



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

FACULTAD DE QUÍMICA

**EVALUACIÓN DE LA APLICACIÓN DE OZONO EN
HUEVOS DE HELMINTO PRESENTES EN AGUAS
RESIDUALES PRETRATADAS**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO QUÍMICO

P R E S E N T A:

Luis Irandiel Balandrano Uribe



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2022



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

PRESIDENTE: Profesora: LAZCANO ARRIOLA LUZ MARIA
VOCAL: Profesora: GUTIERREZ LARA MARIA RAFAELA
SECRETARIO: Profesor: GARCIA REYNOSO JOSE AGUSTIN
1er SUPLENTE: Profesor: GARCIA GONZALEZ SERGIO ADRIAN
2do. SUPLENTE: Profesor: DURAN MORENO ALFONSO

SITIO DONDE SE DESARROLLO EL TEMA:

FACULTAD DE QUÍMICA, CIRCUITO EXTERIOR S/N, COYOACÁN, CD. UNIVERSITARIA,
04510 CIUDAD DE MÉXICO.

ASESOR DEL TEMA:

Dra. Luz María Lazcano Arriola_____

SUPERVISOR TÉCNICO:

Biol. Nora Verónica Salinas Castillo_____

SUSTENTANTE:

Luis Irandiel Balandrano Uribe_____

INDICE

INDICE DE TABLAS	5
INDICE DE FIGURAS.....	6
1 INTRODUCCIÓN	8
1.1 JUSTIFICACIÓN	9
1.2 OBJETIVO GENERAL	10
1.3 OBJETIVOS PARTICULARES	10
2. MARCO TEORICO	11
2.1 Aguas residuales.....	11
2.2 Parámetros Químicos.....	12
2.2.1 Potencial de hidrogeno	12
2.2.2 Alcalinidad.....	13
2.2.3 Demanda química de oxigeno	14
2.2.4 Efecto de los parámetros fisicoquímicos en la remoción de parásitos.....	15
2.3 Características del ozono.....	15
2.3.1 Ozonización	17
2.3.2 Mecanismos de Reacción del Ozono.....	23
2.3.3 Investigaciones en la aplicación de ozono para eliminar Huevos de Helminto (Estado del arte).....	26
2.4 Huevos de Helminto.....	33
2.4.1 Generalidades de los Huevos de Helminto	33
2.4.2 Características de los Huevos de Helminto	35
2.4.3 Tipos de parásitos más comunes en Aguas residuales	35
2.4.4 Legislación	36
2.5 Área de estudio.....	38
2.5.1 Tren de tratamiento.....	39
3. METODOLOGIA.....	42
3.1 Muestreo	42
3.2 Caracterización del agua pretratada	43
3.2.1 pH	43
3.2.2 Demanda Química de Oxígeno.....	44
3.2.3 Alcalinidad.....	46
3.3 Conteo inicial e identificación de Huevos Helminto	47
3.3.1 Identificación de Huevos de Helminto.....	47

3.3.2	Identificación de Huevos de Helminto.....	48
3.4	Proceso de ozonización.....	49
3.5	Identificación e inactivación de Huevos de Helminto	51
3.5.1	Identificación de Huevos de Helminto.....	51
3.5.2	Técnica de verificación de inactivación de Huevos de Helminto	52
4.	RESULTADOS Y ANALISIS.....	53
4.1	Caracterización del agua residual con un tratamiento previo.....	53
4.2	Propiedades fisicoquímicas.	54
4.2.1	DQO.....	54
4.2.2	Alcalinidad.....	55
4.2.3	Proceso de ozonización.....	58
4.4	Huevos de helminto	60
5.	CONCLUSIONES.....	67
6.	REFERENCIAS	68
7.	ANEXO I. MEMORIA DE CÁLCULO	73
7.1	Curva Patrón para DQO.....	73
7.2	Determinación de DQO.....	74
7.3	Transferencia de ozono.....	75

INDICE DE TABLAS

TABLA 1. PRINCIPALES PARÁMETROS DE CONTAMINACIÓN EN LOS EFLUENTES DE ALGUNAS INDUSTRIAS.	11
TABLA 2. PRINCIPALES ORGANISMOS PATÓGENOS Y PARÁSITOS PRESENTES EN LAS AGUAS RESIDUALES.	36
TABLA 3. NORMAS QUE REGULAN LOS HUEVOS DE HELMINTOS EN VERTIDOS DE AGUAS RESIDUALES Y LODOS.	37
TABLA 4. DATOS PARA LA DETERMINACIÓN DE LA CURVA DE CALIBRACIÓN.....	45
TABLA 5. ECUACIONES DE BALANCE DE MASA DE OZONO EN REACTOR POR LOTE.	50
TABLA 6. LLAVE DE IDENTIFICACIÓN.....	51
TABLA 7. RESULTADOS DE CARACTERIZACIÓN.....	53
TABLA 8. IDENTIFICACIÓN DE HUEVOS DE HELMINTO.....	53
TABLA 9. DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO DESPUÉS DE OZONIZACIÓN.	54
TABLA 10. DATOS DE REMOCIÓN DE DQO.....	55
TABLA 11. ALCALINIDAD DESPUÉS DE OZONIZACIÓN.....	56
TABLA 12. ADSORCIÓN DE OZONO EN 10 MINUTOS.	58
TABLA 13. ADSORCIÓN DE OZONO A LOS 15 MINUTOS.	59
TABLA 14. CONTEO DE HUEVOS DE HELMINTO DESPUÉS DE 10 MINUTOS DE OZONIZACIÓN... ..	63
TABLA 15. CONTEO DE HUEVOS DE HELMINTO DESPUÉS DE 15 MINUTOS DE OZONIZACIÓN... ..	63
TABLA 16. PORCENTAJE DE REMOCIÓN A LOS 10 MINUTOS DE OZONIZACIÓN.....	64
TABLA 17. PORCENTAJE DE REMOCIÓN A LOS 15 MINUTOS DE OZONIZACIÓN.....	65
TABLA 18. MEJORES CONDICIONES DE OZONIZACIÓN.....	66
TABLA 19. DATOS PARA LA OBTENCIÓN DE LA CURVA PATRÓN.	73
TABLA 20. OBTENCIÓN DE LA DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO.	74
TABLA 21. DATOS OBTENCIÓN DE OZONO RESIDUAL.....	75

INDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. PARÁMETROS QUÍMICOS EMPLEADOS PARA CARACTERIZAR UN AGUA RESIDUAL INDUSTRIAL. FUENTE: METCALF & EDDY, 2002.	13
FIGURA 2. GENERACIÓN DE OZONO POR DESCARGA DE CORONA. FUENTE: CONAGUA, 2000..	20
FIGURA 3. CÁMARA DE CONTACTO CON DIFUSOR POROSO DE BURBUJAS FINAS. FUENTE: CONAGUA, 2000.....	21
FIGURA 4. CÁMARA DE CONTACTO CON DIFUSOR DE PLATO POROSO. FUENTE: CONAGUA, 2000.	21
FIGURA 5. CÁMARA DE CONTACTO TIPO KEROG. FUENTE: CONAGUA, 2000.....	22
FIGURA 6. SISTEMA DE CONTACTO Y DIFUSIÓN EN TUBO PROFUNDO EN "U". FUENTE: CONAGUA, 2000.....	22
FIGURA 7. MECANISMOS DE OXIDACIÓN DEL OZONO. FUENTE: CAMPOS, 2014.	24
FIGURA 8. CICLO ADICIÓN DIPOLAR, TENIENDO COMO PRODUCTO OZÓNIDO (I). FUENTE: CAMPOS, 2014.	24
FIGURA 9. INTERACCIÓN DEL OZÓNIDO CON MOLÉCULAS DE AGUA. FUENTE: CAMPOS, 2014.	25
FIGURA 10. REACCIÓN ELECTROFÍLICA ENTRE EL FENOL Y OZONO. FUENTE: CAMPOS, 2014.	26
FIGURA 11. HUEVOS DE HELMINTO EN AGUAS RESIDUALES. FUENTE: LARDÍN & PACHECO (2013).....	34
FIGURA 12. UBICACIÓN PTAR SAN LUIS TLAXIALMETALCO.....	38
FIGURA 13. CANALES DESARENADORES CON SU RESPECTIVO APARATO DE MEDICIÓN DIGITAL DE GASTO.....	39
FIGURA 14. VISTA GENERAL DE UNO DE LOS SEDIMENTADORES CIRCULARES CON QUE CUENTA LA PLANTA DE TRATAMIENTO	40
FIGURA 15. VISTA GENERAL DE UNO DE LOS REACTORES BIOLÓGICOS RECTANGULARES DE LA PLANTA.....	40
FIGURA 16. SEDIMENTADOR SECUNDARIO, SE ALMACENAN LOS LODOS EN UNA TOLVA Y SE RECIRCULAN HACIA LOS REACTORES BIOLÓGICOS.....	41
FIGURA 17. INSTALACIÓN PARA LA DESINFECCIÓN DEL EFLUENTE SECUNDARIO CON HIPOCLORITO POR GOTEO.....	41
FIGURA 18. MUESTREO EN EL REACTOR BIOLÓGICO.	42
FIGURA 19. MEDICIÓN DE PH.....	44
FIGURA 20. A) DIGESTOR HANNA INSTRUMENTS EMPLEADO PARA DETERMINACIÓN DE LA DQO. B) DETERMINACIÓN DE LA DQO.....	45
FIGURA 21. RECUPERACIÓN DE HUEVOS DE HELMINTO.....	48
FIGURA 22. SISTEMA DE OZONIZACIÓN.....	49
FIGURA 23. TRAMPA DEL GAS DE OZONO.....	50
FIGURA 24. GRÁFICO DE COMPARACIÓN DE LA DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO DESPUÉS DE OZONIZACIÓN.....	54
FIGURA 25. GRÁFICO DE COMPARACIÓN DE % DE REMOCIÓN DE LA DQO EN LOS DIFERENTES TIEMPOS.	55
FIGURA 26. GRÁFICO DE COMPARACIÓN DEL CAMBIO DE ALCALINIDAD DESPUÉS DE OZONIZACIÓN.....	57
FIGURA 27. COLORACIÓN DE LA MUESTRA EN EL PROCESO DE OZONIZACIÓN.	57
FIGURA 28. COMPARACIÓN DE LA EFICIENCIA DE TRANSFERENCIA DE OZONO.....	59
FIGURA 29. HYMENOLEPIS NANA.....	60
FIGURA 30. HYMENOLEPIS DIMINUTA.....	60
FIGURA 31. ASCARIS LUMBRICOIDE	60
FIGURA 32. REACCIONES DEL O_3 Y SUS SUBPRODUCTOS CUANDO SE DESCOMPONE. FUENTE: HOIGNE Y BADER, 1976.....	61
FIGURA 33. HH DE ASCARIS LUMBRICOIDE ANTES DE TRATAMIENTO	62

FIGURA 34. HH DE ASCARIS LUMBRICOIDE DESPUÉS DE TRATAMIENTO.....	62
FIGURA 35. HH DE ASCARIS LUMBRICOIDE EN FASE INACTIVA.....	62
FIGURA 36. HH DE ASCARIS LUMBRICOIDE EN FASE VIABLE.....	63
FIGURA 37. GRÁFICO DE PORCENTAJE DE REMOCIÓN DE HUEVOS DE HELMINTO CON 10 MINUTOS DE OZONIZACIÓN.....	64
FIGURA 38. GRÁFICO DE PORCENTAJE DE REMOCIÓN DE HUEVOS DE HELMINTO CON 15 MINUTOS DE OZONIZACIÓN.....	65
FIGURA 39. CURVA PATRÓN.....	73

1 INTRODUCCIÓN

En los últimos años según la Organización de las Naciones Unidas (ONU), la población a nivel mundial ha crecido exponencialmente por lo que la demanda de agua potable se ha visto aumentada de manera significativa. Así mismo el crecimiento de la población mundial trae consigo un mayor número de contaminantes a los recursos naturales en particular al agua. La reutilización de aguas residuales es una necesidad, pero éstas no tienen un proceso adecuado para su reúso. Lo anterior debido a que poseen un alto contenido de materia orgánica e inorgánica contaminante, la cual es un problema muy grave tanto para la salud humana como para el ambiente (Rojas, 1998; Garza, 2000).

Los suelos, al ser regados con esta clase de aguas no tratadas correctamente, pueden adquirir contaminantes como metales pesados, compuestos orgánicos tóxicos y microorganismos patógenos. Estos últimos son de gran importancia para la salud pública ya que transmiten enfermedades al ser humano y a los animales (Escalas, 2006).

En México, existen numerosas comunidades de escasos recursos, la mayoría de las cuales no poseen un sistema de tratamiento de aguas. Aunado a esto, los métodos convencionales resultan costosos. Es por ello, que, en caso de necesidad de irrigación, las comunidades campesinas, se ven orilladas a utilizar aguas sin tratamiento para irrigar sus cultivos.

La morbilidad asociada a las helmintiasis constituye un problema de salud pública acentuado en los países con economías emergentes y en situación de pobreza. Dicho padecimiento es responsable de un estimado de tres millones y medio de muertes por año, así como patologías en una tercera parte de la población mundial (Papale et al., 2008; Jiménez, 2007; Mintz et al., 2001). Las condiciones prevalentes de infraestructura, higiene y el establecimiento del reúso de agua con calidad no adecuada constituyen factores que contribuyen de manera determinante a su prevalencia (Rojas et al., 2004).

Los métodos con mayor uso en desinfección de agua residual en plantas de tratamiento son: cloro y el ozono con 80%, seguidos de luz UV con 19% y solar con el 5%. Ellos basan su poder germicida en procesos oxidativos, así como en la desestabilización macromolecular del organismo por penetración. Sin embargo, ninguno de ellos resulta con suficiente poder para inactivar organismos que cuentan con estructuras de alta resistencia, tales como: quistes,

oocistos, virus y huevos de helminto (HH), entre otros (Rojas y Orta, 2009). En Sobsey (2002) se enfatiza particularmente sobre los HH como los organismos de mayor resistencia en una escala de microorganismos de interés sanitario. Los padecimientos que ocasionan requieren de una particular atención, al constituir un problema grave de salud pública en algunas regiones del mundo. Ello radica en la baja eficiencia de inactivación que presentan los desinfectantes antes mencionados ante los HH y la prevalencia en la población local. Los mismos resultados ineficientes se han observado ante diversos tratamientos de tipo aerobios, anaerobios, térmicos, de pH variable y filtración fina de membrana (Jiménez y Maya, 2007). No obstante que su aplicación dirigida resulta más efectiva, aunque en ocasiones de complicada implementación, debido a las condiciones de infraestructura prevalentes *in situ*, así como los costos asociados. Lo anterior ha derivado en la imposibilidad de asegurar la inocuidad absoluta del efluente tratado de las plantas de tratamiento

1.1 JUSTIFICACIÓN

En México, la parasitosis por Huevos de Helminto representa un importante problema de salud pública. La infección intestinal por *Ascaris lumbricoides* varía entre un 43 y 94% en la población rural, de ahí la importancia de erradicar a este tipo de microorganismos de las aguas residuales. El uso de aguas tratadas de manera deficiente usadas para riego agrícola representa un riesgo para la salud porque puede transportar una gran cantidad de agentes patógenos como bacterias, virus, y parásitos como protozoarios y huevos de helminto que provienen de animales o individuos infectados. Esto hace necesario y urgente aplicar un tratamiento adecuado al agua residual para su reutilización segura (Ayala, 2007).

Los parásitos helmintos más importantes que pueden encontrarse en aguas residuales son las lombrices intestinales, de los siguientes géneros: *Ascaris lumbricoides*, *Taenia saginata* y *Taenia solium*, los gusanos intestinales *Trichuris trichuria*, la lombriz intestinal *Ancylostoma duodenale* y el *Necator americanus*, y la lombriz filiforme *Strongyloides stercoralis*. La etapa infecciosa de algunos helmintos es el estado adulto o de larva y en otros la etapa infecciosa es el estado de huevo.

En las aguas residuales el tipo de huevecillos que se pueden encontrar son los No operculados como la *Ascaris lumbricoides*, *Taenia saginata* y *Taenia solium* (Lambert R. 1975).

Los patógenos son aquellos que dañan la salud humana, y son principalmente bacterias, virus y protozoarios. Algunos de ellos fueron y siguen siendo causa de una elevada mortalidad. Mientras que, un parásito es un organismo que vive a despesa de otro organismo huésped en su interior

y se alimenta a expensas del huésped. Hay tres clases importantes de parásitos que pueden provocar enfermedades en los seres humanos: protozoos, helmintos y ectoparásitos.

La capacidad del ozono para desinfectar agua contaminada fue reconocida en 1886 por el francés de Meritens. Años más tarde, la firma alemana Siemens y Halske, construyó la primera planta piloto en Martinikenfelde, Alemania, donde se demostró la efectividad del ozono como desinfectante contra bacterias (Langlais *et al.*1991).

La ozonización se considera la tecnología de mayor eficiencia para eliminar prácticamente todo tipo de patógenos incluyendo parásitos como huevos de helminto. Es efectivo a bajas dosis y tiempos cortos de exposición a diferencia del cloro, el ozono ataca la membrana celular de bacterias provocando la ruptura de esta. Es altamente efectivo con virus y es recomendado sobre todo en aguas con alto nivel de contaminación. Dentro de las limitantes que tiene para su aplicación en su elevado costo además de requerir de personal especializado para la operación de los sistemas de ozonización. El consumo de energía eléctrica es de alrededor de 30 kW/h por kilo de ozono (CONAGUA, 2007). El ozono puede ser aplicado como pretratamiento (pre-ozonización), tratamiento intermedio (oxidación) o tratamiento final (desinfección). En el primer caso se usa para remover hierro y manganeso, para oxidar la materia orgánica precursora de formación de subproductos de desinfección con cloro, y mejora de la coagulación-floculación. Como etapa intermedia para la remoción de micro contaminantes y como etapa final como desinfectante.

1.2 OBJETIVO GENERAL

Evaluar la eficiencia del ozono en la remoción de Huevos de Helminto en un agua residual tratada

1.3 OBJETIVOS PARTICULARES

- 1.- Determinar la eficiencia de remoción del ozono sobre Huevos de Helminto en función a los parámetros fisicoquímicos (DQO, alcalinidad)
- 2.- Establecer las mejores condiciones de ozonización (dosis, tiempo de contacto, ozono residual) para una eficiente remoción de Huevos de Helminto.
- 3.- Determinar el efecto de ozonización mediante la valoración de inactivación estructural del Huevo de Helminto.

2. MARCO TEORICO

2.1 Aguas residuales

La Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996, que establece los límites máximos permisibles de contaminación en las descargas de aguas residuales en agua y bienes nacionales, define agua residual como “las aguas de composición variada provenientes de las descargas de usos municipales, industriales, comerciales, de servicios, agrícolas, pecuarios, domésticos, incluyendo fraccionamientos y en general de cualquier otro uso, así como la mezcla de ellas”.

El agua residual se clasifica tanto por su procedencia como por sus características. El agua residual se puede definir considerando las fuentes de su generación, como la combinación de los desperdicios líquidos y los desperdicios acarreados por agua que se remueven de residencias, instituciones, establecimientos comerciales e industrias junto con agua superficial, subterránea o de tormenta que pueda estar presente (Metcalf & Eddy, 2002).

Los contaminantes en el agua residual son generalmente una mezcla compleja de compuestos orgánicos e inorgánicos. Se puede caracterizar de acuerdo con sus componentes físicos, químicos y biológicos. Las principales propiedades físicas, químicas y biológicas del agua residual se reportan en la Tabla 1.

Tabla 1. Principales parámetros de contaminación en los efluentes de algunas industrias.

TIPO DE INDUSTRIA	CONTAMINANTES
Industria alimenticia	Concentraciones de materia orgánica
Industria petroquímica y refinerías	Concentración de materia orgánica, aceites, fenoles, amoniaco y sulfuros.
Industria del curtido	Alcalinidad, concentración de materia orgánica, materia en suspensión, sulfuros y cromo.
Industria papelera	Color, concentración de materia orgánica, materia en suspensión y materia decantable, pH.
Industrias de lavado de mineral	Concentración de productos tóxicos, sólidos en suspensión y sedimentables.
Industria de acabado de metales	Concentración de cianuros, pH y metales pesados.
Industria minera	Sólidos suspendidos, metales, metales pesados, ácidos y sales.
Industria textil y cueros	Residuos orgánicos, sólidos en suspensión, sulfatos y cromo.
Industria microelectrónica	Residuos orgánicos, productos químicos orgánicos.

Sin embargo, existen otros contaminantes, denominados “contaminantes específicos”, los cuales, proceden de industrias muy concretas y se caracterizan por ser altamente contaminantes a concentraciones de incluso, 1×10^{-6} g/L. En este grupo se encuentran agentes tensoactivos, plaguicidas, derivados halogenados o fosforados de hidrocarburos, compuestos orgánicos específicos, sales metálicas y compuestos eutrofizantes (Ambientum, 2002).

Para tener una idea aproximada sobre la caracterización de un agua residual industrial hay que medir diferentes parámetros, tanto físicos como químicos.

2.2 Parámetros Químicos

Los parámetros químicos del agua residual son normalmente clasificados como inorgánico y orgánicos (Metcalf & Eddy, 2002). En la Figura 1 se muestran parámetros químicos más empleados para caracterizar aguas residuales industriales.

Cabe mencionar que el potencial de hidrógeno (pH) es un parámetro de suma importancia debido a que este influye en los parámetros mencionados anteriormente, además de condicionar en muchos casos la eficiencia de los procesos seleccionados para tratar un agua.

2.2.1 Potencial de hidrogeno

El pH indica la concentración de iones hidrógeno en una disolución. Se utiliza esta notación como medida de la naturaleza ácida o alcalina de una solución acuosa. Muchas propiedades de las sustancias químicas dependen de la concentración del ion hidrógeno en solución pH (Delgadillo, 2010).

En las aguas residuales urbanas, el pH se encuentra entre 6.5 y 8.5, valores elevados (mayores a 9.2) tienen efectos inhibidores del crecimiento de *Escherichia coli*. Cuando los valores están comprendidos entre 5 y 9 (situándose los más favorables entre 6.5 y 8.5) la vida de especies acuáticas es favorecida. En un vertido con pH ácido, los metales pesados son más solubles, a su vez, el pH han de ser referidos a la temperatura de medición, pues es una variable dependiente de ella (Delgadillo, 2010).

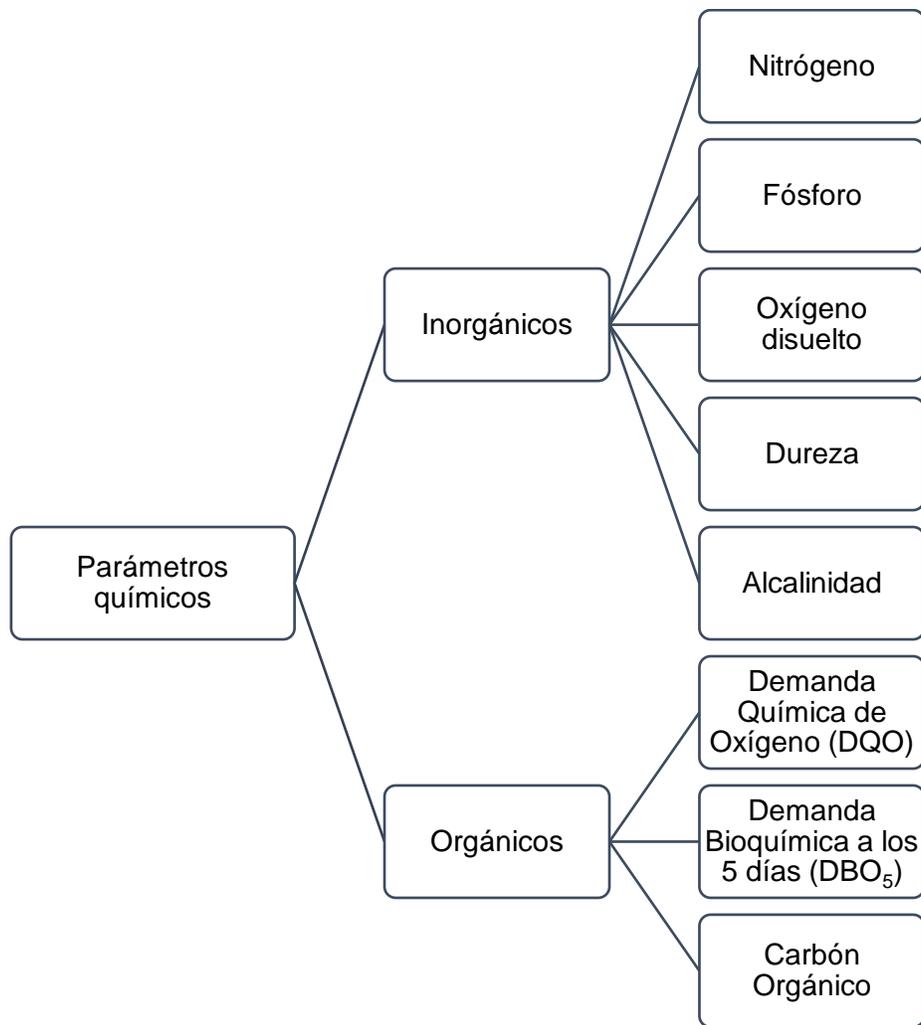


Figura 1. Parámetros químicos empleados para caracterizar un agua residual industrial.
Fuente: Metcalf & Eddy, 2002.

2.2.2 Alcalinidad

La alcalinidad en las aguas residuales resulta de la presencia de iones hidróxidos $[OH^-]$, carbonatos $[CO_3^{2-}]$, y bicarbonatos $[HCO_3^-]$ los cuales provienen de elementos tales como calcio, magnesio, sodio, potasio y amonio. De estos, el calcio y bicarbonato de magnesio son los más comunes. Boratos, silicatos, fosfatos y compuestos similares también pueden contribuir a la alcalinidad. La alcalinidad en las aguas residuales ayuda a resistir los cambios en los pH causados por la adición de ácidos (Metcalf & Eddy, 2002).

La alcalinidad es determinada por titulación utilizando un ácido estándar; los resultados se expresan en términos de mg $CaCO_3/L$.

2.2.3 Demanda química de oxígeno

La norma NMX-AA-030-SCFI-2001 se refiere a la demanda química de oxígeno (DQO), como la cantidad de materia orgánica e inorgánica en un cuerpo de agua susceptible de ser oxidada por un oxidante fuerte. La diferencia principal entre la DQO y la DBO es que la DQO engloba a la DBO, por lo tanto, la DQO siempre es mayor que la DBO. La DQO es una medida que abarca no solo el valor total máximo de DBO sino también otras necesidades de oxígeno del agua.

Diversos tratamientos por métodos convencionales han sido aplicados, todos enfocados a la eliminación de parásitos, pero con bajas remociones de huevos de helminto. Uno de los más simples es el método de sedimentación, que se lleva a cabo en grandes sedimentadores propios de la instalación de una planta de tratamiento de agua residual, por un método que remueve los huevos de helminto por gravedad, con eficiencias de 30%; pero, una desventaja es que los huevos quedan sedimentados en los lodos residuales del agua.

La digestión anaerobia es otra forma de eliminación de huevos de helminto, a partir de la cual, el agua residual es tratada biológicamente por microorganismos que convierten la materia orgánica en energía, para obtener una reducción significativa de parásitos; en este proceso, la temperatura debe ascender a 55°C, con un tiempo de exposición cercano a 28 días. Mientras que el compostaje requiere de ciertas condiciones ambientales controladas que faciliten el incremento de la temperatura (55-60 °C) para la destrucción de parásitos, y un periodo de dos meses, para cumplir con la norma mexicana (Escobar, 2014).

El cloro es el producto químico más comúnmente utilizado para la desinfección de agua, debido a su habilidad para inactivar bacterias y virus; sin embargo, no es efectivo para eliminar los huevos de helminto. Ante tal situación se ha recurrido al uso de procesos avanzados de oxidación, como son: la vía ácida, la cual es un tratamiento que utiliza ácidos para la eliminación de huevos de helminto, como el ácido peracético; la fotocatálisis homogénea, que involucra una reacción química y absorción de luz, con ayuda de un catalizador, para acelerar la reacción; la fotocatálisis solar con TiO_2 (dióxido de titanio) que es el resultado de una reacción causada con luz solar y un catalizador TiO_2 , elementos que darán como resultado la eliminación de huevos de helminto y ozonización, dado que el componente principal es el ozono (Escobar, 2014).

2.2.4 Efecto de los parámetros fisicoquímicos en la remoción de parásitos.

Potencial de hidrógeno: La medida del pH es uno de los parámetros importantes a controlar dentro de los procesos de tratamiento tanto en agua potable como en agua residual. En etapas como la neutralización ácido-base, el ablandamiento, la precipitación, coagulación, desinfección y control de la corrosión dependen de gran medida de este parámetro. En aguas residuales domésticas el pH es ligeramente arriba de 7 y a menudo los cambios en los valores pueden ser indicadores de la presencia de aguas industriales por lo cual se complica el tratamiento de estas.

Demanda Química de Oxígeno: La demanda química de oxígeno es una medida indirecta de la materia orgánica, tanto la biodegradable como la refractaria e inorgánica del agua residual, que es susceptible de oxidarse químicamente bajo condiciones específicas. Casi todas las sustancias orgánicas se oxidan virtualmente en su totalidad por este procedimiento con la excepción de ciertos compuestos aromáticos, como la piridina, el benceno o el tolueno. El valor de la DQO da por tanto una idea del contenido orgánico total del residuo.

Alcalinidad: Cuando la alcalinidad del agua que pasa a través del proceso de tratamiento de agua potable es lo suficientemente alta, el agua se amortiguará contra cambios volátiles de pH. Esto es importante debido a que diferentes coagulantes utilizados para eliminar los contaminantes del agua potable pueden provocar que el pH del agua baje. Al conocer la cantidad de alcalinidad en el agua tratada, se puede ajustar de manera proactiva la dosis de coagulante, el pH del agua y la alcalinidad.

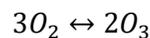
2.3 Características del ozono.

El ozono (O_3) es una forma alotrópica del oxígeno, se encuentra en estado gaseoso a temperatura ambiente, es incoloro y con olor acre penetrante, es tóxico, altamente corrosivo, fuerte oxidante, su potencial de oxidación es de 2.07 V. se estima que 50 ppm por 30 minutos puede ser letal (Gottschalk, 2000). El ozono se produce cuando las moléculas de oxígeno (O_2) son disociadas por medio de una fuente de energía produciendo átomos de oxígeno que posteriormente chocan con una molécula de oxígeno para formar una molécula inestable, el ozono (O_3). El método de descarga eléctrica es la fuente de energía más comúnmente utilizada para la producción de ozono. El aire o el oxígeno puro se utilizan como gas de alimentación, el cual es transmitido al generador de ozono a un flujo estable. La corriente de gas generada con el aire contiene cerca del 0.5 a 3%

de ozono en peso, mientras que, con el oxígeno puro genera aproximadamente de 2 a 4 veces esa concentración (US EPA, 1999a).

El uso más generalizado del ozono se da en la desinfección del agua potable, sin embargo, en los últimos años han aumentado las investigaciones sobre la aplicación de ozono para la desinfección de aguas residuales (US EPA, 1999a). A pesar de sus excelentes propiedades, su uso se ha restringido a ciudades grandes con fuentes de agua muy contaminadas y se ha empleado poco en comunidades pequeñas y de porte medio. El inconveniente principal para las comunidades pequeñas ha sido el costo inicial y el de operación, así como las dificultades de operación y mantenimiento. Sin embargo, cuando las fuentes de agua accesibles están muy contaminadas (biológica y químicamente), puede ser el método más recomendable para la oxidación de las sustancias orgánicas y desinfección primaria, siempre que cuente con la adición de un sistema de cloración secundario para mantener el efecto residual durante su distribución.

Dado que el ozono es una molécula inestable, debe ser generado en el momento que se va a aplicar para su uso en el tratamiento de agua, está formado generalmente por la combinación de un átomo de oxígeno con una molécula de oxígeno:



El ozono puede ser producido utilizando oxígeno puro o aire, puede estar en forma gaseosa o directamente en forma de solución por procesos electroquímicos.

Los radicales hidroxilos son los principales oxidantes formados en la descomposición del ozono en el agua, esto se puede demostrar midiendo las velocidades relativas a las que se consumen los diferentes sustratos y se pueden comparar con las constantes de velocidad de la reacción conocidas, por lo que la velocidad de descomposición del ozono es una función compleja en la que influye la temperatura y el pH (Hoigné y Bader, 1979).

El ozono se produce a partir de oxígeno líquido evaporado con 99.5% de O_2 diluido al 98% de O_2 mediante la adición de aire en un generador de ozono con una capacidad máxima de producción de 2.4 kg de O_3 /h.

2.3.1 Ozonización

La ozonización es una tecnología de oxidación avanzada, ya que tiene numerosas aplicaciones para el tratamiento de aguas residuales, debido a que mejora su biodegradabilidad haciendo más fácil el tratamiento biológico convencional. Las aplicaciones del ozono en tratamiento de aguas residuales pueden agruparse en tres categorías, como desinfectante o biocida, como oxidante clásico para remover contaminantes orgánicos, y pre o post-tratamiento de agentes para ayudar en otras operaciones unitarias como la coagulación, la floculación y la sedimentación (Beltrán, 2004). La eficacia del ozono en agua puede seguir dos rutas: La oxidación directa de los compuestos por ozono molecular y la oxidación indirecta mediante los radicales libres producidos durante la descomposición del ozono y las reacciones entre el ozono y las especies orgánicas e inorgánicas del agua (Hoigné & Bader, 1983).

La desinfección con esta alternativa tecnológica dosifica cantidades suficientes de gas ozono, de manera que se satisfaga la demanda inmediata del agua y se mantenga una concentración residual durante un tiempo de contacto que asegure la inactivación total de los microorganismos patógenos; lo anterior, cuando se trata de un agua para consumo humano. En el caso de aguas residuales, con la dosificación de ozono sólo se busca alcanzar un nivel de desactivación logarítmica deseado con base en el tipo de reúso o destino final del efluente de tratamiento.

Bajo condiciones controladas de laboratorio, concentraciones residuales de $0.4 \frac{mgO_3}{L}$ mantenidas durante 4 min, son suficientes para garantizar la inocuidad del agua. En el caso de agua potable, en los procesos de desinfección por ozono, normalmente se trata de mantener una concentración residual de 0.4 a $0.5 \frac{mgO_3}{L}$ durante 10 a 20 minutos de tiempo de contacto con el agua (Lage, 2010; Lawrence and Cappelli, 1977).

La acción germicida del ozono se debe fundamentalmente a los radicales activos que reaccionan con diversos componentes orgánicos de las células animales, vegetales y de microorganismos; puede romper la membrana celular y así imposibilitar la reactivación de las células de bacterias, virus y protozoarios. Dichos mecanismos se basan en el alto potencial de oxidación que tienen las disoluciones de ozono. Esta condición convierte el ozono en un eficiente destructor de bacterias y la evidencia sugiere que es igual de efectivo para atacar esporas y quistes resistentes de bacterias y hongos. Por esta razón, el ozono se utiliza mayoritariamente para la desinfección del agua potable y la desinfección del procesamiento de alimentos (Langlais et al., 1991; Solsona y Méndez, 2002)

El objetivo primordial de los procesos de desinfección, como parte del tratamiento de aguas residuales, es la inactivación o destrucción de los microorganismos patógenos que puedan encontrarse en el agua (Hammeken y Romero, 2005); contrario a la remoción, el concepto de inactivación se refiere al efecto que tiene la aplicación del desinfectante en la destrucción de la estructura celular o en la interrupción en su metabolismo, biosíntesis o habilidad de desarrollarse/reproducirse (EPA,2011). Según la Comisión Nacional del Agua (2009) un desinfectante ideal para el agua debe cumplir con:

1. Destruir todas las clases de agentes patógenos y en cantidad suficiente
2. No ser tóxico para el hombre ni animales domésticos
3. No tener un sabor desagradable
4. Tener un costo razonable
5. Ser de manejo, transporte y almacenamiento accesibles y seguros
6. No reaccionar con los compuestos presentes en el agua para producir sustancias tóxicas.

La desinfección con ozono tuvo sus inicios en 1906 con la planta de tratamiento de agua Bon Voyage en Niza, Francia, donde se instaló ozono para desinfectar las aguas de los riachuelos de las montañas a fin de asegurar la desinfección sin introducir olor a sabor ajenos al agua.

A presión y temperatura ambiente el ozono se produce como un gas inestable, ligeramente más denso que al aire y con un olor desagradable característico. Es un poderoso agente de oxidación y desinfección, por lo cual puede degradar muchos materiales tanto orgánicos como inorgánicos.

El método de desinfección por ozonización consiste en agregar cantidades suficientes de ozono lo más rápidamente que sea posible, de manera que satisfaga la demanda y mantenga un residuo de ozono durante un tiempo suficiente para asegurar la inactivación o destrucción de los microorganismos. La demanda de ozono en la mayoría de los sistemas de abastecimiento de agua suele ser mayor a la del cloro, debido a su gran potencial de oxidación. Los procesos de desinfección por ozono normalmente tratan de mantener un residual mínimo de 0.4 a 0.5 ppm después de 10 a 20 minutos de contacto con el agua (Solsona y Méndez, 2002).

Proceso de Ozonización

Existen 4 etapas principales en un sistema de ozonización: preparación del gas de alimentación, la generación de ozono, el contactor de ozono y la destrucción del ozono no transferido.

Preparación del gas de alimentación

La calidad y la concentración del ozono producido dependen directamente del secado del aire alimentación. La calidad del ozono producido depende del tipo de gas alimentado, el cual puede ser:

1. Aire
2. Oxígeno de alta pureza
3. Oxígeno líquido de alta pureza
4. Aire enriquecido con oxígeno

La elección del tipo de gas de alimentación depende de la disponibilidad de este de los requerimientos de ozono en el proceso y del costo. En general, se requiere que el gas esté libre de partículas y humedad, para asegurar un buen funcionamiento del sistema. Por lo que, dependiendo del gas de alimentación seleccionado, será necesario un proceso de filtración y secado del gas. Los sistemas alimentados por aire y por aire enriquecido por oxígeno son los que suelen requerir de estos procesos.

Generación de ozono por descarga de corona.

La descarga de corona, también conocido como descarga eléctrica silenciosa, consiste en hacer pasar un gas que contiene oxígeno a través de dos electrodos separados por un dieléctrico y un espacio de descarga. El voltaje se aplica a los electrodos, causando un flujo de electrones a través del espacio de descarga. Estos electrones proporcionan la energía para disociar las moléculas de oxígeno, dando lugar a la formación de ozono.

El efecto corona es un fenómeno de descarga eléctrica en gases, caracterizado por bajas intensidades de corriente (miliamperios), alta densidad de corriente y potencial eléctrico del orden de potencia de chispa del gas (Carlins et al, 1982). Una vez este punto el gas se encuentra en estado de plasma no térmico, es decir está constituido por especies cargadas como iones, electrones, radicales y especies neutras como átomos y moléculas (Brachhold et al, 2005).

En un reactor de descarga de corona (Figura 2), el gas está localizado en la mitad de dos electrodos metálicos conectados a una fuente de tensión, donde uno o ambos electrodos se

cubren con un dieléctrico, produciendo micro descargas pulsadas aleatorias que emanan del electrodo metálico al dieléctrico y se extinguen en nanosegundos (Wojtowicz, 2005).

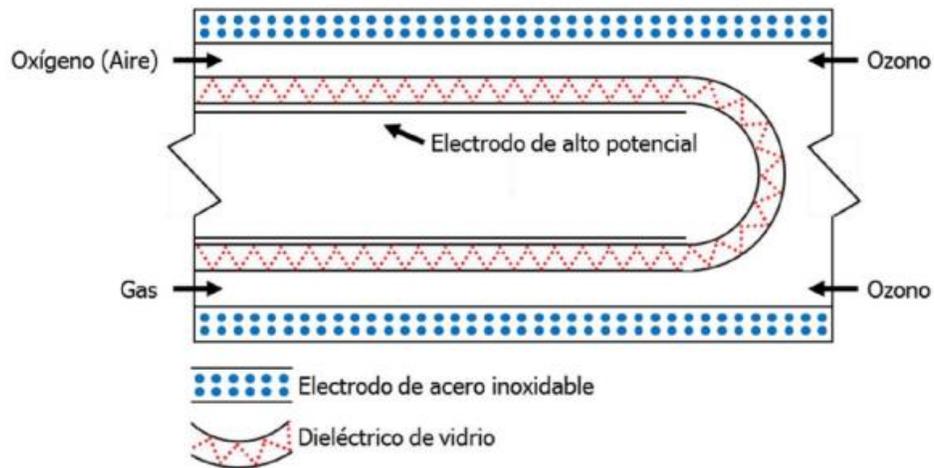


Figura 2. Generación de ozono por descarga de corona.
Fuente: CONAGUA, 2000.

Contactor de ozono

Ya que la producción de ozono se lleva a cabo en fase gas, este tiene que ser transferido posteriormente al agua. Para llevar a cabo esta transferencia se emplea una unidad denominada cámara de contacto, la cual varía en términos de diseño, condiciones de operación y el punto de introducción del ozono (CONAGUA, 2007). La concentración requerida de ozono determina el tamaño y la geometría del sistema de contacto (Langlais et al, 1991). El diseño está fuertemente influenciado por la baja solubilidad del ozono en las concentraciones en que comúnmente se encuentra el gas de alimentación (de 1 a 10%).

Junto con la cámara de contacto, el difusor es una parte clave. Los más usados son los difusores porosos de burbuja fina, debido a que no requiere energía adicional ya que se aprovecha la que se genera al comprimir el aire (CONAGUA, 2000). Las principales cámaras de contacto se describen a continuación:

1° Cámara de contacto en multietapas con difusor poroso de burbujas finas: son construidas de concreto con cemento resistente a la humedad y corrosión. Se diseñan de 1 a 6 etapas separadas por mamparas (Figura 3). El gas se aplica por el fondo, a contracorriente del flujo de agua a través de difusores porosos, reciclando los gases de salida de la primera etapa (CONAGUA, 200).

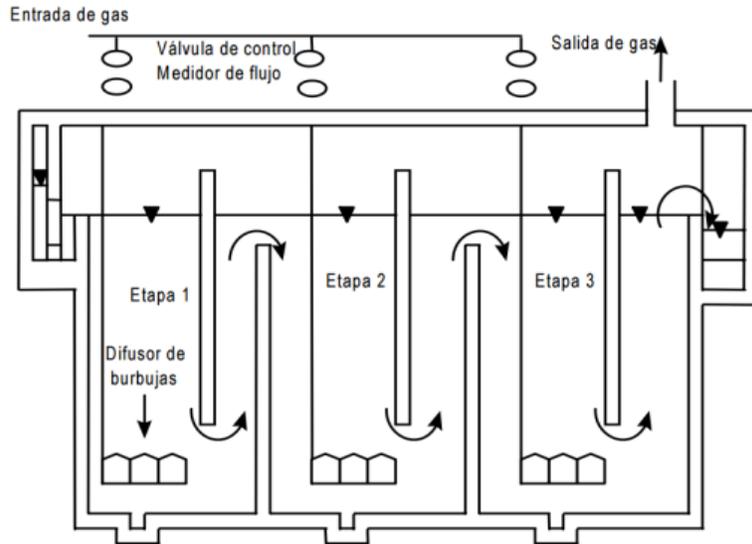
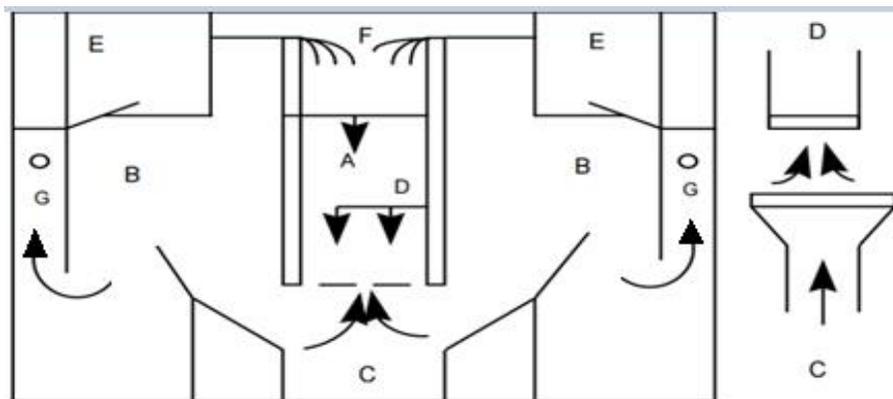


Figura 3. Cámara de contacto con difusor poroso de burbujas finas.
Fuente: CONAGUA, 2000.

2° Cámara de contacto con difusor de plato poroso: Este sistema se usa para combinar la ozonación y la flotación en una sola unidad (Figura 4). Consta de un tanque de contacto dividido en dos, una parte para la ozonación y la otra para la flotación. El agua fluye hacia abajo, por el centro de la cámara, y el ozono es introducido a través de un difusor de plato poroso localizado cerca del fondo (CONAGUA, 2000).



- A: Cámara descendente de ozonación
- B: Cámaras de flotación
- C: Platos porosos de difusión
- D: Corriente de barrido (agua inyectada a través de orificios)
- E: Cámara de remoción de espuma
- F: Entrada de agua a tratar
- G: Salida de agua tratada

Figura 4. Cámara de contacto con difusor de plato poroso.
Fuente: CONAGUA, 2000.

3° Cámara de contacto tipo Kerag con mezclador de turbina con presión positiva o negativa: utiliza un propulsor giratorio rápido con base perforada, a través de la cual se introduce el ozono por el fondo (Vázquez, 1996). Este sistema es común en cámaras de contacto múltiples (hasta 4) donde los gases de salida de la segunda cámara son transportados hacia la primera cámara (Figura 5).

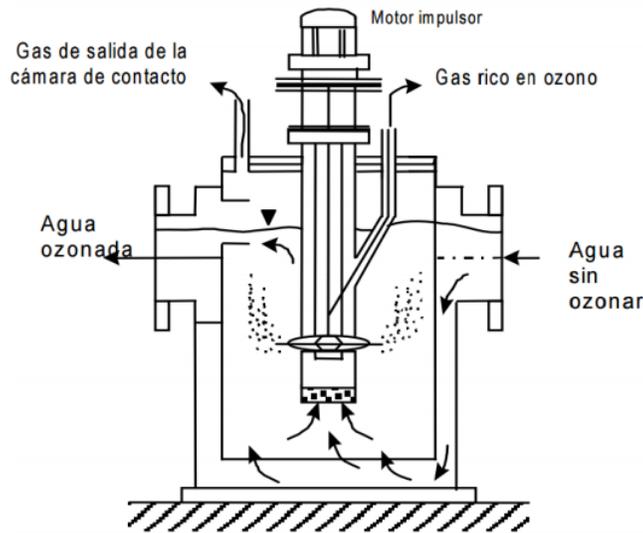


Figura 5. Cámara de contacto tipo Kerog.
Fuente: CONAGUA, 2000.

4° Sistema de contacto y difusión en tubo profundo en "U": consta de dos tubos concéntricos (Figura 6). El ozono se inyecta a través de un orificio ubicado en la parte superior del tubo interno. El agua fluye por éste y regresa en dirección ascendente por el tubo externo, describiendo una trayectoria en "U" (CONAGUA, 2000).

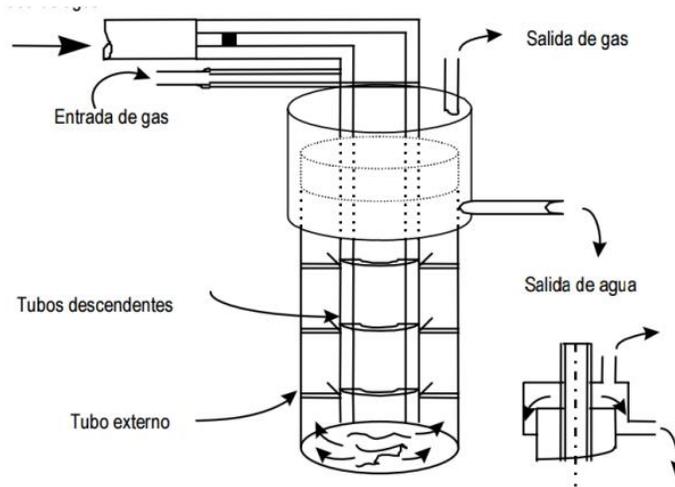


Figura 6. Sistema de contacto y difusión en tubo profundo en "U".
Fuente: CONAGUA, 2000.

Destrucción del ozono

Debido a que la eficiencia de transferencia del ozono es menor al 100% y a que éste no puede ser descargado directamente a la atmósfera por ser contaminante, es necesario destruirlo (Bryant et al, 1992). Existen tres formas de eliminar el ozono (Geering, 1995):

1° Térmica: Consiste en incrementar la temperatura entre 300 y 350 °C durante 5 segundos. A esta temperatura la vida media del ozono es de sólo 0.04 a 0.4 segundos (Manley y Niegowski, 1967).

2° Catalítica: Emplea catalizadores de paladio, manganeso u óxidos de níquel soportados. Estos catalizadores pueden ser regenerados. El principal problema es la disposición de los catalizadores gastados.

3° Adsorción en carbón activado: El ozono reacciona con carbón activado seco generando una cantidad considerable de calor que destruye el ozono y se consume lentamente. Esta combustión resulta en la formación de partículas finas de carbón que son explosivas, por lo que el método es peligroso y difícil de monitorear (U.S. EPA, 1986).

2.3.2 Mecanismos de Reacción del Ozono

Considerando los mecanismos de reacción en el agua, citados en la literatura, el ozono puede reaccionar de dos formas (Langlais et al, 1991):

- a) Adiciones electrofílicas a cualquier enlace múltiple presente, por reacción directa con el ozono molecular.
- b) Reacciones por radicales libre, generados de forma indirecta cuando el ozono se descompone en el agua, atacando a las moléculas presentes.

En el caso de la reacción indirecta, los radicales libres son especies químicas que tienen muy corta vida y poseen un poder de oxidación mayor que el del ozono. Cuando se promueve la formación de radicales libres (OH°) mediante el empleo de promotores (como, por ejemplo, peróxido de hidrogeno, óxido de titanio o radiación UV) se habla de un proceso de oxidación avanzada (POA).

En la práctica, tanto las reacciones directas del ozono y las reacciones indirectas se llevan a cabo simultáneamente. Una de ellas será la predominante, dependiendo de varios factores, tales como la temperatura, el pH y la composición química del agua. La materia orgánica, sólidos disueltos y componentes del agua serán oxidados a diferentes grados por ambos mecanismos, representados a continuación (Figura 7).



Figura 7. Mecanismos de oxidación del ozono.
Fuente: Campos, 2014.

2.3.2.1 Reacciones Directas

El ozono puede reaccionar como un dipolo 1-3 (teniendo la posibilidad de realizar ciclo-adiciones), como agente electrofílico o agente nucleofílico. Estos tres tipos de reacciones normalmente ocurren en soluciones que contienen contaminantes orgánicos.

a) Ciclo- adición

Debido a su estructura, el ozono puede realizar un ciclo adición en compuestos con enlaces insaturados (dobles o triples enlaces). Esto conduce a la formación de compuestos llamados 'ozónidos', como se muestra en la figura 8.

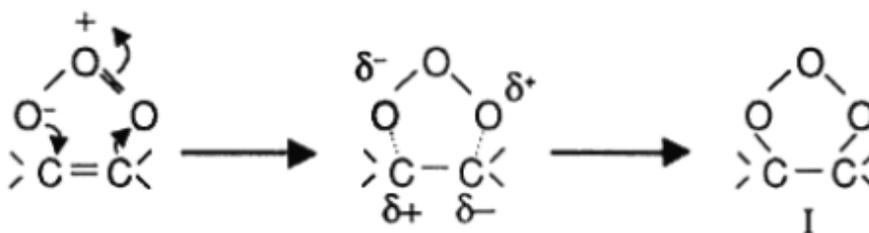


Figura 8. Ciclo adición dipolar, teniendo como producto ozónido (I).
Fuente: Campos, 2014.

En una solución protónica como el agua, el ozónido primario se convierte a un aldehído, cetona o zwitterión (Figura 9). El zwitterión (II) eventualmente se convertirá en peróxido de hidrógeno y compuestos carboxílicos.

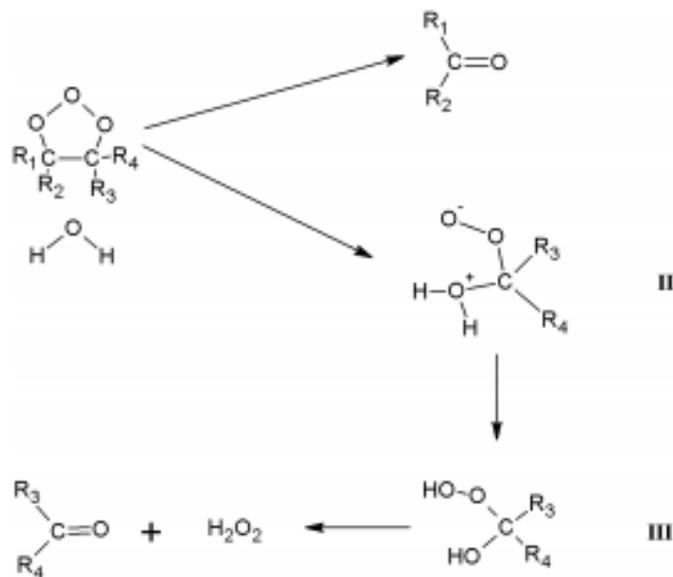


Figura 9. Interacción del ozónido con moléculas de agua.
 Fuente: Campos, 2014.

b) Reacciones electrofílicas

Las reacciones electrofílicas ocurren en soluciones de sustancias que poseen alta densidad electrónica y principalmente en aquellas que contienen un alto nivel de compuestos aromáticos. Los compuestos aromáticos que presentan sustitución de grupos electro donadores, tienen una alta densidad electrónica en las posiciones orto y para, mismas que interaccionarán activamente con el ozono.

A continuación, se muestra un ejemplo de una reacción entre el ozono y fenol (Figura 10), misma que ocurre con relativa rapidez. De acuerdo con este mecanismo, se forman estructuras intermediarias como hidroquinonas, mismas que al seguir interaccionando con el ozono se ven sometidas a un rompimiento del anillo aromático generando una mezcla de ácidos y aldehídos mucónicos como también ácidos maléicos y fumáricos, que en una subsecuente oxidación generan ácido oxálico, glioxálico y fórmico. En una etapa final la oxidación conduciría a la mineralización total del hidrocarburo aromático hasta CO_2 (Langlais, et al., 1991).

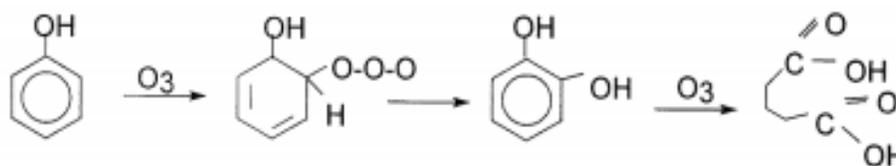


Figura 10. Reacción electrofílica entre el fenol y ozono.
Fuente: Campos, 2014.

c) Reacciones nucleofílicas

Las reacciones nucleofílicas ocurren principalmente en lugares donde existe una carencia de electrones y en particular en los compuestos de carbono que contienen grupos de aceptores de electrones, tales como $-\text{COOH}$ y $-\text{NO}_2$. En estos casos, las velocidades de reacción son menores (Gunten, 2003a).

De lo anterior, se deduce que la oxidación directa por ozono posee un mecanismo de reacción muy selectiva, en la que el ozono reacciona rápidamente con la materia orgánica que contiene enlaces dobles, grupos aromáticos activados o aminas. De esta forma, el ozono reacciona más rápido con compuestos orgánicos ionizados y disociados que con moléculas neutras. Los grupos sulfuro también se oxidan rápidamente por ozono. Los sustituyentes electro-aceptores ($-\text{Cl}$, $-\text{COOH}$ y $-\text{NO}_2$) causan una disminución de la velocidad de reacción, mientras que los donadores de electrones ($-\text{NH}_3$, $-\text{OH}$, $-\text{O}$, $-\text{OCH}_3$) causan un aumento en la velocidad de reacción.

En resumen, el ozono oxida directamente los compuestos orgánicos de forma selectiva y parcial. Por otra parte, un gran número de compuestos inorgánicos se oxidan muy rápidamente.

2.3.3 Investigaciones en la aplicación de ozono para eliminar Huevos de Helminto (Estado del arte)

Tipa Mori (2018) determinó la dosis óptima de ozono y peróxido de hidrógeno en un proceso de oxidación avanzada para disminuir la carga orgánica elevada que presentan las descargas de aguas residuales no domésticas. Se tomó como primera muestra 1 litro de agua residual no doméstica y se procedió analizar las características. Se usaron 4 dosis de O_3 (1.25, 2.5, 5 Y 7.5 g). Concluyendo que si se puede determinar la dosis adecuada de O_3 y H_2O_2 en el proceso oxidativo avanzado, siendo corroborado por los resultados obtenidos en los 8 tratamientos, la dosis adecuada es de 5 g de O_3 y 20 ml de H_2O_2 , logrando un nivel de disminución de 920 a 435

mg/L. Recomienda para posteriores investigaciones es necesario usar mayores niveles de ozono, así como peróxido de hidrógeno en mayor pureza, para tener un resultado más exacto además que este sistema de tratamiento de aguas residuales debería ser aprovechado por las pequeñas industrias, no requiere de costos elevados y tampoco mantenimiento continuo.

Hao Wang, *et al.* (2018) demostraron la eliminación de virus relacionados con los seres humanos mediante un tratamiento adicional con ozono. El tratamiento adicional con ozono redujo los virus a niveles indetectables. La planta de tratamiento de aguas residuales investigada en Knivsta en 2015 agregó un paso de ozonización adicional que trata todo el flujo de aguas residuales al final del proceso. El paso de ozonización a gran escala se divide en dos líneas paralelas con una capacidad máxima total de 560 m³ de aguas residuales por hora. El ozono se produce a partir de oxígeno líquido evaporado con 99.5% de O₂ diluido al 98% de O₂ mediante la adición de aire en un generador de ozono con una capacidad máxima de producción de 2.4 kg de O₃ /h. Se agregó una dosis de ozono de alrededor de 6 mg/L a las aguas residuales efluentes a través de mezcladores estáticos que transfieren más del 98% del ozono agregado a las aguas residuales.

Landa Fernández (2018) en un estudio de inactivación con ozono del nematodo *Meloidogyne enterolobii* en agua para riego agrícola determinó las condiciones para lograr su inactivación. Para ello, se utilizaron nematodos de la especie *M. enterolobii*, extraídos previamente de raíces agalladas de plantas de tomate. En los ensayos de inactivación, una suspensión de huevos de dicha especie fue inoculada al agua de riego. Posteriormente, se llevó a cabo el proceso de inactivación en una unidad de ozonización a escala laboratorio. El desempeño de los tratamientos fue evaluado a través de la viabilidad de los huevos mediante la valoración de su estructura por microscopía óptica. Los experimentos se llevaron a cabo en una unidad de desinfección escala laboratorio integrada por un separador de aire (Airsep modelo AS-12, USA), un generador de ozono Labo 76 (Emery Tralligaz, USA) con capacidad de producción de $1.9 \frac{gO_3}{h}$ y un reactor de tanque agitado de 1 L como contactor gas- líquido. El reactor fue operado por lotes y contó con puertos de entrada y salida para el gas ozono. Las concentraciones de ozono en fase gas a la entrada y a la salida del sistema ((C_{ge}, C_{gs})) fueron determinadas mediante el método yodométrico. El gas sin reaccionar fue enviado a la unidad de destrucción catalítica para su liberación segura al ambiente. El ozono fue inyectado al medio acuoso por medio de un difusor de vidrio de placa porosa con tamaño de poro de 10 – 15 μm . La mezcla ozono – agua en el reactor se mantuvo en agitación mediante una barra magnética. El reactor tuvo un puerto de muestreo de agua para análisis de ozono residual. La concentración de ozono residual en el agua se midió mediante el

método colorimétrico de índigo. Finalmente, el autor concluyó que, para lograr la inactivación de 20 huevos de nematodos por litro, se requirió mantener una concentración de ozono residual en el agua de $0.55 \frac{mgO_3}{h}$ durante 15 min, lo que corresponde a un valor de CT igual a 8.25 mg-min/L. El ozono tuvo la capacidad de causar daño en la estructura de la pared celular de los huevos de nematodos afectando su integridad y con ello la viabilidad potencial del nematodo lo cual está acorde con la acción biocida del ozono. Y con base en un análisis preliminar de costos de capital y de operación y mantenimiento, se concluye que el proceso de desinfección con ozono es técnica y económicamente viable.

Prado Martínez (2017) realizó pruebas de desinfección con ozono preliminares en muestras sintéticas inoculando una cantidad de huevos conocida de *Meloidogyne enterolobii* con el fin de determinar la dosis de ozono requerida y el tiempo de contacto para lograr la inactivación de todos los organismos presentes. Estas pruebas se realizaron en una unidad de oxidación, compuesta por un separador de aire (Airsep modelo AS-12, USA), un generador de ozono Labo 76 (Emery Tralligaz, USA), un medidor de flujo de gas, una columna de burbujeo de vidrio de 1.2 L de capacidad y una unidad de destrucción catalítica de ozono (PCI Ozone & Control Systems Inc.) para su liberación segura al ambiente. El gas que era alimentado al generador de ozono está compuesto por una corriente gaseosa enriquecida con oxígeno la cual se obtiene al pasar aire del medio ambiente a través del separador de aire, el cual se obtiene al pasar aire del medio ambiente a través del separador de aire, el cual concentra el oxígeno hasta un 80%. Esta corriente de alimentación a su vez está libre de humedad. La concentración de ozono en fase gas se determinó mediante el método yodométrico. Por su parte la concentración de ozono en fase líquida se determinó por el método colorimétrico índigo (Bader and Hoigné). Se concluyó que además de la inactivación de los huevos inoculados de nematodo *Meloidogyne enterolobii*, se logra la inactivación de bacterias indicadoras de contaminación fecal y de hongos presentes en las muestras y el tratamiento requerido para garantizar la calidad fisicoquímica y microbiológica del agua empleada en la irrigación consiste en un sistema de filtración con anillos de 150 μm y una etapa de desinfección con ozono.

Castillo Verónica (2016) en un estudio de procesos de oxidación avanzada con ozono y peróxido de hidrógeno para inactivar huevos de helminto *Toxocara canis* y quistes del protozooario *Giardia Lamblia*, reportó que, el ozono y el peróxido de hidrógeno, así como las combinaciones de ambos son poderosos oxidantes que se aplican exitosamente desde hace mucho tiempo como desinfectantes de agua de tipo residual y potable, por lo que es de interés evaluar su actividad

parasiticida a diferentes tiempos de contacto, pH y concentraciones. Se utilizaron quistes de *Giardia Lamblia* y huevos de *Toxocara canis*, ambos agentes zoonóticos, cosmopolitas, que comúnmente contaminan aguas residuales y suelo. El tratamiento con ozono fue durante 15 min se ozonaron 10 mL de agua potable comercial que se colocó en un reactor semi-bach con capacidad de 50 mL. En esta etapa se trabajó con un ozonador de la marca Ozone se le suministró oxígeno industrial como gas de alimentación con un gasto de 0.519 L/min que se puede controlar con una válvula check adaptada a un rotámetro o flujómetro, de esta manera se puede tener una tasa fija de ozono disuelto en la muestra, que se determinó por el método colorimétrico de índigo, obteniéndose $1.7 \frac{mgO_3}{L}$. El autor determinó que la oxidación de los quistes de *G. lamblia* cuando se ozonaron directamente en el reactor se incrementó hasta 2.6 veces que, en el tratamiento con agua saturada con ozono, por lo que la inactivación resultó ser más eficiente. Durante la oxidación con ozono a pH 7 no se eliminó el riesgo de transmisión de la *giardiosis*, ya que se obtuvo una eficiencia de solo el 84.62%, y en el caso de la *toxocariosis* la eficiencia fue solo 45.24%, mientras que a pH alcalino se favorece la formación y acción de los radicales hidroxilos, incrementándose la inactivación 1.1 veces de ambos parásitos. La oxidación por ozono a pH 10 favorece la inactivación de los quistes de *G. lamblia* y en ambiente ácido la inactivación de huevos de *T. canis*. Por todo lo anterior, se propone el empleo del peróxido de hidrógeno, ozono, así como su combinación ozono/peróxido de hidrógeno, como una alternativa menos agresiva para el ambiente que el tratamiento con cloro en el control de la transmisión de ambas parasitosis.

López Lidia (2016) con la finalidad de proponer el uso del ozono en sistemas de distribución de agua, diseñó una cámara de contacto que permitiera inactivas en un 99% *H. pylori* en su estado VNC. Se determinó emplear una concentración residual constante de 0.6 mg/L de ozono en la fase líquida. Este valor se determinó gracias a diversas pruebas realizadas en el equipo de ozonización, con la única finalidad de verificar que la concentración del ozono en la fase acuosa a lo largo del tiempo permaneciera lo más estable posible. Concluye que una cámara de contacto que permita inactivar en un 99.99% la bacteria *H pylori* en estado VNC, para un flujo de $1 \frac{m^3}{s}$ debe contar con 13.5 m de largo, 9 m de ancho y 5 m de altura, un TRH de 10.1 min t. El flujo es un parámetro que puede ajustarse dependiendo del espacio disponible. Mientras que las dimensiones de cada etapa se encuentran en función del tiempo de residencia y de los puntos de suministro de ozono.

Campos Reales Alberto (2014) en su estudio de la mejora de la calidad y desinfección con ozono del efluente de un tratamiento primario avanzado para reúso agrícola reportó el efecto que tiene utilizar ozono en dicho tratamiento y en la desinfección de aguas residuales municipales de la Ciudad de México; estudiando las mejoras en la calidad del efluente obtenido para su posterior reutilización como aguas de riego agrícola. El principal aporte es la propuesta de un modelo teórico que trata de elucidar las razones de las mejoras obtenidas en el desempeño del TPA y las interacciones del ozono con la materia orgánica del agua residual al ser aplicado como pretratamiento del TPA o simultáneamente durante la etapa de coagulación. Los mejores resultados se obtuvieron para el O_3DTPA al aplicar 2 mg/L O_3 , puesto que se incrementaron considerablemente la remoción de sólidos suspendidos, turbiedad y color del agua tratada, brindando un efluente de mejor calidad. Por lo tanto, las dosis requeridas de coagulante pueden reducirse hasta en un 50% para lograr remociones de turbiedad similares a las de un TPA convencional, sin la necesidad de adicionar floculantes. Para la desinfección, se estableció que la combinación de $O_3 + NaOCl$ es la más efectiva, pues con el O_3 se minimizan las concentraciones de huevos de helmintos y con la cloración se mantiene un efecto residual en los efluentes. Bajo este esquema de tratamiento se establecieron las condiciones que permiten cumplir los criterios microbiológicos de la NOM-001-SEMARNAT-1966 para uso en riego no restringido; sin inhibir la productividad agrícola. Con los datos obtenidos el autor concluyó que el ozono promueve la solubilización de la MO, su microfloculación, y polimerización; mientras que durante la ozocoagulación (O_3DTPA), se favorece la formación de especies polinucleares con mayor efecto coagulante. Así se obtienen efluentes de superior calidad, que al ser desinfectados no afectan las productividades de los cultivos irrigados. En términos económicos, se estimó que la ozocoagulación tiene el potencial de reducir en casi un 10% el costo total del TPA convencional.

Ibáñez-Cervantes, *et al.* (2014) reportaron que el tratamiento con ozono podría ser un proceso de desinfección útil para destruir o inactivar etapas infecciosas de los huevos de helminto. Además que los estudios muestran que la oxidación con ozono y la acción de los radicales hidroxilos formados a pH alcalino tienen un efecto más rápido en la destrucción de la capa externa de huevos de *Hymenolepis nana* que fue en comparación con los efectos obtenidos en las reacciones a ácido y pH neutros. Se confirmó la gran resistencia de los huevos de helminto hacia procesos químicos comúnmente aplicados en el tratamiento de aguas. Las pruebas de ozonización se realizaron en un reactor de vidrio de 50 mL de volumen de forma cilíndrica con una placa de vidrio poroso en el fondo para hacer burbujas finas de menos de 1 mm de diámetro, la entrada de ozono estaba en la parte inferior del reactor y la salida en la parte superior. El reactor

tiene una tapa de vidrio para colocar las muestras y para su limpieza. El volumen operativo en el reactor fue de 10 mL, en cada prueba la dosis de ozono fue de 1 mg/min y se mantuvo constante durante el tiempo de reacción de 60 min.

Ayala Alberto (2007) determinó la capacidad de desinfección del ozono en muestras de agua residual municipal con altas concentraciones de microorganismos, y se aplicó ozono a concentraciones de 9.2, 18.4 y 36.8 mgO₃/L en fase gas, a diferentes condiciones de pH (3, 5 y 7) y tiempos de contacto (0, 15 y 60 min). Paralelamente se evaluó la demanda de ozono por parámetros fisicoquímicos. Los resultados mostraron un claro decremento en las concentraciones de bacterias y algunos parámetros fisicoquímicos, eliminando a los 15 min de aplicación de ozono, el 99.98% de las bacterias. El tiempo máximo de ozonización aplicado fue de 1 h, esto con la finalidad de conocer el efecto sobre amibas y huevos de helminto, ya que estos son más resistentes a los métodos de desinfección que las bacterias. Concluyó para implementar en una planta de tratamiento de agua residual un equipo para desinfección con ozono, las mejores condiciones para tratar el agua residual en su último punto serían a pH 7 y una concentración en la fase gas de 9.2 mgO₃/L durante 15 minutos, pues habría un menor gasto de recursos económicos por no utilizar sustancias ni equipo más sofisticado para controlar el pH del agua. La calidad final del agua tratada es similar a la obtenida a pH 3. La desinfección con ozono no solo es eficaz para eliminar los microorganismos antes mencionados sino también para huevos de helmintos, reduciéndolos hasta en un 95% con respecto al influente. Por último, la desinfección con ozono sería una etapa secundaria en el proceso de tratamiento de aguas residuales para obtener aguas tratadas de mayor calidad y que cumplan con la norma oficial mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996.

Rojas Neftalí, *et al.* (2005) en el estudio de selección y aplicación del mejor método de desinfección para eliminar huevos de helmintos, amibas y bacterias patógenas en agua residuales tratadas, reportaron la capacidad de desinfección y la factibilidad técnica y económica de un tratamiento con ozono para destruir microorganismos de alta resistencia. Para ello se aplicaron concentraciones de 9.2 y 18.4 mgO₃/L a pH 3, 5 y 9 a diferentes tiempos sobre muestras sintéticas bajo condiciones controladas de laboratorio. Posteriormente se aplicaron las mejores condiciones más la concentración de 36.8 mgO₃/L y pH 7 en muestras de aguas residuales municipales. Los resultados experimentales y de campo mostraron un claro decremento en el número total de huevos de helmintos, bacterias y protozoarios (amibas). En el caso de bacterias a los 8 minutos se alcanzó una adecuada aproximación a los límites señalados por la norma

NOM.001-ECOL-1996 para las descargas de aguas residuales. A los 15 minutos todas las bacterias fueron destruidas por completo y a la hora sólo se registró en la mayoría de los casos 1 huevo de helminto no viable, mientras que las amibas ya no fueron detectadas, logrando con esto el cumplimiento de la norma.

García Armando, *et al.* (2005) determinaron la capacidad del ozono para destruir bacterias y huevos de helminto antes y después de un tratamiento primario avanzado (TPA) de un agua residual municipal. La prueba de TPA fue simulada en una prueba de jarras (Phipps y Bird modelo 7790-400) usando 150 mg/L de Sulfato de Aluminio octadecano hidratado y 1 mg/L de polímero aniónico los cuales se adicionaron bajo condiciones de mezclado y después de 10 minutos de sedimentación. El conteo de coliformes fecales y bacterias patógenas se realizó mediante el método de filtros de membrana según la norma mexicana NMX-AA-102-1987, y el aislamiento y cuantificación de los HH/L, de acuerdo con la norma NMX-AA-113-SCFI-1999. El ozono fue aplicado a una concentración de 36.8 mg mgO_3/L a diferentes tiempos para cada tratamiento. El tiempo de destrucción del 100% de la población inicial de bacterias fue de 30 minutos, mientras que los huevos de helminto y *Giardia* sp. necesitaron 1 hora. Con esto se puede demostrar que la aplicación de un tratamiento con ozono al agua residual cruda para reusó agrícola es eficiente para mejorar la calidad microbiológica de hortalizas que se consumen crudas.

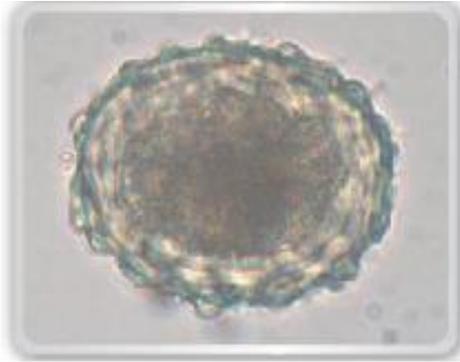
2.4 Huevos de Helminto

2.4.1 Generalidades de los Huevos de Helminto

La palabra *helminto* procede del término griego *helmins* que significa gusano y, de estos, los que son parásitos se clasifican en: platelmintos (gusanos planos) y nematelmintos (gusanos redondos). Los huevos de helminto tienen una longitud que varía entre 18 y 150 μm , y un diámetro que va de 12 a 14 μm , en los gusanos más pequeños, y hasta 90 μm , en los más grandes. Su forma puede ser esférica, ovalada o alargada (Orihel, 2010). Las infecciones por helmintos se diagnostican por la presencia de sus huevos o larvas en las heces; los cuales son eliminados por el portador y la vía de entrada al hospedero es oral. Los huevos de helminto tienen una cubierta lisa que puede variar de grosor, según la especie; con excepción de los huevos de *Ascaris lumbricoides*, que presentan una cubierta externa mamelonada, la cual es una protuberancia externa, generalmente carnosa, que altera su textura y superficial natural (Paruch, 2010).

La tasa de supervivencia de los helmintos llega a durar varios años, por lo que son considerados uno de los grupos más resistentes a cambios en los factores ambientales (pH, temperatura, humedad, etc.), llegando a sobrevivir a los tratamientos convencionales de desinfección de aguas residuales y lodos (Diago, 2011). Otra característica es su alta capacidad de ovoposición; durante el primero y segundo años de vida, una hembra de *A. lumbricoides* en estado adulto puede liberar, aproximadamente 200,000 huevos por día; *Trichuris* de 3,000 a 20,000 huevos por día, y *Taenia solium*, 50,000 huevos por día.

Existe una gran diversidad de huevos de helminto de importancia sanitaria recuperada de aguas residuales y lodos que afectan a humanos y animales; entre los helmintos más importantes encontrados en las aguas residuales destacan: *A. lumbricoides*, *Hymenolepis diminuta*, *Trichuris trichiura*, *Toxocara canis*, *Necator americanus*, *Taenia solium* y *Enterobius vermicularis* (Figura 11) (Rojas 2004).



Acaris lumbricoides



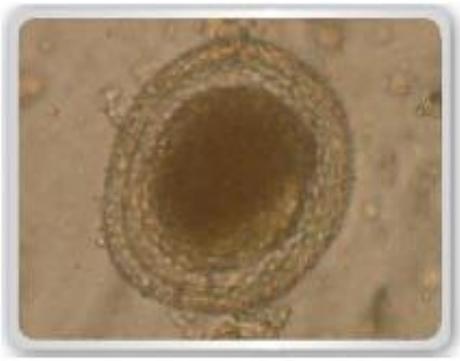
Taenia spp



Hymenolepis nana



Enterobius vermicularis



Toxocara canis



Trichuris trichiura

Figura 11. Huevos de Helminto en aguas residuales.
Fuente: Lardín & Pacheco (2013)

2.4.2 Características de los Huevos de Helminto

Aunque los parásitos de Helminto no son estudiados generalmente por los microbiólogos, su presencia en aguas residuales es no obstante de gran preocupación con respecto a la salud humana. El huevo constituye la etapa contagiosa de los parásitos de helminto; son excretados en las heces y se extienden a las aguas residuales, en el suelo o en los alimentos. El huevo es muy resistente a las tensiones ambientales y a la desinfección con cloro en la planta de tratamiento de aguas residuales (Bitton, 1994).

Los helmintos o gusanos pertenecen al subreino de los Metazoarios, lo que denota que son animales multicelulares, en los cuales las células se hayan diferenciado formando estructuras con funciones especiales, y además divididos en dos ramas, los Platelminfos (gusanos planos) y los Nematelminfos (gusanos redondos). Los platelminfos están subdivididos en dos clases, los Trematodos (duelas) y los Cestodos (tenias). Los nematelmintos incluyen la clase Nematodo, de los cuales algunos son parásitos del hombre; mientras que la mayoría son formas de vida libre o parásitos de los animales y de las plantas (Lambert,1975).

2.4.3 Tipos de parásitos más comunes en Aguas residuales

Las aguas residuales municipales pueden acarrear concentraciones considerables de agentes patógenos y parásitos relacionados con las excretas. Estos organismos pueden transmitirse por la ruta oral – fecal y tienen el potencial de causar infecciones importantes para la salud pública o producir brotes epidémicos asociados con las aguas residuales crudas o insuficientemente tratadas. Los principales organismos patógenos que se pueden encontrar en las aguas residuales pertenecen a los siguientes grupos: virus, bacterias, protozoarios y helmintos: estos organismos son capaces de sobrevivir a diferentes ambientes hostiles que presenten cambio de pH, temperatura, limitación de nutrientes, etc. Estos agentes patógenos, si bien provienen de las aguas residuales, alcanzan concentraciones más altas en los lodos por acumulación, ya que el volumen de los lodos es más pequeño que el volumen del agua a partir del cual fueron originados dichos lodos (Castro 2001).

La tabla 2 incluye una lista de algunos microorganismos patógenos y parásitos que se encuentran en aguas residuales, así como los síntomas o enfermedades entéricas con los que se asocian.

Tabla 2. Principales organismos patógenos y parásitos presentes en las aguas residuales.

Microorganismo	Enfermedad Producida
Bacterias	
<i>Salmonella sp.</i>	Salmonelosis (alimento contaminado), fiebre tifoidea
<i>Shigella sp</i>	Disentería bacilar
<i>Yersinia sp</i>	Gastroenteritis aguda (incluyendo diarrea y dolor abdominal)
<i>Vibrio cholerae</i>	Cólera
<i>Escherichia jejini</i>	Gastroenteritis
Virus	
<i>Polivirus</i>	Poliomielitis
<i>Coxsacovirus</i>	Meningitis, neumonía, hepatitis, fiebre, etc.
<i>Virus hepatitis A</i>	Infección de hepatitis
<i>Rotavirus</i>	Gastroenteritis aguda con severa diarrea
<i>Virus Norwalk</i>	Gastroenteritis epidémica con severa diarrea
<i>Retrovirus</i>	Infecciones respiratorias, gastroenteritis
Protozoarios	
<i>Cryptosporidium</i>	Gastroenteritis
<i>Entamoeba histolytica</i>	Enteritis aguda
<i>Balantidium coli</i>	Diarrea y disentería
<i>Toxoplasma gondii</i>	Toxoplasmosis
Helmintos	
<i>Ascaris lumbricoides</i>	Problemas digestivos y nutricionales, dolor abdominal, vómito, insomnio
<i>Ascaris suum</i>	Produce síntomas como: tos, dolor de pecho y fiebre, dolor abdominal, diarrea, anemia y pérdida de peso
<i>Toxocara canis</i>	Nerviosismo, insomnio, anorexia, dolor abdominal, trastornos digestivos
<i>Taenia solium</i>	Taeniasis
<i>Necantor americanus</i>	Anquilostomiasis
<i>Hymenolepis nana</i>	Hymenolepiasis

Fuente: Tornado de Guzmán, 1994.

2.4.4 Legislación

Los helmintos representan un elevado riesgo a la salud humana debido a que sus diversos estadios infecciosos (huevos embrionados o larvas) son altamente persistentes en el agua contaminada. Así, el agua constituye un vehículo directo o indirecto de diseminación de helmintos, aun cuando se encuentren en bajas concentraciones, dando lugar a enfermedades gastrointestinales, sobre todo cuando ésta se emplea para el riego de cultivos. La tabla 3 muestra las normas que regulan los huevos de helminto en México.

Tabla 3. Normas que regulan los huevos de helmintos en vertidos de aguas residuales y lodos.

Norma	Descripción
NOM-001-SEMARNAT-1996	Que establece el límite máximo permitido para riego no restringido máximo hasta 1 HH/L, y en riego restringido máximo 5 HH/L.
NOM-004-SEMARNAT-2002	Que clasifica los lodos en: A (menor de 1HH/g), B (menor de 10 HH/g) y C (menor de 35 HH/g).
NMX-AA-113-SCFI-2012	Establece el método para la cuantificación e identificación de huevos de helminto en aguas residuales y tratadas, con el fin de evaluar la calidad del agua y la eficiencia de los sistemas de tratamiento de ésta.

2.5.1 Tren de tratamiento

Se cuenta actualmente con 2 trenes de tratamiento gemelos. Se tiene un tanque de igualación de gasto a la entrada de la planta, lo cual permite entregar un gasto constante a los elementos de tratamiento. En el primer paso del tratamiento, el agua pasa a través de rejillas de limpieza manual, las cuales remueven la basura de mayor tamaño de las aguas municipales. Inmediatamente después de las rejillas se cuenta con canales desarenadores (Figura 13). El sedimento recolectado en el fondo de estos canales se desazolva y se usa dentro de la planta para relleno de desniveles. Dentro de los desarenadores se cuenta con aparatos digitales de medición de gasto.



Figura 13. Canales desarenadores con su respectivo aparato de medición digital de gasto.

Como último paso del tratamiento primario se cuenta con sedimentadores primarios circulares (Figura 14). En estos tanques se tiene un brazo mecánico en la superficie para desnatar las grasas, y dragas en el fondo para dirigir las partículas sedimentadas hacia una tolva, donde por medio de bomba se desecha lo recolectado hacia un espesador.



Figura 14. Vista general de uno de los sedimentadores circulares con que cuenta la planta de tratamiento

Originalmente la planta contaba con tanques espumadores, los cuales funcionaban de forma correcta, pero se dejaron de utilizar debido al uso de detergentes biodegradables. Como primer paso del tratamiento secundario se cuenta con reactores biológicos con aireación y recirculación de lodos (Figura 15). Anteriormente la aireación de los reactores biológicos se llevaba a cabo de forma mecánica, pero recientemente se ha optado por introducir un sistema de difusión de aire extendida, la cual se lleva a cabo por medio de 3 aireadores de 50 HP (uno para cada reactor, el tercero está instalado para cuando se construya el tercer tren de tratamiento). El tiempo de residencia del agua en esta etapa es de 12 a 16 horas.



Figura 15. Vista general de uno de los reactores biológicos rectangulares de la planta.

Después de los reactores biológicos el agua pasa a los sedimentadores secundarios (Figura 16), los cuales cuentan con dragas de recolección y una tolva en la que se almacenan los lodos, para su posterior recirculación o tratamiento en el digestor.



Figura 16. Sedimentador secundario, se almacenan los lodos en una tolva y se recirculan hacia los reactores biológicos.

Al salir de la sedimentación secundaria, el agua llega a una serie de filtros de antracita, arena y grava de diámetro variable entre 1 y 1.5 metros. Estos filtros cuentan con un sistema de retrolavado con la ayuda de 2 bombas de 50 HP y 2 bombas de 100 HP. El agua utilizada para el retrolavado de los mismos es recirculada al inicio de la planta para su tratamiento. Finalmente, se lleva a cabo la desinfección del efluente con hipoclorito por goteo (Figura 17). El agua permanece alrededor de 20 minutos en un laberinto y llega por gravedad al tanque de almacenamiento de agua tratada.



Figura 17. Instalación para la desinfección del efluente secundario con hipoclorito por goteo.

3. METODOLOGIA

3.1 Muestreo

Se realizó el muestreo de acuerdo con los lineamientos generales y recomendaciones para el muestreo de Aguas Residuales, establecido en la NMX- AA-003-1980. El muestreo se realizó en la planta de tratamiento de aguas residuales de San Luis Tlaxialmetalco, se realizó hacer el muestreo en uno de los reactores biológicos y en el primer sedimentador circular de la planta.

Se utilizaron contenedores de plástico y el recipiente muestreador fue enjuagado repetidas veces antes de efectuar el muestreo (Figura 18).

Se introdujo el recipiente en el reactor biológico donde el flujo era turbulento para asegurar un buen mezclado, se llenó el recipiente y se identificó la muestra con la siguiente información.



Figura 18. Muestreo en el reactor biológico.

Numero de muestra: 1

Fecha y hora de muestreo: 13 de octubre del 2021 9:29 horas

Punto de muestreo: Reactor biológico PTAR San Luis Tlaxiámetalco

Temperatura de la muestra: 14 °C

3.2 Caracterización del agua pretratada

3.2.1 pH

Se determinó el pH *in situ* por el método de la NMX-AA-008-SCFI-2000. El método se fundamenta en la existencia de una diferencia de potencial entre las dos caras de una membrana de vidrio, expuestas a disoluciones acuosas que difieren en su valor de pH. En primera aproximación a temperatura constante, la magnitud de esta diferencia de potencial es directamente proporcional a la diferencia de pH entre dichas disoluciones.

Para empezar, se calibró el dispositivo de determinación de pH seleccionando dos disoluciones patrón de pH cuyos valores fueron 4, 7 y 10 que estaban a la misma temperatura.

Se continuó retirando los electrodos de su disolución de conservación. Enjuagando completa y cuidadosamente con agua se secaron con papel absorbente. Con el dispositivo de determinación de pH listo para operar se sumergió los electrodos en la primera porción de disolución patrón de pH, agitando suavemente la disolución se esperó 2 min para que se estabilizara la respuesta de determinación y se ajustó la lectura del aparato de medición con el botón de calibración hasta obtener el valor de pH asignado.

Teniendo el dispositivo de determinación de pH calibrado se enjuagaron los electrodos con agua, se sumergieron los electrodos en una porción de la muestra problema durante 1 min para acondicionar el electrodo de vidrio, agitando suavemente. Al retirar los electrodos de la disolución, se secaron con papel absorbente.

Después del acondicionamiento, se sumergieron nuevamente los electrodos en una porción fresca de la muestra problema, agitando suavemente. Se esperó a que la lectura de pH se estabilizara (variación de la lectura menor que 0.02 unidad de pH en un lapso no mayor de 1 min). Se realizó una lectura por duplicado y la media se reportó.



Figura 19. Medición de pH.

3.2.2 Demanda Química de Oxígeno

Se determinó la Demanda Química de Oxígeno (DQO) mediante el método de flujo abierto que se describe en la NMX-AA-030-1-SCFI-2012 Que tiene como principio determinar la cantidad de materia orgánica e inorgánica en un cuerpo de agua susceptible de ser oxidada por un oxidante fuerte como el de sulfato de mercurio (II) con una cantidad conocida de dicromato de potasio y catalizador de plata en ácido sulfúrico concentrado.

Para las determinaciones se realizó el siguiente procedimiento.

1. Se prepararon tres disoluciones para la determinación de la demanda química de oxígeno, la primera con 500 mL de agua destilada para disolver 10.216 g de $K_2Cr_2O_7$ y se aforó a un 1L. La segunda, se agregó 10.09 g de Ag_2SO_4 y se aforó a un 1 L con ácido sulfúrico concentrado y la última consta de una disolución patrón de biftalato de potasio en la cual se agregaron 0.850 g de $KHC_8H_4O_4$ y se aforó a un 1 L con agua destilada que representa una concentración de 1000 mg/L de DQO.
2. Se realizó una curva de calibración en el espectrofotómetro a una longitud de onda de 600 nm, utilizando la solución patrón de biftalato de potasio se realizaron diluciones para obtener los calores de concentración citados en la tabla 4 utilizando la ecuación 1.

$$C_1V_1 = C_2V_2 \quad \text{-----} \quad (1)$$

Tabla 4. Datos para la determinación de la curva de calibración.

Volumen de la solución Patrón (ml)	DQO ($\frac{mg}{L}$)
0	0
1.2	48
3.7	148
6.2	248
8.7	348
11.2	448
13.7	548
18.7	748
21.2	848

Se preparó un testigo con agua destilada, para fijar la absorbancia a 0.

3. En un vial con tapa rosca de 10 mL se añadieron 2.5 mL de la muestra de agua residual de la planta San Luis Tlaxialtemalco, 1.5 ml de la solución de $KHC_8H_4O_4$ y 3.5 ml del reactivo de ácido sulfúrico.
4. Digestión a 150 °C y enfriamiento a temperatura ambiente.
5. Después de 24 horas se obtuvo el valor de la absorbancia en el espectrofotómetro Genesis 10s UV-vis. El procedimiento se realizó por triplicado (figura 20).



Figura 20. a) Digestor Hanna Instruments empleado para determinación de la DQO.
b) Determinación de la DQO.

3.2.3 Alcalinidad

La determinación de alcalinidad se realizó usando el método de titulación directa con ácido clorhídrico 0.4 M de la NMX-AA-36-SCFI-2001, este método está basado en la medición de la acidez o alcalinidad en el agua por medio de una valoración de la muestra empleando como disolución valorante un álcali o un ácido según sea el caso de concentración perfectamente conocida.

Se transfirieron 100 ml de muestra en un matraz Erlenmeyer de 250 ml, se agregaron 2 gotas de disolución indicadora de fenolftaleína para después titular con una disolución valorada de ácido (0.4 N) hasta el vire de la fenolftaleína, registrando los mililitros gastados para después adicionar 2 gotas de la disolución indicadora de naranja de metilo. Se continuó con la titulación hasta alcanzar el vire del naranja de metilo y se registró los volúmenes para ambos puntos finales.

Para la determinación de la Alcalinidad se utilizó la ecuación 2.

$$\text{Alcalinidad total como CaCO}_3 \text{ en } \frac{\text{mg}}{\text{L}} = \frac{AxN}{100} (50)(1000) \quad \text{--- (2)}$$

Donde:

- A es el volumen total gastado de ácido en la titulación al vire del anaranjado de metilo en ml;
- N es la normalidad de la disolución del ácido;
- 100 es el volumen de la muestra en ml;
- 50 es el factor para convertir eq/L a mg CaCO₃/L, y
- 1000 es el factor para convertir ml a L.

3.3 Conteo inicial e identificación de Huevos Helminto

3.3.1 Identificación de Huevos de Helminto

El conteo de huevos de helminto se realizó con base a NMX-AA-113-SCFI-2012, este método de análisis se basa en la diferencia de densidades entre los huevos de helminto, las demás sustancias presentes en las aguas residuales, y las que se agregan para permitir la separación. El método comprende los procesos de sedimentación, flotación, decantación y la técnica bifásica para recuperar los huevos de helminto y efectuar el conteo (Figura 21). La recuperación de los huevos de helminto de la muestra se realizó efectuando el siguiente procedimiento;

1. Dejar reposar la muestra al menos 3 h, o centrifugar a 400 g de 3 min a 5 min
2. Aspirar utilizando vacío o por decantación lenta sin agitar cuidando siempre la integridad del sedimento, desechar el sobrenadante
3. Filtrar el sedimento a través del tamiz (150 μm – 170 μm)
4. Lavar el tamiz con 5 L de agua (potable o destilada), y recuperar el agua de lavado junto con el sedimento filtrado
5. Colocar el filtrado y el agua de enjuague en el garrafón donde originalmente se encontraba la muestra para la centrifugación
6. Dejar reposar la muestra al menos 3 h o centrifugar a 400 G de 3 min a 5 min
7. Decantar con cuidado todo el sobrenadante y desechar
8. Depositar el sedimento en los recipientes para la centrífuga
9. Enjuagar 3 veces el garrafón perfectamente con suficiente agua potable o destilada, y colocar en los recipientes para centrifugación
10. Centrifugar a 400 G de 3 min a 5 min
11. Decantar nuevamente el sobrenadante utilizando vacío
12. Re suspender el paquete sólido en 150 ml de la disolución de sulfato de zinc
13. Homogenizar el paquete sólido con el agitador de tubos o con un aplicador de madera
14. Centrifugar a 1000 G de 3 min a 5 min, y se recuperó el sobrenadante vertiéndolo en un recipiente de plástico
15. Diluir cuando menos en 1 L de agua destilada, y dejar sedimentar al menos 3 h
16. Decantar por vacío el sobrenadante y re suspender el paquete sólido por agitación utilizando suficiente agua destilada
17. Verter la suspensión resultante en un tubo de centrifuga, incluyendo el agua de enjuague del recipiente y centrifugar a 400 g durante 3 min

18. Decantar a vacío el sobrenadante y re suspender el paquete sólido con agua destilada de alcohol-ácido por medio de un agitador de tubos, y agregar 10 ml de acetato de etil
19. Agitar suavemente y de vez en cuando destapar cuidadosamente los tubos para dejar escapar el gas que se desprenda
20. Centrifugar a 660 g durante 3 min
21. Aspirar el sobrenadante, dejando menos de 1 mL de este y evitar la pérdida del paquete de sólidos
22. Homogenizando el paquete se procedió a la cuantificación.

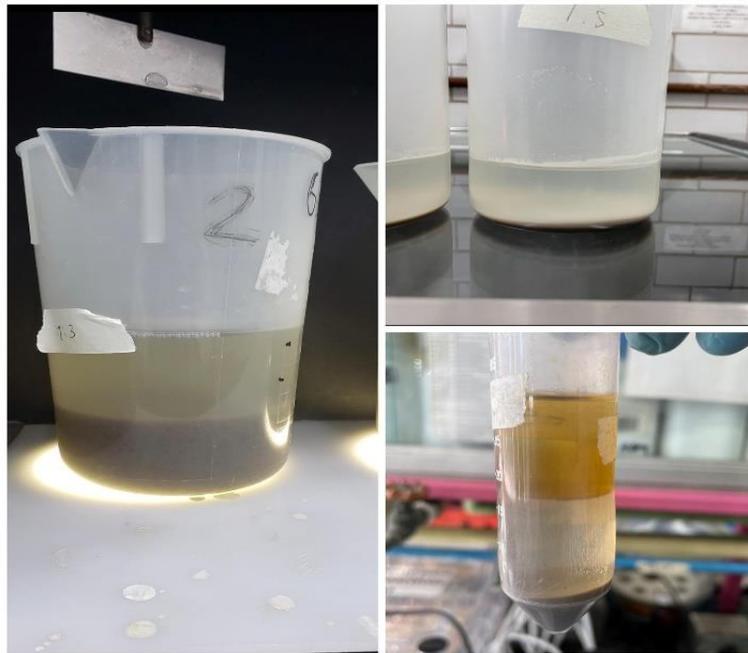


Figura 21. Recuperación de huevos de helminto.

3.3.2 Identificación de Huevos de Helminto

1. Se distribuyó cada alícuota en una celda de Sedgwich-Rafter, se examinó la totalidad del paquete obtenido
2. Se identificó visualmente una a una las estructuras, con la ayuda de un microscopio compuesto Olympus anotando los géneros encontrados con ayuda de bibliografía especializada
3. Se utilizó la técnica de conteo adecuada al número de huevos de helminto presentes en la muestra

3.4 Proceso de ozonización

Los experimentos se llevaron a cabo en un reactor batch de tanque agitado de 4 L como contactor gas-líquido, un generador de ozono (Radox, USA) con capacidad de producción de 1.2 g O₃/h. El reactor fue operado por lotes el cual tiene puertos de entrada y salida para el gas ozono. La salida del reactor estaba conectada a una trampa de gases. Las concentraciones ozono en fase gas a la entrada y a la salida del sistema se determinó utilizando el método yodo métrico (Figura 22).

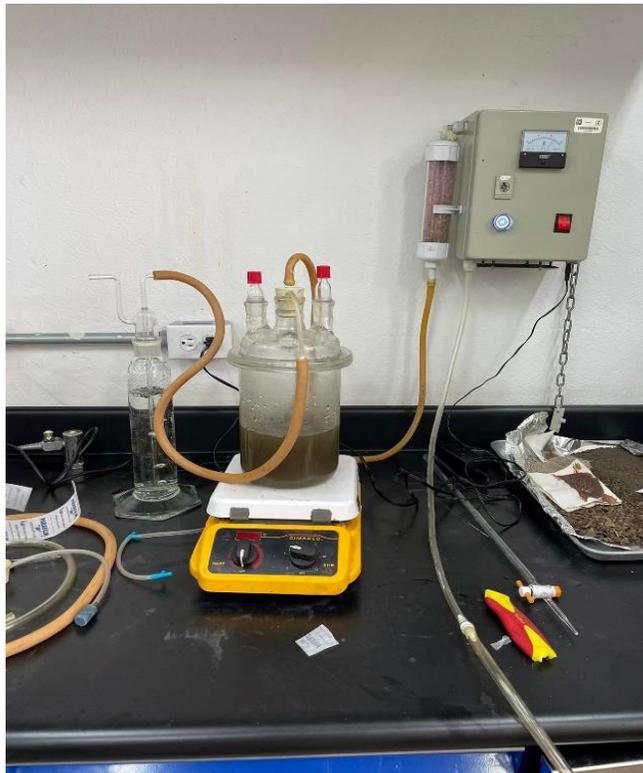


Figura 22. Sistema de ozonización.

El ozono fue inyectado al medio acuoso por medio de un difusor de pecera. La mezcla ozono-agua en el reactor se mantuvo en agitación constante mediante una barra magnética. La concentración de ozono residual en el agua ($[O_3]$) se midió mediante un balance de materia teniendo el dato de concentración a la entrada y concentración de salida.

Por cada prueba, se determinó la dosis de ozono aplica (DOA), la dosis de ozono transferida (DOT), la eficiencia de transferencia (ET) y valores de CT (concentración de ozono residual x tiempo), mediante las ecuaciones de la Tabla 5.

Tabla 5. Ecuaciones de balance de masa de ozono en reactor por lote.

Ecuación		Donde:
Dosis de ozono aplicada	$DOA = \frac{c_{ge} * Q_g * t}{V_r}$	c_{ge} Concentración de ozono en fase gas a la entrada al reactor.
Dosis de ozono transferida	$DOT = \frac{Q_g(c_{ge} - c_{gs})t}{V_r}$	c_{gs} Concentración de ozono en fase gas a la salida del reactor.
Eficiencia de transferencia	$ET = \frac{c_{ge} - c_{gs}}{c_{ge}} * 100$	$[Q_r]$ Concentración de ozono en la fase líquida.
CT	$CT = [O_3] * t$	Q_g Flujo de gas de entrada (L/min) t Tiempo de ozonización (min) V_r Volumen del reactor (L)

Para la determinación de ozono (producción, final) se usó el método yodométrico. Se preparó una solución al 2% m/m de yoduro de potasio (KI) y se colocaron 500 mL de la solución de KI en un lavador de gases, equipado con un dispositivo de burbujeo (tubo o difusor) el cual estaba sumergido 10 cm en la solución.

Se burbujeo el gas que contiene ozono a $3.6 \text{ mgO}_3 / \text{min}$ haciéndolo pasar por 10 min. El yodo formado en la solución de KI contenida en el lavador de gases inmediatamente se acidificó con 10 mL de H_2SO_4 1 M y se tituló con una solución valorada de $N_2S_2O_3$ 0.1 N hasta que el color desapareció (Figura 23).

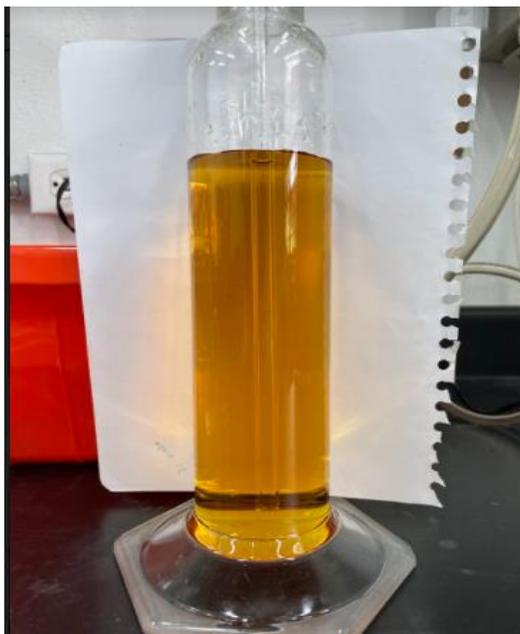


Figura 23. Trampa del gas de ozono.

La ozonización se realizó estableciendo diferentes condiciones de pH (3, 5, 7, 9 y 11). Para las condiciones de pH 3 y 5 se ajustó con ácido clorhídrico 3 N y para el pH 9 y 11 con hidróxido de sodio 1 N.

El tiempo de contacto de ozonización fue de 10 min y 15 min.

Se registraron los datos obtenidos y se analizó la mejor condición para inactivar el máximo de huevos de helminto.

3.5 Identificación e inactivación de Huevos de Helminto

3.5.1 Identificación de Huevos de Helminto

La identificación se realizó por comparación con ayuda clave de identificación (Tabla 6).

Tabla 6. Llave de identificación.

Tamaño	Forma	Nombre	Imagen	Características
< 50 μm	esférico	<i>Taenia spp.</i>		Tamaño 31 - 43 μm A veces se observa una membrana delgada externa alrededor del huevo
		<i>Hymenolepis nana</i>		Tamaño 30 - 47 μm Hay dos engrosamientos alrededor de la membrana
<i>Hymenolepis diminuta</i>			Tamaño 70 - 85 μm Color amarillento gris Embrión sin filamentos	
<i>Ascaris lumbricoide</i>			Tamaño 55 - 75 μm Color amarillento gris	
50 – 80 μm				

Fuente: Lardin & Pacheco (2013).

3.5.2 Técnica de verificación de inactivación de Huevos de Helminto

Para determinar la viabilidad potencial de los huevos de helmintos, se realizó una técnica rápida que se fundamenta en el uso del colorante biológico azul de metileno. Esta técnica permite detectar los cambios de permeabilidad de la cubierta externa de los huevos, misma que se ha demostrado está relacionada con el desarrollo embrionario y la viabilidad, ya que los huevos no viables son permeables al colorante, mientras que los que permanecen viables, no se tiñen. Además, esta técnica ha sido ajustada a la técnica cuantitativa de concentración por litro en membrana y aplicada exitosamente en el análisis de muestras de aguas crudas y tratadas. (Rojas Valencia, 1998).

En una celda de Sedgwich-Rafter, se agregó una gota de colorante de azul de metileno y se observó la viabilidad de los huevos de helminto.

4. RESULTADOS Y ANALISIS

4.1 Caracterización del agua residual con un tratamiento previo

A la muestra de agua residual se le realizó un tratamiento previo con coagulación-floculación y método Fenton. Se obtuvieron los siguientes resultados de caracterización (Tabla 7.)

Tabla 7. Resultados de caracterización.

	pH	Alcalinidad ($\text{CaCO}_3 \frac{\text{mg}}{\text{L}}$)	DQO (mg/L)	HH (HH/L)
Agua residual cruda	6.99	320	977.33	36
Agua residual primer tratamiento	6.99	40	267.33	30

Se escogieron estos parámetros a seguir por su importancia en el pre tratamiento que llevo el agua, ya que, al conocer la cantidad de alcalinidad en el agua tratada, se puede ajustar de manera proactiva la dosis de coagulante y el pH del agua. En el caso de la DQO, el valor nos da una idea del contenido orgánico total de la muestra.

Se identificaron tres diferentes especies de huevos de helminto en el agua residual (Tabla 8).

Tabla 8. Identificación de huevos de helminto.

Especie	Inicial (HH/L)	Imagen
<i>Hymenolepis nana</i>	10	
<i>Hymenolepis diminuta</i>	8	
<i>Ascaris lumbricoide</i>	18	

4.2 Propiedades fisicoquímicas.

4.2.1 DQO

A continuación, se describen los resultados obtenidos con los diferentes ensayos, remoción de DQO a diferentes pH (Tabla 9).

Como se puede observar la ozonización provoca una disminución en la DQO en todos los casos, teniendo una mejor remoción a los 15 minutos. Esta disminución de la DQO se debe a que el ozono es un agente oxidante, por lo tanto, al someter la muestra a ozonización muchos compuestos presentes en esta son oxidados, disminuyendo con esto la cantidad de compuestos oxidables y con ello se obtiene una mayor remoción de DQO, cumpliendo con la regla directamente proporcional, a mayor tiempo, mayor remoción de DQO (Figura 24).

Tabla 9. Demanda química de oxígeno después de ozonización.

pH	Tiempo (min)	
	10	15
	DQO (mg/L)	
11	250.11	157.89
9	142.33	66.78
7	192.33	2.33
5	100.11	40.11
3	50.11	36.78
Blanco	0.00	0.00

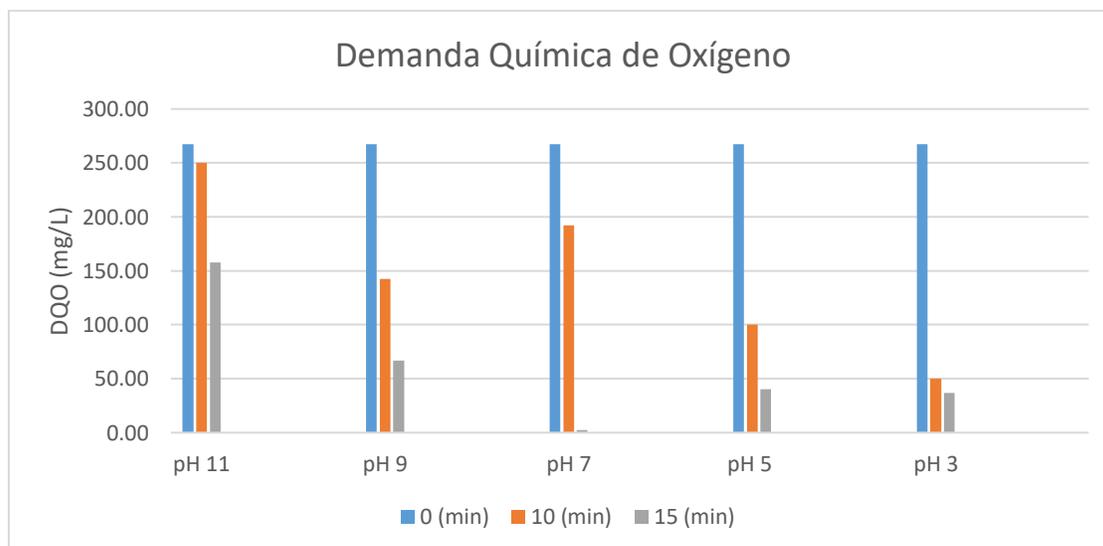


Figura 24. Gráfico de comparación de la demanda química de oxígeno después de ozonización.

En la Tabla 10 se muestran los porcentajes de remoción de DQO para cada uno de los ensayos donde se observa que a los 10 minutos de ozonización se obtuvo un porcentaje de disminución en la DQO de 60 a 80% en pH ácidos, a pH neutro un 30% y para pH básicos 40%. A los 15 minutos de ozonización se obtuvo un porcentaje de disminución en la DQO de 85% en pH ácidos, a pH neutro un 98% y para pH básicos entre 7 y 15%. En la figura 25 se grafican los resultados obtenidos en cuanto a la remoción de DQO.

Tabla 10. Datos de remoción de DQO.

pH	Tiempo (min)	
	10	15
	% de remoción	
3	81.26	86.24
5	62.55	85.00
7	28.05	99.13
9	46.76	75.02
11	40.94	6.44

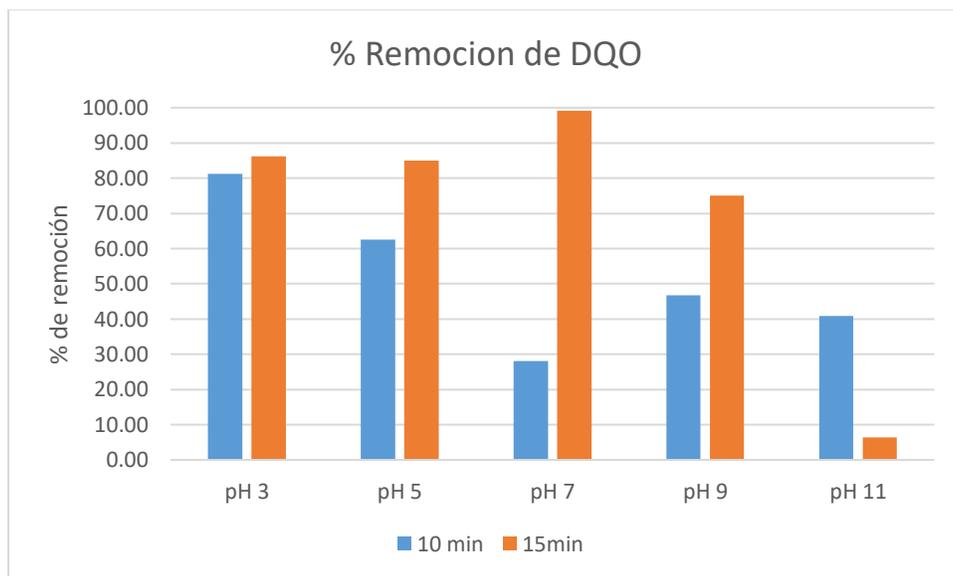


Figura 25. Gráfico de comparación de % de remoción de la DQO en los diferentes tiempos.

4.2.2 Alcalinidad

En la tabla 11 se muestran los datos obtenidos en la medición de la alcalinidad donde se puede observar que el ajuste de pH previo a la aplicación del ozono obviamente provocó una disminución de alcalinidad, por lo que a pH 3 y a pH 5 el valor obtenido fue muy bajo a comparación de la inicial. En el valor de pH 7 se mantuvo constante y a valores de pH básicos,

la alcalinidad aumento. Esto se puede explicar ya que la alcalinidad está definida como la presencia de sustancias hidrolizables en agua y que como producto de hidrolisis generan el ion hidroxilo (OH^-)(NMX-AA-036-SCFI-2001), en este caso al estar en pH básico aumenta la alcalinidad y disminuye a pH ácido.

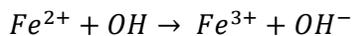
Tabla 11. Alcalinidad después de ozonización.

pH	Tiempo (min)		
	0	10	15
	Alcalinidad ($mg\ CaCO_3/L$)		
11	140	160	200
9	80	80	60
7	40	60	60
5	20	20	40
3	20	20	20

En la figura 26 se observa que la alcalinidad a mayor tiempo de ozonización aumenta, esto se debe a las pequeñas porciones de sulfato ferroso que quedaron en las muestras por el tratamiento previo que tuvo el agua. En estudios se ha demostrado que el mecanismo de oxidación por el reactivo de Fenton se debe a la generación de radicales hidroxilos, en una solución ácida por la descomposición catalítica del peróxido de hidrógeno (Lazcano, 2003), este mecanismo se lleva a cabo de la siguiente manera:



Los radicales hidroxilos pueden reaccionar con más Fe^{2+}



Al estar en medio alcalino hay más presencia de radicales hidroxilos, provocando la formación de más hierro (III). Este hierro (III) presente en el medio acuoso le da una coloración rojiza a la muestra del agua. (Figura 27).

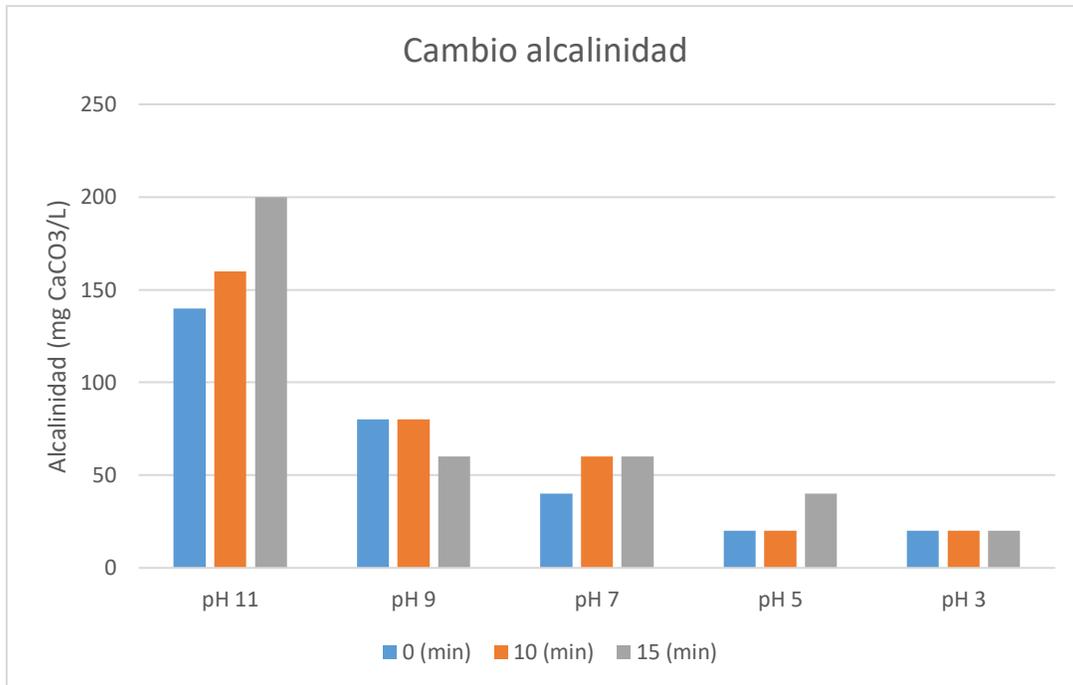


Figura 26. Gráfico de comparación del cambio de alcalinidad después de ozonización.

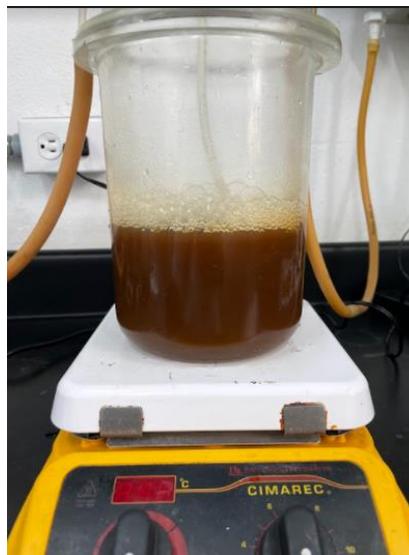


Figura 27. Coloración de la muestra en el proceso de ozonización.

4.2.3 Proceso de ozonización.

En la tabla 12 y 13 se muestra la eficiencia de transferencia de ozono en cada una de las corridas del experimento, esta no bajo del 80% teniendo el mínimo en pH 11, esto puede indicar que en la corrida final la agitación en el reactor no fue muy buena o hubo fallas en el difusor.

Tabla 12. Adsorción de ozono en 10 minutos.

pH	mL gastados de $Na_2S_2O_3$	Promedio	O_3 (g)	DOA	DOT	ET
3	0.2	0.2	0.00048	2.412	2.0904	86.67
	0.2					
	0.2					
5	0.2	0.2	0.00048	2.412	2.0904	86.67
	0.1					
	0.3					
7	0.1	0.1	0.00024	2.412	2.2512	93.33
	0.1					
	0.1					
9	0.1	0.13	0.00032	2.412	2.1976	91.11
	0.2					
	0.1					
11	0.1	0.13	0.00032	2.412	2.1976	91.11
	0.1					
	0.2					

Tabla 13. Adsorción de ozono a los 15 minutos.

pH	mL gastados $Na_2S_2O_3$	Promedio	O ₃ (g)	DOA	DOT	ET
3	0.2	0.2	0.00048	3.618	3.1356	86.67
	0.2					
	0.2					
5	0.2	0.2	0.00048	3.618	3.1356	86.67
	0.2					
	0.2					
7	0.1	0.1	0.00024	3.618	3.3768	93.33
	0.1					
	0.1					
9	0.3	0.3	0.00064	3.618	2.9748	82.22
	0.3					
	0.2					
11	0.3	0.3	0.0008	3.618	2.814	77.78
	0.3					
	0.4					

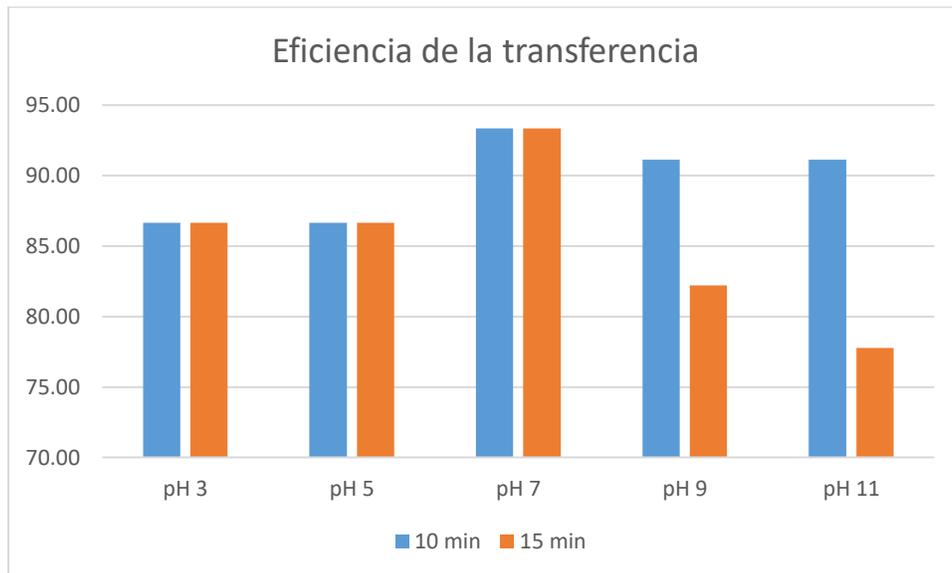


Figura 28. Comparación de la eficiencia de transferencia de ozono.

4.4 Huevos de helminto

Los géneros de huevos de helminto que se identificaron fueron *Hymenolepis nana* (ver figura 29), *Hymenolepis diminuta* (ver figura 30) y *Ascaris lumbricoide* (ver figura 31).



Figura 29. *Hymenolepis nana*



Figura 30. *Hymenolepis diminuta*

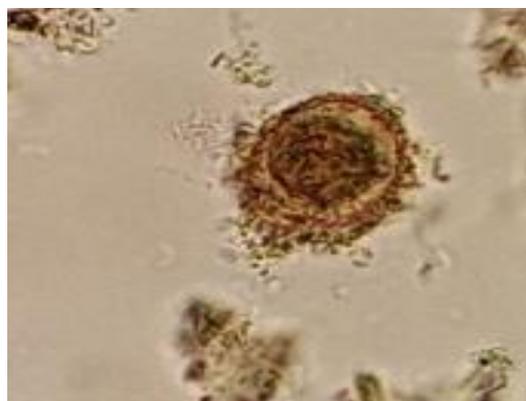


Figura 31. *Ascaris lumbricoide*

Los huevos no son eliminados totalmente, pero si se reducen a un 70% con 10 min de ozonización y un flujo de $3.6 \text{ mg } O_3/\text{min}$. Y en un 80% con 15 min a las mismas condiciones de flujo. Pero a diferencia de la muestra principal, los huevos de helminto todavía activados tuvieron una disminución en el tamaño de su pared celular después de la ozonización, esto es una de las características de la desinfección con ozono, el daño a la pared celular de los huevos, en algunas ocasiones la pared estaba destruida y el núcleo del huevo se encontraba dispersado a su alrededor. El ozono mata a la bacteria por medio de la ruptura de su membrana celular. Este proceso produce la dispersión del citoplasma celular en el agua: los lípidos insaturados son los componentes mayoritarios de la membrana citoplasmática que poseen las bacterias, el ozono ataca los enlaces olefínicos y da lugar a la formación de un ozónido. Esta acción comienza la destrucción de la capacidad de la célula de funcionar. Este ozónido tiene un alto potencial de oxidación, es inestable, y ejerce su propia acción de desinfección atacando enzimas, grupos sulfridrilo o aldehídos, liberando compuestos peroxiles, que son también desinfectantes, todo esto conduce como se ha dicho antes a la dispersión del citoplasma y por consiguiente a la muerte del microorganismo (Figura 32) (Hoigne y Bader, 1976).

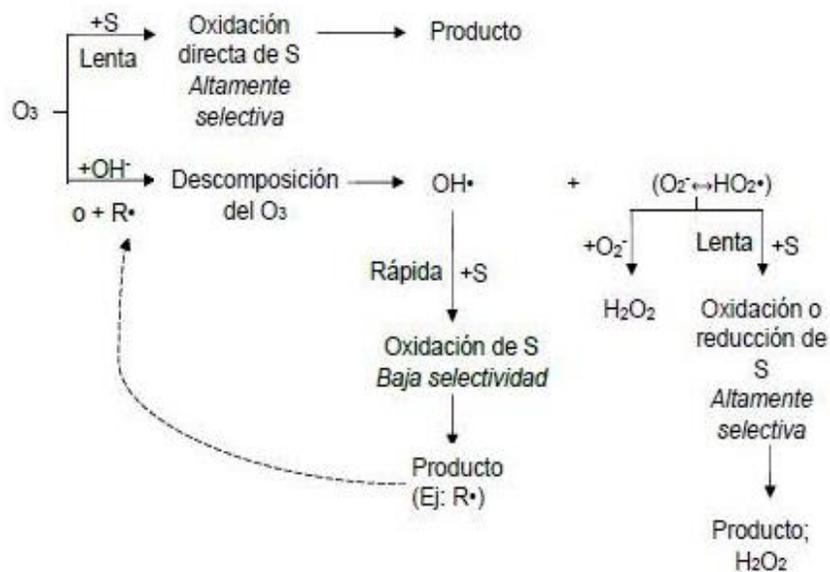


Figura 32. Reacciones del O_3 y sus subproductos cuando se descompone.
Fuente: Hoigne y Bader, 1976.

En la figura 33 se observa un huevo de helminto de *Ascaris lumbricoide* antes del tratamiento, la pared celular y el núcleo no se ven dañados, en la figura 34 el huevo de helminto de la misma especie se ve afectado por los tratamientos, la pared celular se ve reducida al igual que el núcleo.

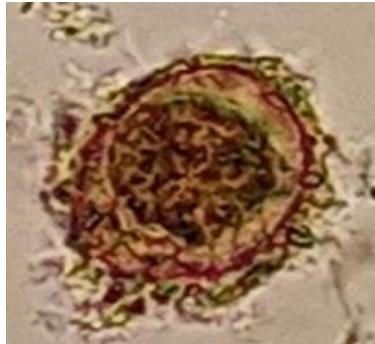


Figura 33. HH de *Ascaris lumbricoide* antes de tratamiento



Figura 34. HH de *Ascaris lumbricoide* después de tratamiento.

Para la determinación de viabilidad se encontró que los huevos cuyo núcleo estaba teñido con el colorante de azul de metileno mostraba inactividad, su pared celular había sido desgastada en el proceso de ozonización al punto de permitir el paso del colorante y lograr una tinción del contenido celular, mientras que con los huevos de helmintos viables solo se logró una tinción superficial de su pared celular esto también indica que la pared del huevo se dañó en el proceso de ozonización (Figura 35 y 36).



Figura 35. HH de *Ascaris lumbricoide* en fase inactiva.

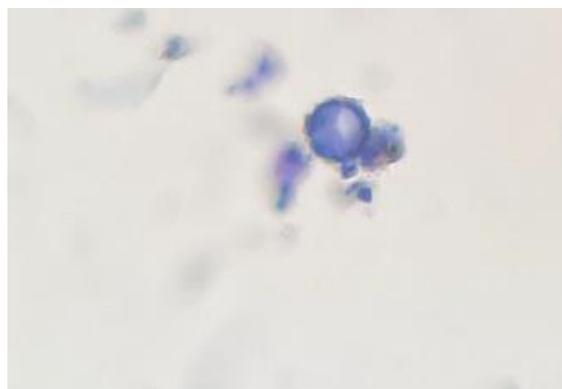


Figura 36. HH de *Ascaris lumbricoide* en fase viable.

En la Tabla 14 y 15 se observa la eficacia del ozono para inactivar los huevos de helminto a 10 min y 15 min de ozonización. En la mayoría de los casos se observa una disminución mayor a la mitad de HH/L.

Tabla 14. Conteo de huevos de helminto después de 10 minutos de ozonización.

Especie	pH 3			pH 5			pH 7			pH 9			pH 11		
	NDH	A	I	NDH	A	I									
<i>Hymenolepis nana</i>	5	1	4	10	3	7	6	3	3	4	1	3	4	1	3
<i>Hymenolepis diminuta</i>	7	2	5	7	2	5	7	2	5	6	0	4	4	1	3
<i>Ascaris lumbricoide</i>	18	6	12	19	7	12	19	6	13	17	6	11	18	4	14

NDH: Numero de huevos HH/L
 A: Activados HHV/L
 I: Inactivados HHI/L

Tabla 15. Conteo de huevos de helminto después de 15 minutos de ozonización.

Especie	pH 3			pH 5			pH 7			pH 9			pH 11		
	NDH	A	I	NDH	A	I									
<i>Hymenolepis nana</i>	5	2	3	10	3	7	5	1	4	6	2	4	7	3	4
<i>Hymenolepis diminuta</i>	6	1	5	4	1	3	2	0	2	6	1	5	7	2	5
<i>Ascaris lumbricoide</i>	16	3	13	18	5	13	14	4	10	18	4	14	15	4	11

NDH: Numero de huevos HH/L
 A: Activados HHV/L
 I: Inactivados HHI/L

Se obtuvo un porcentaje de remoción de *Hymenolepis nana* del 90% en pH 3, 9 y 11 y 70% a pH 5 y 7. Para *Hymenolepis diminuta* el mayor porcentaje de remoción se obtuvo a pH 11 con un 88% y el resto de las muestras se mantuvo constante en 75% de remoción. En *Ascaris lumbricoide* se logró un porcentaje del 78% a un pH 11 y en el resto de las muestras se obtuvo menos del 70% todo esto con 10 minutos de contacto con ozono (Tabla 16).

Tabla 16. Porcentaje de remoción a los 10 minutos de ozonización.

Genero	pH 3	pH 5	pH 7	pH 9	pH 11
<i>Hymenolepis nana</i>	90	70	70	90	90
<i>Hymenolepis diminuta</i>	75	75	75	75	87.50
<i>Ascaris lumbricoide</i>	66.67	61.11	66.67	66.67	77.78

En la figura 37 se observa una comparación gráfica de los mejores porcentajes de remoción a los 10 minutos los cuales fueron a pH 11 con 78% o más de remoción en cada una de las especies.

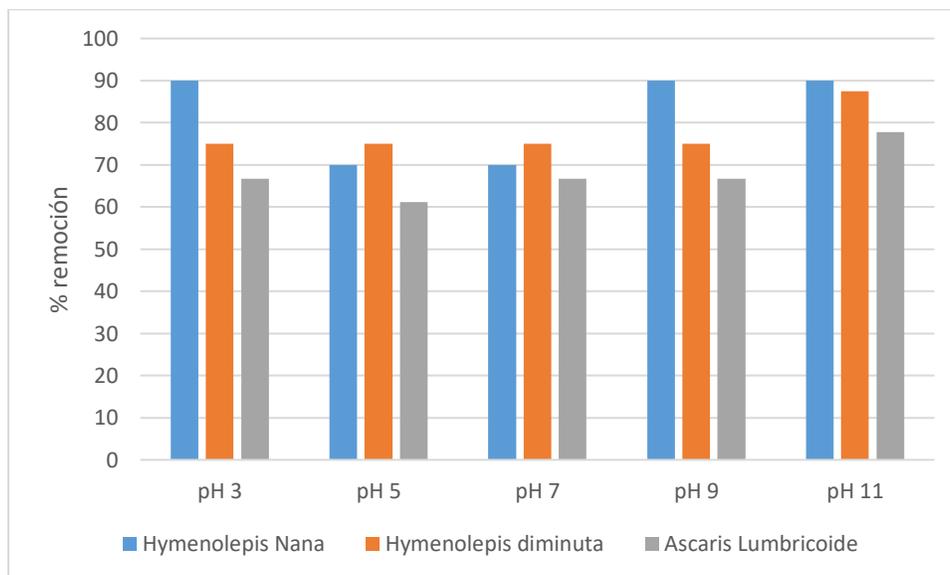


Figura 37. Gráfico de porcentaje de remoción de huevos de helminto con 10 minutos de ozonización.

Con 15 minutos de ozonización se obtuvieron resultados donde se logró un porcentaje de remoción del 88% en todos los pH's excepto en pH 11 donde se obtuvo un 75% de remoción se para el huevo de helminto *Hymenolepis diminuta*. Para el caso del huevo de helminto *Hymenolepis nana* se logró una mejor remoción a pH 3, 7 y 9 con 80% de remoción y *Ascaris lumbricoide* a pH 3 con más del 80% de remoción (Tabla 17). De acuerdo con la literatura un medio ácido causa la hidrólisis de proteínas, con aminoácidos como productos terminales (Hoigné and Bader, 1979), los resultados obtenidos son consistentes con la gran reactividad de los

aminoácidos formados por la hidrólisis, en medio ácido, de la cubierta proteica característica de los huevos de helminto, es por esto que a pH ácidos la remoción de huevos de helminto es mayor.

Tabla 17. Porcentaje de remoción a los 15 minutos de ozonización.

Genero	pH 3	pH 5	pH 7	pH 9	pH 11
<i>Hymenolepis nana</i>	80	70	80	80	70
<i>Hymenolepis diminuta</i>	87.5	87.5	87.5	87.5	75
<i>Ascaris lumbricoide</i>	83.33	72.22	77.78	77.78	77.78

En la figura 38 se observa una comparación grafica de los mejores porcentajes de remoción a los 15 minutos de ozonización los cuales fueron a un pH 3 obteniendo porcentajes de remoción mayores al 80%.

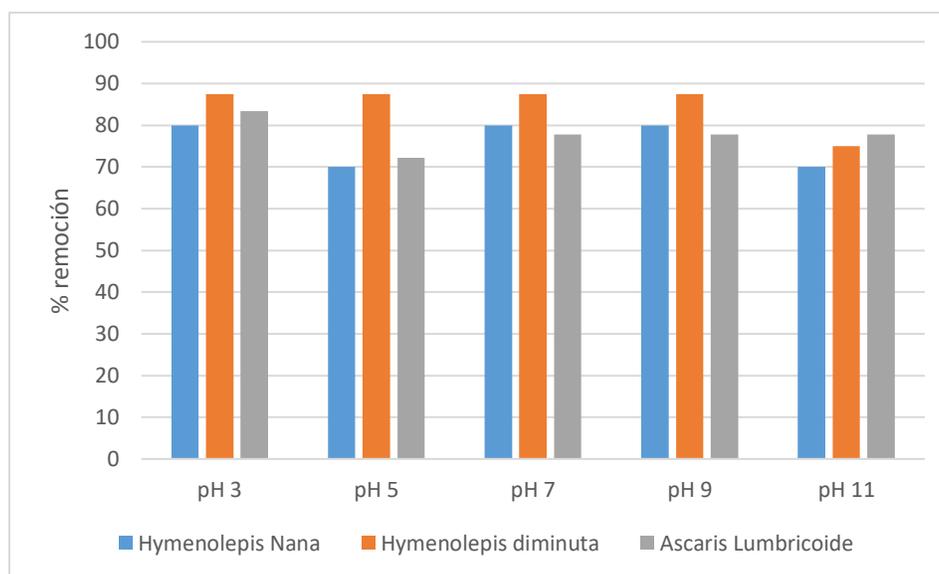


Figura 38. Gráfico de porcentaje de remoción de huevos de helminto con 15 minutos de ozonización.

Se logró encontrar las mejores condiciones de ozonización para una eficiente remoción de huevos de helminto las cuales fueron a pH 3, 15 minutos de ozonización y $3.6 \text{ mgO}_3/\text{min}$ de flujo (Tabla 18), ya que es la mejor tanto en parámetros fisicoquímicos como en la eliminación de huevos de helminto, se tiene una reducción en la demanda química de oxígeno del 86%, la alcalinidad no se vio afectada y se mantuvo en $20 \text{ mg CaCO}_3/\text{L}$, una eficiencia en la transferencia de ozono del 86% y una reducción del 80% del género *Hymenolepis Nana*, 87.5% para *Hymenolepis diminuta*, 84% en *Ascaris Lumbricoide*.

Tabla 18. Mejores condiciones de ozonización.

	pH	Tiempo de ozonización (min)	Flujo (mgO_3/min)
Mejores condiciones de remoción.	3	15	3.6

Por los resultados obtenidos, la desinfección con ozono es una buena opción como proceso posterior a procesos como lo son coagulación-floculación, método Fenton en un proceso de tratamiento de aguas residuales para obtener aguas tratadas de mayor calidad, que cumplan con la norma oficial mexicana NOM-01-SEMARNAT-1996 y hacer que un agua residual sea más productiva en el campo agrícola después de un tratamiento, sin causar efectos adversos al ambiente y a los seres vivos.

5. CONCLUSIONES

Los resultados experimentales muestran que la ozonización es una alternativa viable y prometedora para la eliminación de huevos de helminto, ya que de acuerdo con los resultados obtenidos se logró:

1.- Evaluar la eficiencia del ozono para la remoción de huevos de helminto en un agua residual tratada, el ozono tiene una alta eficiencia para disminuir el grosor de la pared celular de los huevos de helminto y en su mayoría de casos inactivarlos.

2.- El utilizar el proceso de ozonización permite reducir los parámetros fisicoquímicos en estudio (DQO y alcalinidad) en más del 80% determinando su alta eficiencia de remoción.

3.- Las mejores condiciones de trabajo para que el proceso de ozonización fuera eficiente en la inactivación de los huevos de helminto fueron de pH 3, 15 minutos de ozonización y 3.6 mgO_3/min de flujo.

4.- Con la determinación sobre el efecto de ozonización mediante la valoración estructural del huevo de helminto, la mayoría de los huevos presentaron ruptura en su pared celular y en algunos casos adelgazamiento de esta.

6. REFERENCIAS

1. Ambasta, B., 2012. *Chemistry for engineers*. 4ed. New Delhi: Laxmi Publications.
2. Ambientum, 2002. *Clasificación de aguas residuales industriales*. Ambientum, Issue Junio, pp. 1-3.
3. A.M.Paruch. 2010. *Possible Scearios of Environmental Transport, Occurrence and fate of Helminth Eggs in light Weight Aggregate Wastewater Treatment Systems*. Rev Environ Sci Biotechnol. Vol9. Pp 51-58.
4. Ayala Islas Alberto. 2007. *Efecto desinfectante del ozono sobre huevos de helmintos, bacterias y amibas en aguas residuales*. Tesis de Licenciatura. Facultad de Química. Universidad Nacional Autónoma de México. México. 57 páginas.
5. Brachhold, H., R. Muller, and P. Gunter, *Plasma Reactions, in Ullmann's Encyclopedia of industrial Chemistry*. 2005, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. P. 1-12.
6. Bryant, E. A., Fulton, G. P., Budd, G.L, 1992. *Desinfection alternatives for safe drinking wáter*. Van Nostrand Reinhold, New York. 518 pp
7. Campos Reales Pineda Alberto Eduardo. 2014. *Mejora de la calidad y desinfección con ozono del efluente de un tratamiento primario avanzado para reúso agrícola*. Tesis de Doctorado. Instituto de Ingeniería. Universidad Nacional Autónoma de México. México. 221 páginas.
8. Cantor, A. F., 2009. *Water Distribution System Monitoring: A Practical Approach for Evaluating Drinking Water Quality*. Florida: CRC Press Taylor & Francis Group.
9. Carlins J., J. and R. Clark, G., *Ozone generation by corona discharge, in Handbook of ozone technology and applications*, R. Rice, G. and A. Netzer, Editors. 1982, Butterworth-Heinemann: Boston. P. 41-75.
10. Castillo Campos Verónica. 2016. *Procesos de oxidación avanzada con ozono y peróxido de hidrógeno para inactivar huevos de helminto *Toxocara canis* y quistes del protozoario *Giardia lamblia**. Tesis de Maestría. División de ciencia básicas e ingeniería. Universidad Autónoma Metropolitana. México. 146 páginas.
11. Castro Ortiz, Lourdes Patricia. 2001. *Remoción de parásitos (Huevos de helminto) y patógenos (coliformes fecales) por digestión anaerobia de lodos en mesofilia y termofilia*. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias. UNAM. Pp 149.
12. Comett Ambriz, Miguel Angel. 1996. *Efectos de los parámetros fisicoquímicos del agua residual en los procesos de cloración y su relación con los residuales en el efluente final*. Tesis de Licenciatura. Facultad de Química. Universidad Nacional Autónoma de México. México. 59 páginas.

13. Comisión Nacional del Agua. (2000). *Desinfección para sistemas de agua potable saneamiento. Desinfección. Manual de diseño de agua potable alcantarillado y saneamiento.*
14. Comisión Nacional del Agua. (2007). *“Desinfección para sistemas de agua potable y saneamiento. Desinfección. Manual de agua potable alcantarillado y saneamiento”.*
15. Comisión Nacional del Agua (2009). *Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento: Alcantarillado sanitario.* México, Distrito Federal.
16. Crites, R. & Tchobanoglous, G., 2000. *Sistemas de manejo de aguas residuales para núcleos pequeños y descentralizados.* Santa Fe de Bogotá: Mc Graw Hill.
17. C.Diago, V. García, F. Salabarría. 2011. *Ascaris lumbricoides en el corazón de una gestante.* Revista Cubana de Obstetricia y Ginecología. Vol. 37. Num. 2, pp. 243-250.
18. Delgadillo, O., Camacho, A., Pérez, L. F. & Andrade, M., 2010. *Depuración de aguas residuales por medio de humedales.* 1 ed. Cochabamba-Bolivia: Serie Técnica.
19. Dupont, R. R., Theodore, L. & Ganesan, K., 2000. *Pollution Prevention: The waste Management Approach for the 21st Century.* Florida, CRC Press LLC Lewis Publishers.
20. Environmental Protection Agency (EPA). (2011). *Water Treatment Manual: Disinfection.*
21. García Acosta Armando, Ma. Orta de Velásquez Teresa, Martínez Zamudio Mónica. 2005. *Aplicación del agua residual tratada con ozono y tratamiento primario avanzado más ozono en el reúso agrícola.* Tesis de Licenciatura. Instituto de Ingeniería. Universidad Nacional Autónoma de México. México. 57 páginas.
22. Garza, A. V. 2000. *Reúso agrícola de las aguas residuales de Cd. Juarez, (Chih., México).* En el Valle de Juarez y su impacto en la salud pública. Salud Publica, 1, 3, Consultado en 2021, disponible en http://www.repyn.uanl.mx/3/ensayos/aguas_residuales.html#3
23. Geering, F. 1995. *Optimization of ozone plants for wáter Works in Switzerland.* The journal of the international Ozone Association. Vol 17. 1-14.
24. Gunten U., 2003^a. *Ozonation of drinking wáter: Part I. Oxidation kinetics and product formation.* Review. Water Research, 37 (7): 1443-1467.
25. Guzmán, A. A. (1994). *Salmonella: Análisis cualitativo y cuantitativo en lodos primarios provenientes de una planta de tratamiento de aguas residuales.* Tesis de licenciatura: Biología. Facultad de Ciencias. UNAM. Pp 83.
26. Hammeken Arana, A. M., Romero García, E. 2005. *Análisis y diseño de una planta de tratamiento de agua residual para el municipio de San Andrés Cholula.* Tesis Licenciatura. Ingeniería Civil. Departamento de Ingeniería Civil. Escuela de Ingeniería. Universidad de las Américas Puebla.

27. Hao Wang, Per Sikora, Carolin Rutgersson, Magnus Lindh, Tomas Brodin. 2018. *Differential removal of human pathogenic viruses from sewage by conventional and ozone treatments*. International Journal of Hygiene and Environmental Health. Vol 17. 10 páginas.
28. Henry, J. G. & Heinke, G. W., 1999. *Ingeniería Ambiental*. 2ed. México: Prentice Hall.
29. Ibáñez Cervantes, Gabriela, Ramírez Cortina Clementina Rita, Márquez Navarro Adrián. 2014. *Effect of ozone and peroxone on Helminth Hymenolepis nana eggs*. Science & Engineering, 35:201-207.
30. Jiménez, B. 2007. *Multimedia en internet. Helminths (worms) eggs control in wastewater and sludge*. International Symposium on New Directions in Urban Waste Management. UNESXO Paris Multimedia en internet. <http://www2.gtz.de/Dokumente/oe44/ecosan/en-helminths-eggs-control-wastewater-and-sludge-2007.pdf>. Sustentado por: Deusthegesallshaft for technische zusammenarbeit, (Consultado en mayo 2021)
31. Jimenez, B., Maya. C. 2007. *Multimedia en internet. Helminths and Sanitation Commucating Current. Research and Eductaional Topics and Trends in Applied Microbiology A*. Méndez-Vilas (Ed.). Multimedia en internet. <http://www.formatex-org/microbio/pdf/Pages60-71.pdf>. (Consultado en mayo de 2021).
32. Lage Filho, FA. (2010). *Ozone application in wáter sorces: Effects of operational parameters and wáter quality variables on ozone residual profiles and decay rates*. Brazilian Journal of Chemical Engineering. 27(4), 545-554.
33. Landa Fernández, Itzel Anahí. 2018. *Inactivación con ozono del nematodo Meloidogyne enterolobii en agua para riego agrícola*. Tesis de Licenciatura. Facultad de ingeniería. Universidad Nacional Autónoma de México. México. 96 páginas.
34. Langlais B., Reckhow D. A., Brink D. R., 1991. *Ozone in wáter treatment: application and engineering*. Lewis Publishers Inc., American Water Works Association Research Foundation: Compagnie Generale Des Eaux. Michingan, EE UU.
35. Lawrence, J. and Cappelli, F. (1977). *Ozone in dirnking wáter treatment: a review*. Science of The Total Environment, 7(2), 99-108.
36. Lazcano Arriola Luz María. 2003. *Evaluación de la biodegradabilidad de diferentes aguas residuales pretratadas con método fenton*. Tesis de Maestría. Facultad de ingeniería. Universidad Nacional Autónoma de México. 159 páginas.
37. López Vega Lidia Alicia. 2016. *Obtención de las constantes cinéticas y diseño de una cámara de contacto con ozono para la desinfección de Helicobacter pylori en solución*

- acuosa*. Tesis de Licenciatura. Facultad de Química. Universidad Nacional Autónoma de México. 89 páginas.
38. L.R.Ash, T. Orihel. 2010. *Atlas de parasitología humana*. Buenos Aires. Médica panamericana. 556 pp
 39. Manley, T.X. y Niegowsky, S.J. 1967 “*Kirk Othmer Encyclopedia of Chemical technology*”, Vol. 14, John Wiley and Sons, Inc., New York (2nd ed.), pp. 410-432.
 40. Ma. Rojas Valencia Neftalí, Ma. Orta de Velásquez Teresa, Vaca Mier Mabel. 2005. *Selección y aplicación del mejor método de desinfección para eliminar huevos de helmintos, amibas y bacterias patógenas en aguas residuales tratadas*. Tesis de Maestría. Instituto de Ingeniería. Universidad Autónoma Metropolitana. México. 19 páginas.
 41. Mendoza Roca, J. A., Montañes Sanjuan, M. T. & Palomares Gimeno, A. E., 2003. *Ciencia y tecnología del medio ambiente*. 1 ed. Valencia: Servicio de Publicaciones.
 42. Metcalf & Eddy, Tchobanoglous, G., Burton, F. L. & Stensel, H. D., 2002. *Wastewater Engineering: Treatment and Reuse*. 4 ed. USA: McGraw-Hill.
 43. M. Harrison, R., 2001. *Pollution: Causes, effects and control*. 4 ed. Cambridge: The Royal Society of Chemistry.
 44. M. Rojas, M. Orta de Velásquez, M.M Vaca, V. Franc. 2004. *Ozonation by-Products Issue from The Destruction of Microorganisms Present in Wastewaters Treated for Reuse- Water Science & Technology*, vol .50, núm. 2 pp. 187-193.
 45. Papale, K., García, M.N., Torres, M., 2008. *Anemia, deficiencias de hierro y de vitamina A y helmintiasis en una población rural del estado de Lara*. An. Venez. Nutr. 21, 70-76.
 46. Pérez García Julio César. 2015. *Tratamiento de aguas residuales industriales con procesos de oxidación avanzada: ozonación y oxidación anódica*. Tesis de Licenciatura. Facultad de Química. Universidad Nacional Autónoma de México. 80 páginas.
 47. Prado Martínez, Andrés Alejandro. 2017. *Diseño de un sistema de desinfección con ozono de agua para riego agrícola*. Tesis de Licenciatura. Facultad de Química. Universidad Nacional Autónoma de México. México. 98 páginas.
 48. Rigola Lapeña, M., 1990. *Tratamiento de aguas industriales: Aguas de proceso y residuales*. Barcelona: Alfaomega Marcombo.
 49. Riveros Olivares, Bruno. 2013. *Tratamiento de aguas residuales municipales en la Ciudad de México*. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional Autónoma de México. México. 150 páginas.
 50. Solsona, F y Méndez, JP. (2002). *Desinfección del agua*. PUB/O2.83. Lima, Perú: Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (OPS/CEPIS).

51. Spellman, F. R., 2013. *Handbiik of wáter and Wastewater Treatment Plant Operations*. 3ed. Florida: CRC Press of Taylor & Francis Group.
52. Tipa Mori, José Rickson Eloy. 2018. *Dosis óptima de ozono y H_2O_2 en oxidación avanzada para reducir la carga orgánica de efluentes básicos de la tintorería*. Santa Rosa 2018. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ingeniería Ambiental. Universidad César Vallejo. Perú. 77 páginas.
53. U.S. Enviromental Protection Agency (U.S. EPA). 1986. *Design Manual: Municipal Wastewater Disinfection*. EPA-625/1-86/021.
54. Vázquez, R.P. 1996 *¿Problemas con el Tratamiento de Aguas?: Prueba con el ozono*, Tesis de Licenciatura, Facultad de Química, UNAM.

7. ANEXO I. MEMORIA DE CÁLCULO

7.1 Curva Patrón para DQO.

Para la obtención de una curva patrón se utilizaron los datos de la tabla 18 obteniendo los resultados de la figura 40.

Tabla 19. Datos para la obtención de la curva patrón.

DQO (mg/L)	Absorbancia 1	Absorbancia 2	Absorbancia 3	Promedio
0	0.04	0.053	0.031	0.041
48	0.042	0.09	0.085	0.072
148	0.095	0.114	0.09	0.100
248	0.118	0.118	0.109	0.115
348	0.138	0.122	0.182	0.147
448	0.155	0.154	0.209	0.173
548	0.184	0.197	0.211	0.197
748	0.276	0.27	0.261	0.269
848	0.29	0.287	0.296	0.291

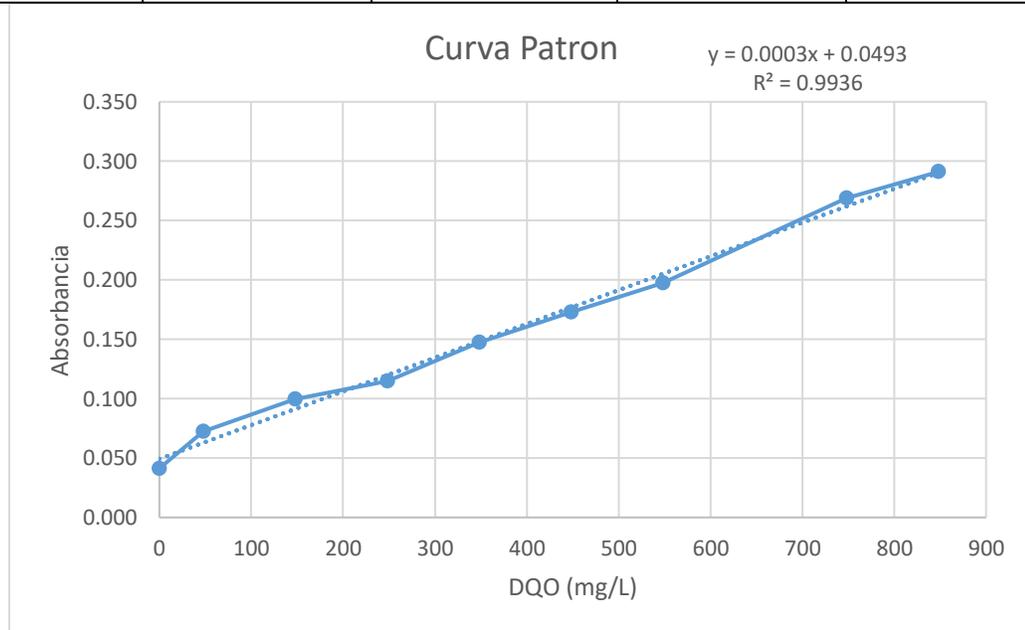


Figura 39. Curva Patrón.

Se obtuvo la ecuación de recta siguiente:

Fórmula 2

$$DQO \left(\frac{mg}{L} \right) = \frac{Abs - 0.0493}{0.0003 \left(\frac{L}{mg} \right)}$$

7.2 Determinación de DQO

Para la obtención de los cálculos de la demanda química de oxígeno se utilizó la Fórmula 2 para la obtención de estos.

Ejemplo:

$$DQO \left(\frac{mg}{L} \right) = \frac{Abs - 0.0493}{0.0003 \left(\frac{L}{mg} \right)}$$

$$DQO \left(\frac{mg}{L} \right) = \frac{0.124 - 0.0493}{0.0003 \left(\frac{L}{mg} \right)}$$

$$DQO \left(\frac{mg}{L} \right) = 250.11 \text{ mg/L}$$

Tabla 20. Obtención de la demanda química de oxígeno.

pH	Tiempo (min)					
	10		15		15	
	Absorbancia		Promedio		DQO (mg/L)	
11	0.123	0.109	0.124	0.097	250.11	157.89
	0.126	0.097				
	0.124	0.084				
9	0.048	0.09	0.069	0.092	142.33	66.78
	0.107	0.088				
	0.053	0.098				
7	0.053	0.105	0.050	0.107	192.33	2.33
	0.05	0.103				
	0.047	0.113				
5	0.061	0.047	0.061	0.079	100.11	40.11
	0.072	0.05				
	0.051	0.141				
3	0.056	0.073	0.060	0.064	50.11	36.78
	0.062	0.041				
	0.063	0.079				
Blanco	0	0.1	0.023	0.065	0.00	0.00
	0.022	0.038				
	0.047	0.058				

7.3 Transferencia de ozono.

Por el método yodométrico se conoció la producción de ozono y la salida de ozono del reactor, usando la fórmula 3 y dando como resultados los datos de la tabla 20.

$$\text{Formula 3} \quad \text{Producción} = \text{Vol. gastado} \times N \times E \times PM O_3$$

Dónde:

N Normalidad de la solución de tiosulfato de sodio

E Estequiometria de la reacción de titulación

PM Peso molecular O_3 (g)

Vol. gastado (L)

$$\text{Ejemplo:} \quad O_3 (g) = \text{Vol. gastado} \times N \times E \times PM O_3$$

$$O_3 (g) = 0.0002 L \times 0.1 \frac{\text{mol } Na_2S_2O_3}{L} \times 0.5 \frac{\text{mol } O_3}{\text{mol } Na_2S_2O_3} \times 48 \frac{g O_3}{\text{mol } O_3}$$

$$O_3 (g) = 0.0048 g O_3$$

Tabla 21. Datos obtención de Ozono residual

10 min				15 min			
pH	mL gastados $Na_2S_2O_3$	Promedio	O_3 (g)	pH	mL gastados $Na_2S_2O_3$	Promedio	O_3 (g)
3	0.2	0.2	0.00048	3	0.2	0.2	0.00048
	0.2						
	0.2						
5	0.2	0.2	0.00048	5	0.2	0.2	0.00048
	0.1						
	0.3						
7	0.1	0.1	0.00024	7	0.1	0.1	0.00024
	0.1						
	0.1						
9	0.1	0.13	0.00032	9	0.3	0.3	0.00064
	0.2						
	0.1						
11	0.1	0.13	0.00032	11	0.3	0.3	0.0008
	0.1						
	0.2						