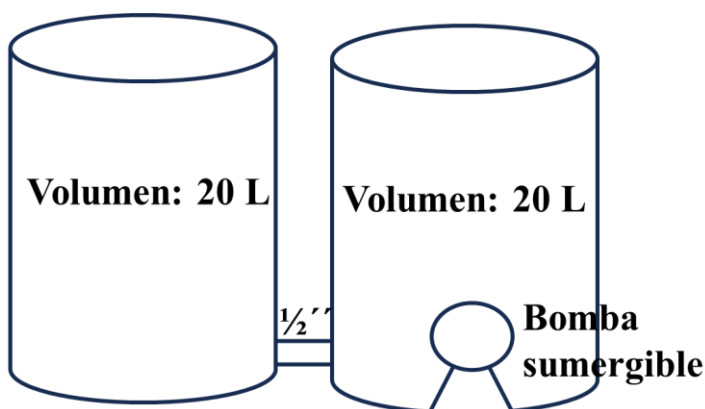


Figura 2. Almacenamiento y bombeo del agua residual municipal.

3.1.2. Filtro de lecho simple

El filtro de lecho simple (tezontle) consta de un prisma rectangular de acrílico con una altura de 50 cm, un área de 169 cm² y un volumen útil de 3.6 L. En la Figura 3 se muestran las alturas del lecho.

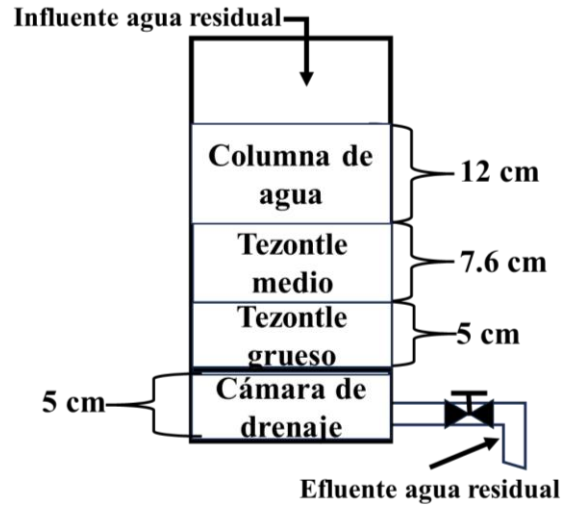


Figura 3. Filtro de tezontle.

3.1.3. Reactor

Para la construcción del reactor se tomó como base un contenedor cilíndrico de PVC con un volumen útil de 6 L, una altura de 35 cm y un diámetro de 16 cm. En la parte inferior se colocó un difusor de plástico poroso con una longitud de 20 cm distribuido en forma circular para lograr una difusión homogénea de la corriente de ozono. Las especificaciones de construcción se presentan en la Figura 4.

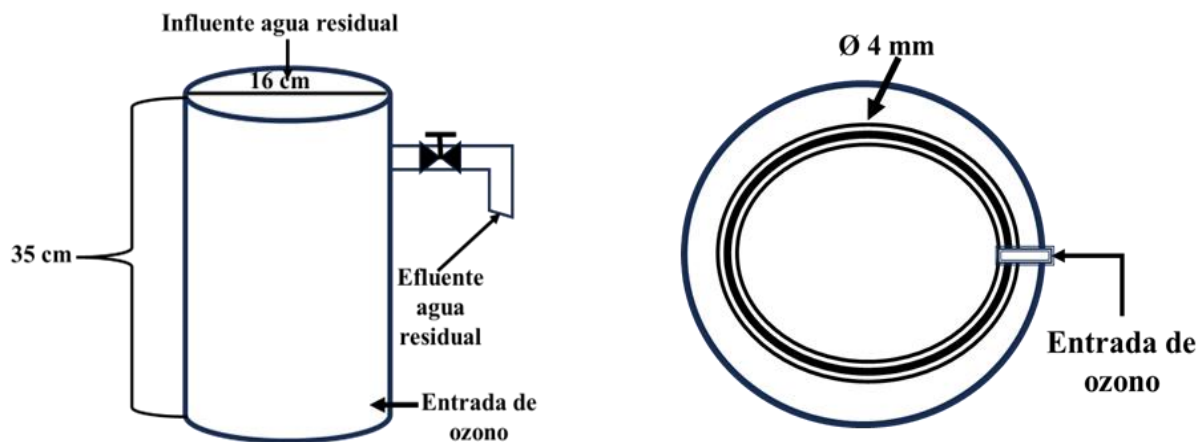


Figura 4. Reactor de ozonización.

3.1.4 Filtro de lecho doble

El filtro de lecho doble (tezontle y arena) consta de un prisma rectangular de acrílico con una altura de 40 cm, un área de 169 cm² y un volumen útil de 3.4 L. A la salida del filtro se instaló un medidor de caudal con el objetivo de monitorear y regular el flujo de salida. Esta medida permitió mantener un control preciso sobre el caudal, asegurando que el proceso de tratamiento se realizará de manera continua y constante. En la Figura 5 se muestra la configuración del filtro.

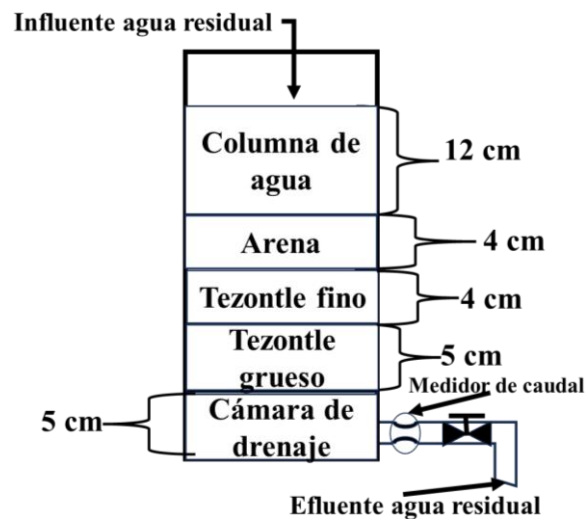


Figura 5. Filtro de lecho doble.

3.2. Medio filtrante

Se eligió el tezontle como medio filtrante debido a sus características favorables, como su alta porosidad, rugosidad, área superficial, bajo precio y fácil acceso en el mercado. La combinación del medio filtrante de arena y tezontle en el segundo filtro se seleccionó para mejorar la calidad del agua residual filtrada dado que la arena tiene un tamaño de grano más pequeño en comparación con el tezontle además de que es barata, inerte, durable y ampliamente disponible.

Para determinar la porosidad de los medios granulares (tezontle y arena) se empleó el método de Hulbert y Feben- modificado de CEPIS,1978 (Valdivia 1998):

- I. Primero se realizó un proceso de limpieza y saturación. Se lavó un volumen de arena y tezontle con agua para eliminar cualquier resto de tierra que pudieran contener. Luego, se sumergieron ambos materiales por separado en agua y se dejaron en reposo hasta que todos los poros se llenaron de agua. De esta manera, se evitó que los poros afectaran el resultado de la prueba.
- II. Para el caso del tezontle se colocó una muestra de 1000 mL en un vaso de precipitado de 1000 mL y se agregó agua desionizada hasta aforar los 1000 mL. Se cuantifico el volumen de agua requerido (volumen de vacíos). El mismo procedimiento se realizó para la arena, únicamente se cambió el volumen de muestra a 200 mL.
- III. Se hicieron repeticiones para obtener un promedio.
- IV. Se utilizó la siguiente fórmula para obtener la porosidad en porcentaje:

$$\% \text{ Porosidad} = \left(\frac{V}{V_t} \right) * 100$$

Ecuación 7

Donde:

V= Volumen promedio de vacíos (mL)

V_t= Volumen total de muestra (mL)

En la tabla 1 se muestran los porcentajes de porosidad obtenidos.

Tabla 1. *Características de los medios filtrantes.*

Material	Tamaño promedio (mm)	Porosidad (%)
Tezontle grueso	21.52 ± 0.82	56.75
Tezontle medio	7.85 ± 1	51.5
Tezontle fino	4.075 ± 1.05	49
Arena	<1	42

3.3. Recolección y caracterización del agua residual.

Se realizó la caracterización del agua residual municipal a partir de muestras simples recolectadas en un pozo de visita del sistema de alcantarillado de la ciudad de Morelia, Michoacán (19°41'39.5"N 101°12'06.8"O) de acuerdo a los siguientes parámetros: pH, temperatura, conductividad, DQO, DBO, toxicidad oxígeno disuelto, sólidos totales volátiles, en la tabla 2 se indican sus respectivas técnicas o normas.

Tabla 2. *Parámetros y sus respectivos métodos o normas.*

Parámetro	Método/Norma
Muestreo	NMX-AA-003-1980
pH	NMX-AA-008-SCFI-2016
Conductividad	NMX-AA-093-SCFI-2000
DQO	8000 Hach Digestión/Espectrofotometría
DBO	NMX-AA-028-SCFI-2001
Temperatura.	NMX-AA-007-SCFI-2013
Sólidos y sales.	NMX-AA-034-SCFI-2015
Determinación de oxígeno disuelto	NMX-AA-012-SCFI-2001
Toxicidad	10017 HACH
Concentración de ozono en muestras de agua	HI38054 disco Checker® HANNA® instruments

3.4. Sistema de ozonización

El sistema de ozonización consistió en una bomba de aire Elite Optima Hata con variador de flujo volumétrico conectada al ozonizador marca Clearwater modelo microzone 300 como se muestra en la Figura 6.



Figura 6. Sistema de ozonización.

3.5. Diseño experimental

La tabla 3 muestra los factores en dos niveles con los cuales se generó la matriz de experimentos, considerando 4 factores: filtración, caudal de agua residual municipal, flujo de ozono y temperatura. Los experimentos se realizaron por duplicado.

Tabla 3. Factores del diseño de experimentos.

Factores	Nivel 1	Nivel 2
Caudal de agua residual (L/min)	5.5	2
Flujo de ozono (L/min)	3.11	2.11
Temperatura (°C)	25	15
Filtración	si	no

3.5.1 Factores del diseño experimental

3.5.1.1. Filtración

La filtración se seleccionó para ayudar a eliminar las partículas en suspensión que podrían interferir con la acción del ozono. Además, investigaciones anteriores han destacado la importancia de implementar un tratamiento posterior adecuado para la eliminación de los subproductos de la ozonización (por ejemplo, filtración con arena).

3.5.1.2. Caudal de agua residual municipal

El caudal de agua residual es otro factor considerado en el análisis debido a que las descargas de aguas residuales municipales no son continuas, sino que varían a lo largo del día. Esta variabilidad es importante ya que influye directamente en el diseño, operación y capacidad de los sistemas de tratamiento.

3.5.1.3. Temperatura

La temperatura es un factor crucial en la solubilidad del ozono en el agua, por esta razón, es importante considerar la temperatura en el proceso de ozonización del agua residual municipal. En el caso de Morelia, Michoacán, donde se realizó este proyecto de investigación, la selección de 15 °C y 25 °C como temperaturas de estudio reflejan las condiciones reales de temperatura mínima y máxima a las que el agua residual está expuesta durante el año. Estos dos valores de temperatura permiten obtener una comprensión más precisa de cómo la solubilidad del ozono puede variar en la eficiencia del tratamiento en condiciones reales.

3.5.1.4. Flujo de ozono

El flujo de ozono es otro factor a considerar ya que un incremento en este flujo podría implicar una mayor capacidad para oxidar y descomponer la materia orgánica presente en el agua. Sin

embargo, es crucial equilibrar la eficacia y la eficiencia energética. Por esta razón, se ha optado por un flujo de ozono en el nivel bajo de 2.11 L/min y un flujo en el nivel alto de 3.11 L/min.

3.5.2. *Corridas experimentales*

En la tabla 4 se muestran las corridas del diseño de experimentos con un arreglo ortogonal Taguchi L₈. Se realizó un ANOVA que permitió evaluar el efecto principal y de interacción de cada uno de los factores para dichos análisis se utilizó el programa Minitab®.

Tabla 4. *Diseño ortogonal Taguchi L₈.*

Número de prueba	Caudal de agua residual (L/min)	Flujo de ozono (L/min)	Temperatura (°C)	Filtración
1	5.5	3.11	25	Si
2	5.5	3.11	15	No
3	5.5	2.11	25	No
4	5.5	2.11	15	Si
5	2	3.11	25	No
6	2	3.11	15	Si
7	2	2.11	25	Si
8	2	2.11	15	No

3.6. Análisis de datos

3.6.1. *Evaluación del tratamiento*

Se evaluó el porcentaje de remoción de la materia orgánica medido como Sólidos Totales Volátiles (STV) durante el tratamiento de ozonización para identificar la prueba con la mayor eficiencia de remoción de acuerdo a la siguiente ecuación.

$$\% \text{ Remoción} = \frac{STV_0 - STV_f}{STV_0} \times 100 \quad \text{Ecuación 8}$$

Donde:

STV₀: Sólidos Totales Volátiles iniciales (mg/L)

STV_f: Sólidos Totales Volátiles finales (mg/L)

3.7. Consumo eléctrico y costo de tratamiento

Se midió la potencia requerida en Watts (W) del sistema aire-ozono durante el tiempo de ozonización para obtener el consumo eléctrico utilizando la siguiente ecuación:

$$\text{Consumo eléctrico} = \frac{\text{Potencia promedio} \times \text{tiempo}}{\text{masa inicial} - \text{masa final}} \times \frac{1}{60} \quad \text{Ecuación 9}$$

Donde el consumo eléctrico está medido en kW-h/g de materia orgánica removida

Para calcular el costo por cada gramo de materia orgánica removida se empleó la siguiente ecuación:

$$\text{Costo por cada gramo de materia orgánica removida} = \text{costo por kWh} \times \text{Consumo eléctrico} \quad \text{Ecuación 10}$$

Donde el costo por kW-h se consideró de \$1.441 MXN ya que, en México, el costo del kilovatio-hora (kWh) para el sector industrial varía según la tarifa y la región (CFE, 2024).

3.8. Equipo empleado

Para las determinaciones de pH y temperatura se utilizó el medidor de pH Horiba NAVI F-51, la conductividad se determinó con el conductímetro Starter 300 C, para la medición de oxígeno disuelto se utilizó el multímetro portátil HQ30D de Hach, la digestión de la materia orgánica

(DQO) fue llevada a cabo en el digestor HACH 45600-00 COD reactor y las pruebas espectrofotométricas requirieron del espectrofotómetro HACH DR2800. La DBO se realizó de acuerdo a la NMX-AA-028-SCFI-2001 La determinación de sólidos se realizó de acuerdo a la NMX-AA-034-SCFI-2015. Para la medición de ozono residual en el agua se utilizó el disco Checker® de HANNA Instruments. La medición de ozono ambiental se realizó con el analizador de ozono portátil marca walfront y para la medición del consumo eléctrico del ozonizador se utilizó un vatímetro marca Abanopi.

CAPÍTULO IV

4. Resultados y Discusión

4.1. Resultados del diseño de experimentos

En este apartado se presentan los resultados obtenidos a partir del diseño experimental implementado. El agua residual municipal utilizada fue distinta en cada prueba debido a los requerimientos específicos de volumen y tiempo necesarios para realizarlas. El tiempo de operación del tratamiento se llevó a cabo durante un periodo de 5 minutos, durante el cual se extrajeron muestras minuto a minuto tanto del efluente del reactor como de los filtros, en los casos en que estos últimos fueron empleados. Esto permitió un seguimiento detallado y sistemático de la operación, asegurando la recopilación de datos representativos para la evaluación del proceso.

4.1.1. Prueba 1

La tabla 5 detalla las condiciones operativas correspondientes a la prueba 1, mientras que la tabla 6 expone los valores iniciales del agua residual municipal.

Tabla 5. *Condiciones de operación de la prueba 1.*

Factor	Valor
Temperatura	25 °C
Filtración	Si
Caudal de agua residual	5.5 L/min
Flujo de ozono	3.11 L/min

Tabla 6. *Caracterización del agua residual municipal (Prueba 1).*

Parámetro	Valor
STV (mg/L)	255 ± 21.21
pH	7.42 ± 0.31
Conductividad (μS/cm)	1952 ± 16.97
Oxígeno disuelto (mg/L)	0.30 ± 0.16

En la Figura 7 se observa el comportamiento de las líneas de operación de los STV en el Efluente del Filtro de Tezontle (EFT), Efluente del Reactor (ER) y en el Efluente del Filtro de Arena (EFA) con sus respectivos porcentajes de remoción.

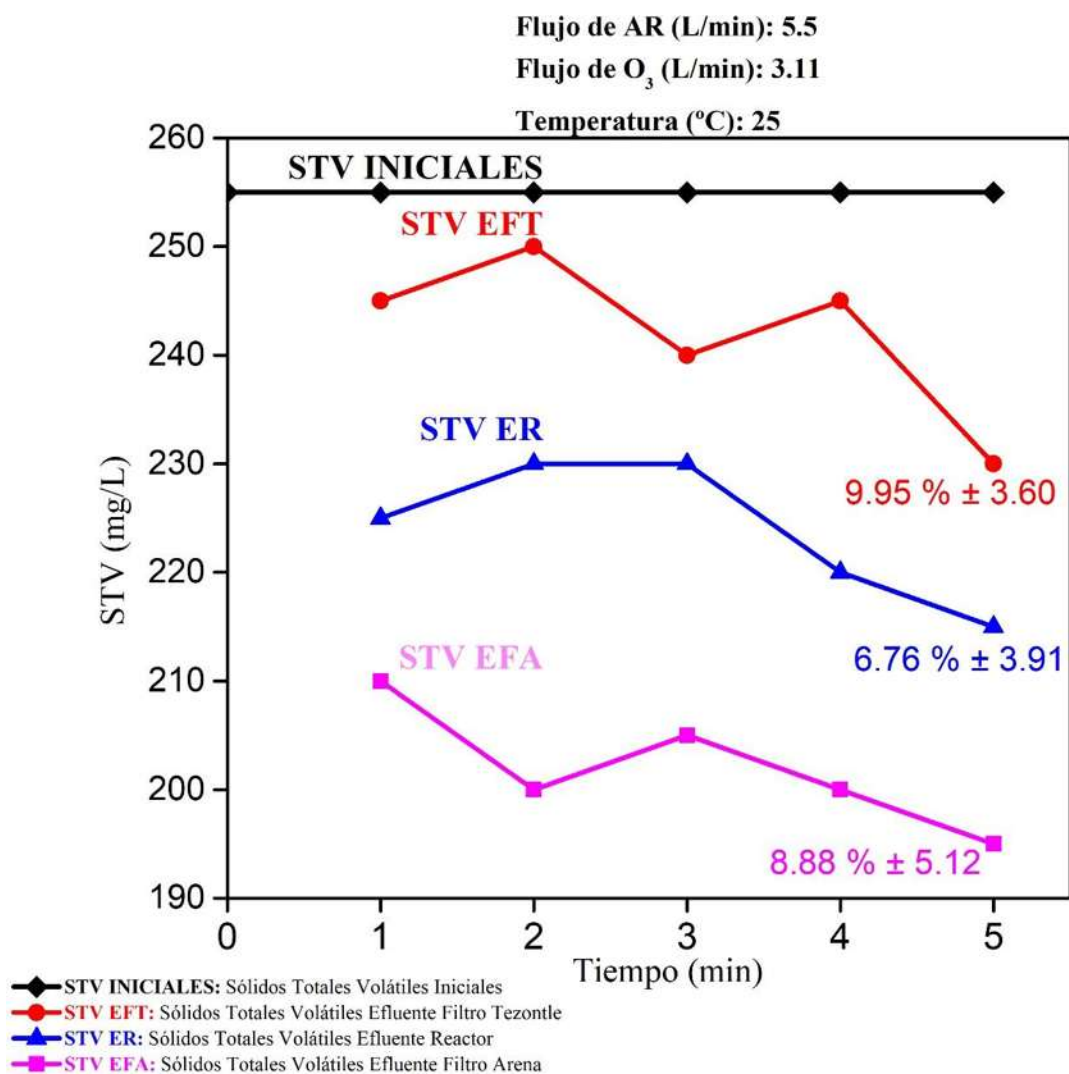


Figura 7. Gráfica de operación de los STV (Prueba 1).

En la Figura 7 se muestran las 4 fases de operación de la prueba 1. La fase inicial, denominada STV INICIALES representa la concentración de los STV al comienzo del tratamiento. Durante la primera etapa, identificada como STV EFT se observa como disminuyen los STV en el efluente del filtro de tezontle, lo que indica una disminución en la concentración de la materia orgánica de 9.95 % ± 3.60. La siguiente etapa, STV ER corresponde al efluente del reactor de ozonización donde se registra una segunda disminución en la carga orgánica con una remoción de 6.76 % ± 3.91. La fase final, STV EFA muestra el comportamiento de los STV en efluente de la

segunda filtración, indicando una tendencia a la baja de los STV con una remoción de $8.8 \% \pm 5.12$. En conjunto las etapas del tratamiento resultan en una remoción global de STV de $23.61 \% \pm 1.96$ para la prueba 1. Como observamos ambos filtros complementaron al proceso de ozonización en la remoción de la materia orgánica y esto se puede atribuir a que los sólidos totales volátiles engloban a los sólidos suspendidos volátiles, estos son los sólidos que están en suspensión en el agua y no se disuelven completamente. Incluyen partículas orgánicas e inorgánicas, como microorganismos, sedimentos y materiales particulados.

4.1.2. Prueba 2

En la tabla 7 se presentan las condiciones de operación para la prueba 2 y en la tabla 8 se presentan los valores iniciales del agua residual municipal.

Tabla 7. *Condiciones de operación de la prueba 2.*

Factor	Valor
Temperatura	15 °C
Filtración	No
Caudal de agua residual	5.5 L/min
Flujo de ozono	3.11 L/min

Tabla 8. *Caracterización del agua residual municipal (Prueba 2).*

Parámetro	Valor
STV (mg/L)	225 ± 35.36
pH	6.96 ± 0
Conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	1445.5 ± 13.44
Oxígeno disuelto (mg/L)	0.28 ± 0.07

En la Figura 8 se puede observar el comportamiento de las líneas de operación de los STV en el Efluente del Reactor (ER) y su porcentaje de remoción.

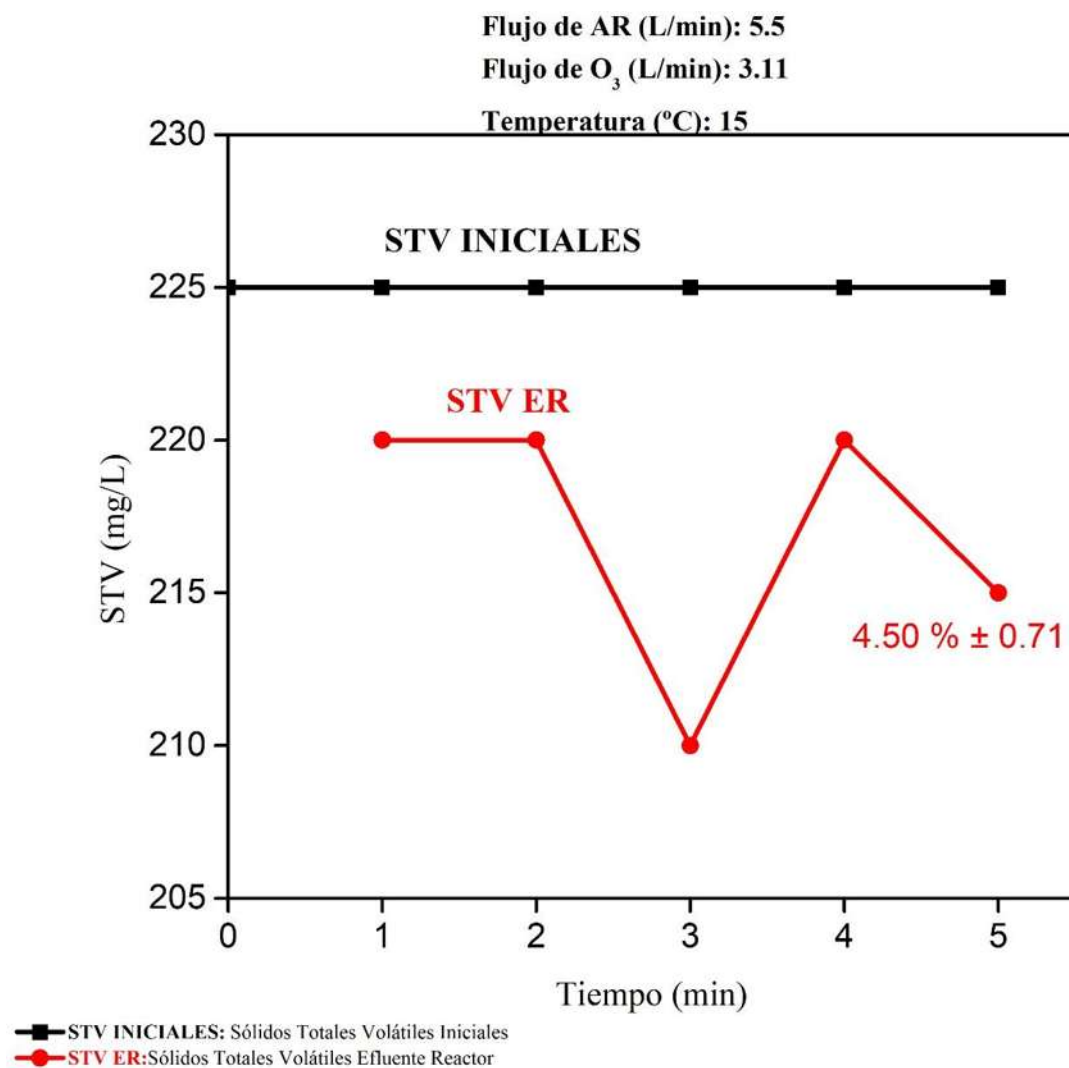


Figura 8. Gráfica de operación de los STV (Prueba 2).

En la Figura 8 se muestran las 2 etapas de operación de la prueba 2. La fase inicial, denominada STV INICIALES representa la concentración de los STV al comienzo del tratamiento. En la etapa identificada como STV ER se observa como oscilan los STV en el efluente del reactor de ozonización donde se logró una disminución global en la concentración de la materia orgánica de 4.50 % ± 0.71. Esta baja remoción se puede explicar a qué tanto el caudal de agua residual como el flujo de ozono se encontraban en su nivel alto, lo que resultó en un corto tiempo de contacto entre el ozono y la materia orgánica. Además, es relevante mencionar que en esta prueba no se usó

filtración a diferencia de la prueba 1, donde se observó que la filtración mejoraba la eliminación de STV al retener los sólidos suspendidos volátiles, componentes de los STV.

4.1.3. Prueba 3

La tabla 9 presentan las condiciones de operación de la prueba 3 y en la tabla 10 se muestra los valores iniciales del agua residual municipal.

Tabla 9. *Condiciones de operación de la prueba 3.*

Factor	Valor
Temperatura	25 °C
Filtración	No
Caudal de agua residual	5.5 L/min
Flujo de ozono	2.11 L/min

Tabla 10. *Caracterización del agua residual municipal (Prueba 3).*

Parámetro	Valor
STV (mg/L)	220 ± 14.14
pH	7.48 ± 0.13
Conductividad ($\mu\text{S/cm}$)	1407 ± 7.07
Oxígeno disuelto (mg/L)	0.17 ± 0.01

En la Figura 9 se muestra el comportamiento de las líneas de operación de los STV en el Efluente del Reactor (ER) y su porcentaje de remoción.

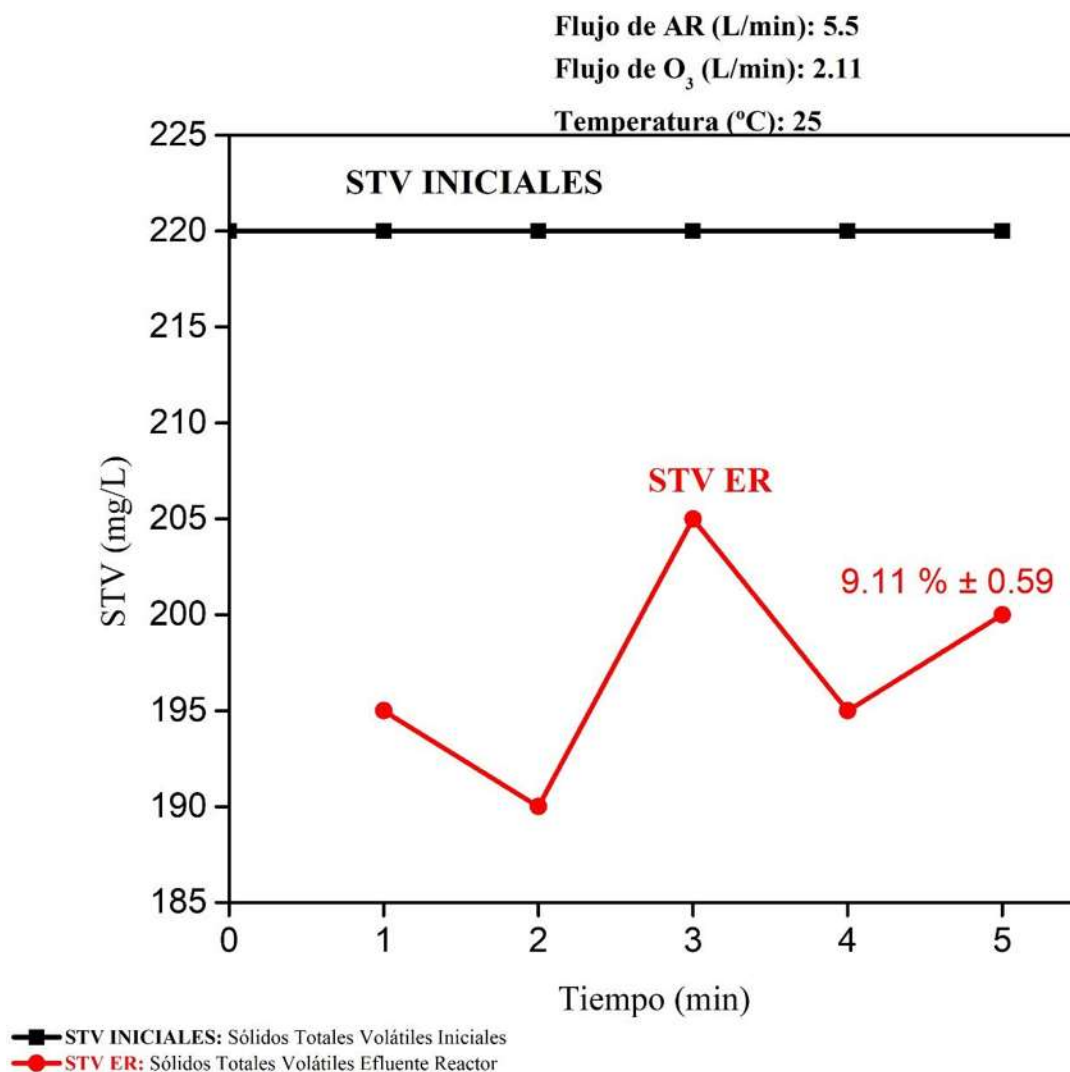


Figura 9. Gráfica de operación de los STV (Prueba 3).

En la Figura 9 se muestran las 2 etapas de operación de la prueba 3. La fase inicial, denominada STV INICIALES representa la concentración de los STV al comienzo del tratamiento. En la etapa identificada como STV ER se observa como oscilan los STV en el efluente del reactor de ozonización donde se logró una disminución global en la concentración de la materia orgánica de 9.11 % $\pm$ 0.59. En comparación con la prueba 2 que también se llevó a cabo sin filtración, se ha observado un aumento en la remoción de la materia orgánica. Este aumento en la remoción puede ser explicado por la disminución del flujo de ozono, lo que favoreció una transferencia más

eficiente de ozono hacia el agua. Como resultado, se produjo una interacción más efectiva entre el ozono y la materia orgánica.

4.1.4. Prueba 4

La tabla 11 presenta las condiciones de operación de la prueba 4 y en la tabla 12 se puede observar la caracterización del agua residual municipal.

Tabla 11. *Condiciones de operación de la prueba 4.*

Factor	Valor
Temperatura	15 °C
Filtración	Si
Caudal de agua residual	5.5 L/min
Flujo de ozono	2.11 L/min

Tabla 12. *Caracterización del agua residual municipal (Prueba 4).*

Parámetro	Valor
STV (mg/L)	260 ± 14.14
pH	7.73 ± 0.05
Conductividad (μS/cm)	1875 ± 56.57
Oxígeno disuelto (mg/L)	0.40 ± 0.07

En la Figura 10 se observa el comportamiento de las líneas de operación de los STV en el Efluente del Filtro de Tezontle (EFT), Efluente del Reactor (ER) y en el Efluente del Filtro de Arena (EFA) con sus respectivos porcentajes de remoción.

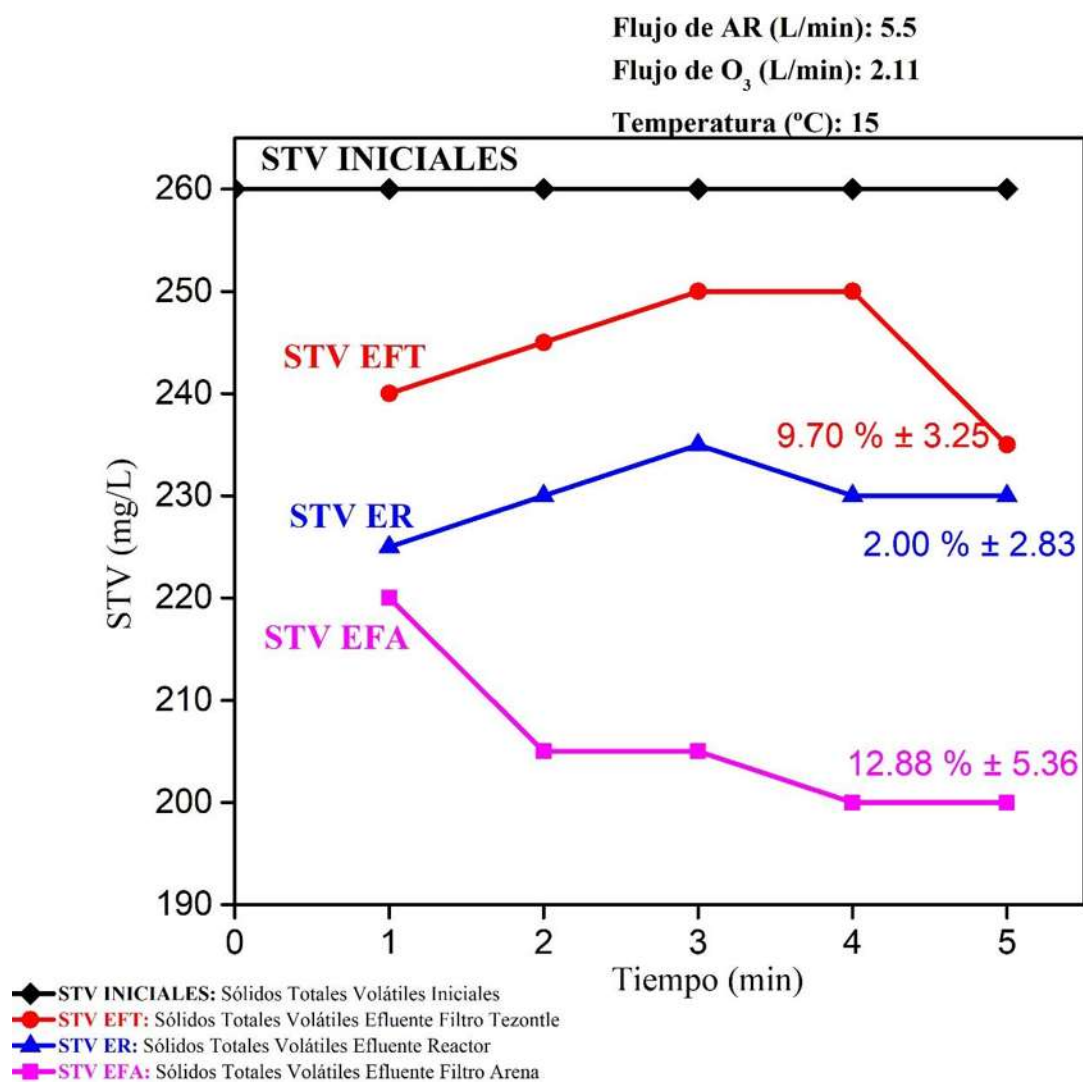


Figura 10. Gráfica de operación de los STV (Prueba 4).

En la Figura 10 se muestran las 4 fases de operación de la prueba 4. La fase inicial, denominada STV INICIALES representa la concentración de los STV al comienzo del tratamiento. Durante la primera etapa, identificada como STV EFT se observa como disminuyen los STV en el efluente del filtro de tezontle, lo que indica una disminución en la concentración de la materia orgánica de $9.70 \% \pm 3.25$. La siguiente etapa, STV ER corresponde al efluente del reactor de ozonización donde se registra una menor disminución en la carga orgánica con una remoción de $2.00 \% \pm 2.83$. La fase final, STV EFA muestra el comportamiento de los STV en efluente de la

segunda filtración, indicando una tendencia a la baja de los STV con una remoción de $12.88 \% \pm 5.36$. En conjunto las etapas del tratamiento resultan en una remoción global de STV de $22.96 \% \pm 4.19$. En esta prueba se observó que los filtros ejercieron una mayor influencia en la eliminación de materia orgánica y aunque el tratamiento con ozono contribuyó a la remoción, su efecto fue menor en comparación con la filtración. Este hallazgo subraya la importancia de complementar el tratamiento con ozono con un método adecuado de tratamiento que garantice la máxima eficiencia en la remoción de contaminantes orgánicos.

4.1.5. Prueba 5

En la tabla 13 se observan las condiciones de operación de la prueba 5 y en la tabla 14 se muestra la caracterización del agua residual municipal.

Tabla 13. *Condiciones de operación de la prueba 5.*

Factor	Valor
Temperatura	25 °C
Filtración	No
Caudal de agua residual	2 L/min
Flujo de ozono	3.11 L/min

Tabla 14. *Caracterización del agua residual municipal (Prueba 5).*

Parámetro	Valor
STV (mg/L)	285 ± 106.07
pH	7.58 ± 0.01
Conductividad ($\mu\text{S/cm}$)	1703 ± 425.68
Oxígeno disuelto (mg/L)	0.17 ± 0.01

La Figura 11 muestra el comportamiento de las líneas de operación de los STV en el Efluente del Reactor (ER) y su porcentaje de remoción.

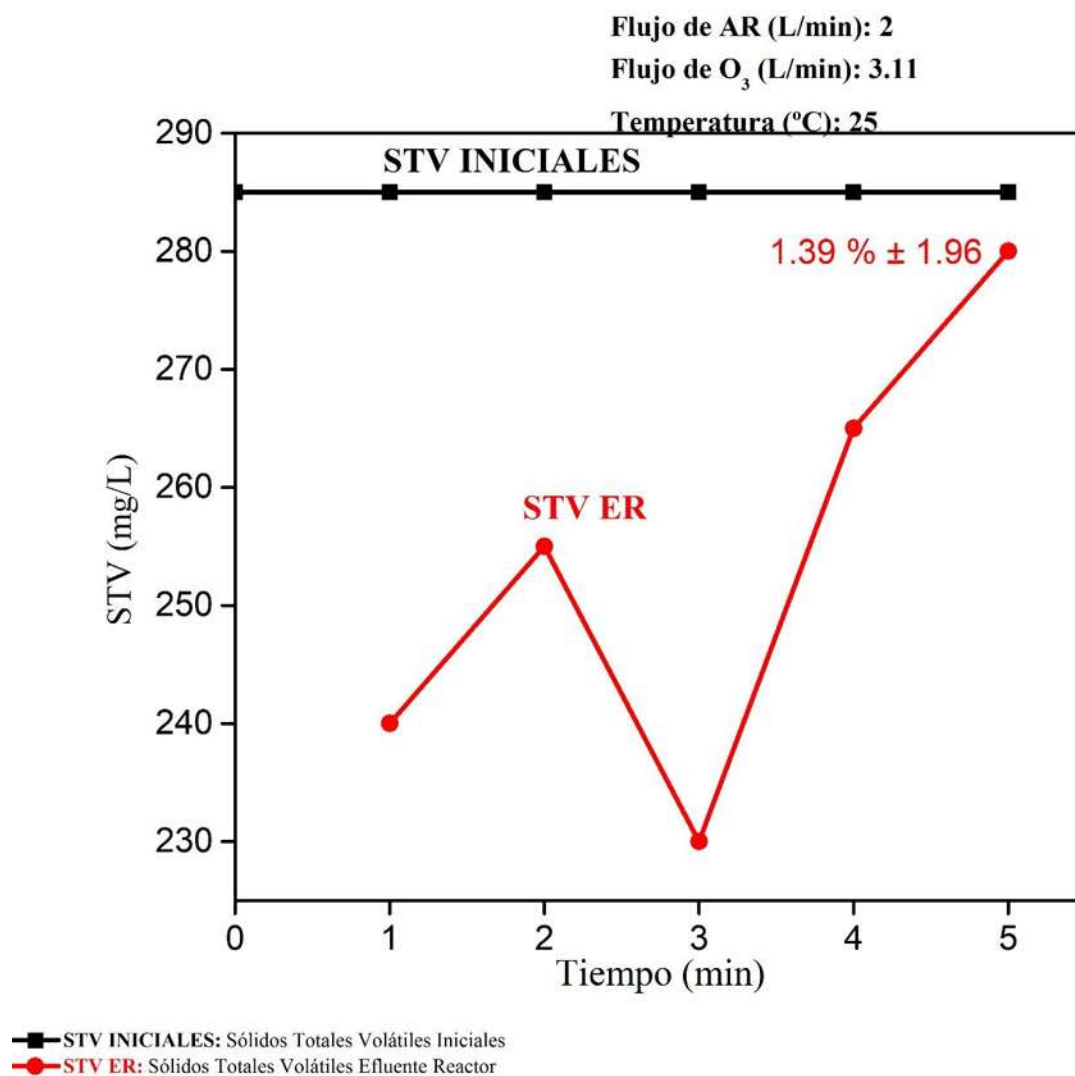


Figura 11. Gráfica de operación de los STV (Prueba 5).

En la Figura 11 se muestran las 2 etapas de operación de la prueba 5. La fase inicial, denominada STV INICIALES representa la concentración de los STV al comienzo del tratamiento. En la etapa identificada como STV ER se observa como oscilan bruscamente los STV en el efluente del reactor de ozonización donde se logró una disminución global en la concentración de la materia orgánica de $1.39 \% \pm 1.96$. En comparación con las pruebas que se llevaron a cabo sin filtración, la prueba 5 es la que obtuvo la menor remoción de la materia orgánica a los 5 minutos de operación. Esto puede ser explicado, además de la ausencia de filtración, a que la temperatura

y el flujo de ozono se encontraban en su nivel alto lo que no favoreció una transferencia eficiente del ozono al agua, evidenciado en las oscilaciones observadas en la gráfica de operación de la prueba 5.

4.1.6. Prueba 6

La tabla 15 muestra las condiciones de operación de la prueba 6 y la tabla 16 presenta la caracterización del agua residual municipal.

Tabla 15. *Condiciones de operación de la prueba 6.*

Factor	Valor
Temperatura	15 °C
Filtración	Si
Caudal de agua residual	2 L/min
Flujo de ozono	3.11 L/min

Tabla 16. *Caracterización del agua residual municipal (Prueba 6).*

Parámetro	Valor
STV (mg/L)	240 ± 28.28
pH	7.50 ± 0.25
Conductividad (µS/cm)	1279 ± 385.37
Oxígeno disuelto (mg/L)	0.75 ± 0.69

En la Figura 12 se observa el comportamiento de las líneas de operación de los STV en el Efluente del Filtro de Tezontle (EFT), Efluente del Reactor (ER) y en el Efluente del Filtro de Arena (EFA) con sus respectivos porcentajes de remoción.

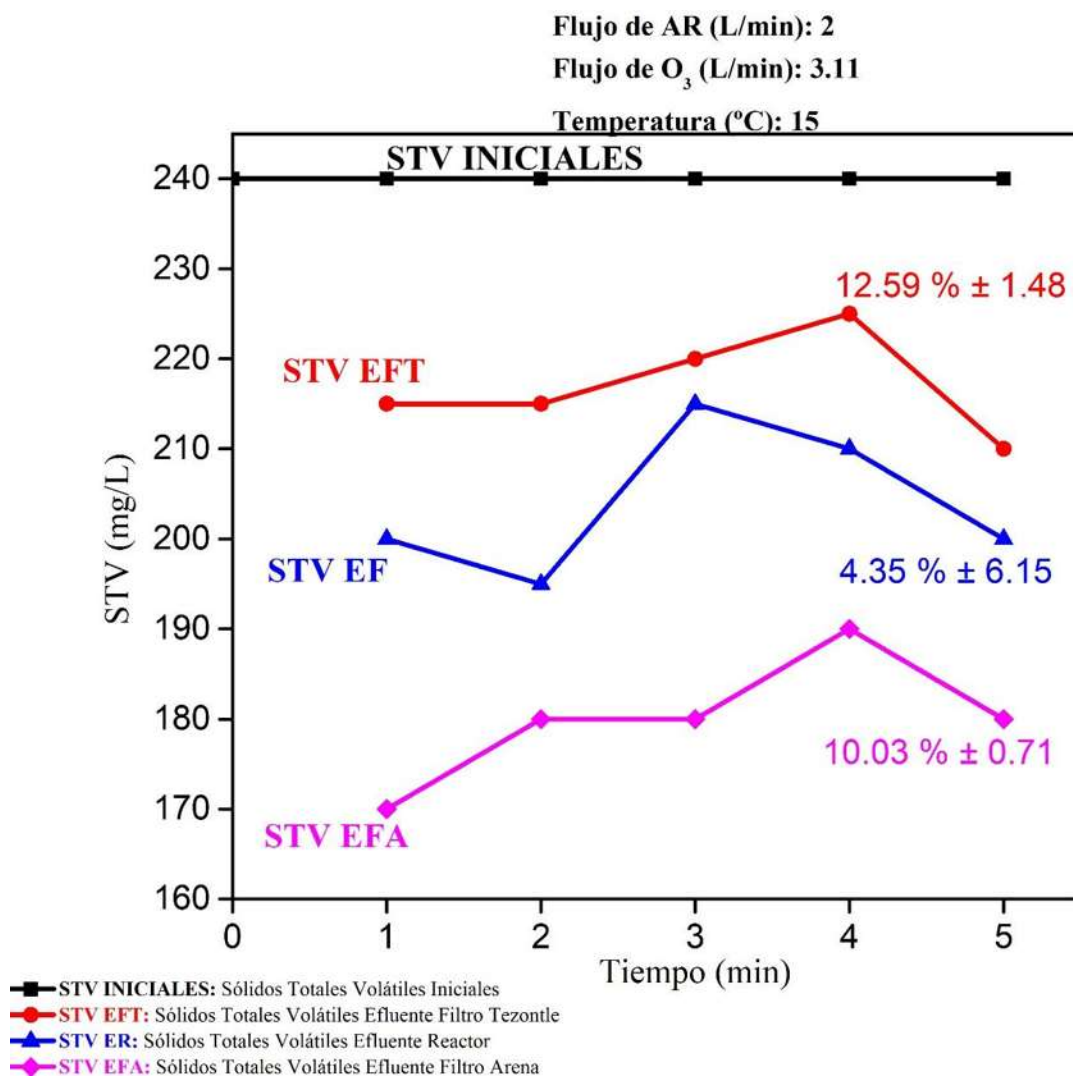


Figura 12. Gráfica de operación de los STV (Prueba 6).

En la Figura 12 se muestran las 4 fases de operación de la prueba 6. La fase inicial, denominada STV INICIALES representa la concentración de los STV al comienzo del tratamiento. Durante la primera etapa, identificada como STV EFT se observa como disminuyen los STV en el

efluente del filtro de tezontle, lo que indica una disminución en la concentración de la materia orgánica de $12.59 \% \pm 1.48$. La siguiente etapa, STV ER corresponde al efluente del reactor de ozonización donde se registra una disminución en la carga orgánica con una remoción de $4.35 \% \pm 6.15$. La fase final, STV EFA muestra el comportamiento de los STV en efluente de la segunda filtración, indicando una tendencia a la baja de los STV con una remoción de $10.03 \% \pm 0.71$. En conjunto las etapas del tratamiento resultan en una remoción global de STV de $24.83 \% \pm 2.97$. En esta prueba se observó un comportamiento similar a la prueba 4 donde los filtros ejercieron una mayor influencia en la remoción de la materia orgánica lo que refuerza la importancia de integrar la filtración al tratamiento con ozono para garantizar la máxima eficiencia en la remoción de los contaminantes orgánicos.

4.1.7. Prueba 7

En la tabla 17 se observan las condiciones de operación de la prueba 7 y la tabla 18 se expone la caracterización del agua residual municipal.

Tabla 17. *Condiciones de operación de la prueba 7.*

Factor	Valor
Temperatura	25 °C
Filtración	Si
Caudal de agua residual	2 L/min
Flujo de ozono	2.11 L/min

Tabla 18. *Caracterización del agua residual municipal (Prueba 7).*

Parámetro	Valor
STV (mg/L)	240 ± 28.28
pH	7.41 ± 0.16
Conductividad ($\mu\text{S/cm}$)	1659 ± 340.83
Oxígeno disuelto (mg/L)	0.20 ± 0.06

En la Figura 13 se observa el comportamiento de las líneas de operación de los STV en el Efluente del Filtro de Tezontle (EFT), Efluente del Reactor (ER) y en el Efluente del Filtro de Arena (EFA) con sus respectivos porcentajes de remoción.

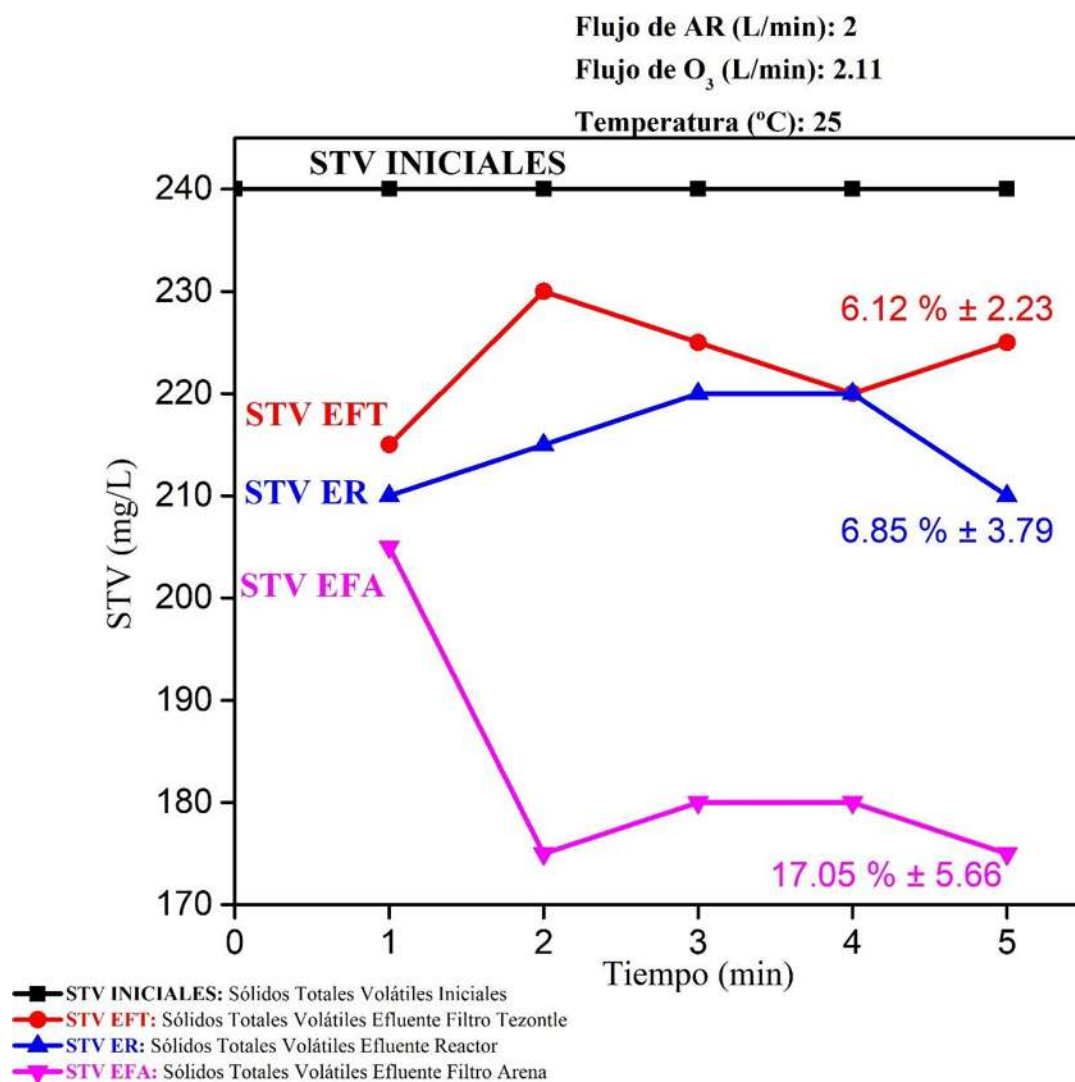


Figura 13. Gráfica de operación de los STV (Prueba 7).

En la Figura 13 se muestran las 4 fases de operación de la prueba 7. La fase inicial, denominada STV INICIALES representa la concentración de los STV al comienzo del tratamiento. Durante la primera etapa, identificada como STV EFT se observa como disminuyen los STV en el efluente del filtro de tezontle, lo que indica una disminución en la concentración de la materia orgánica de 6.12 % ± 2.23. La siguiente etapa, STV ER corresponde al efluente del reactor de ozonización donde se registra una disminución en la carga orgánica con una remoción de 6.85 % ± 3.79. La fase final, STV EFA muestra el comportamiento de los STV en efluente de la segunda

filtración, indicando una tendencia a la baja de los STV con una remoción de $17.05 \% \pm 5.66$. En conjunto las etapas del tratamiento resultan en una remoción global de STV de $27.45 \% \pm 6.18$. Esta prueba fue la que mayor remoción de materia orgánica logró lo cual se puede explicar porque el flujo de ozono y el caudal de agua residual se encontraban en su nivel bajo lo cual favoreció un contacto más prolongado entre el ozono y la materia orgánica. Además, la filtración ejerció una influencia en la eliminación de la materia orgánica, particularmente el segundo filtro, que mostró una notable reducción de la materia orgánica a partir del segundo minuto de tratamiento lo cual sugiere que la última etapa potenció la remoción conseguida en las fases anteriores, resultando en una remoción significativa de la carga orgánica.

4.1.8. Prueba 8

La tabla 19 muestra las condiciones de operación de la prueba 8 y en la tabla 20 se observa la caracterización del agua residual municipal.

Tabla 19. *Condiciones de operación de la prueba 8.*

Factor	Valor
Temperatura	15 °C
Filtración	No
Caudal de agua residual	2 L/min
Flujo de ozono	2.11 L/min

Tabla 20. *Caracterización del agua residual municipal (Prueba 8).*

Parámetro	Valor
STV (mg/L)	250 ± 14.14
pH	7.35 ± 0.46
Conductividad ($\mu\text{S/cm}$)	1506 ± 64.35
Oxígeno disuelto (mg/L)	0.74 ± 0.71

La Figura 14 muestra el comportamiento de las líneas de operación de los STV en el Efluente del Reactor (ER) y su porcentaje de remoción.

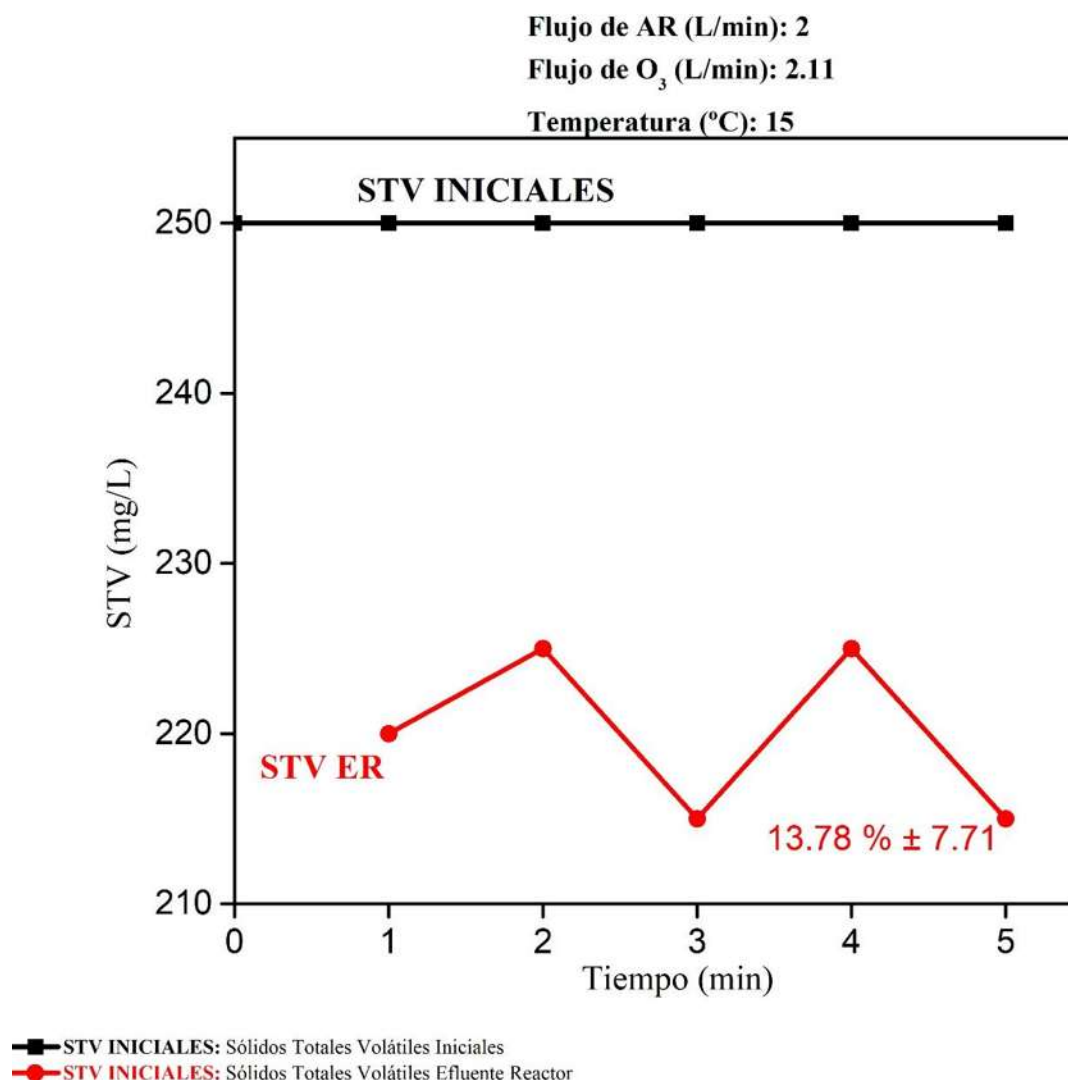


Figura 14. Gráfica de operación de los STV (Prueba 8).

En la Figura 14 se muestran las 2 etapas de operación de la prueba 8. La fase inicial, denominada STV INICIALES representa la concentración de los STV al comienzo del tratamiento. En la etapa identificada como STV ER se observa como oscilan los STV en el efluente del reactor de ozonización donde se logró una disminución global en la concentración de la materia orgánica de 13.78 % ± 7.71. En comparación con las pruebas que se llevaron a cabo sin filtración, la prueba 8 es la que obtuvo la mayor remoción de la materia orgánica a los 5 minutos de operación. Esto puede atribuirse a que la temperatura, el flujo de ozono y el caudal de agua residual

encontraban en su nivel bajo lo que favoreció una transferencia eficiente del ozono al agua y por lo tanto una mayor remoción de la carga orgánica.

4.2 Mejores Condiciones de Operación

Una vez realizadas las pruebas del diseño experimental se procedió a evaluar la mejor prueba teniendo como variable de respuesta la remoción de los STV. La tabla 21 detalla las ocho pruebas del diseño de experimentos y sus respectivos porcentajes globales de remoción de los STV.

Tabla 21. *Porcentajes globales de remoción de los STV para cada prueba del diseño de experimentos.*

Número de prueba	Caudal de agua residual (L/min)	Flujo de ozono (L/min)	Temperatura (°C)	Filtración	% remoción de los STV
1	5.5	3.11	25	Si	23.61 ± 1.96
2	5.5	3.11	15	No	4.50 ± 0.71
3	5.5	2.11	25	No	9.11 ± 0.59
4	5.5	2.11	15	Si	22.96 ± 4.19
5	2	3.11	25	No	1.39 ± 1.96
6	2	3.11	15	Si	24.83 ± 2.97
7	2	2.11	25	Si	27.45 ± 6.18
8	2	2.11	15	No	13.78 ± 7.71

En relación a la remoción de los STV; con la temperatura de 25 °C, el uso de filtración, un caudal de agua residual de 2 L/min y un flujo de ozono de 2.11 L/min, se observa en la tabla 21 que la prueba 7 presenta el mayor porcentaje de remoción de los STV (27.45 %) a los 5 minutos del tiempo de tratamiento.

4.3 Análisis estadístico

Se identificaron los principales factores con mayor influencia en la variable de respuesta para la optimización del sistema de tratamiento del agua residual municipal. Los resultados se muestran en la tabla 22.

Tabla 22. *Análisis de varianza de medias*

Fuente	GL	SC Sec.	SC Ajust.	MC Ajust.	F	P
FAR	1	6.588	6.588	6.588	0.43	0.558
FO ₃	1	45.016	45.016	45.016	2.96	0.184
T	1	2.546	2.546	2.546	0.17	0.710
Filtro	1	613.658	613.658	613.658	40.33	0.008
Error residual	3	45.646	45.646	15.215		
Total	7	713.454				

Como se observa en la tabla 22 el ANOVA permitió identificar que los factores Flujo de Agua Residual (FAR), Flujo de Ozono (FO₃) y Temperatura (T) no tiene un efecto estadístico sobre el porcentaje de remoción de los STV. Mientras que la filtración tiene un efecto significativo sobre el porcentaje de remoción de los STV, con un 95% de confianza.

La Figura 15 muestra los efectos principales para medias, que nos indica que factores están teniendo un efecto en la variabilidad del porcentaje de remoción de los STV.

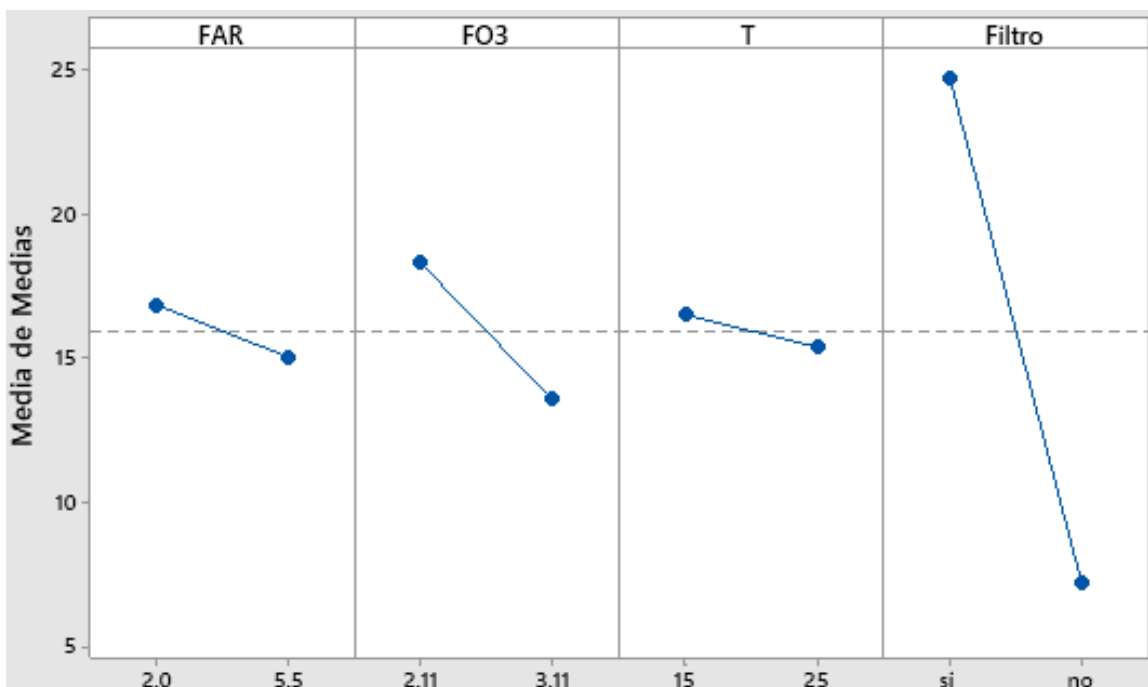


Figura 15. Gráfica de efectos principales para medias.

Como se puede analizar en la Figura 15 y como el ANOVA lo indico el uso de la filtración tiene el mayor efecto en el porcentaje de remoción de los STV. En la tabla 23 se muestra la importancia que tiene cada factor en la variable respuesta.

Tabla 23. Respuesta para medias

Nivel	FAR	FO ₃	T	Filtro
1	16.861	18.326	16.518	24.712
2	15.046	13.581	15.389	7.195
Delta	1.815	4.744	1.128	17.517
Clasificar	3	2	4	1

De las Figura 15 y de la tabla 23 podemos inferir que la combinación de factores para lograr el mayor porcentaje de remoción de lo STV en orden de importancia son el uso de filtración, el flujo de ozono en su nivel bajo de 2.11 L/min, el flujo de agua residual en el nivel bajo de 2 L/min y la temperatura en su nivel bajo de 15 °C.

De las 8 pruebas del diseño de experimentos, la prueba 7 es la más próxima a la combinación de factores que maximiza el porcentaje de remoción de los STV. No obstante, se observó que la temperatura es el factor que no se alinea en el nivel de efecto sobre la variable respuesta.

Por lo anterior y para optimizar el sistema de tratamiento con ozono, se llevaron a cabo pruebas considerando los factores en su nivel de mayor importancia.

4.4 Factores en su nivel de mayor importancia: ozonización

En la tabla 24 se presentan las condiciones de operación para el sistema de tratamiento con ozono y en la tabla 25 se presenta la caracterización del agua residual municipal.

Tabla 24. *Factores en su nivel de mayor importancia: ozonización.*

Factor	Valor
Temperatura	15 °C
Filtración	Si
Caudal de agua residual	2 L/min
Flujo de ozono	2.11 L/min

Tabla 25. *Caracterización del agua residual municipal.*

Parámetro	Valor
STV (mg/L)	215 ± 63.64
pH	7.28 ± 0.04
Conductividad (μS/cm)	1512 ± 9.90
Oxígeno disuelto (mg/L)	0.34 ± 0.06
DQO (mg/L)	303 ± 18.38
DBO (mg/L)	219 ± 1.41
Toxicidad (% de inhibición)	30.08 ± 10.12

La Figura 16 muestra el comportamiento de las líneas de operación de los STV en el Efluente Filtro de Tezontle (EFT), Efluente del Reactor (ER) y Efluente Filtro de Arena (EFA) con su respectivo porcentaje de remoción, además, en las Figuras 17 y 18 se muestran los parámetros de seguimiento en el reactor de ozonización (pH, conductividad, oxígeno disuelto y ozono ambiental).

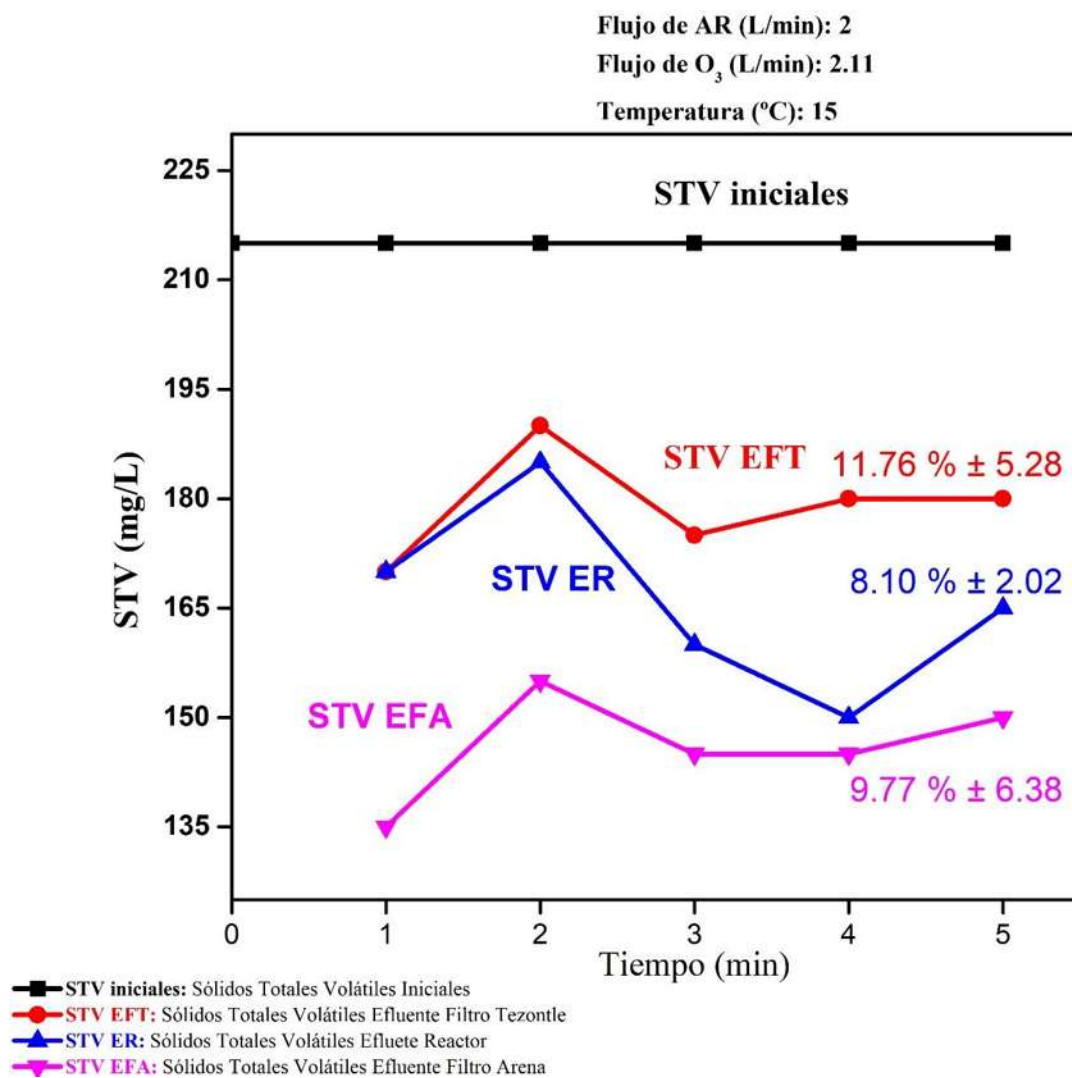


Figura 16. Gráfica de operación de los STV (factores en su nivel de mayor importancia: ozonización).

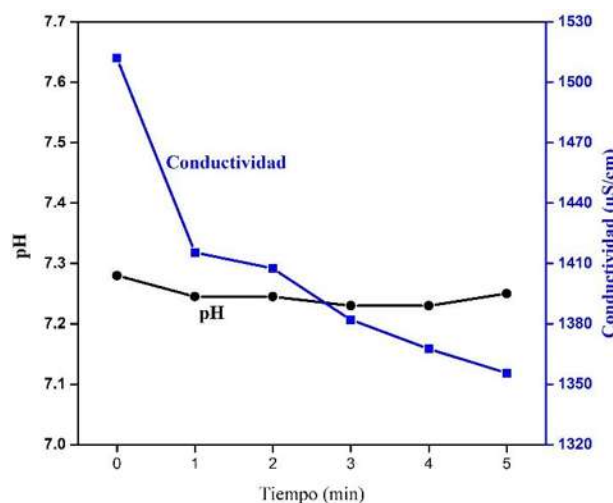


Figura 17. Monitoreo del pH y la conductividad en el reactor de ozonización.

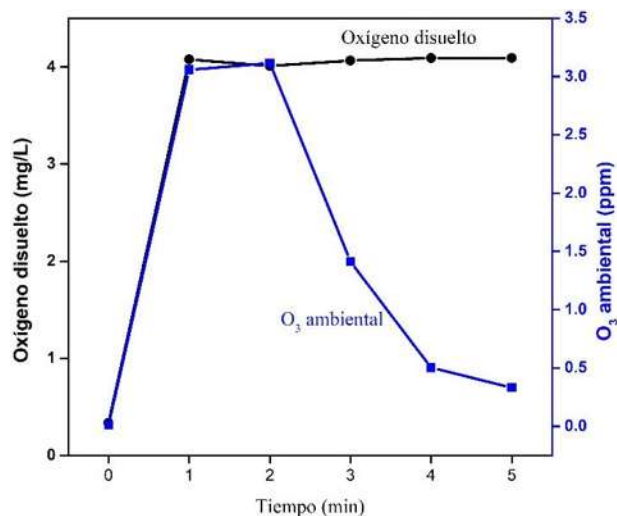


Figura 18. Monitoreo del oxígeno disuelto y el ozono ambiental en el reactor de ozonización.

En la Figura 16 se muestran las 4 fases de operación considerando los factores en su nivel de mayor importancia. La fase inicial, denominada STV INICIALES representa la concentración de los STV al comienzo del tratamiento. Durante la primera etapa, identificada como STV EFT se observa como disminuyen los STV en el efluente del filtro de tezontle, lo que indica una disminución en la concentración de la materia orgánica de $11.76 \% \pm 5.28$. La siguiente etapa, STV ER corresponde al efluente del reactor de ozonización donde se registra una disminución en la carga orgánica con una remoción de $8.10 \% \pm 2.02$. La fase final, STV EFA muestra el comportamiento de los STV en efluente de la segunda filtración, indicando una tendencia a la baja de los STV con una remoción de $9.77 \% \pm 6.38$. En conjunto las etapas del tratamiento resultan en una remoción global de STV de $30.09 \% \pm 0.96$. Esta tasa de remoción fue superior a la obtenida en la prueba 7 que fue de 27.45% , este incremento puede estar relacionado con la variación en la temperatura; en la prueba 7, la temperatura se mantuvo en un nivel alto de 25°C , mientras que en

la prueba actual se trabajó a una temperatura más baja de 15 °C lo cual favoreció la solubilidad del ozono en el agua, además, de la influencia de la filtración en la remoción de la materia orgánica.

Adicionalmente, las Figuras 17 y 18 ilustran el seguimiento realizado de los parámetros pH, conductividad, oxígeno disuelto y ozono ambiental en el reactor de ozonización. Se observó que el pH se mantuvo estable, sin variaciones significativas. Por otro lado, la conductividad experimentó una reducción, pasando de 1512 $\mu\text{S}/\text{cm}$ a 1355 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Respecto al monitoreo del oxígeno disuelto y del ozono ambiental; ambos parámetros evidenciaron un incremento progresivo. El oxígeno disuelto aumento de 0.34 mg/L a 4 mg/L, mientras que la concentración de ozono ambiental aumentó de 0.011 ppm a 0.331 ppm. Este notable aumento sugiere que no toda la cantidad de ozono suministrada está reaccionando como se esperaba. Es crucial monitorear este parámetro de cerca, ya que el ozono presente en la atmósfera puede actuar como un contaminante, afectando negativamente la calidad del aire que respiramos.

En la Figura 19 se muestra el monitoreo de los parámetros pH, conductividad y oxígeno disuelto al final del tratamiento.

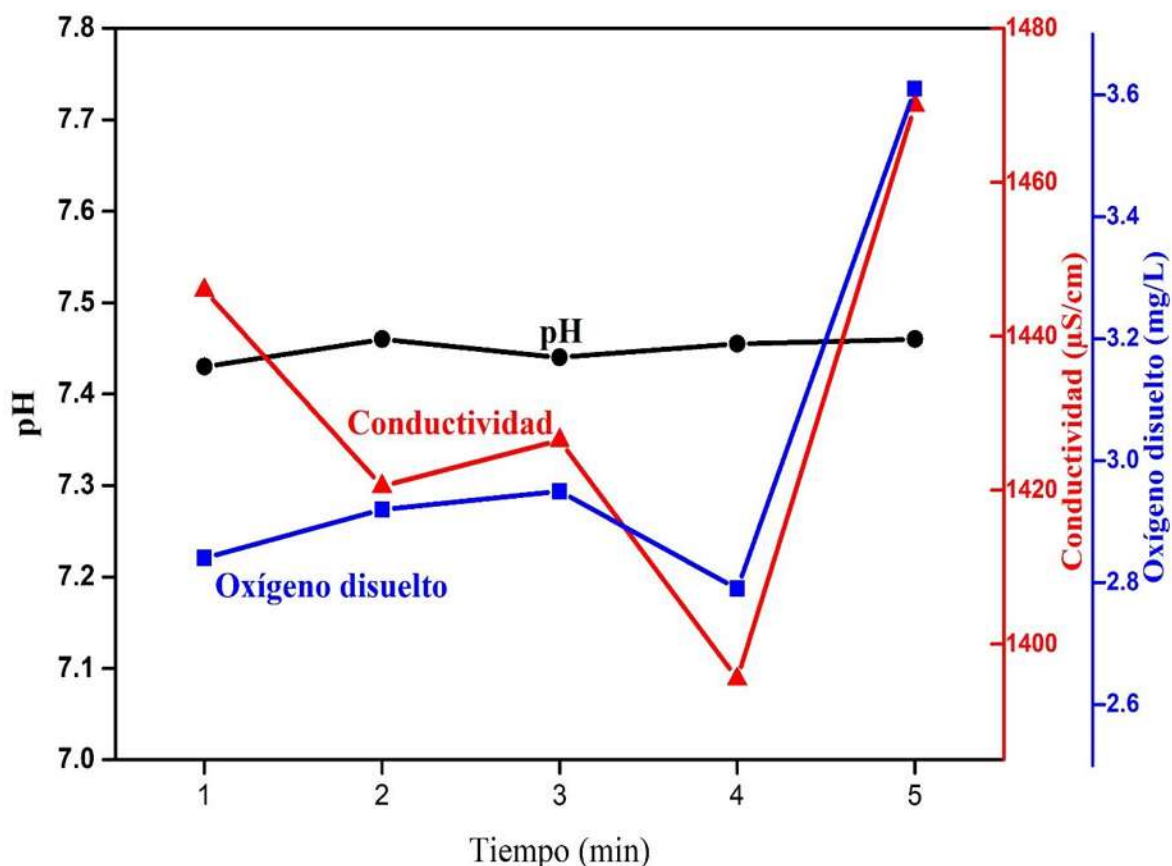


Figura 19. Monitoreo de los parámetros al final del tratamiento con ozono.

Al concluir el tratamiento y comparando los valores iniciales mostrados en la tabla 25 y los valores finales que se observan en la Figura 19, se observa un incremento moderado en el nivel de pH, de 7.28 a 7.46, esto se puede atribuir a la formación de radicales libres en presencia de iones de hidróxido (OH^-) lo cual de acuerdo con Alvares *et al.* (2001) aumenta la eficiencia óptima de la ozonización y la mejora de la biodegradabilidad ya que esto se ve favorecido a partir de un pH de 7, donde la generación de radicales libres equilibra la tasa de autodescomposición del ozono. Paralelamente, la conductividad experimentó una ligera reducción, pasando de 1512 $\mu\text{S}/\text{cm}$ a 1470 $\mu\text{S}/\text{cm}$, lo que sugiere una disminución en la concentración de iones disueltos. Además, se observó un notable aumento en la concentración de oxígeno disuelto, de 0.34 mg/L a 3.61 mg/L lo cual es

favorable para los procesos de biodegradación aerobia de la materia orgánica debido a que una mayor cantidad de oxígeno disuelto facilita la descomposición de compuestos orgánicos por microorganismos aerobios, lo que resulta en una autodepuración más eficiente de los cuerpos de agua.

4.4.1. Remoción de la materia orgánica

En la tabla 26 se presentan las concentraciones iniciales y finales de la materia orgánica medida como STV, DQO y DBO con sus respectivos porcentajes de remoción.

Tabla 26. *Concentración de la Materia Orgánica en el Agua Residual Municipal.*

Parámetro	Valor Inicial (mg/L)	Valor Final (mg/L)	% Remoción
STV	215 ± 63.64	150 ± 42.43	30.09 ± 0.96
DBO	219 ± 1.41	152.75 ± 8.84	30.24 ± 4.49
DQO	303 ± 18.38	248.50 ± 31.82	18.15 ± 5.54

De la tabla 26 se observa que al concluir el tratamiento con ozono existe remoción de la materia orgánica, independientemente del método de medición empleado. La variación en los porcentajes de remoción entre STV, DBO y DQO proporciona una visión más detallada sobre cómo el sistema de tratamiento con ozono interactúa con la materia orgánica ya que cada uno de estos parámetros se basa en un principio de medición distinto. La DBO mide la cantidad de oxígeno requerido por los microorganismos aerobios para descomponer la materia orgánica biodegradable. Por su parte, la DQO cuantifica tanto la materia orgánica biodegradable como la no biodegradable, proporcionando una visión más amplia de la contaminación orgánica total. Los STV, en cambio, representan la fracción de sólidos en suspensión y disueltos que pueden ser volatilizados (a 550 °C

$\pm 50\text{ }^{\circ}\text{C}$). A pesar de que cada uno de estos parámetros se fundamenta en un principio de medición diferente, todos coinciden en proporcionar una medida indirecta y global de la materia orgánica presente en el agua residual.

4.4.2. Biodegradabilidad

Adicionalmente con los datos de la tabla 26 se obtuvo la estimación de biodegradabilidad del agua residual municipal mediante la relación DBO_5/DQO (Ledakowicz *et al.* 2017). En la tabla 27 se muestra la relación de biodegradabilidad antes y después del tratamiento.

Tabla 27. *Relación de biodegradabilidad del agua residual municipal*

Muestra	Relación DBO_5/DQO
Sin Tratamiento	0.72 ± 0.04
Después del Tratamiento	0.62 ± 0.12

De la tabla 27 se observa que el agua residual municipal es biodegradable ya que la relación DBO_5/DQO es mayor a 0.6 antes y después del tratamiento. Sin embargo, se detecta una moderada disminución en la biodegradabilidad al final del tratamiento, esta reducción se puede atribuir a la mineralización de una fracción de la materia orgánica presente en el agua residual municipal lo cual es favorable porque disminuye la carga orgánica de las descargas de aguas residuales contribuyendo a la autodepuración de los cuerpos de agua receptores.

4.4.3. Toxicidad

En la tabla 28 se muestran los valores iniciales y finales de toxicidad y de ozono disuelto en el agua residual municipal.

Tabla 28. *Valores de toxicidad y ozono disuelto pre y post tratamiento.*

Parámetro	Valor Inicial	Valor Final
Toxicidad (% de Inhibición)	30.08 ± 10.12	42.73 ± 1.85
Ozono Disuelto (mg/L)	0 ± 0	< 0.1

En la tabla 28 se observa un incremento moderado en el parámetro de toxicidad, lo cual podría atribuirse a la acción oxidante del ozono para eliminar microorganismos. Dicha capacidad, aunque es beneficiosa para la desinfección, debe ser monitoreada cuidadosamente para evitar exceder los umbrales de seguridad para organismos vivos. Por lo tanto, es esencial controlar la concentración de ozono para maximizar sus ventajas como oxidante, minimizando los riesgos potenciales. Además, como se muestra en la tabla 28 la concentración de ozono disuelto es inferior a 0.1 mg/L, el cual puede continuar reaccionando con compuestos orgánicos hasta agotarse completamente.

4.4.4. Consumo eléctrico y costo del sistema de ozonización

La tabla 29 presenta el consumo de energía eléctrica requerido por el ozonizador, así como el costo económico que implica la remoción de cada gramo de materia orgánica.

Tabla 29. *Consumo eléctrico y el costo asociado para la remoción de cada gramo de materia orgánica*

Parámetro	Consumo eléctrico (kW-h/g)	\$/g de materia orgánica removida
STV	0.01213 ± 0.00359	0.01747 ± 0.00518
DBO	0.01143 ± 0.00141	0.01647 ± 0.00204
DQO	0.01425 ± 0.00394	0.02053 ± 0.00568

La tabla 29 proporciona una perspectiva de la eficiencia y viabilidad económica del proceso de ozonización, permitiendo comprender mejor la relación entre el consumo energético y la efectividad del tratamiento aplicado. Sin embargo, no resulta adecuado establecer una comparación directa entre el costo de eliminar un gramo de DQO y el costo asociado a una planta de tratamiento de aguas residuales municipales. Esta disparidad se debe a la influencia de múltiples factores que pueden alterar significativamente las estimaciones de costos. Entre estos factores se incluyen la tecnología utilizada, la eficiencia del proceso, y los costos locales de operación y mantenimiento asociados a la planta. Por lo tanto, cualquier análisis de costos debe considerar estas variables para obtener una evaluación precisa y contextualizada.

5. Conclusiones

- Esta investigación demuestra que la implementación de un sistema de tratamiento para aguas residuales municipales, que combina filtración y ozonización, tiene un impacto positivo en la calidad del agua al reducir la concentración de materia orgánica e incrementar los niveles de oxígeno disuelto permitiendo coadyuvar en la biodegradación de los contaminantes orgánicos.
- Los resultados indicaron que el sistema de tratamiento combinado filtración-ozonización logró una remoción de los STV del 30.09 %, de la DQO del 18.15 % y DBO del 30.24 % además de un incremento en la concentración de oxígeno disuelto pasando de 0.34 mg/L a 3.61 mg/L en un tiempo de tratamiento de 5 minutos.

5.1. Recomendaciones

- Es crucial realizar un seguimiento continuo del ozono ambiental en el reactor de ozonización ya que se detectó que no toda la cantidad de ozono suministrada reacciona durante el tiempo de tratamiento. El monitoreo es esencial para maximizar sus ventajas como oxidante, minimizando los riesgos potenciales.
- Explorar el uso de otros materiales en el proceso de filtración. Esta exploración podría ofrecer avances significativos en la eficiencia y efectividad de la etapa de filtración en comparación con los sistemas de filtración empleados en este trabajo.
- Experimentar con diferentes tiempos de residencia dentro del reactor de ozonización. Este enfoque permitirá determinar las condiciones óptimas para maximizar la remoción de la materia orgánica y mejorar la eficacia del proceso. Además, estos datos podrían contribuir a la optimización del diseño de los reactores.

6. Bibliografía

- Aguilar Ibarra, A. (2010). *Calidad del agua: un enfoque multidisciplinario* (primera). Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Instituto de Investigaciones Económicas.
- Alvares, A. B. C., Diaper, C., & Parsons, S. A. (2001). Partial oxidation by ozone to remove recalcitrance from wastewaters - a review. *Environmental Technology (United Kingdom)*, 22(4), 409–427. <https://doi.org/10.1080/09593332208618273>
- Ameta, S. C. (2018). Introduction. En *Advanced Oxidation Processes for Wastewater Treatment: Emerging Green Chemical Technology* (pp. 1–12). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-810499-6.00001-2>
- CFE. (2024, julio 28). *Comisión Federal de Electricidad*. <https://app.cfe.mx/Aplicaciones/CCFE/Tarifas/TarifasCREIndustria/Tarifas/GranDemandaMTO.aspx>
- CONAGUA. (2015a). Diseño de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Municipales: Procesos Avanzados con Fines de Reúso. En *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento (MAPAS)* (Vol. 35). Comisión Nacional del Agua (CONAGUA).
- CONAGUA. (2015b). Introducción al Tratamiento de Aguas Residuales Municipales. En *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento* (Vol. 25). Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). www.conagua.gob.mx
- CONAGUA. (2018). *Estadísticas del agua en México*. www.gob.mx/conagua

- Crittenden, J. C., Rhodes Trussell, R., Hand, D. W., Howe, K. J., & Tchobanoglous, G. (2012). Granular Filtration. En John Wiley y Sons (Ed.), *MWH's Water Treatment: Principles and Desing* (Third Edition, pp. 727–818).
<https://doi.org/https://doi.org/10.1002/9781118131473.ch11>
- Garrido-Cardenas, J. A., Esteban-García, B., Agüera, A., Sánchez-Pérez, J. A., & Manzano-Agugliaro, F. (2020). Wastewater treatment by advanced oxidation process and their worldwide research trends. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(1). <https://doi.org/10.3390/ijerph17010170>
- Hansen, K. M. S., Spiliotopoulou, A., Chhetri, R. K., Escolà Casas, M., Bester, K., & Andersen, H. R. (2016). Ozonation for source treatment of pharmaceuticals in hospital wastewater - Ozone lifetime and required ozone dose. *Chemical Engineering Journal*, 290, 507–514.
<https://doi.org/10.1016/j.cej.2016.01.027>
- Irani, R., Khoshfetrat, A. B., & Forouzesh, M. (2021). Real municipal wastewater treatment using simultaneous pre and post-ozonation combined biological attached growth reactor: Energy consumption assessment. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(1).
<https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104595>
- Kirby, C. S., Dennis, A., & Kahler, A. (2009). Aeration to degas CO₂, increase pH, and increase iron oxidation rates for efficient treatment of net alkaline mine drainage. *Applied Geochemistry*, 24(7), 1175–1184. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2009.02.028>
- Ledakowicz, S., Żyła, R., Paździor, K., Wrębiak, J., & Sójka-Ledakowicz, J. (2017). Integration of Ozonation and Biological Treatment of Industrial Wastewater From Dyehouse. *Ozone: Science and Engineering*, 39(5), 357–365. <https://doi.org/10.1080/01919512.2017.1321980>

- Mainardis, M., Buttazzoni, M., De Bortoli, N., Mion, M., & Goi, D. (2020). Evaluation of ozonation applicability to pulp and paper streams for a sustainable wastewater treatment. *Journal of Cleaner Production*, 258. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120781>
- Malik, S. N., Ghosh, P. C., Vaidya, A. N., & Mudliar, S. N. (2019). Ozone pre-treatment of molasses-based biometanated distillery wastewater for enhanced bio-composting. *Journal of Environmental Management*, 246, 42–50. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.05.087>
- Martínez, S. B., Pérez-Parra, J., & Suay, R. (2011). Use of Ozone in Wastewater Treatment to Produce Water Suitable for Irrigation. *Water Resources Management*, 25(9), 2109–2124. <https://doi.org/10.1007/s11269-011-9798-x>
- Metcalf y Eddy. (2014). *Wastewater Engineering Treatment and Resource Recovery* (G. Tchobanoglous, D. H. Stensel, R. Tsuchihashi, & F. Burton, Eds.; 5 th). McGraw-Hill.
- NMX-AA-003-1980. (s/f). *Aguas residuales. -Muestreo*.
- NMX-AA-007-SCFI-2013. (s/f). *ANÁLISIS DE AGUA-MEDICIÓN DE LA TEMPERATURA EN AGUAS NATURALES, RESIDUALES Y RESIDUALES TRATADAS*.
- NMX-AA-008-SCFI-2016. (s/f). *ANÁLISIS DE AGUA.-MEDICIÓN DEL pH EN AGUAS NATURALES, RESIDUALES Y RESIDUALES TRATADAS*.
- NMX-AA-012-SCFI-2001. (s/f). *ANÁLISIS DE AGUA-DETERMINACIÓN DE OXÍGENO DISUELTO EN AGUAS NATURALES, RESIDUALES Y RESIDUALES TRATADAS-MÉTODO DE PRUEBA*.

NMX-AA-028-SCFI-2001. (s/f). *ANÁLISIS DE AGUA-DETERMINACIÓN DE LA DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO EN AGUAS NATURALES, RESIDUALES (DBO5) Y RESIDUALES TRATADAS.*

NMX-AA-034-SCFI-2015. (s/f). *ANÁLISIS DE AGUA - MEDICIÓN DE SÓLIDOS Y SALES DISUELTAS EN AGUAS NATURALES, RESIDUALES Y RESIDUALES TRATADAS.*

NMX-AA-093-SCFI-2000. (s/f). *ANÁLISIS DE AGUA-DETERMINACIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD ELECTROLÍTICA-MÉTODO DE PRUEBA.*

Rekhate, C. V., & Srivastava, J. K. (2020). Recent advances in ozone-based advanced oxidation processes for treatment of wastewater- A review. En *Chemical Engineering Journal Advances* (Vol. 3). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.100031>

SEMARNAT. (2019). *Informe de la Situación del Medio Ambiente en México (2018a ed.)*. SEMARNAT.

SEMARNAT. (2021). *NOM-001-SEMARNAT-2021, Que establece los límites permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores propiedad de la nación.*

Somensi, C. A., Simionatto, E. L., Bertoli, S. L., Wisniewski, A., & Radetski, C. M. (2010). Use of ozone in a pilot-scale plant for textile wastewater pre-treatment: Physico-chemical efficiency, degradation by-products identification and environmental toxicity of treated wastewater. *Journal of Hazardous Materials*, 175(1–3), 235–240. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.09.154>

- Stalter, D., Magdeburg, A., Weil, M., Knacker, T., & Oehlmann, J. (2010). Toxication or detoxication? In vivo toxicity assessment of ozonation as advanced wastewater treatment with the rainbow trout. *Water Research*, 44(2), 439–448.
<https://doi.org/10.1016/j.watres.2009.07.025>
- Tian, S., Wang, Z., & Shang, H. (2011). Study on the self-purification of Juma River. *Procedia Environmental Sciences*, 11(PART C), 1328–1333.
<https://doi.org/10.1016/j.proenv.2011.12.199>
- Valdivia Soto, C. A. (1998). *Filtración combinada en lechos de tezontle para el tratamiento de aguas residuales* [Tesis de Maestría, Universidad Nacional Autónoma de México].
<https://repositorio.unam.mx/contenidos/filtracion-combinada-en-lechos-de-tezontle-para-el-tratamiento-de-aguas-residuales-85633>
- von Sonntag, C., & von Gunten, U. (2012). *Chemistry of ozone in water and wastewater treatment : from basic principles to applications*. IWA Publishing.
- Weber Jr, W. J. (2003). *Control de la calidad del agua: Procesos fisicoquímicos*. Reverté.

Anexo A. Resultados

Este apartado muestra el monitoreo del pH, conductividad, oxígeno disuelto y ozono ambiental en el reactor de ozonización de las 8 pruebas del diseño de experimentos.

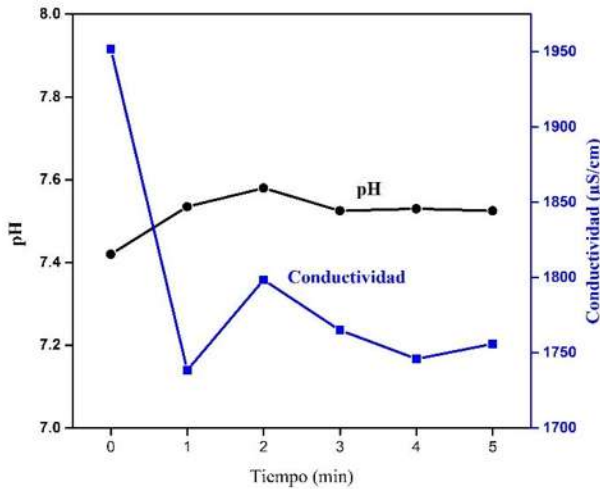


Figura A. 1. Monitoreo del pH y la conductividad en el reactor de ozonización (Prueba 1)

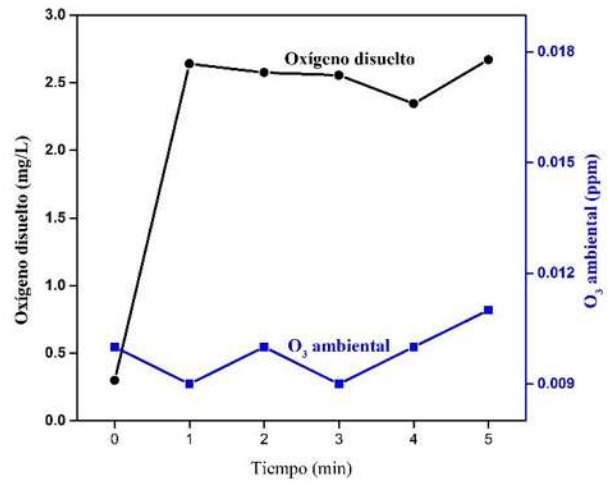


Figura A. 2. Monitoreo del oxígeno disuelto y el ozono ambiental en el reactor de ozonización (Prueba 1)

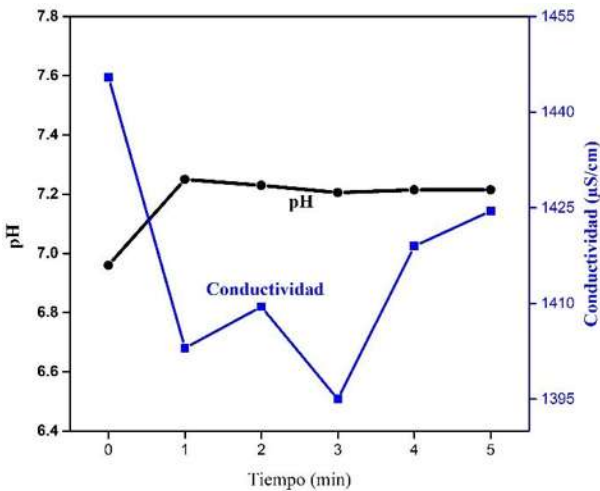


Figura A. 3. Monitoreo del pH y la conductividad en el reactor de ozonización (Prueba 2)

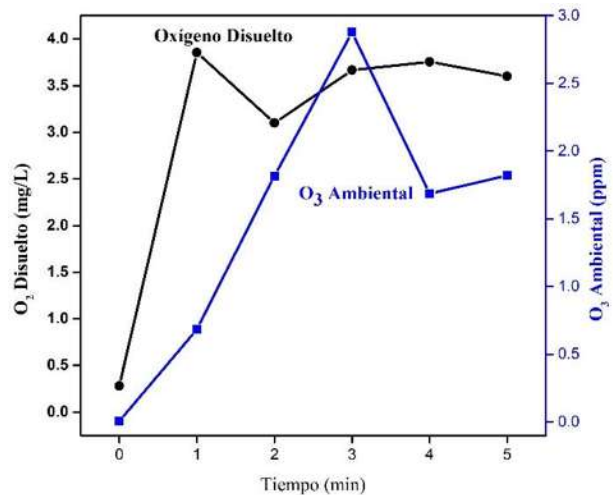


Figura A. 4. Monitoreo del oxígeno disuelto y el ozono ambiental en el reactor de ozonización (Prueba 2)

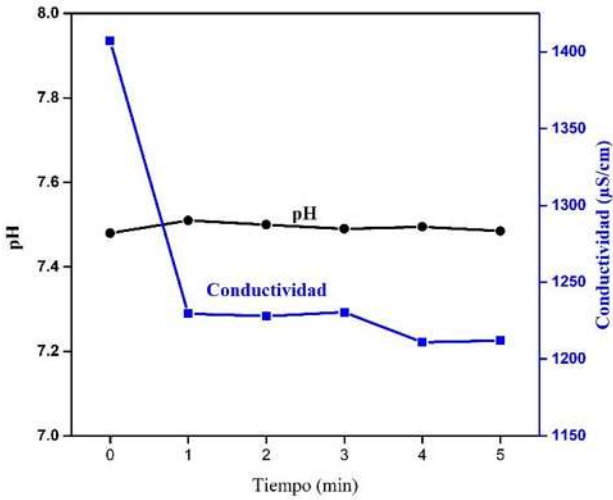


Figura A. 5. Monitoreo del pH y la conductividad en el reactor de ozonización (Prueba 3)

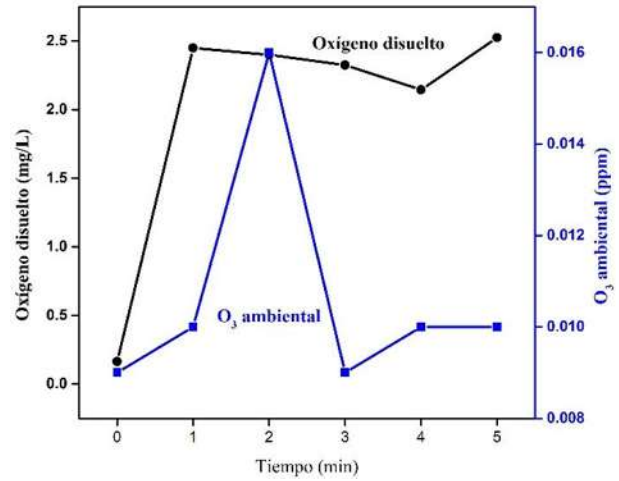


Figura A. 6. Monitoreo del oxígeno disuelto y el ozono ambiental en el reactor de ozonización (Prueba 3)

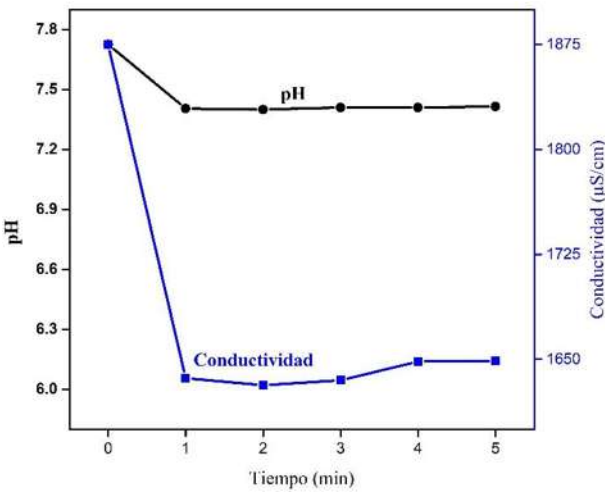


Figura A. 7. Monitoreo del pH y la conductividad en el reactor de ozonización (Prueba 4)

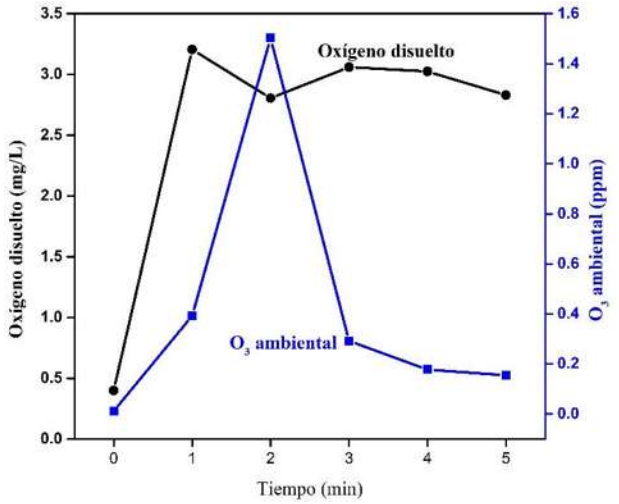


Figura A. 8. Monitoreo del oxígeno disuelto y el ozono ambiental en el reactor de ozonización (Prueba 4)

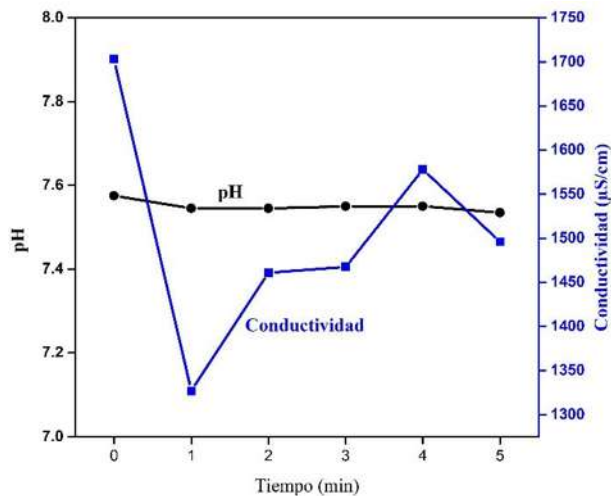


Figura A. 9. Monitoreo del pH y la conductividad en el reactor de ozonización (Prueba 5)

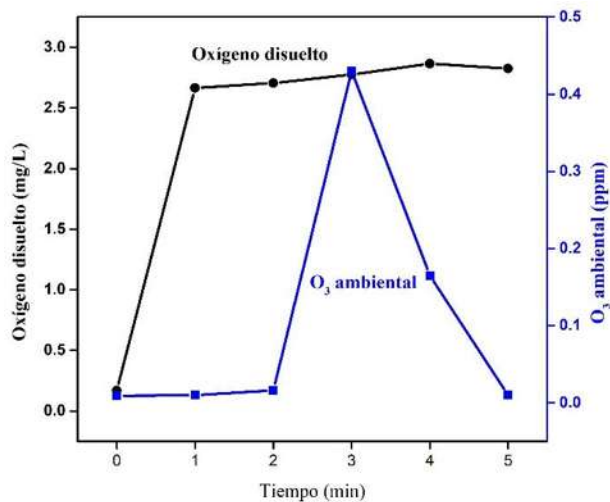


Figura A. 10. Monitoreo del oxígeno disuelto y el ozono ambiental en el reactor de ozonización (Prueba 5)

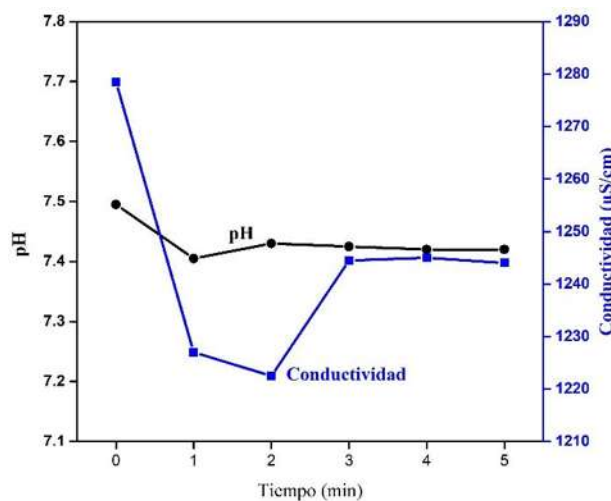


Figura A. 11. Monitoreo del pH y la conductividad en el reactor de ozonización (Prueba 6)

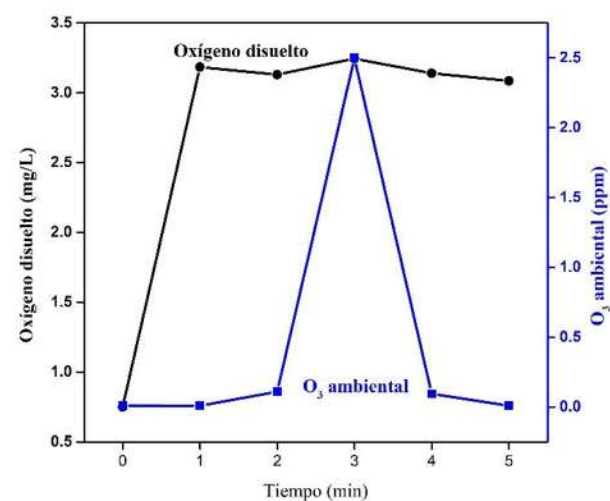


Figura A. 12. Monitoreo del oxígeno disuelto y el ozono ambiental en el reactor de ozonización (Prueba 6)

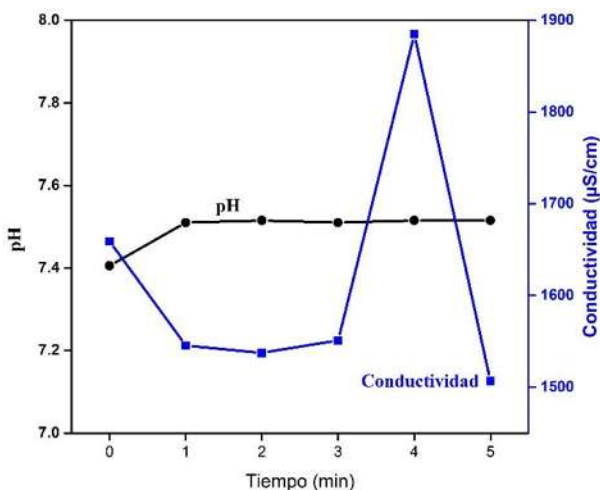


Figura A. 13. Monitoreo del pH y la conductividad en el reactor de ozonización (Prueba 7)

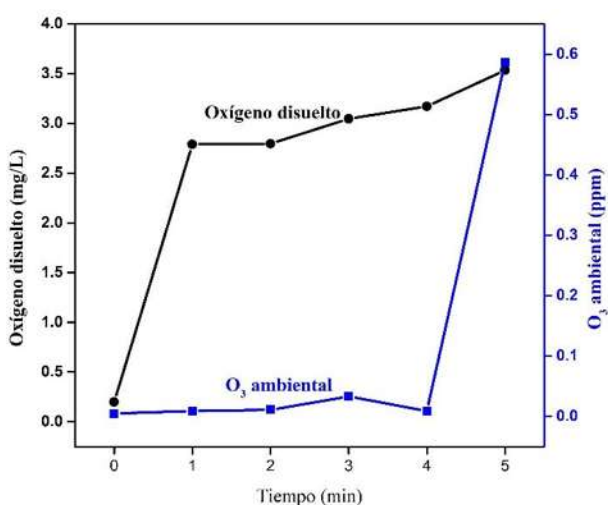


Figura A. 14. Monitoreo del oxígeno disuelto y el ozono ambiental en el reactor de ozonización (Prueba 7)

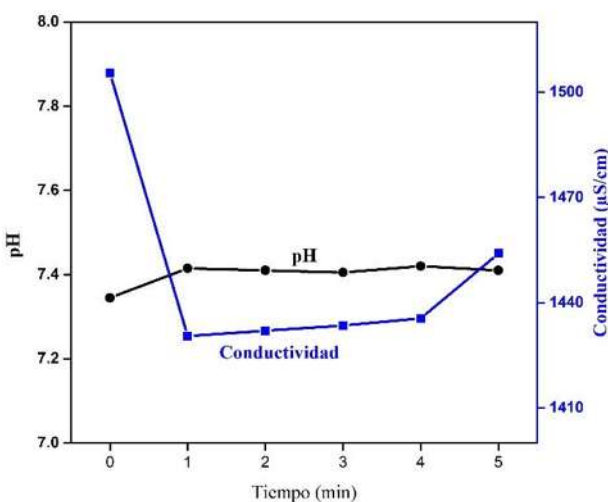


Figura A. 15. Monitoreo del pH y la conductividad en el reactor de ozonización (Prueba 8)

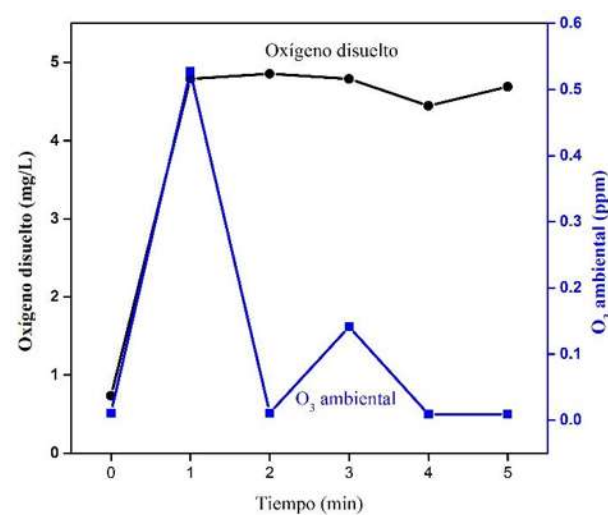


Figura A. 16. Monitoreo del oxígeno disuelto y el ozono ambiental en el reactor de ozonización (Prueba 8)

Anexo B. Resultados

Optimización estadística

La Figura B.1 muestra la gráfica de efectos principales para la relación señal a ruido y la Figura B.2 muestra el análisis de varianza de relaciones señal a ruido.

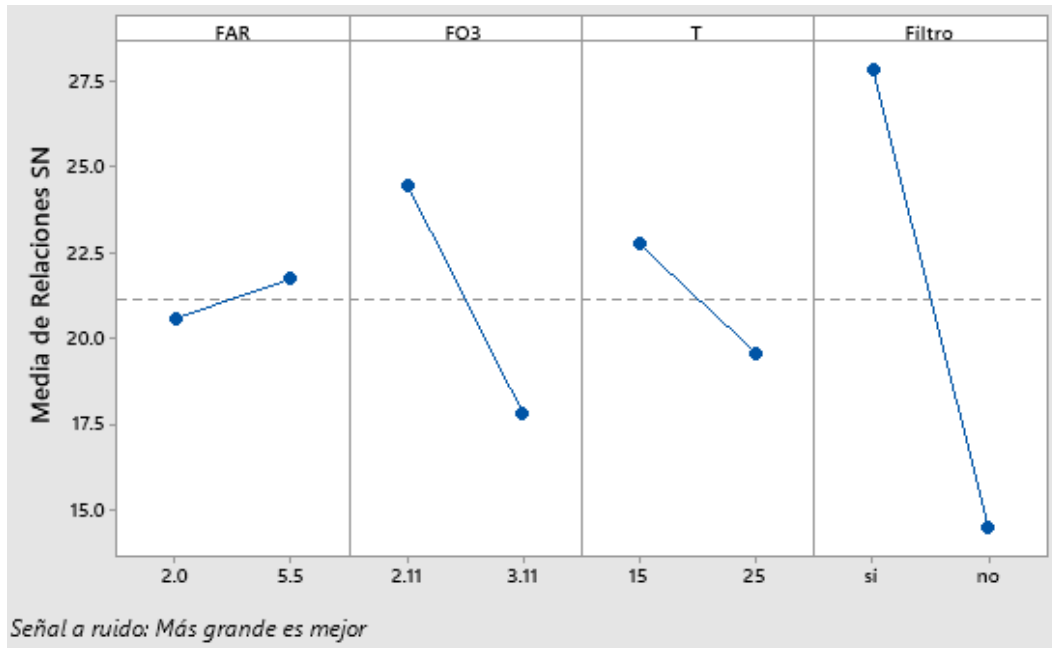


Figura B. 1. Gráfica de efectos principales para relación señal a ruido

Fuente	GL	SC	Sec. SC	Ajust. SC	Ajust. MC	F	P
FAR	1	2.679		2.679	2.679	0.07	0.811
FO3	1	89.039		89.039	89.039	2.27	0.229
T	1	20.139		20.139	20.139	0.51	0.526
Filtro	1	357.204		357.204	357.204	9.09	0.057
Error residual	3	117.899		117.899	39.300		
Total	7	586.961					

Figura B. 2. Análisis de varianza de relaciones señal a ruido

Al igual que lo visto en la gráfica de efectos principales para medias, en la gráfica de efectos principales para relación señal a ruido y complementado con el ANOVA de relación señal a ruido el factor que más afecta la variabilidad del porcentaje de remoción de la materia orgánica es el uso de la filtración.

Anexo C. Resultados

Asimismo, se llevó a cabo un análisis comparativo entre el tratamiento con ozono y con aireación exclusiva, con el fin de evaluar la eficacia de la ozonización en la eliminación de materia orgánica. Este enfoque permitió determinar si la incorporación de ozono mejora significativamente el tratamiento del agua residual municipal en comparación con la aireación por sí sola. También, destacando que la filtración emergió como el factor con mayor influencia en la eficiencia del tratamiento, se procedió a una evaluación de la filtración, es decir, se realizó una prueba utilizando únicamente los filtros para medir su influencia directa en los resultados del tratamiento. La prueba de aireación como la de filtración, se llevaron a cabo sin la realización de duplicados.

Factores en su nivel de mayor importancia: aireación

En la tabla C.1 se presentan las condiciones de operación para el sistema de tratamiento con aire y en la tabla C.2 se presenta la caracterización del agua residual municipal.

Tabla C. 1. *Factores en su Nivel de Mayor Importancia: Aireación.*

Factor	Valor
Temperatura	15 °C
Filtración	Si
Caudal de agua residual	2 L/min
Flujo de aire	2.11 L/min

Tabla C. 2. *Caracterización del Agua Residual Municipal.*

Parámetro	Valor
STV (mg/L)	210
pH	6.64
Conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	1555
Oxígeno disuelto (mg/L)	0.34
DQO (mg/L)	269
DBO (mg/L)	173
Toxicidad (% de inhibición)	29.13

La Figura C.1 muestra el comportamiento de las líneas de operación de los STV en el Efluente Filtro de Tezontle (EFT), Efluente del Reactor (ER) y Efluente Filtro de Arena (EFA) con su respectivo porcentaje de remoción, además, en las Figura C.2 se muestran los parámetros de seguimiento en el reactor de aireación (pH, conductividad y oxígeno disuelto).

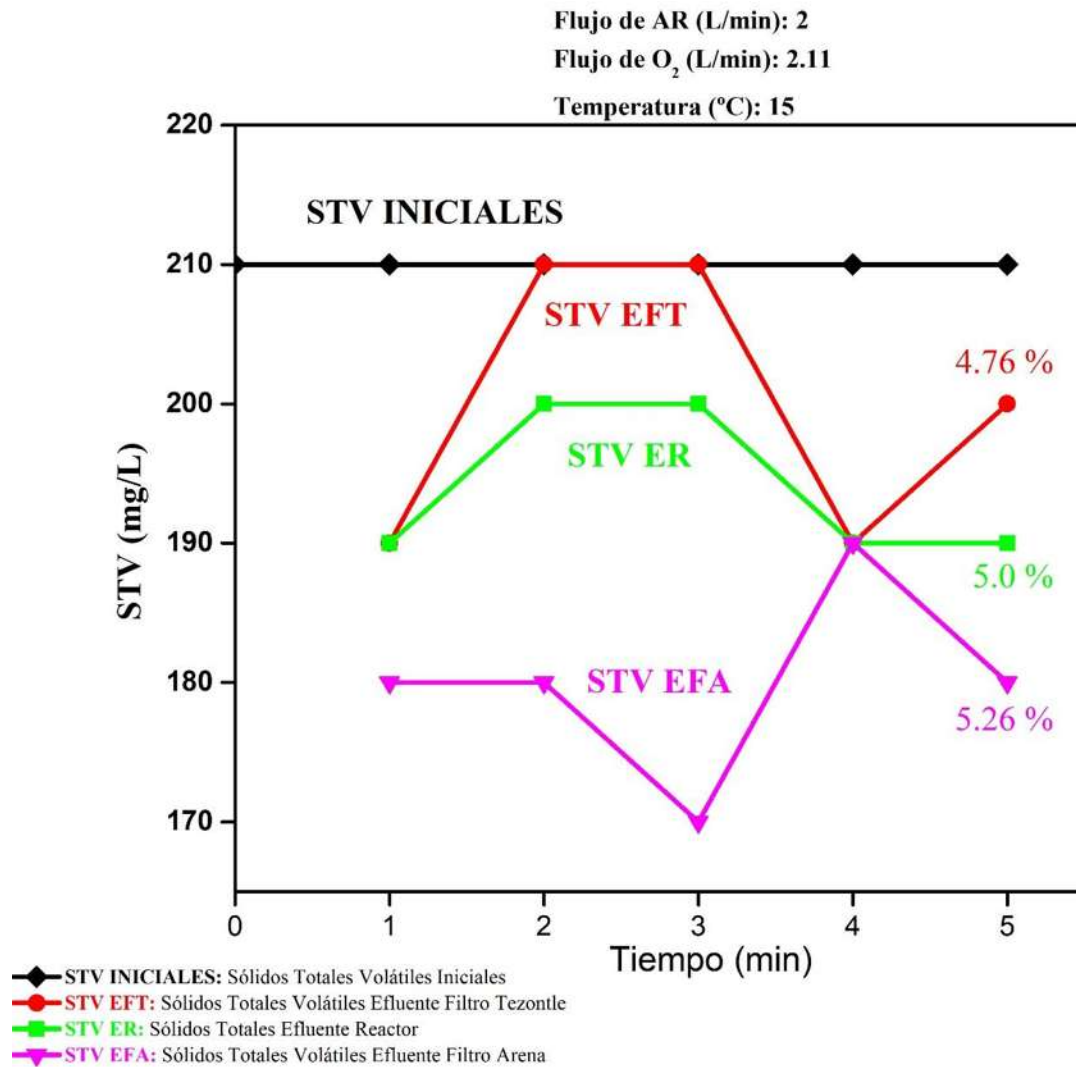


Figura C. 1. Gráfica de operación de los STV (factores en su nivel de mayor importancia: aireación).

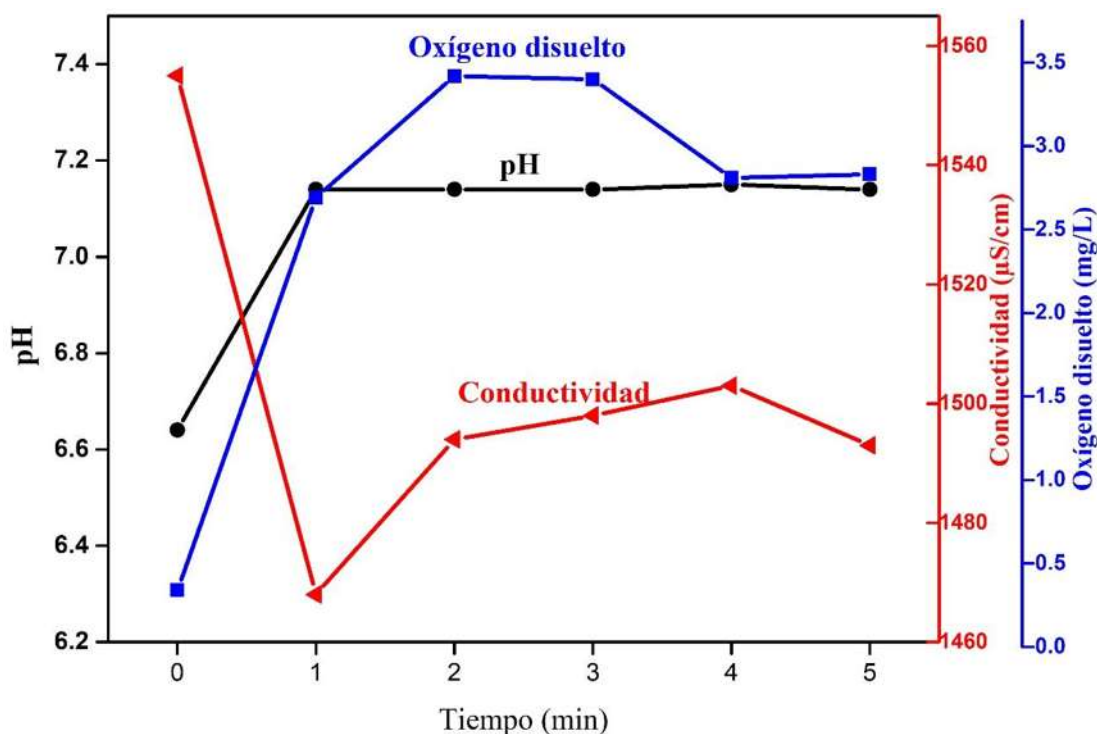


Figura C. 2. Monitoreo del pH, la conductividad y el oxígeno disuelto en el reactor de aireación.

En la Figura C.1 se muestran las 4 fases de operación para la prueba de aireación. La fase inicial, denominada STV INICIALES representa la concentración de los STV al comienzo del tratamiento. Durante la primera etapa, identificada como STV EFT se observa como disminuyen los STV en el efluente del filtro de tezontle, lo que indica una disminución en la concentración de la materia orgánica de 4.76 %. La siguiente etapa, STV ER corresponde al efluente del reactor de aireación donde se registra una disminución en la carga orgánica con una remoción de 5.00 %. La fase final, STV EFA muestra el comportamiento de los STV en efluente de la segunda filtración, indicando una tendencia a la baja de los STV con una remoción de 5.26 %. En conjunto las etapas del tratamiento resultan en una remoción global de STV de 14.29 %. Los resultados de esta prueba revelan que, si bien la aireación-filtración remueven una cantidad de materia orgánica, el tratamiento combinado ozono-filtración es más eficaz, alcanzando una remoción de materia

orgánica del orden del 30.09 %. Esta diferencia notable indica que el ozono es un agente más potente y eficiente para la eliminación de la materia orgánica presente en las aguas residuales municipales.

En la Figura C.2 se observa el monitoreo de los parámetros en el reactor donde el pH presentó un ligero aumento de 6.6 a 7.1. Por otro lado, la conductividad experimentó una reducción, pasando de 1555 $\mu\text{S}/\text{cm}$ a 1493 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Respecto al monitoreo del oxígeno disuelto y como era de esperarse debido a la inyección de aire en el sistema se observa un incremento pasando de 0.34 mg/L a 2.83 mg/L.

En la Figura C.3 se muestra el monitoreo de los parámetros pH, conductividad y oxígeno disuelto al final del tratamiento.

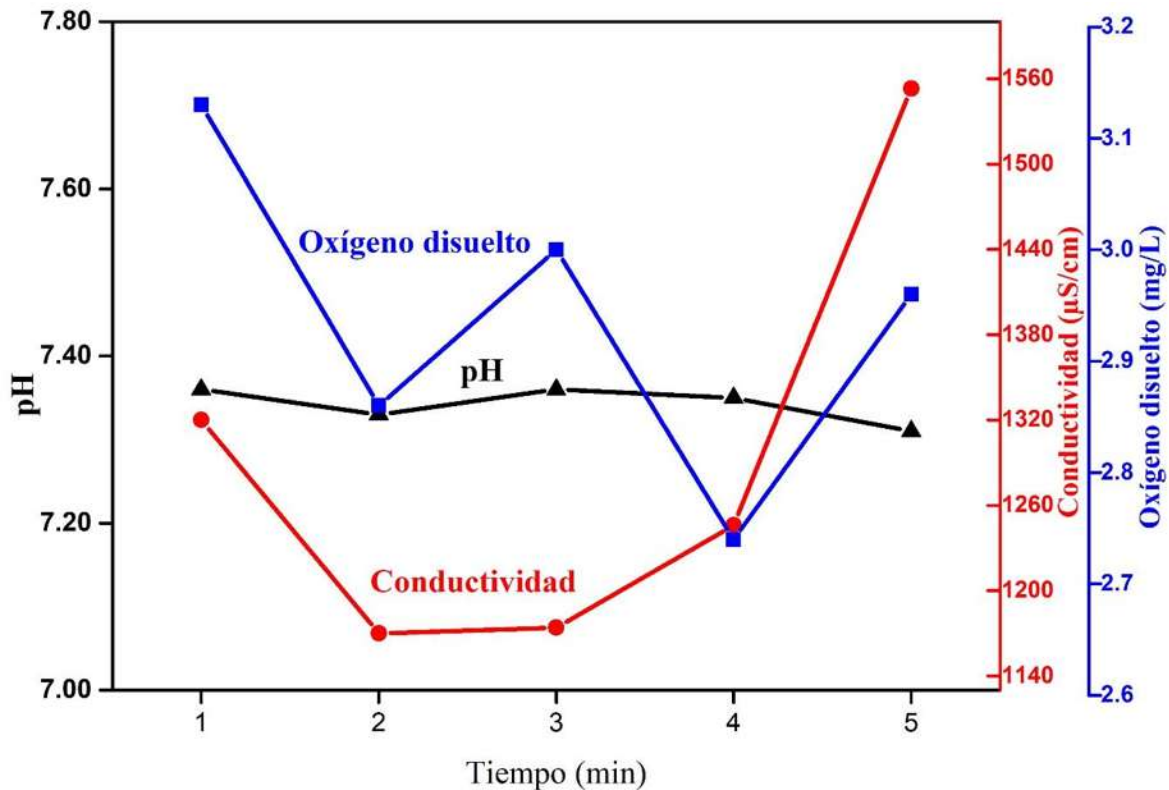


Figura C. 3. Monitoreo de los parámetros al final del tratamiento con Aire

Al concluir el tratamiento y comparando los valores iniciales mostrados en la tabla C.2 y los valores finales que se observan en la Figura C.3, se observa un incremento moderado en el nivel de pH, de 6.64 a 7.31, este cambio se puede explicar por el incremento en la concentración de oxígeno disuelto, el cual provoca la expulsión de CO_2 del agua. El CO_2 reacciona con el agua formando ácido carbónico (H_2CO_3), que al descomponerse libera iones de hidrógeno (H^+), resultando en la disminución del pH. Al airear el agua, se facilita la liberación del CO_2 , lo que disminuye la cantidad de ácido carbónico y, como consecuencia, se produce un incremento en el nivel de pH (Kirby *et al.* 2009). Paralelamente, la conductividad se mantuvo estable, sin variaciones significativas pasando de 1555 $\mu\text{S/cm}$ a 1553 $\mu\text{S/cm}$. Además, se observó un notable aumento en la concentración de oxígeno disuelto, de 0.34 mg/L a 2.96 mg/L.

En la tabla C.3 se presentan las concentraciones iniciales y finales de la materia orgánica medida como STV, DQO y DBO con sus respectivos porcentajes de remoción.

Tabla C. 3. *Concentración de la Materia Orgánica en el Agua Residual Municipal.*

Parámetro	Valor Inicial (mg/L)	Valor Final (mg/L)	% Remoción
STV	210	180	14.29
DBO	173	168	2.89
DQO	269	233	13.38

Al analizar la tabla C.3 se puede apreciar que la aireación por sí sola logra una cierta eliminación de materia orgánica. No obstante, esta remoción es inferior comparada con los resultados obtenidos mediante el tratamiento con ozono. Esto indica que, aunque la aireación contribuye al proceso de tratamiento de las aguas residuales municipales, el ozono es significativamente más eficaz en la remoción de la materia orgánica. Por lo tanto, el uso de ozono representa una alternativa más eficaz para la depuración en términos de eficiencia en la remoción de materia orgánica.

Adicionalmente con los datos de la tabla C.3 se obtuvo la estimación de biodegradabilidad del agua residual municipal mediante la relación DBO_5/DQO . En la tabla C.4 se muestra la relación de biodegradabilidad antes y después del tratamiento con aire.

Tabla C. 4. *Relación de biodegradabilidad del agua residual municipal*

Muestra	Relación DBO ₅ /DQO
Sin Tratamiento	0.64
Después del Tratamiento	0.72

De la tabla C.4 se observa que el agua residual municipal es biodegradable ya que la relación DBO₅/DQO es mayor a 0.6 antes y después del tratamiento. Así mismo, se detecta un aumento en la biodegradabilidad al final del tratamiento, este incremento se puede explicar ya que la aireación introduce oxígeno disuelto en el agua lo cual es esencial para la actividad metabólica de las bacterias aerobias que participan en la degradación de la materia orgánica.

En la tabla C.5 se muestran los valores iniciales y finales de toxicidad y de oxígeno disuelto en el agua residual municipal.

Tabla C. 5. *Valores de toxicidad y oxígeno disuelto pre y post tratamiento*

Parámetro	Valor Inicial	Valor Final
Toxicidad (% de Inhibición)	29.13	34.71
Oxígeno Disuelto (mg/L)	0.34	2.96

De la tabla C.5 se aprecia que hay un ligero incremento en la toxicidad esto se puede atribuir al incremento en la concentración de oxígeno disuelto que puede llevar a la oxidación de ciertos compuestos orgánicos que pueden generar subproductos que podrían contribuir a la toxicidad observada.

Factores en su nivel de mayor importancia: filtración

En la tabla C.6 se presentan las condiciones de operación para el uso solo de filtración y en la tabla C.7 se presenta la caracterización del agua residual municipal.

Tabla C. 6. *Factores en su nivel de mayor importancia: filtración.*

Factor	Valor
Temperatura	15 °C
Filtración	Si
Caudal de agua residual	2 L/min

Tabla C. 7. *Caracterización del agua residual municipal.*

Parámetro	Valor
STV (mg/L)	160
pH	7.39
Conductividad (µS/cm)	1227
Oxígeno disuelto (mg/L)	0.72
DQO (mg/L)	153
DBO (mg/L)	83.7
Toxicidad (% de inhibición)	31.14

La Figura C.4 muestra el comportamiento de las líneas de operación de los STV en el Efluente Filtro de Tezontle (EFT) y Efluente Filtro de Arena (EFA) con su respectivo porcentaje de remoción.

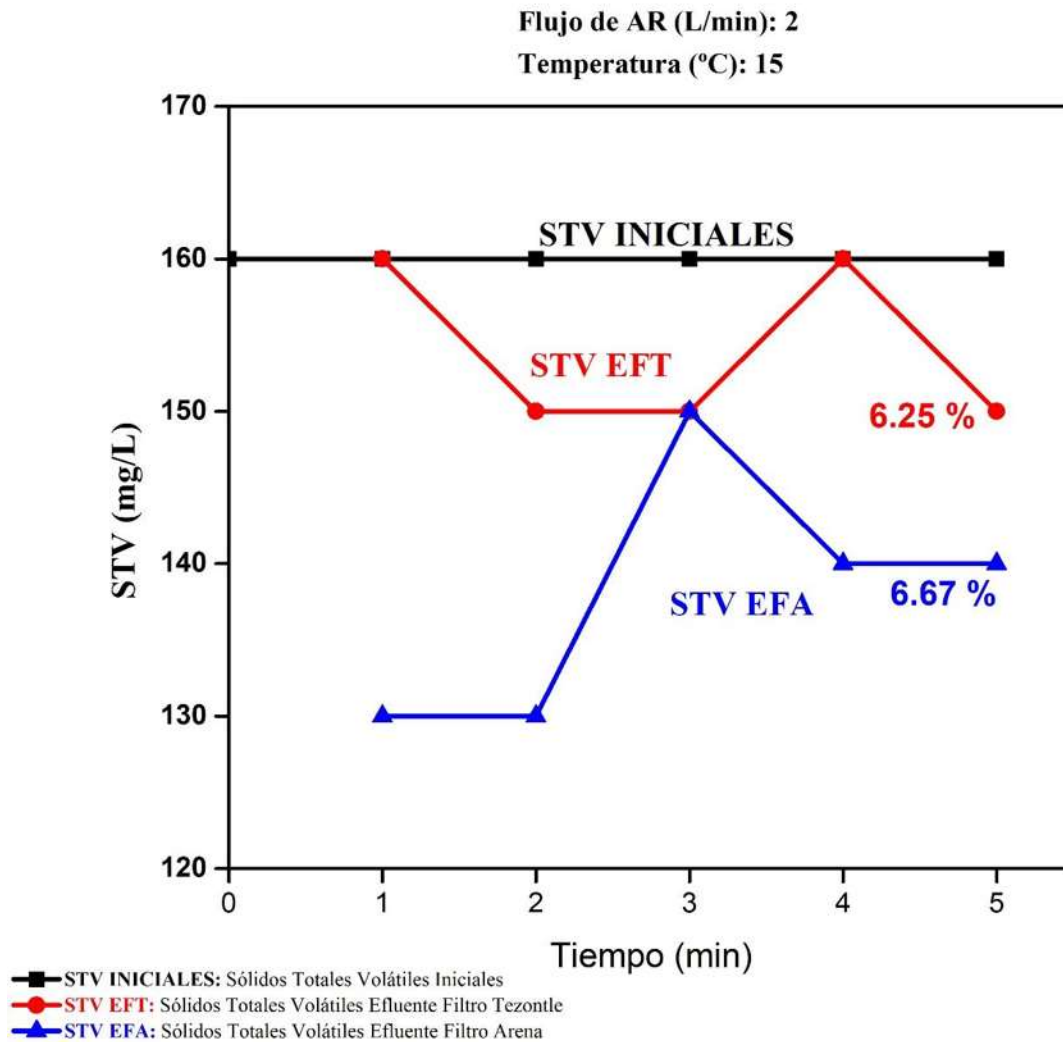


Figura C. 4. Gráfica de operación de los STV filtración.

En la Figura C.4 se muestran las 4 fases de operación para la prueba de filtración. La fase inicial, denominada STV INICIALES representa la concentración de los STV al comienzo del tratamiento. Durante la primera filtración, identificada como STV EFT se observan ligeras oscilaciones en los STV, alcanzando una disminución en la concentración de la materia orgánica de 6.25 %. La segunda filtración, denominada STV EFA muestra una tendencia a la baja de los

STV con una remoción de 6.67 %. En conjunto las etapas de filtración resultan en una remoción global de STV de 12.5 %. Estos datos sugieren que, aunque el uso únicamente de filtración disminuye la concentración de la materia orgánica medida como STV, el tratamiento combinado ozono-filtración resulta ser significativamente más eficiente para la remoción de la materia orgánica presente en las aguas residuales municipales.

En la Figura C.5 se muestra el monitoreo de los parámetros pH, conductividad y oxígeno disuelto al final del tratamiento.

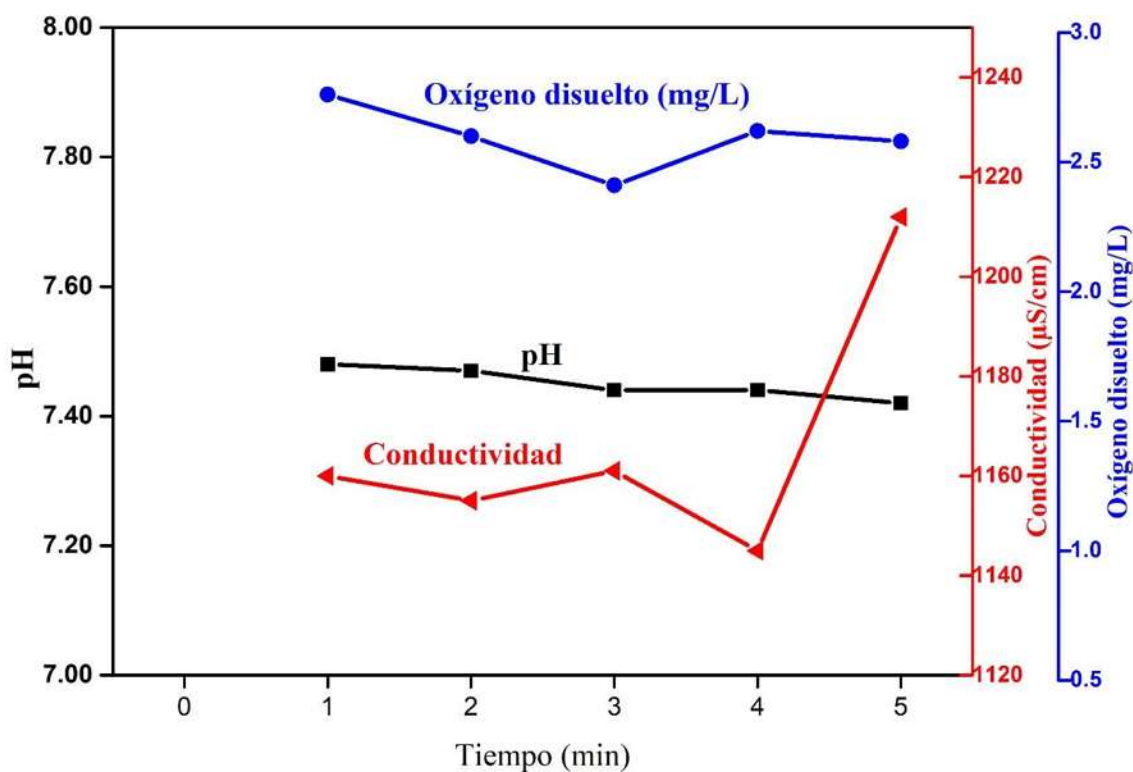


Figura C. 5. Monitoreo de los parámetros al final del tratamiento de filtración

Al concluir el tratamiento y comparando los valores iniciales mostrados en la tabla C.7 y los valores finales que se observan en la Figura C.5 indica que el pH no tuvo cambios significativos pasando de 7.39 a 7.42. La conductividad presento una ligera disminución de 1227 $\mu\text{S/cm}$ a 1212

$\mu\text{S/cm}$. Además, se observó un aumento en la concentración de oxígeno disuelto, de 0.72 mg/L a 2.58 mg/L este aumento puede atribuirse a la oxigenación del agua residual provocada por su caída por gravedad a través de los filtros.

En la tabla C.8 se presentan las concentraciones iniciales y finales de la materia orgánica medida como STV, DQO y DBO con sus respectivos porcentajes de remoción con el uso de filtración.

Tabla C. 8. *Concentración de la materia orgánica en el agua residual municipal*

Parámetro	Valor Inicial (mg/L)	Valor Final (mg/L)	% Remoción
STV	160	140	12.5
DBO	83.7	81.6	2.51
DQO	153	133	13.07

Al analizar la tabla C.8 se puede apreciar que el uso de la filtración por sí sola logra una cierta eliminación de materia orgánica. No obstante, esta remoción es inferior comparada con los resultados obtenidos mediante el tratamiento con ozono. Esto indica que, aunque la filtración contribuye al proceso de tratamiento de las aguas residuales municipales, el tratamiento combinado de filtración-ozonización es significativamente más eficaz en la remoción de la materia orgánica. Por lo tanto, el uso de ozono representa una alternativa más eficaz para la depuración en términos de eficiencia en la remoción de materia orgánica.

Adicionalmente con los datos de la tabla C.8 se obtuvo la estimación de biodegradabilidad del agua residual municipal mediante la relación DBO_5/DQO . En la tabla C.9 se muestra la relación de biodegradabilidad antes y después de la filtración.

Tabla C. 9. *Relación de biodegradabilidad del agua residual municipal*

Muestra	Relación DBO ₅ /DQO
Sin Tratamiento	0.55
Después de la Filtración	0.61

Como se observa en la tabla C.9 hubo un incremento en la relación de biodegradabilidad del agua residual municipal después de la filtración esto se puede atribuir a la oxigenación que promueve la biodegradación de contaminantes orgánicos. No obstante, es importante señalar que, aunque la filtración mejora la biodegradabilidad del agua residual municipal, la eficacia en la remoción de la materia orgánica aún es limitada. Por lo tanto, se sugiere la complementación con el ozono para potenciar la remoción de la materia orgánica y optimizar el tratamiento del agua residual municipal.

En la tabla C.10 se muestran los valores iniciales y finales de toxicidad y de oxígeno disuelto en el agua residual municipal.

Tabla C. 10. *Valores de toxicidad y oxígeno disuelto pre y post filtración.*

Parámetro	Valor Inicial	Valor Final
Toxicidad (% de Inhibición)	31.14	51.21
Oxígeno Disuelto (mg/L)	0.72	2.58

De la tabla C.10 se aprecia que un incremento en la toxicidad esto se puede atribuir al incremento en la concentración de oxígeno disuelto que puede llevar a la oxidación de ciertos compuestos orgánicos que pueden generar subproductos que podrían contribuir a la toxicidad observada.

Anexo D. Formato de declaración de originalidad y uso de Inteligencia Artificial

 **iThenticate®**

Identificación de reporte de similitud: oid:3117:375892241

NOMBRE DEL TRABAJO	AUTOR
"Evaluación de un proceso de filtración y oxidación avanzada con ozono para el tratamiento de las	David Piña Valentín

RECuento DE PALABRAS	RECuento DE CARACTERES
16542 Words	93832 Characters
RECuento DE PÁGINAS	TAMAÑO DEL ARCHIVO
103 Pages	3.5MB
FECHA DE ENTREGA	FECHA DEL INFORME
Aug 26, 2024 11:16 AM CST	Aug 26, 2024 11:18 AM CST

● 26% de similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para cada base de datos.

- 25% Base de datos de Internet
- Base de datos de Crossref
- 0% Base de datos de trabajos entregados

- 15% Base de datos de publicaciones
- Base de datos de contenido publicado de Crossref

Resumen

Formato de Declaración de Originalidad y Uso de Inteligencia Artificial

Coordinación General de Estudios de Posgrado
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo



A quien corresponda,

Por este medio, quien abajo firma, bajo protesta de decir verdad, declara lo siguiente:

- Que presenta para revisión de originalidad el manuscrito cuyos detalles se especifican abajo.
- Que todas las fuentes consultadas para la elaboración del manuscrito están debidamente identificadas dentro del cuerpo del texto, e incluidas en la lista de referencias.
- Que, en caso de haber usado un sistema de inteligencia artificial, en cualquier etapa del desarrollo de su trabajo, lo ha especificado en la tabla que se encuentra en este documento.
- Que conoce la normativa de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, en particular los Incisos IX y XII del artículo 85, y los artículos 88 y 101 del Estatuto Universitario de la UMSNH, además del transitorio tercero del Reglamento General para los Estudios de Posgrado de la UMSNH.

Datos del manuscrito que se presenta a revisión		
Programa educativo	Maestría en Ciencias en Ingeniería Ambiental	
Título del trabajo	Evaluación de un proceso de filtración y oxidación avanzada con ozono para el tratamiento de las aguas residuales municipales	
	Nombre	Correo electrónico
Autor/es	David Piña Valentin	1614752@umich.mx
Director	José Apolinar Cortés	jose.apolinar@umich.mx
Codirector		
Coordinador del programa	Hugo Luis Chávez García	mae.cs.ingenieria.ambiental@umich.mx

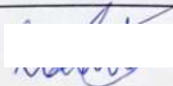
Uso de Inteligencia Artificial		
Rubro	Uso (sí/no)	Descripción
Asistencia en la redacción	No	-----

Formato de Declaración de Originalidad y Uso de Inteligencia Artificial

Coordinación General de Estudios de Posgrado
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo



Uso de Inteligencia Artificial		
Rubro	Uso (sí/no)	Descripción
Traducción al español	No	-----
Traducción a otra lengua	Si	Traducción del resumen a inglés
Revisión y corrección de estilo	No	-----
Análisis de datos	No	-----
Búsqueda y organización de información	No	-----
Formateo de las referencias bibliográficas	No	-----
Generación de contenido multimedia	No	-----
Otro	No	-----

Datos del solicitante	
Nombre y firma	David Piña Valentin 
Lugar y fecha	Morelia, Michoacán a 19 de agosto del 2024