



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE YUCATÁN

FACULTAD DE INGENIERÍA

UNIDAD DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

**“EFECTO DEL PROCESO FENTON SOBRE HUEVOS DE
HELMINTO”**

Tesis

PRESENTADO POR:

Luis Eduardo Vázquez Ovando

EN OPCIÓN AL GRADO DE

MAESTRO EN INGENIERÍA

OPCIÓN AMBIENTAL

MÉRIDA, YUCATÁN, MÉXICO

2018

Aunque este trabajo hubiere servido para el Examen de Grado y hubiera sido aprobado por el sínodo, sólo el autor es responsable de las doctrinas emitidas en él.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) y a la Universidad Autónoma de Yucatán, por su apoyo y patrocinio para la realización de este proyecto de tesis.

RESUMEN

Actualmente la mayoría de las plantas de tratamiento de aguas residuales en nuestro país utilizan como único medio de desinfección al cloro que, a pesar de tener buenos resultados, presenta algunos inconvenientes como la nula efectividad ante algunos microorganismos patógenos como lo son los huevos de helminto, organismos clasificados en un nivel alto de riesgo para la salud de acuerdo con la Organización Mundial de la Salud. Debido al incremento en la reutilización de las aguas residuales y lodos residuales para uso agrícola se ha optado por buscar alternativas para la eliminación de estos organismos, encontrándose a los procesos avanzados de oxidación como una de las tecnologías más viables para su aplicación. Existe evidencia que muestra resultados favorables con el proceso Fenton para la remoción de organismos patógenos en aguas sintéticas, sin embargo, no se encontraron referencias de su aplicación en helmintos de lodos reales por lo que la presente investigación utilizó lodos residuales reales para evaluar la inactivación de Huevos de Helminto por efecto de la oxidación con un proceso de Fenton Homogéneo.

Las muestras utilizadas se obtuvieron de lodos sedimentados en un reactor anaerobio y se concentraron de acuerdo con lo descrito por la NOM-002-SEMARNAT-2002, se utilizó un diseño experimental de dos vías de efectos fijos considerado el pH y $[H_2O_2]$ como fuentes de variación y a la eficiencia de inactivación de huevos de helmintos como variable respuesta. Para determinar la viabilidad de los huevos se utilizó azul de metileno al 0.1%. Los resultados mostraron una remoción del 88.4 % con una dosis de 60 mg/L de H_2O_2 , pH de 4 y una relación Fe/ H_2O_2 mg/mg de 12 por lo que este método mostro ser viable para la remoción de huevos de áscaris lumbricoides en lodos residuales.

ABSTRACT

Currently most of the wastewater treatment plants in Mexico use chlorine as the only means of disinfection that, despite of having good results, has some drawbacks such as the lack of effectiveness against some pathogenic microorganisms such as helminth eggs. These organisms are classified at a high level of health risk according to the World Health Organization. Due to the increase in the reuse of residual waters and sewage sludge for agricultural use, it has been decided to look for alternatives for the elimination of these organisms, being the advanced oxidation processes one of the most viable technologies for its application.

There is evidence that shows favorable results with the Fenton process for the removal of pathogenic organisms in synthetic waters, however, there were no references of their application in real waters. The present investigation used real residual sludge to evaluate the inactivation of eggs from helminth by oxidation effect with a Homogeneous Fenton process

The samples used were obtained from sedimented sludge in an anaerobic reactor and were concentrated according to the NOM-002-SEMARNAT-2002, an experimental two-way fixed-effect design considering the pH and $[H_2O_2]$ were used as sources of variation and the efficiency of inactivation of helminth eggs as variable response. To determine the viability of the eggs, 0.1 % methylene blue was used. The results showed a removal of 88.4 % with a dose of 60 mg/L of H_2O_2 , pH of 4 and an Fe/ H_2O_2 mg/mg ratio of 12, so this method proved viable for the removal of eggs from *ascaris lumbricoides* in residual sludge.

ÍNDICE GENERAL

I. INTRODUCCIÓN	1
II. OBJETIVOS	2
2.1 Objetivo general	2
2.1 Objetivos específicos	2
III. MARCO TEÓRICO	3
3.1 Tratamiento de aguas residuales	3
3.2 Desinfección de efluentes de aguas residuales	5
3.3 Parásitos en aguas residuales	7
3.4 Huevos de Helminto	10
3.5 <i>Ascaris lumbricoides</i>	16
3.6 Métodos de desinfección	18
3.7 Procesos de oxidación avanzada.....	19
3.8 Proceso Fenton.....	22
3.8.1 Proceso Fenton Heterogéneo	23
3.8.2 Fenton Homogéneo	24
IV. METODOLOGÍA	25
4.1 Obtención de la muestra	25
4.2 Separación y concentración de huevos de Helminto	26
4.3 Determinación de la viabilidad de huevos de helminto	28
4.4 Ensayos de inactivación de huevos de helminto.....	29
4.5 Tratamiento estadístico	33
V. RESULTADOS Y DISCUSIONES	35
5.1 Identificación de Huevos de Helminto	35
5.2 Viabilidad de huevos de <i>Ascaris lumbricoides</i>	36
5.3 Efecto del proceso Fenton sobre la viabilidad de huevos de <i>Áscaris lumbricoides</i>	37
5.4 Análisis estadístico de los tratamientos	40
5.5 Determinación del tiempo óptimo	44
VI. CONCLUSIONES	46
VI. RECOMENDACIONES	47

VI. REFERENCIAS	48
Anexo 1. Valores obtenidos	53

Lista de tablas

Tabla 1. Caracterización y composición de lodos	4
Tabla 2. Persistencia y resistencia de algunos microorganismos patógenos.....	6
Tabla 3. Principales patógenos encontrados en aguas residuales domésticas	8
Tabla 4. Excreción de microorganismos patógenos, supervivencia y dosis infectiva	9
Tabla 5. Principales enfermedades transmitidas por helmintos.	12
Tabla 6. Límites máximos permisibles para patógenos y parásitos en lodos y biosólidos.	15
Tabla 7. Efecto de los procesos de tratamiento de agua residual en huevos de parásitos y quistes.....	18
Tabla 8. Diversos POA´s aplicados para inactivación de huevos de helminto	20
Tabla 9. Dosis propuestas por cada parámetro de interés.....	30
Tabla 10. Matriz de tratamientos.....	30
Tabla 11. Cuantificación de Áscaris lumbricoides	37
Tabla 12.- Resultados del Análisis de Varianza para porcentaje de remoción.....	41
Tabla 13.- Pruebas de Múltiple Rangos para porcentaje de remoción por tratamiento	42
Tabla 14.- Análisis de Varianza con Carencia de Ajuste (porcentaje de de remoción vs pH)	43
Tabla 15.- Pruebas de Múltiple Rangos para porcentaje de remoción por tratamiento	44

Lista de figuras

Figura 1.- Clasificación de Helmintos y ejemplos	11
Figura 2.- Ejemplo de helmintos: A: Nematodos; B: Cestodo; C: Trematodo.....	12
Figura 3.- Ciclo de vida <i>Ascaris lumbricoides</i>	17
Figura 4.- Tipos de procesos Fenton.....	23
Figura 5.- Metodología de la investigación	25
Figura 6.- Cama de secado de lodos (planta de tratamiento de aguas residuales del fraccionamiento “Las Américas”	26
Figura 7.- Lavado de lodos con solución Tween 80 0.1%	27
Figura 8.- A: Retiro de sobrenadante por medio de bomba de vacío B: Filtración de muestra para retirar partículas mayores a 170 milimicras.	28
Figura 9.- Huevo de áscaris lumbricoides viable, a la derecha materia orgánica teñida.	28
Figura 10.- Microscopio óptico Zeiss Axiostar Plus.	29
Figura 11.- Equipo de prueba de jarras	31
Figura 12.- Pruebas de oxidación.....	32
Figura 13.- Ajuste de pH para los tratamientos de oxidación	32
Figura 14.- Cinética de reacción probando dosis óptima	33
Figura 15.- Huevos de <i>Áscaris lumbricoides</i> fértiles no embrionados	35
Figura 16.- A: huevo perteneciente a <i>Necator americanus</i> B: Huevo <i>hymenoleptis nana</i> C: Huevo <i>hymenoleptis diminuta</i>	36
Figura 17.- Huevos de <i>Áscaris lumbricoides</i> viable (no teñido) y no viable (teñido).	37
Figura 18.- Porcentaje de remoción de los diferentes tratamientos	39
Figura 19.- Huevos de Helminto inactivados (teñidos).	40
Figura 20.- Grafico de probabilidad normal	41
Figura 21.- Grafico de medias de grupos homogéneos	42
Figura 22.- Cinética de reacción.....	44

I. INTRODUCCIÓN

En nuestro país el objetivo principal que buscan las plantas de tratamiento de aguas residuales es la de remover de manera eficaz los contaminantes orgánicos presentes en el agua tratada, sin embargo, no se han diseñado específicamente para eliminar organismos patógenos.

Actualmente la mayoría de las plantas utilizan como único medio de desinfección al cloro que, a pesar de tener buenos resultados, presenta algunos inconvenientes como la creación, en presencia de materia orgánica, de subproductos denominados trihalometanos que pueden ocasionar un daño a la salud humana o la nula efectividad ante algunos microorganismos patógenos como lo son los huevos de helminto, organismos clasificados en un nivel alto de riesgo para la salud de acuerdo a la Organización Mundial de la Salud.

Aunado a esto una gran parte de lodos residuales que salen de los trenes de tratamiento son utilizados en suelos agrícolas por su alto contenido en nutrientes, sin embargo, pueden representar un foco de infección debido a que numerosas plantas de tratamiento en México no cuentan con una desinfección adecuada de lodos.

Ante este panorama han surgido tecnologías alternativas para la eliminación de sustancias tóxicas y organismos patógenos como lo son los procesos avanzados de oxidación, los cuales pueden aplicarse para la remoción de contaminantes en pequeñas y medianas escalas. Una de estas tecnologías es el proceso Fenton que garantiza habitualmente una elevada degradación de la carga orgánica contaminante, consiguiendo un efluente con una menor toxicidad.

Existe evidencia que muestra resultados favorables con este sistema para la remoción de organismos patógenos en aguas sintéticas, sin embargo, no se encontraron referencias de su aplicación en huevos de helmintos de lodos reales por lo que la presente investigación pretende identificar los tiempos de contacto, dosis de peróxido y pH óptimos para la remoción de huevos de helmintos presentes en las aguas residuales provenientes del municipio de Mérida, Yucatán.

II. OBJETIVOS

2.1 Objetivo general

- Evaluar la inactivación de huevos de helminto por efecto de la oxidación con un proceso de Fenton homogéneo.

2.1 Objetivos específicos:

- Determinar la dosis óptima de peróxido de hidrógeno para la inactivación de huevos de helminto en el proceso Fenton.
- Determinar el pH óptimo para la inactivación de huevos de helminto en el proceso Fenton.
- Determinar el tiempo de contacto óptimo para el proceso Fenton.

III. MARCO TEÓRICO

3.1 Tratamiento de aguas residuales

Diversos países están experimentando actualmente problemas de déficits hídricos. Esto se debe al incremento en la demanda del agua frente a recursos que no se renuevan al mismo ritmo con el que son explotados y a las periódicas sequías que se intensifican debido al cambio climático (Winpenny *et al.*, 2013).

La Organización de las Naciones Unidas en su informe con motivo del Día Internacional del Agua 2015, menciona que para el año 2050 aumentará la necesidad de agua en un 55 por ciento por lo que la reutilización de agua será primordial. México ya enfrenta actualmente graves problemas de disponibilidad, desperdicio y contaminación de sus fuentes hídricas por lo que es necesario comenzar a buscar medidas efectivas para su reutilización y cuidado. En nuestro país más del 80 por ciento de las aguas residuales no se canalizan adecuadamente ni se tratan (CONAGUA, 2015).

En virtud de que el ciclo natural del agua tiene gran capacidad de purificación, la sociedad ha hecho que los cuerpos de agua superficiales sean el vertedero habitual en el que se arrojan los residuos producidos por las diferentes actividades económicas. Con el paso del tiempo se aprendió a replicar estos procesos de depuración en sistemas de tratamiento de aguas residuales con buenos resultados lo que provocó que esta práctica se haya extendido en diversos países.

Actualmente el tratamiento de las aguas residuales está enfocado no solamente en reducir el potencial impacto ambiental y sanitario que conllevaría verter el agua sin tratamiento alguno sino también en poder reutilizar el líquido. Con el avance en materia de agua potable y alcantarillado, esta práctica ha cobrado mayor importancia alrededor del planeta.

Por otra parte, el Informe de las Naciones Unidas sobre los recursos hídricos en el mundo del 2015 menciona que el sector agrícola representa aproximadamente el

70 % de todas las extracciones de agua dulce a nivel mundial, y más del 90 % en la mayoría de los países menos desarrollados del mundo.

A nivel mundial, solo una pequeña parte de las aguas residuales tratadas se usa actualmente en agricultura, pero esta práctica está aumentando en muchos países y, en algunas regiones, una alta proporción de agua regenerada se utiliza para el riego. (Winpenny *et al.*, 2013).

El tratamiento del agua también trae como consecuencia la formación de lodos residuales donde generalmente quedan contenidos los contaminantes (Oropeza 2006) esto gracias a los procesos de sedimentación, absorción y adsorción.

De igual forma a las aguas residuales los lodos residuales pueden disponerse siempre y cuando sean adecuados a los receptores en los que se depositarán. Entre las diferentes opciones en las que se le puede dar destino final a los lodos, la reutilización, aplicándolos al suelo como mejorador, es una de las alternativas más adecuadas (Oropeza, 2006).

Tabla 1. Caracterización y composición de lodos (Hernández, 1992)

PARÁMETROS	LODOS PRIMARIOS	LODOS SECUNDARIOS (MEZCLA)	LODOS DIGERIDOS
pH	5.5-6.5	6.5-7.5	6.8-7.6
Contenido de agua (%)	92-96	97.5-98	94-97
Bacterias patógenas (NMP/100mL)	10 ³ -10 ⁵	100-1000	10-100

En el caso de México en particular se ha presentado en los últimos años un incremento en la cobertura de agua potable y alcantarillado, sin embargo, el

tratamiento de las aguas usadas por la población del país no ha crecido en la misma proporción. CONAGUA estima que, al cierre de 2014, la cobertura nacional de agua potable fue de 92.4 % y con respecto al alcantarillado del 91 %, sin embargo, tan sólo el 48.7 % de las aguas recolectados en los sistemas de alcantarillado municipales son tratadas (Lahera, 2010; CONAGUA, 2015).

Para el tratamiento de aguas residuales a nivel nacional, se contaba con un total de 2,337 plantas municipales en operación, en ellas se trataba un caudal promedio de 111.3 metros cúbicos por segundo, es decir el 48.7% de los 228.7 metros cúbicos por segundo recolectados en los sistemas de alcantarillado municipales (CONAGUA, 2015).

Con relación a los datos presentados por el Sistema Nacional de Información del Agua en su reporte del 2015, el estado de Yucatán contaba con un total de 29 plantas en operación, estas plantas trataban un caudal de 130 litros por segundo, lo que representa que solo el 3.3% de lo producido en el estado es tratado (CONAGUA, 2015).

Aunque el objetivo del tratamiento de aguas residuales es la “conversión del agua residual en un efluente final aceptable a las condiciones del ambiente (estético, organoléptico y de salud pública)” en México generalmente no se cumplen en su totalidad las características que debe de cumplir un agua correctamente tratada, uno de los ejemplos más importantes de estas deficiencias puede ser vista en los métodos finales de desinfección. En su mayoría las plantas de tratamiento utilizan al cloro como desinfectante para la eliminación de patógenos, y a pesar de tener bondades como la eliminación de un amplio espectro de organismos y bajo costo esta sustancia no logra eliminar algunos patógenos de importancia (Rojas, 2002a).

3.2 Desinfección de efluentes de aguas residuales

En el tratamiento de las aguas residuales, la desinfección es la etapa más importante desde el punto de vista de la salud pública, ya que es la última etapa donde los patógenos pueden ser eliminados (Rojas, 2002b).

La desinfección es utilizada para reducir principalmente el contenido de bacterias, virus y quistes amebianos en las aguas residuales tratadas. Esta consiste en la destrucción selectiva de los organismos causantes de enfermedades. Generalmente la desinfección suele efectuarse con la ayuda de agentes químicos, físicos, mecánicos y radiación. El más utilizado en nuestro país es la desinfección química con cloro (Rojas, 2002a).

Sin embargo, la cloración como método de desinfección no es capaz de inactivar a ciertos parásitos debido a la resistencia de los mismos a este tipo de tratamiento, mientras que otros métodos como la pasteurización o incluso el hervir el agua pueden resultar en algunos casos imprácticos para la población y con riesgo de recontaminación (Leal, 2006).

Aunado a esto en el año de 1974, investigadores de la EPA (Environment Protection Agency) llegaron a la conclusión de que el cloro reacciona con ciertos compuestos orgánicos formando trihalometanos, compuestos que pueden ser cancerígenos para animales de laboratorio, surgiendo el temor de que pudieran ser potencialmente cancerígenos para los humanos (Metcalf y Eddy, 2005).

Entre los microorganismos que no son afectados por el proceso de desinfección con cloro se encuentran algunas especies de huevos de helminto (Tabla 2), patógenos que causan interés por su alta tasa de incidencia como responsables de trastornos a la salud (May, 2012).

Tabla 2. Persistencia y resistencia de algunos microorganismos patógenos (Rojas R. 2002^a)

ORGANISMO	PERSISTENCIA	RESISTENCIA AL CLORO
Virus		
Adenovirus	Desconocida	Moderada
Enterovirus	Prolongada	Moderada
Hepatitis A	Desconocida	Moderada
Norwalk	Desconocida	Desconocida
Rotavirus	Desconocida	Desconocida

ORGANISMO	PERSISTENCIA	RESISTENCIA AL CLORO
Bacterias		
<i>Salmonella typhi</i>		Baja
<i>Escherichia coli</i>		Baja
<i>Campylobacter j.</i>	Moderada	Baja
Otras salmonellas	Prolongada	Baja
<i>Shigella sp</i>	Breve	Baja
<i>Vibrio cholerae</i>	Prolongada	Baja
<i>Yersinia enterocolíca</i>		Moderado
<i>Pseudomona a.</i>		Baja
<i>Aeromonas spp</i>	Pueden multiplicarse	Baja
Protozoos		
<i>Entamoeba hystolítica</i>	Moderada	Alta
<i>Cryptosporidium</i>	Moderada	Alta
	Prolongada	Alta
Helmintos		
Nematodos		
<i>Ascaris lumbricoides</i>	Prolongada	Alta
<i>Ancylostoma duodenale</i>	Prolongada	Alta
<i>Necator americanus</i>	Prolongada	Alta
<i>Enterobius vermicularis</i>	Prolongada	Alta
<i>Trichuris trichiura</i>	Prolongada	Alta
Cestodos		
<i>Taenia saginata</i>	Prolongada	Alta
<i>Taenia solium</i>	Prolongada	Alta
<i>Hymenolepis nana</i>	Prolongada	Alta

3.3 Parásitos en aguas residuales

Las aguas residuales contienen los productos de excreción provenientes de las actividades fisiológicas de las personas y tienen como principal característica la presencia de una carga orgánica elevada. Esta sirve como materia prima para el crecimiento microbiano.

Las aguas negras, especialmente las de origen doméstico, albergan una amplia variedad de agentes patógenos como bacterias, virus y otros organismos (Tabla 3)

que pueden resultar de gran interés debido a su capacidad para afectar la salud pública.

Los organismos patógenos que se encuentran en las aguas residuales pueden proceder de desechos humanos que estén infectados o que sean portadores de una determinada enfermedad, estos microorganismos a su vez pueden migrar a otros portadores si existe un contacto de las aguas contaminadas con algún hospedero, resultando un peligro para la salud pública (Tabla 4).

Tabla 3. Principales patógenos encontrados en aguas residuales domésticas (González y Rubalcaba 2011)

ORGANISMOS PATÓGENO	ENFERMEDAD
Helmintos	
<i>Ascaris lumbricoides</i>	Ascariasis
<i>Ancylostoma duodenale</i>	Anquilostomiasis
<i>Ancylostoma spp.</i>	Larva migrante cutánea
<i>Necator americanus</i>	Necatoriasis
<i>Strongyloides stercoralis</i>	Estrongiloidiasis
<i>Trichuris trichiura</i>	Trichuriasis
<i>Taenia spp</i>	Teniasis
<i>Enterobius vermicularis</i>	Enterobiasis
<i>Echinococcus granulosus</i>	Hidatidosis
<i>Schistosoma spp.</i>	Schistosomiasis
<i>Faciola hepática, F. Gigantica</i>	Faciolosis
Protozoos	
<i>Giardia lamblia</i>	Giardiasis
<i>Entamoeba histolytica</i>	Disentería amebiana
<i>Balantidium coli</i>	Balantidiosis
<i>Cryptosporidium parvum</i>	Criptosporidiasis
<i>Cyclospora cayetanensis</i>	Trastornos intestinales
<i>Microsporidia</i>	Diarrea
Bacterias	
<i>Salmonella typhi</i>	Fiebre tifoidea
<i>Salmonella spp.</i>	Salmonelosis
<i>Shigella spp.</i>	Shigellosis
<i>Campylobacter jejuni</i>	Gastroenteritis
<i>Helicobacter pylori</i>	Gastroenteritis, úlcera gástrica
<i>Escherichia coli</i>	Gastroenteritis
<i>Vibrio cholerae</i>	Cólera
<i>Legionella pneumophila</i>	Legionelosis/Fiebre de Pontiac
<i>Yersinia enterocolitica</i>	Yersiniosis
<i>Leptospira spp.</i>	Leptospirosis

ORGANISMOS PATÓGENO	ENFERMEDAD
Virus	
Virus de la hepatitis A y E	Hepatitis infecciosa
Rotavirus	Gastroenteritis
Enterovirus	Gastroenteritis/Meningitis
Parvovirus	Gastroenteritis
Adenovirus	Infecciones respiratorias

Los agentes patógenos y parásitos transmitidos por el agua más comunes son los que poseen una infectividad alta y o pueden proliferar en el agua o poseen una resistencia alta fuera del organismo (OMS, 2006).

Los virus y las formas latentes de los parásitos (quistes y huevos) no pueden multiplicarse en el agua, pero pueden conservar su viabilidad sobreviviendo varios meses fuera del hospedero.

Tabla 4. Excreción de microorganismos patógenos, supervivencia y dosis infectiva (Rojas 2002a)

ORGANISMO	NÚMERO/GRAMO DE HECES	SUPERVIVENCIA (DÍAS)	DOSIS EFECTIVA PARA INFECTAR
Bacterias			
<i>E. coli toxígena</i>	1x10 ⁸	90	1x10 ³ - 1x10 ⁸
<i>Salmonella typhi</i>	1x10 ⁸	60	1x10 ² – 1x10 ⁶
<i>Salmonella spp</i>	1x10 ⁸	90	1x10 ⁴ – 1x10 ⁶
<i>Shigella</i>	1x10 ⁶	30	1x10 ²
<i>Campylobacter</i>	1x10 ⁷	7	1x10 ⁶
<i>Vibrio cholerae</i>	1x10 ⁶	30	1x10 ⁸
<i>Yersinia</i>	1x10 ⁵	90	1x10 ⁹
<i>Enterocolítica</i>	--	90	1x10 ⁸
<i>Aeromonas</i>	--	--	3
<i>Leptospira</i>			
Virus			
Enterovirus	1x10 ⁷	90	1 – 1x10 ³

ORGANISMO	NÚMERO/GRAMO DE HECES	SUPERVIVENCIA (DÍAS)	DOSIS EFECTIVA PARA INFECTAR
Hepatitis	1x10 ⁶	5 – 90	1 – 1x10 ³
Rotavirus	1x10 ⁶	5 – 27	1 – 1x10 ³
Norwalk	--	5 - 27	1 – 1x10 ³
Protozoarios			
<i>Entamoeba</i>	1x10 ⁷	25	10 – 100
<i>Giardia lamblia</i>	1x10 ⁵	25	1 – 10
<i>Cryptosporidium</i>	1x10 ²	--	1 – 30
<i>Balantidium coli</i>	--	20	25 – 100
Helmintos			
<i>Echinococcus</i>	--	--	--
<i>Ascaris lumbricoides</i>	1x10 ⁴	12 meses	2 – 5
<i>Taenia saginata</i>	1x10 ⁴	9 meses	1 - 10
<i>Trichuris trichiura</i>	1x10 ³	9 meses	1 – 10
	1x10 ²	3 meses	1 – 10

3.4 Huevos de helminto

Los huevos de helminto son un término designado a un amplio grupo de organismos que incluye a todos los gusanos parásitos (de humanos, animales y vegetales) y de vida libre, con forma y tamaños variados. Sus ciclos de vida comprenden la producción de huevos o larvas, infecciosas o no, y la alternancia compleja de estadios que incluye hasta tres huéspedes diferentes (NMX-AA-113-SCFI-2012).

Estos pueden dividirse en dos grupos (figuras 1 y 2), los platelmintos o helmintos planos (cestodos y trematodos) y los nematelmintos o helmintos redondos (nemátodos). Se reproducen sexualmente formando huevos fértiles, que dan lugar a larvas de diversa morfología y tamaño variable, algunas de las cuales pueden presentar varios estadios muy diferenciados entre sí en uno o diversos huéspedes

intermediarios hasta transformarse en adultos (Simón *et al.*, 2010).

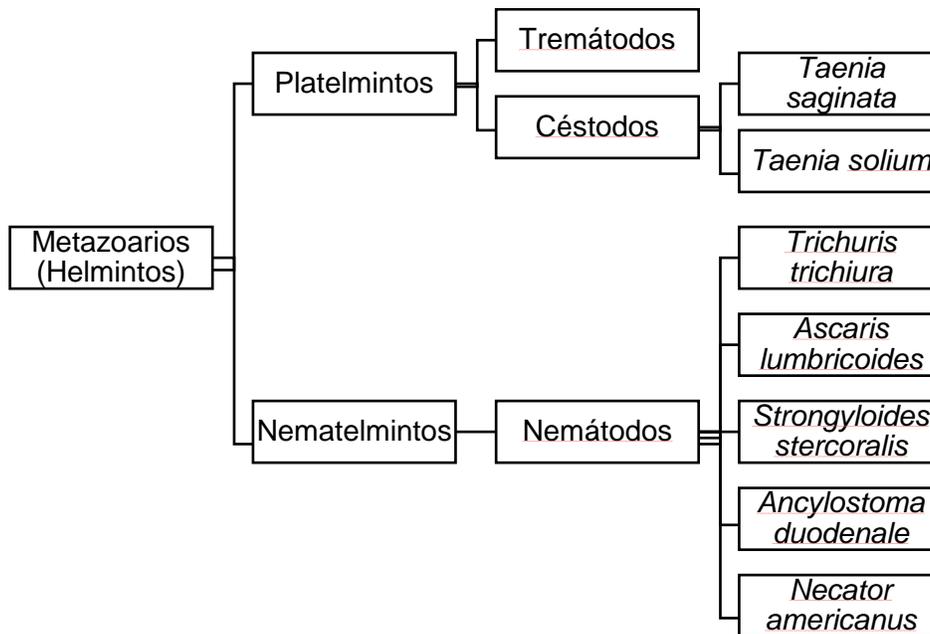


Figura 1.- Clasificación de Helmintos y ejemplos (López *et al.*, 2006)

Los helmintos representan un elevado riesgo a la salud humana debido a que sus diversos estadios infecciosos son altamente persistentes en el agua residual y lodos. Así, el agua constituye un vehículo directo o indirecto de diseminación, aun cuando se encuentren en bajas concentraciones, dando lugar a enfermedades gastrointestinales, sobre todo cuando ésta se emplea para el riego de cultivos (NMX-AA-113-SCFI-2012).

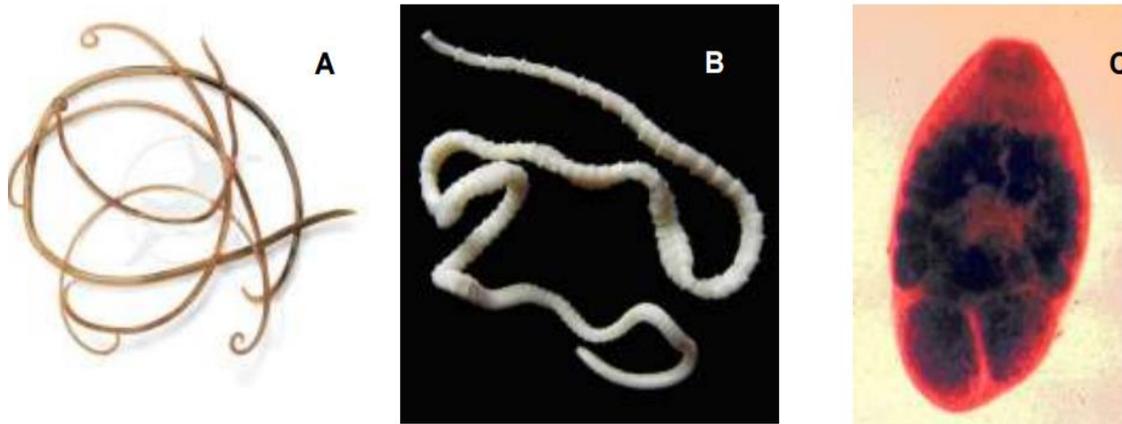


Figura 2.- Ejemplo de helmintos: A: Nematodos; B: Cestodo; C: Trematodo. (Fuente: Simón et al. 2010)

Estos parásitos provocan en el ser humano enfermedades denominadas “helmintiasis” en las que una parte del cuerpo está infestada de gusanos y en donde puede existir deterioro físico, nutricional y cognitivo, además estos parásitos pueden llegar a perforar el intestino pudiendo causar la muerte.

Generalmente afectan a las comunidades más pobres y desfavorecidas. Son transmitidas por los huevecillos de los parásitos eliminados con las heces fecales de las personas infestadas (Leal, 2006; OMS, 2016).

La siguiente tabla muestra las helmintiasis más comunes en el ser humano.

Tabla 5. Principales enfermedades transmitidas por helmintos. fuente: (Hernández, 2009)

ORGANISMO PATÓGENO	ENFERMEDAD	SÍNTOMAS
Nemátodos		
<i>Ascaris lumbricoides</i>	Ascariosis	Disturbios abdominales y nutricionales, dolor abdominal, vomito,

ORGANISMO PATÓGENO	ENFERMEDAD	SÍNTOMAS
		inquietud y síntomas neurrológicos.
<i>Ascaris suum</i>	Ascariosis	Abscesos de tos, dolor en el pecho y fiebre.
<i>Toxocara canis</i>	Larva migrans, visceral y cutánea	Fiebre, disconformidad abdominal, dolores musculares, síntomas neurrológicos.
<i>Trichuris trichiura</i>	Trichuriasis	Dolor abdominal, erosión de la mucosa intestinal y pérdida de peso.
<i>Strongyloides stercoralis</i>	Estrongiloidiasis	Dermatitis, neumonitis eosinofílica, diarrea con moco y nauseas.
<i>Necator americanus</i>	Necatoriasis	Diarrea con sangre, anemia.
<i>Ancylostoma duodenale</i>	Ancylostomiosis	Cuadros diarreicos con sangrado.
<i>Enterobius vermicularis</i>	Enterobiasis	Prurito y escoriaciones en región perianal y vulvar (mujeres).

Tremátodos

ORGANISMO PATÓGENO	ENFERMEDAD	SÍNTOMAS
<i>Schistosoma spp</i>	Schistosomiasis	Diarrea sanguinolenta y obstrucción intestinal.
Céstodos		
<i>Hymenolepis nana</i>	Hymenolepiasis	Enteritis, diarrea, dolor abdominal y vomito.
<i>Taenia solium</i> Y <i>T. saginata</i>	Teniasis, Cisticercosis	Nerviosismo, insomnio, anorexia, disturbios digestivos, dolor abdominal y diarrea.

La organización mundial de la salud clasifica a los parásitos presentes en las aguas residuales por orden de riesgo para la salud, colocando en un nivel alto de riesgo a los Helmintos (*Ascaris*, *Trichuris*, *Anquilostomas* y *Taenia*), en un nivel medio a las bacterias y protozoarios y por último en un nivel bajo a los virus (WHO, 2004).

Los primeros lugares en infección son ocupados por los tres nemátodos intestinales transmitidos por el suelo, *Ascaris lumbricoides*, *Trichuris trichiura* y uncinaria (*Ancylostoma duodenale*, *Necator americanus*), que, según las estimaciones, infectan alrededor del 1.4; 1 y 1.2 mil millones de personas, respectivamente, lo que representa alrededor del 25 % de la población mundial (Marilyn, 2008), siendo el *Ascaris lumbricoides* de mayor interés.

Debido a su importancia, en México, la Norma Oficial Mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002 establece las especificaciones y límites máximos permisibles de huevos de helminto que pueden ser dispuestos en los lodos o biosólidos que buscan ser reutilizados (Tabla 6).

Tabla 6. Límites máximos permisibles para patógenos y parásitos en lodos y biosólidos

CLASE	INDICADOR		
	BIOLÓGICO DE CONTAMINACIÓN	PATÓGENOS	PARÁSITOS
	COLIFORMES FECALES NMP/G EN BASE SECA	<i>SALMONELLA</i> SPP. NMP/G EN BASE SECA	HUEVOS DE HELMINTO/G EN BASE SECA
A	Menor de 1,000	Menor de 3	Menor de 1 (Huevo de helminto viable)
B	Menor de 1,000	Menor de 3	Menor de 10
C	Menor de 2,000,000	Menor de 300	Menor de 35

La clasificación otorgada por la norma establece tres tipos de lodos a aprovechar siendo el tipo A el de uso urbano con contacto directo con público durante su aplicación, tipo B para uso urbano sin contacto público directo y el tipo c el utilizado para usos forestales o como mejorador de suelo.

Con respecto a los límites máximos permisibles para descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales contenidos en la Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996 toma a los huevos de helminto como indicador y establece como límite máximo permisible para descargas vertidas a suelo (uso en riego agrícola) el valor de un huevo de helminto por litro para riego restringido, y de cinco huevos por litro para riego no restringido.

3.5 *Ascaris lumbricoides*

El *Ascaris lumbricoides* es transmitido por la ingesta del mismo en su fase de huevo, estos huevos eclosionan y las larvas que surgen penetran el intestino y migran a través de los vasos porta hasta el hígado y los pulmones donde son expulsados por la tos y deglutidos, un proceso que dura varias semanas. Después del regreso de los gusanos al intestino, maduran para dar paso a gusanos adultos, machos y hembras, que miden normalmente unos 20 y 30 cm de longitud (Marilyn, 2008).

Los gusanos adultos viven entre 1 y 2 años, en este periodo las hembras adultas producen una gran cantidad de huevos (fluctuando desde 10 hasta 220 huevos por gusano hembra por gramo de heces), mismos que son enviados al exterior con ayuda de la materia fecal. Los huevos fértiles pueden caer a la tierra; si ésta es húmeda y sombreada, en 2 a 8 semanas se forman en el interior de los huevos las larvas con capacidad infectante para repetir nuevamente el ciclo (Marilyn, 2008; Botero y Zuluaga, 2001).

La migración de los nematodos hacia el hígado y los pulmones provoca reacciones inflamatorias y de hipersensibilidad en los pulmones, como neumonía y eosinofilia pulmonar. Otras patologías producidas por los gusanos adultos incluyen manifestaciones de malabsorción, obstrucción intestinal e invasión del conducto biliar o del apéndice, dando lugar a pancreatitis aguda y apendicitis, por otro lado, se presume que podría tener relación con problemas de memoria (Marilyn, 2008).

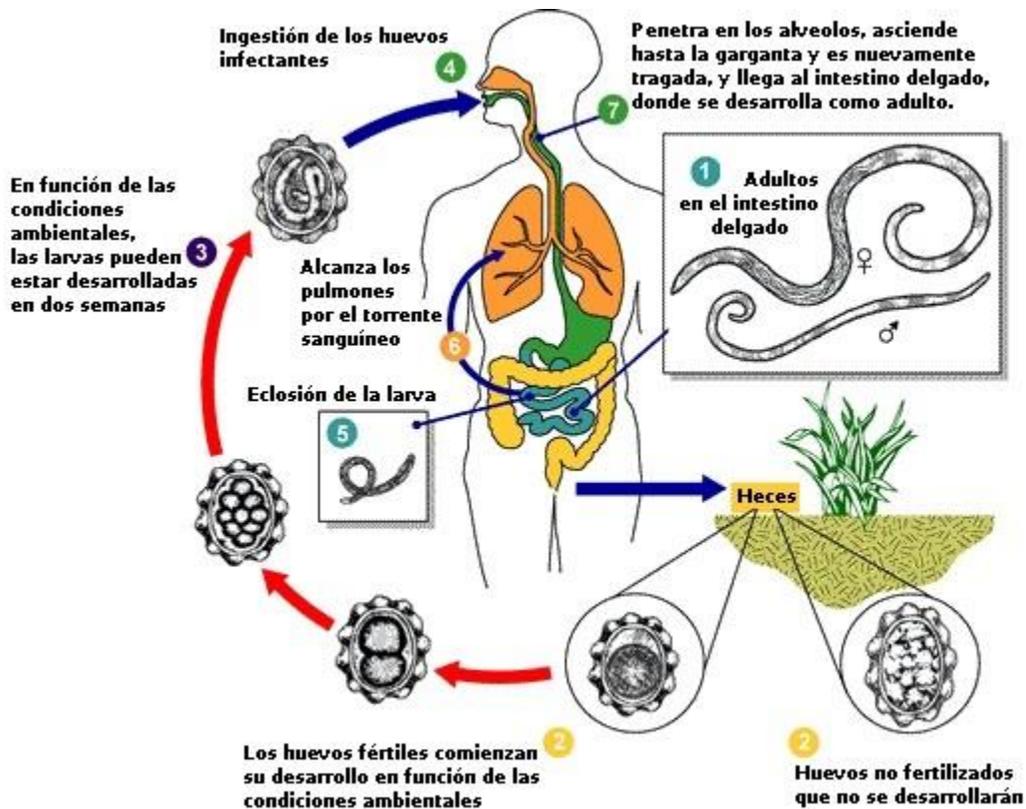


Figura 3.- Ciclo de vida *Ascaris lumbricoides* (Fuente: <https://sites.google.com/site/diplomadoparasitos/>)

Estos microorganismos han desarrollado estrategias y estructuras especializadas con las que pueden sobrevivir en el ambiente por largos periodos de tiempo antes de parasitar a su huésped. Estas estructuras son de tal resistencia que le permiten soportar periodos largos en condiciones adversas de humedad, pH extremos, depredación, temperatura, e insolación (Hernández, 2009).

La persistencia de sus huevos en aguas residuales y la resistencia de éstos a los métodos tradicionales de desinfección es motivo de preocupación lo que ha conducido a la búsqueda de nuevas alternativas de tratamiento. Algunas de ellas involucran reacciones químicas y radiación ultravioleta; lo que se denomina procesos avanzados de oxidación (Escobar, 2014).

El boletín epidemiológico mexicano número 38 del año en curso, reporta, al cierre del año 2015, 36,866 casos de Ascariasis; de los cuales 4,624 pertenecen al estado de Yucatán siendo superado solamente por Guerrero y Veracruz (DGE, 2016).

3.6 Métodos de desinfección

Los procesos de remoción y de inactivación de huevos de helminto se dividen en dos grandes grupos: biológicos y fisicoquímicos.

Dentro del rubro de los procesos de remoción biológicos se pueden encontrar las lagunas de estabilización, los humedales artificiales y los reactores UASB. Por parte del grupo de los procesos fisicoquímicos se pueden encontrar la filtración rápida, embalses, coagulación-floculación, radiación con luz UV. Aunado a estos procesos destacan los procesos no convencionales, como los procesos de oxidación avanzada como el ozono y el reactivo Fenton.

Por otra parte, los diferentes procesos de tratamiento de agua residuales existentes tienen diferentes efectos sobre los huevos de helminto como se puede ver en la tabla 7.

Tabla 7. Efecto de los procesos de tratamiento de agua residual en huevos de parásitos y quistes. Fuente: (WHO 2004).

OPERACIÓN UNITARIA	EFICACIA
Proceso de remoción (no destruye al parásito)	
Clarificación (primaria y secundaria)	80 % de remoción de <i>Ascaris</i> , 54 % de remoción de <i>Entamoeba</i> ; la remoción depende de las condiciones de operación.
Flotación	>95 % de remoción depende del estado de los huevos y las condiciones de operación.
Tanques imhoff	97 % de remoción.

OPERACIÓN UNITARIA	EFICACIA
Biofiltros	Remoción del 38 %, promueve el desarrollo de los huevos.
Filtración	Retiene el 99 % de huevos.
Procesos de estabilización (afecta el estado de los huevos)	
Lodos activados	Promueve el desarrollo de los huevos.
Aeración extendida	Promueve el desarrollo de los huevos.
Procesos de desinfección	
Cloración	No tiene efecto.

3.7 Procesos de oxidación avanzada

A pesar de que el cloro es uno de los productos químicos más socorridos para la desinfección de efluentes de plantas de tratamiento de aguas residuales por su efecto para inactivar bacterias y virus no es completamente efectivo para la eliminación de huevos de helminto (Rojas *et al.*, 2008).

Debido a lo anterior se comenzó a plantear nuevos métodos para la desinfección con la capacidad de inactivar huevos de helminto y patógenos; es así entonces como nacen los procesos de oxidación avanzada (POA) (Escobar, 2014).

Las POA se basan en procesos fisicoquímicos capaces de producir cambios profundos en la estructura química de los contaminantes debido a que involucran la generación y uso de especies transitorias con un elevado poder oxidante como el radical hidroxilo (HO•). Este radical puede ser generado por varios medios y es altamente efectivo para la oxidación de materia orgánica, en especial aquella que no es biodegradable. Algunas POA recurren, además, a reductores químicos que

permiten realizar transformaciones en contaminantes tóxicos poco susceptibles a la oxidación, como iones metálicos o compuestos halogenados (Forero *et al.*, 2005).

Algunos ejemplos de la aplicación de estos métodos de oxidación para la degradación de contaminantes y patógenos son:

- La fotocatalisis homogénea (que involucra una reacción química y absorción de luz, con ayuda de un catalizador, para acelerar la reacción; la fotocatalisis solar con TiO₂ (dióxido de titanio) que es el resultado de una reacción causada con luz solar y un catalizador TiO₂, elementos que darán como resultado la eliminación de HH).
- Procesos basados en el empleo Ozono
- Procesos basados en el empleo de H₂O₂ (UV/H₂O₂, Fenton, Fenton-like, Foto-Fenton) (Escobar, 2014).

Existen estudios que demuestran la efectividad de estos procesos para la inactivación de huevos de Helminthos en aguas residuales (Tabla 8), por ejemplo, Rojas *et al.* (2004) eliminaron en un 96.7 % huevos de *Ascaris suum* empleando ozono con una hora de contacto, en tanto que Leal *et al.* (2006) encontraron que la viabilidad de éstos se redujo a cero con seis horas de tratamiento usando fotocatalisis solar con TiO₂, por otro lado Nájera (2013) evaluó la eficiencia de remoción de *Ascaris lumbricoides* a través de la reacción Fenton quien obtuvo un 93 % de remoción de huevos.

Tabla 8. Diversos POA's aplicados para inactivación de huevos de helminto (Morales, 2013).

PROCESO	PORCENTAJE DE INACTIVACIÓN	INFLUENTE (*HAL/L)	CONDICIONES DE OPERACIÓN	REFERENCIA
Fenton clásico	66.83	2,000	pH = 3, 50 min H ₂ O ₂ = 40 mg/L relación másica Fe ³⁺ / H ₂ O ₂ = 10	(Ramírez <i>et al.</i> , 2006a)
Fenton clásico	87.02	2,000	pH = 3, 50 min H ₂ O ₂ = 40 mg/L relación másica Fe ³⁺ / H ₂ O ₂ = 2	(Solís, 2009)

PROCESO	PORCENTAJE DE INACTIVACIÓN	INFLUENTE (*HAL/L)	CONDICIONES DE OPERACIÓN	REFERENCIA
FotoFenton	75	2,000	pH = 3, 32.5 min, H ₂ O ₂ = 22.5 mg/L relación másica Fe ³⁺ / H ₂ O ₂ = 6	(Ramírez <i>et al.</i> , 2006b)
FotoFenton	87.93	2,000	pH = 3, 120 min Fe ³⁺ / H ₂ O ₂	(Solís, 2009)
FotoFenton	79	100	pH = 3, 60 min Co ²⁺ / PMS	(García <i>et al.</i> , 2008)
FotoFenton	36	100	550 W/m ² (290 y 800 nm) tiempo = 6 h	(García <i>et al.</i> , 2008)
Tratamiento solar (SODIS)	93.94	3,000,000	550 W/m ² (290 y 800 nm) tiempo = 6 h, 250 µM riboflamina	(Heaselgrave y Kilvington, 2011)
SODIS-R	87	3,000,000	pH = H ₂ O ₂ = relación másica Fe ³⁺ / H ₂ O ₂ =	Heaselgrave y Kilvington, 2011)
Solar Fenton en fase homogénea	49	No reportado	pH = 3, 90 min, H ₂ O ₂ = 2380 mg/L relación másica Fe ³⁺ / H ₂ O ₂ = 0.12	(Guisar <i>et al.</i> , 2007)
Solar Fenton en fase heterogénea	84	312.5	pH = 3, 120 min, H ₂ O ₂ = 9520 mg/L, relación másica Fe ³⁺ / H ₂ O ₂ = 0.058	(Bandala <i>et al.</i> 2011)

*Huevos de *Ascaris Lumbricoides*

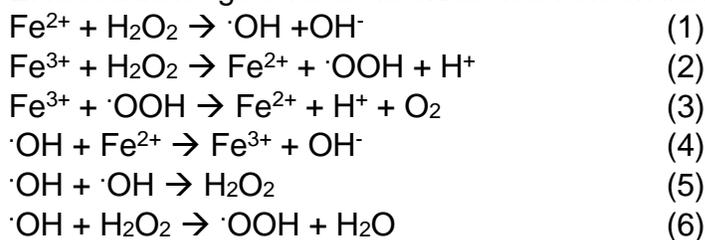
3.8 Proceso Fenton

Se denomina reacción Fenton al proceso de oxidación avanzada donde se trata la carga contaminante con una combinación de peróxido de hidrógeno y sulfato ferroso (reactivo Fenton), a presión atmosférica y temperatura entre 20 °C y 40 °C y en condiciones ácidas (Martínez y López, 2001).

A la aplicación de este proceso oxidante se le pueden atribuir las siguientes características.

- Un cambio estructural de los compuestos orgánicos que posibilitan un eventual tratamiento biológico posterior
- Una oxidación parcial que redundará en una disminución de la toxicidad del efluente.
- Una oxidación total de los compuestos orgánicos en sustancias inocuas
- Remoción de olor y de color.

El mecanismo general de la oxidación Fenton incluye los siguientes pasos:



Los principales parámetros que afectan al proceso Fenton son el pH de la solución, la cantidad de iones ferrosos, concentraciones de H₂O₂, concentración inicial del contaminante y la presencia de otros iones (Ramírez *et al.*, 2007; Stasinakis, 2008).

Investigaciones recientes han permitido comprobar que el agente responsable de la oxidación es el radical hidroxilo ($\cdot\text{OH}$). Este radical libre es en extremo reactivo y se forma por la descomposición catalítica del peróxido de hidrógeno en un medio ácido (Kitis *et al.*, 1999; Yoon *et al.*, 2001; Lu *et al.*, 2001).

La reacción de Fenton puede clasificarse de acuerdo a la fase en que se lleva a cabo, es decir, puede ser en fase homogénea o en fase heterogénea

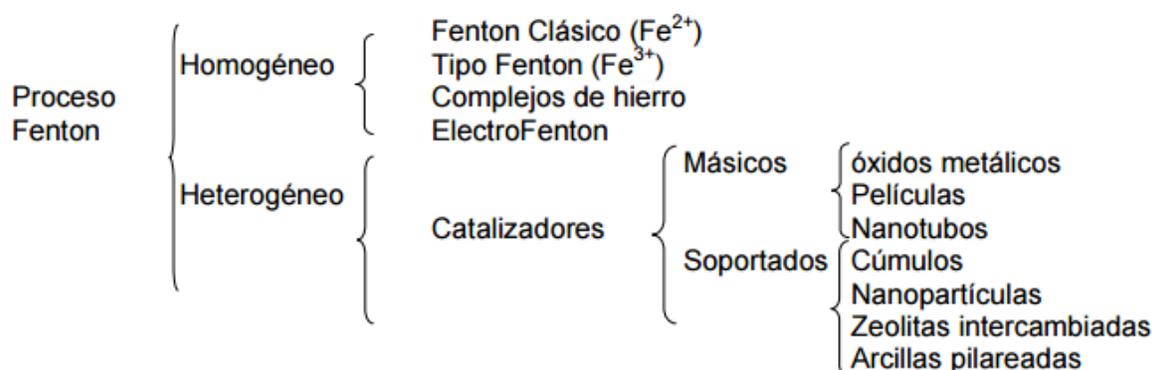


Figura 4.- Tipos de procesos Fenton (Fuente: Morales 2013).

Los radicales hidroxilo pueden oxidar compuestos orgánicos por abstracción de protones produciendo radicales orgánicos, los cuales son altamente reactivos y pueden ser oxidados más adelante (Walling y Kato, 1971, Vargas *et al.*, 2007).

3.8.1 Proceso Fenton Heterogéneo

El proceso Fenton heterogéneo se caracteriza por producir radicales hidroxilo a partir de la descomposición catalítica de un agente oxidante (peróxido de hidrógeno) y emplea un inmovilizador de hierro (catalizador) en una gran variedad de soportes sólidos. Un buen catalizador heterogéneo debe de cumplir con dos requisitos:

- Alta actividad catalítica
- Baja disolución de Fe (Daud y Hameed, 2011).

Generalmente procesos de oxidación avanzada usan catalizadores heterogéneos para llevar a cabo la degradación de los compuestos. En comparación con los procesos homogéneos, tales catalizadores heterogéneos tienen la ventaja de separar el hierro con mayor facilidad.

Además de las ventajas que ofrece el proceso Fenton heterogéneo se ha estudiado que el catalizador puede ser fácilmente recuperado después de la reacción y permanecer activo durante operaciones sucesivas (Hassan y Hameed, 2011).

Aunado a estas características el proceso Fenton Heterogeneo tiene la particularidad de no producir lodos de difícil remoción como en el caso de los procesos homogéneos, además de ser un proceso relativamente sencillo de operar sin requerir mano de obra especializada.

3.8.2 Fenton homogéneo:

El reactivo clásico de Fenton es un proceso de oxidación avanzada (POA) que genera especies reactivas de oxígeno (ROS por sus siglas en inglés “Reactive Oxygen Species”), utilizando una mezcla de dos soluciones, una de un metal reductor de transición (Fe^{2+} , Cu^+ , Co^{2+} , Mn^{3+}) y otra de peróxido de hidrógeno. Comúnmente se utilizan, por su costo, disponibilidad y mayor eficiencia las sales de Fe (II), en particular el sulfato ferroso (Pignatello *et al.*, 2006).

Por otra parte, las ventajas que presenta este método son:

- El hierro es abundante y no tóxico
- El peróxido de hidrógeno es relativamente fácil de manejar y ambientalmente inocuo
- Útil para oxidar contaminantes refractarios que son recalcitrantes a otros métodos de tratamiento, principalmente de tipo convencional biológico.
- Sirve para tratar contaminantes a muy baja concentración.
- No se forman subproductos de oxidación, o se forman en bajas concentraciones. El reactivo de Fenton es ideal para evitar la formación de subproductos tóxicos generados en procesos de desinfección, con desinfectantes como el cloro como es el caso de los trihalometanos.
- Generalmente, mejora las propiedades organolépticas del agua tratada.
- Consumen, en la mayoría de sus casos, significativamente menos energía que otros métodos, por ejemplo, la incineración (Domènech *et al.*, 2001).

IV. METODOLOGÍA

La metodología empleada se describe en el siguiente diagrama.

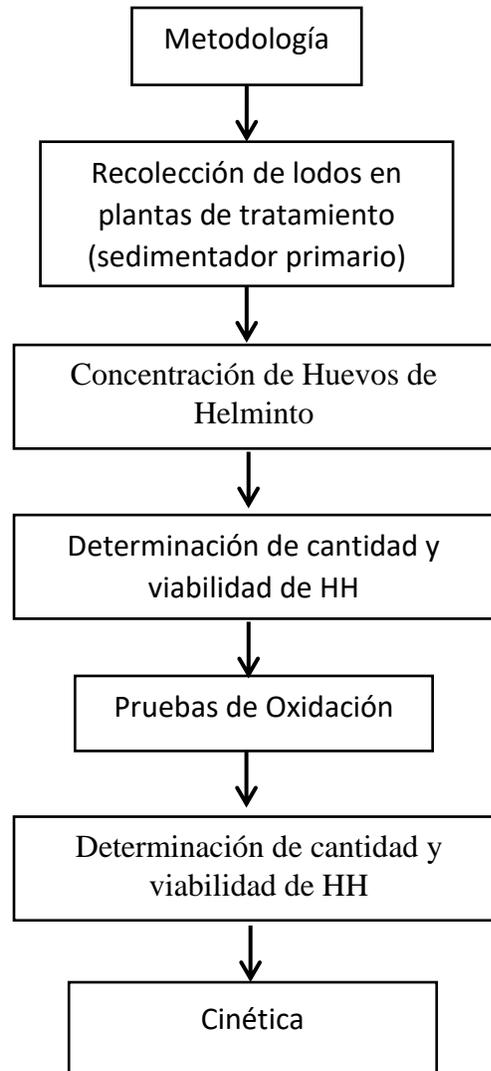


Figura 5.- Metodología de la investigación

4.1 Obtención de la muestra

Las muestras utilizadas para realizar la concentración de los huevos de helminto se obtuvieron de los lodos sedimentados en el reactor anaerobio de la planta de tratamientos del fraccionamiento "Las Américas", y "Fovissste Pensiones" ubicados

en el municipio de Mérida Yucatán. Los lodos fueron tomados cuando se recircularon a la cama de secado.

Para la obtención de la muestra se tomaron 20 litros de lodos en un bidón de plástico previamente desinfectado con cloro y rotulado con la fecha del muestreo.

El transporte de la muestra fue realizado sin refrigeración debido a la cercanía de la planta al laboratorio utilizado para el estudio. El almacenamiento de la muestra se realizó en un cuarto frío a 4° C.



Figura 6.- Cama de secado de lodos (planta de tratamiento de aguas residuales del fraccionamiento “Las Américas”)

4.2 Separación y concentración de huevos de helminto

Para la obtención de los huevos de helmintos presentes en las aguas residuales se utilizó el método descrito en el anexo V de la Norma Oficial Mexicana NOM-002-SEMARNAT-2002, este se basa en el principio de separación de huevos de helmintos por medio de lavados continuos combinados con diferentes etapas de filtración y flotación, así como su concentración.

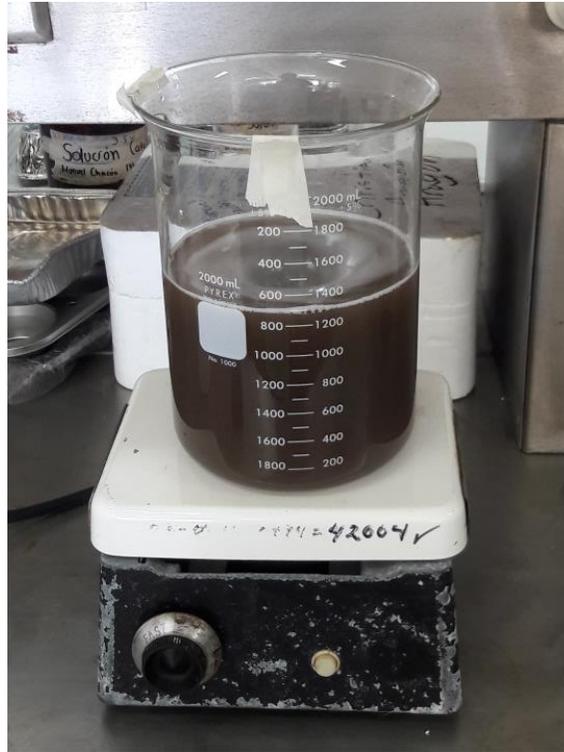


Figura 7.- Lavado de lodos con solución Tween 80 0.1 % v/v

Las condiciones de centrifugado fueron de 1980 rpm durante 5 minutos en todos los procesos, por otro lado, el tamiz utilizado para la separación de la materia orgánica fue de 170 milimicras de poro. El retiro de sobrenadante se realizó por medio de una bomba de vacío para evitar la pérdida de muestra. El procedimiento se repitió hasta obtener una concentración aproximada de 104,280 huevos de *Ascaris lumbricoides* en 50 mililitros. La muestra madre fue almacenada a 4 °C para no afectar su viabilidad.

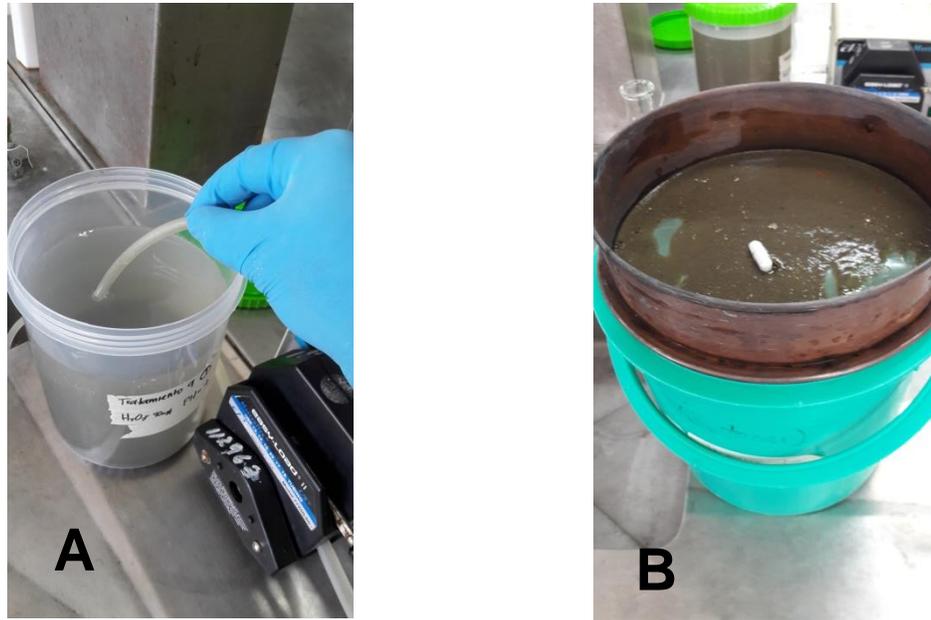


Figura 8.- A: Retiro de sobrenadante por medio de bomba de vacío B: Filtración de muestra para retirar partículas mayores a 170 milimicras

4.3 Determinación de la viabilidad de huevos de helminto

Para determinar la viabilidad de los huevos de helminto se utilizó el método publicado por Rojas (1998), el cual se fundamenta en la utilización de un colorante biológico (azul de metileno) al 0.1 % v/v. Este método se basa en el principio que, de acuerdo con su fisiología y morfología, los huevos de helminto viables conservarán su impermeabilidad y, por lo tanto, no aceptarán el colorante, por el contrario, los huevos no viables se teñirán de azul.



Figura 9.- Huevo de *Ascaris lumbricoides* viable, a la derecha materia orgánica teñida

Para realizar esta metodología se colocó una alícuota de 0.04 mL de la concentración final de huevos de helminto sobre un portaobjeto y se añadió 0.1 mL de azul de metileno al 0.1 % v/v contabilizando con el objetivo 40x (seco fuerte) todos aquellos huevos de helminto que aceptaron el colorante en su interior. Las muestras fueron analizadas bajo un microscopio óptico Zeiss Axiostar Plus.



Figura 10.- Microscopio óptico Zeiss Axiostar Plus.

4.4 Ensayos de inactivación de huevos de helminto

Para determinar el porcentaje de inactivación de huevos de helminto por el método Fenton homogéneo se propusieron 2 parámetros a variar:

- H_2O_2
- pH

Para la realización de la prueba se propuso un diseño experimental del 3^2 . Para cada una de las variables se plantearon 3 diferentes dosis, cabe señalar que cada uno de los valores propuestos corresponde a valores mayores y menores encontrados en la literatura que puede ser observada en la tabla número 8, estos corresponden a los trabajos de Ramírez *et al.* (2006a) quienes obtuvieron resultados favorables

(66.83 % de inactivación) con dosis de pH 3 con 50 min de exposición, 40 mg/L de H₂O₂ con una relación másica Fe³⁺/ H₂O₂ de 10 y Solís (2009), quien obtuvo buenos resultados (87.02 % de inactivación) con pH 3, 50 min de exposición, H₂O₂ = 40 mg/L y una relación másica Fe³⁺/ H₂O₂ de 2.

Tabla 9. Dosis propuestas por cada parámetro de interés

VARIABLES		H ₂ O ₂		
		30 mg/L	60 mg/L	90 mg/L
pH	2	T1	T4	T7
	3	T2	T5	T8
	4	T3	T6	T9

De acuerdo con las variables analizadas se obtuvieron 9 combinaciones diferentes, cada uno de los tratamientos fue realizado por cuadruplicado, de modo que al finalizar se obtuvieron 36 resultados, cada uno de los tratamientos y sus repeticiones fueron ordenados de manera aleatoria, agregando un blanco por tratamiento y una prueba extra con las mismas condiciones de dosis propuesta en cada tratamiento ajustado el pH a 7 al finalizar la reacción.

Tabla 10. Matriz de tratamientos

TRATAMIENTOS	CONCENTRACIÓN PERÓXIDO (mg/L)	pH
Tratamiento No 1	30	2
Tratamiento No 2	30	3
Tratamiento No 3	30	4
Tratamiento No 4	60	2
Tratamiento No 5	60	3
Tratamiento No 6	60	4

TRATAMIENTOS	CONCENTRACIÓN PERÓXIDO (mg/L)	pH
Tratamiento No 7	90	2
Tratamiento No 8	90	3
Tratamiento No 9	90	4

Para la ejecución de los ensayos de inactivación se utilizó el equipo de prueba de jarras presente en el Laboratorio de Ingeniería Ambiental de la Universidad Autónoma de Yucatán.



Figura 11.- Equipo de prueba de jarras

En cada prueba se utilizaron reactores de 300 mL con un contenido de 250 mL de agua destilada y 0.5 mL de la solución madre de huevos de helminto.

Se utilizó como catalizador de la reacción Fenton al sulfato ferroso heptahidratado a una relación Fe/H₂O₂ mg/mg de 12 para todas las pruebas.

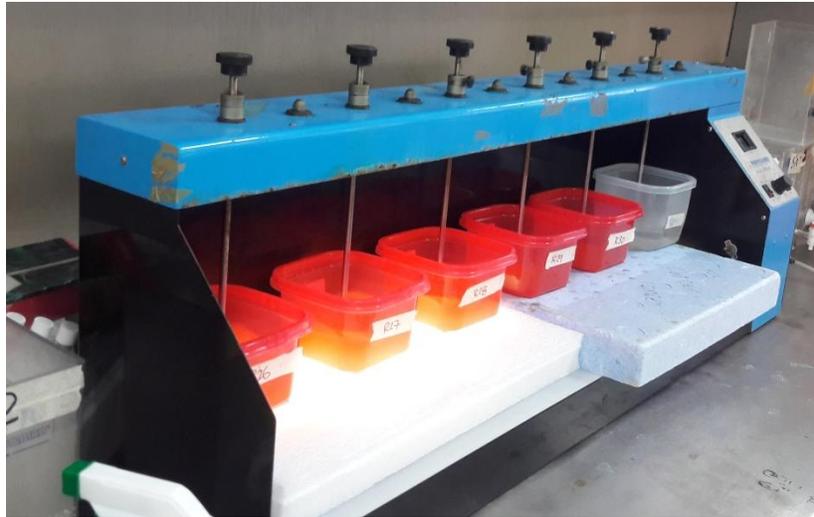


Figura 12.- Pruebas de oxidación

Para realizar las pruebas de oxidación se procedió a ajustar el pH con ayuda de una solución de ácido sulfúrico 1N y una solución de hidróxido de sodio 1N hasta obtener las condiciones deseadas. Posteriormente se agregó el catalizador (FeSO_4) seguido del agente oxidante (peróxido de hidrógeno al 30 %) para ser agitado 120 rpm durante 2 horas con ayuda del equipo de prueba de jarras.



Figura 13.- Ajuste de pH para los tratamientos de oxidación

Posteriormente la muestra tratada fue centrifugada a 1980 rpm durante 5 minutos, se retiró de sobrenadante por medio de una bomba de vacío y se transfirió la pastilla sedimentada a tubos marca Corning de 50 mL para su posterior lectura.

Para determinar el porcentaje de inactivación de los huevos de helminto después del tratamiento se analizó la cantidad de huevos presentes y su viabilidad por medio de la técnica de tinción con colorante, colocando 0.04 mL de muestra y 0.1 mL de azul de metileno al 0.1 % en un portaobjeto contabilizando los huevos viables y los no viables, este procedimiento se repitió 5 veces por cada una de las muestras analizadas haciendo un total de 270 visualizaciones.

Como último paso se realizó una cinética de reacción con las dosis óptimas encontradas con las pruebas anteriores, analizándose los tiempos de 5, 10, 15, 30, 60, 90 y 120 minutos para encontrar el tiempo de contacto óptimo.



Figura 14.- Cinética de reacción probando dosis óptima

4.5 Tratamiento estadístico

Se determinó la relación entre los variables pH, H₂O₂ y porcentaje de eficiencia mediante un modelo estadístico de dos vías de efectos fijos:

$$y_{ij} = \mu + T_i + \beta_j + \varepsilon_{ij}$$

Donde:

y_{ij} = Eficiencia de inactivación de huevos de helminto

μ = Gran media de la variable respuesta.

T_i = Efecto del H_2O_2 sobre la variable respuesta.

β_j = Efecto del pH sobre la variable respuesta.

ε_{ij} = Error Aleatorio

Para todos los análisis estadísticos se utilizó el programa de STATGRAPHICS Centurión 16.103 en su versión de prueba.

V. RESULTADOS Y DISCUSIONES

5.1 Identificación de Huevos de Helminto

A partir de la muestra de lodos concentrada se observó la cantidad aproximada de huevos de *Áscaris lumbricoides* en solución madre además de la identificación de las especies de huevos de helminto.

La solución madre de 50 mL presentó un total aproximado de 104,280 huevos de *Áscaris lumbricoides*, los cuales se encontraban en su fase fértil con superficie amelonada (sin haber comenzado la división celular) y con la superficie lisa (huevos descorticados), ambas formas son infecciosas y pueden conservar su vitalidad durante varios meses en la tierra sombreada y húmeda por lo que se considera importante su inactivación (Biagi, 1985).

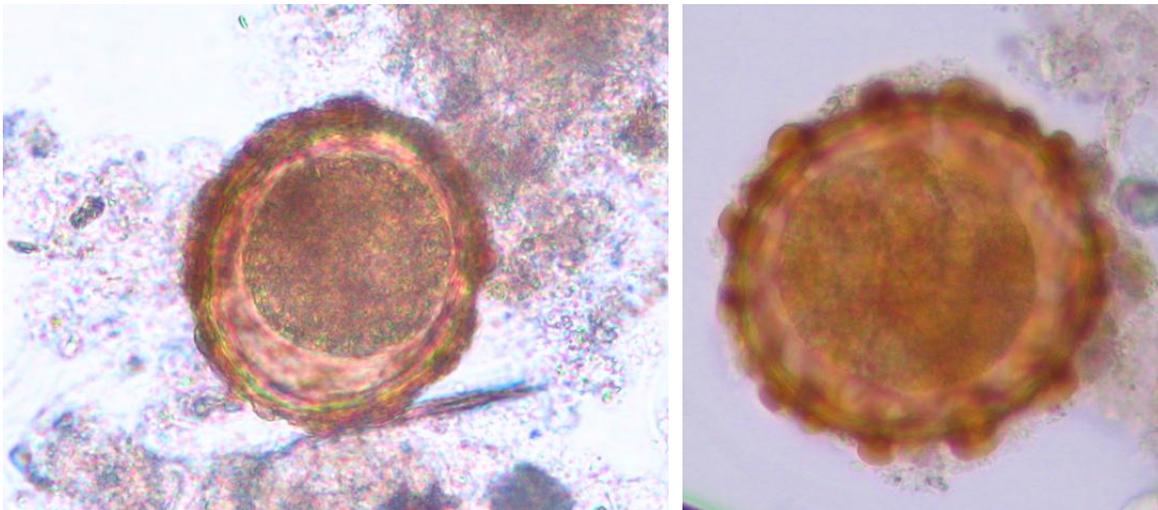


Figura 15.- Huevos de *Áscaris lumbricoides* fértiles no embrionados

Así mismo se logró identificar la presencia de otros huevos de helminto (figura 16) pertenecientes al grupo de las uncinarias como el *Necator americanus*, y a algunos otros cestodos como la *Hymenoleptis nana* e *Hymenoleptis diminuta*. Dentro de los

síntomas asociados a la presencia de uncinarias se destacan fenómenos pulmonares o bronquiales como tos, estertores y algunas formas de bronquitis, además de duodenitis y anemia hipocrómica. Con respecto a los síntomas que son observados en la parasitosis por *Hymenoleptis* se encuentran palidez, dolor abdominal, anorexia, meteorismo, diarrea y cefalea (Biagi, 1985).

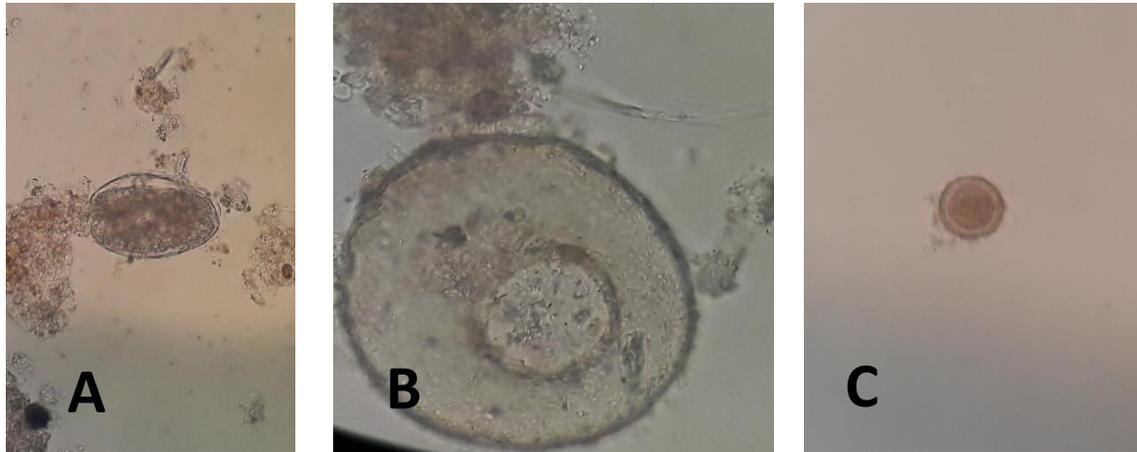


Figura 16.- A: huevo perteneciente a *Necator americanus* B: Huevo *Hymenoleptis nana* C: Huevo *Hymenoleptis diminuta*

5.2 Viabilidad de huevos de *Ascaris lumbricoides*

La muestra concentrada de lodos mostro un total aproximado de 2,085 huevos viables por mililitro, para determinar la viabilidad se utilizó el método publicado por Rojas *et al.* (1998), aplicando azul de metileno al 0.1 % a la muestra observada bajo microscopio (figura 14). Cabe señalar que se encontraron algunos huevos no viables antes del proceso de inactivación, esto puede deberse a que el periodo de vida de los huevos de *Áscaris lumbricoides* se limitan a algunos meses (Biagi, 1985), y ya que estos huevos fueron concentrados de los lodos sedimentados de una planta de tratamientos existe la posibilidad de que los lodos hayan estado sedimentados por un periodo largo o hayan sido recirculados en el sistema aumentando su tiempo de residencia. Por otra parte, se demostró la factibilidad de

la técnica de viabilidad potencial de los Huevos de *A. lumbricoides* mediante el uso del colorante azul de metileno ya que se demostró la variabilidad entre muestras con el tratamiento y el blanco de control.

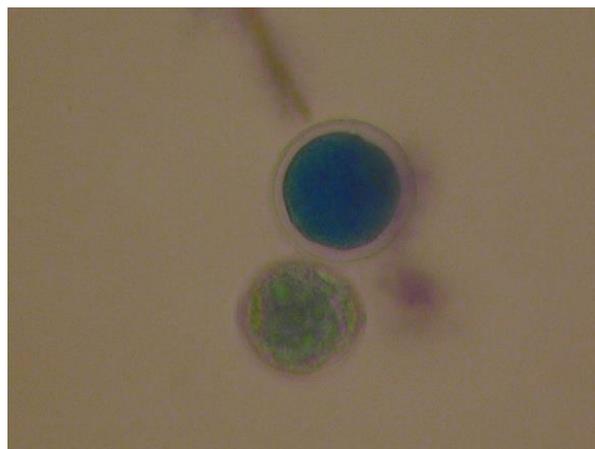


Figura 17.- Huevos de *Áscaris lumbricoides* viable (no teñido) y no viable (teñido).

5.3 Efecto del proceso Fenton sobre la viabilidad de huevos de *Áscaris lumbricoides*.

Para cada una de las repeticiones se colocaron 0.5 mililitros de la solución madre donde se encontró un promedio de 1,445 huevos viables por reactor y se contabilizó una cantidad de 14 huevos por portaobjeto.

La tabla 11 muestra los promedios de los huevos de *Áscaris lumbricoides* contabilizados antes y después de la aplicación del tratamiento Fenton, los valores completos se encuentran en el anexo 1.

Tabla 11. Cuantificación de *Áscaris lumbricoides*

NO DE TRATAMIENTO (H ₂ O ₂ Mg/L), PH	HUEVOS DE <i>Áscaris lumbricoides</i>		PORCENTAJE DE REMOCIÓN
	ANTES DEL TRATAMIENTO (HH/L)	DESPUÉS DEL TRATAMIENTO (HH/L)	
Tratamiento 1	7,595	4,005.7	47.26

NO DE TRATAMIENTO (H ₂ O ₂ Mg/L), PH	HUEVOS DE <i>Áscaris lumbricoides</i>		PORCENTAJE DE REMOCIÓN
	ANTES DEL TRATAMIENTO (HH/L)	DESPUÉS DEL TRATAMIENTO (HH/L)	
(30, 2)			
Tratamiento 2 (30, 3)	6,080	2,361.5	61.1
Tratamiento 3 (30, 4)	5,500	2,882.5	47.5
Tratamiento 4 (60, 2)	6,300	5,021.7	20.2
Tratamiento 5 (60, 3)	4,800	2,832.7	40.9
Tratamiento 6 (60, 4)	5,650	630.5	88.8
Tratamiento 7 (90, 2)	6,300	3335.5	47.0
Tratamiento 8 (90, 3)	5,320	1,470.2	72.3
Tratamiento 9 (90, 4)	4,480	1,855.2	58.5

Como se puede observarse en la tabla anterior y en la figura 18 existe una remoción diferente de huevos de *Áscaris lumbricoides* en cada uno de los tratamientos, lográndose con el tratamiento numero 6 (H₂O₂: 60 mg/L y pH: 4) una remoción del 88.4 % siendo este proceso el más apropiado para su aplicación. Cabe señalar que no se observó algún cambio en la estructura morfológica de los huevos.

Este porcentaje de remoción obtenido es mayor a lo reportado por los trabajos de Ramírez *et al.* (2006a) quien obtuvo 66.83 % de inactivación con dosis de H₂O₂ de 40 mg/L y pH: 3 y el trabajo de Solís (2009), quien obtuvo 87.02 % de inactivación con 40 mg/L de H₂O₂ y pH: 3.

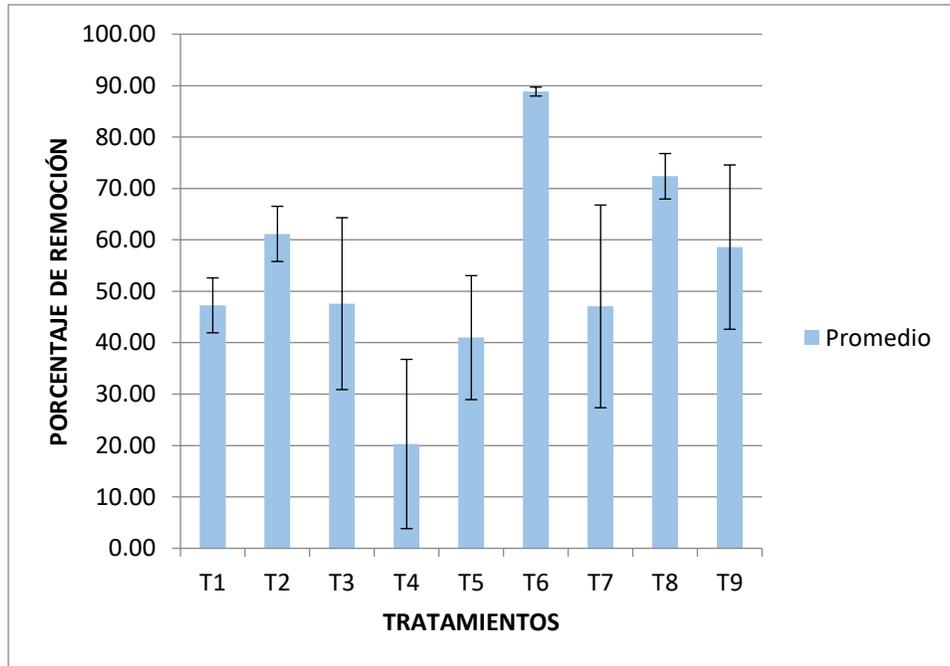


Figura 18.- Porcentaje de remoción de los diferentes tratamientos

La disminución en la cantidad de huevos de *Áscaris lumbricoides* en cada uno de los tratamientos puede deberse a la acción de los radicales hidroxilo ($\bullet\text{OH}$) sobre la cubierta del huevo como lo reporta Maness *et. al.* (1999), en su investigación evalúa la inactivación de *E. Coli* causada por especies reactivas de oxígeno como resultado del daño en la pared de la membrana celular y subsecuente peroxidación de fosfolípidos poliinsaturados que son componentes de la membrana lípida, lo que conlleva a la muerte celular.

Los huevos de *Áscaris lumbricoides* están protegidos por cuatro capas de 3 a 4 μm de espesor por lo que son altamente resistentes. La capa interna llamada lipoide o ascarosida, está compuesta en 25 % de proteína y 75 % de lípidos ascarósidos, es la responsable de la permeabilidad selectiva (evita la penetración de sustancias polares) y es una capa resistente a la desecación. La segunda capa llamada quitina, la cual provee fuerzas estructurales al huevo está formada por espinelas de quitina dentro de una matriz proteínica. La tercera capa llamada vitelina contiene lipoproteínas y la última que es mamelonada, contiene proteínas y mucopolisacáridos y le provee adhesión (Quiles *et al.*, 2006).

Los radicales libres formados por la reacción Fenton, por su alta reactividad química, atacan preferentemente moléculas que contienen dentro de su estructura, dobles enlaces carbono-carbono o anillos de carbono. De esta forma, aminoácidos, carbohidratos, lípidos y ácidos nucleicos que componen a las macromoléculas de la célula, pueden ser “atacadas” y alterar la función o la estructura de la célula (Gutiérrez 2006) dañando la cubierta de protección de los huevos y por consiguiente afectando su viabilidad.

El tratamiento número 6 presentó una mayor cantidad de huevos de helminto diferentes al *A. lumbricoides* inactivados como puede verse en la figura 18 lo que podría sugerir su efectividad para otro tipo de helmintos.

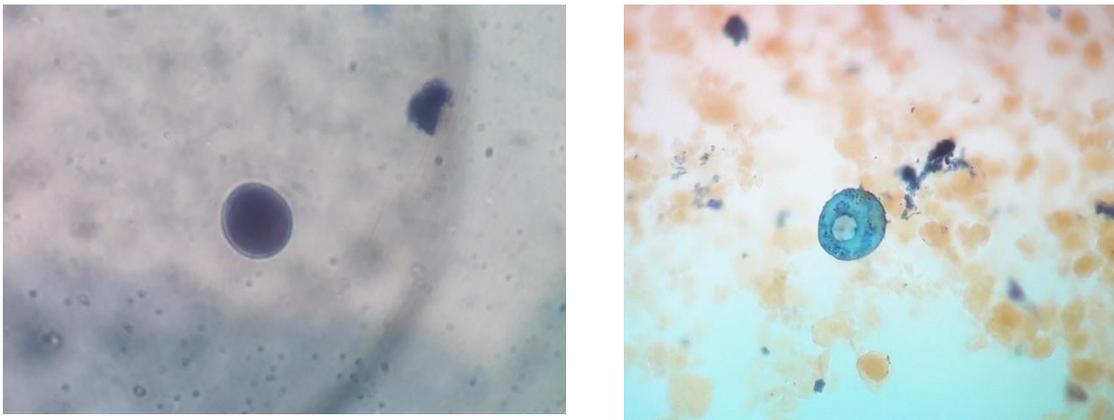


Figura 19.- Huevos de Helminto inactivados (teñidos)

5.4 Análisis estadístico de los tratamientos

A continuación, se presentan los resultados del ANOVA analizando los datos de los porcentajes de remoción anteriores para determinar el mejor tratamiento.

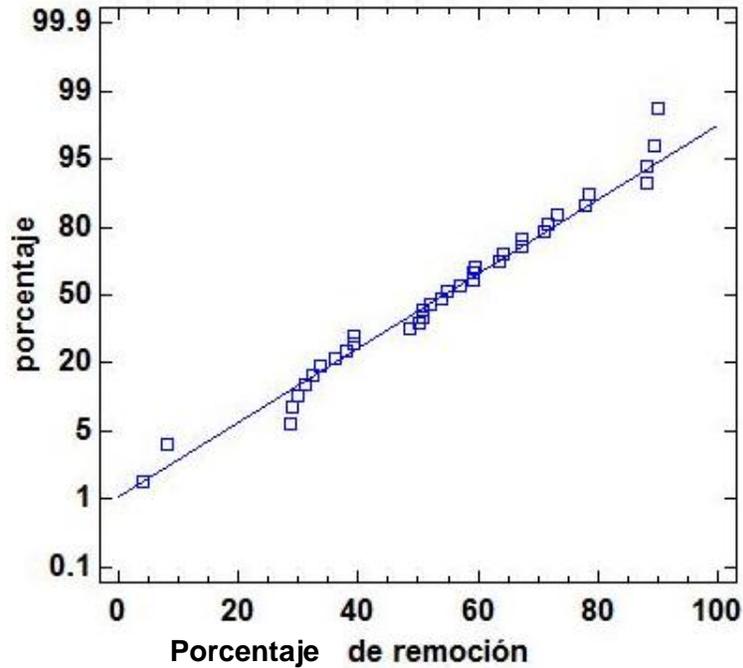


Figura 20.- Grafico de probabilidad normal

Como se puede ver en el gráfico 20, los datos de porcentaje de remoción obtenidos corresponden a una distribución normal por lo que se puede realizar un análisis de varianza.

Tabla 12.- Resultados del Análisis de Varianza para porcentaje de remoción

FUENTE	SUMA DE CUADRADOS	G L	CUADRADO MEDIO	RAZÓN-F	VALOR-P
Entre grupos	12255.0	8	1531.88	9.73	0.0000
Intra grupos	4252.41	27	157.497		
Total (Corr.)	16507.5	35			

Puesto que el valor-P de la prueba-F es menor que 0.05, existe una diferencia estadísticamente significativa entre la media de los porcentajes de remoción entre un nivel de Tratamiento y otro, con un nivel del 95.0 % de confianza. Por lo que se procedió a analizar la Pruebas de Múltiples Rangos para observar la diferencia significativa de las medias de los tratamientos y los grupos homogéneos que se formaron.

Tabla 13.- Pruebas de Múltiple Rangos para porcentaje de remoción por tratamiento

TRATAMIENTO	CASOS	MEDIA	GRUPOS HOMOGÉNEOS
D	4	20.29	X
E	4	40.985	X
G	4	47.055	XX
A	4	47.2575	XX
C	4	47.59	XX
I	4	58.5875	XXX
B	4	61.1625	XX
H	4	72.36	XX
F	4	88.845	X

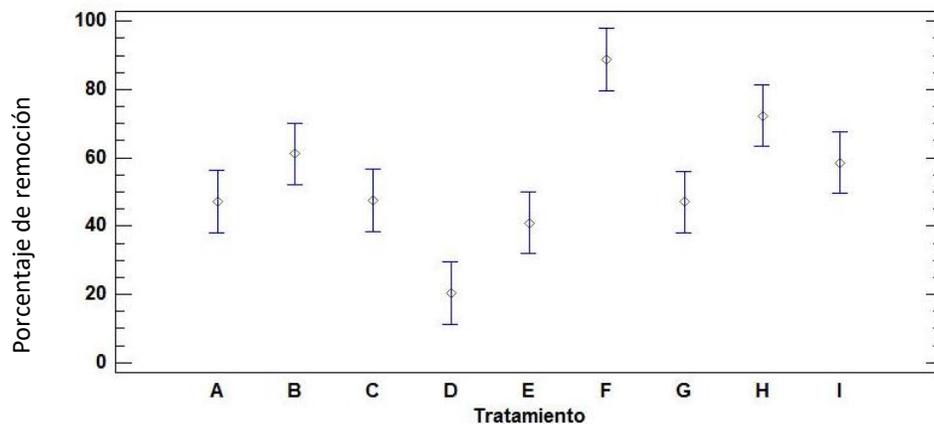


Figura 21.- Grafico de medias de grupos homogéneos

En la prueba de múltiples rangos presentados en la tabla 13 y figura 21 se pudo observar la diferencia significativa de las medias de los tratamientos y los grupos homogéneos que se formaron, existiendo 5 grupos de tratamientos considerados homogéneos. De estos grupos se observa que solo uno cuenta con el mayor porcentaje de remoción que corresponde a los tratamientos H y F, por lo que se seleccionará el tratamiento más económico, siendo éste el tratamiento F (Tratamiento número 6).

Se realizó una regresión múltiple con el objetivo de determinar la variable que tiene una mayor influencia sobre el porcentaje de remoción entre los tratamientos y si existe una diferencia significativa entre ellas, pero solo se obtuvo como variable significativa el valor del pH por lo que realizó una regresión lineal simple para el porcentaje de remoción y pH.

Tabla 14.- Análisis de Varianza con Carencia de Ajuste (porcentaje de remoción vs pH)

FUENTE	SUMA DE CUADRADOS	GL	CUADRADO MEDIO	RAZÓN-F	VALOR-P
Modelo	4311.58	1	4311.58	12.02	0.0014
Residuo	12195.9	34	358.702		
Carencia de Ajuste	344.794	1	344.794	0.96	0.3343
Error Puro	11851.1	33	359.123		
Total (Corr.)	16507.5	35			

En la Tabla 14 se muestra el análisis de varianza de la prueba de falta de ajuste del porcentaje de remoción vs pH, donde el Valor – P es menor a 0.05 a un nivel de confianza del 95 % por lo tanto hay una diferencia estadísticamente significativa en la carencia de ajuste.

En el análisis de varianza se obtiene una R cuadrada igual al 26.11 %, lo que se traduce como el porcentaje en el cual el pH interviene en la remoción de Helmintos en los tratamientos. El coeficiente de correlación es igual a 0.511068, indicando una relación moderadamente fuerte entre las variables.

La ecuación del modelo ajustado es Porcentaje de remoción = 13.5825 + 13.4033*pH

Para la variable Peróxido, el modelo de regresión lineal tuvo un Valor – P de 1.95334 por lo que es mayor a 0.05 a un nivel de confianza del 95 %. Lo que nos indica que el peróxido no tiene una diferencia estadísticamente significativa en los tratamientos.

5.5 Determinación del tiempo óptimo

Con los resultados obtenidos y los análisis estadísticos se llevó a cabo la cinética de reacción probando 6 tiempos en minutos para determinar el tiempo óptimo de contacto de la solución con huevos de helminto y la reacción Fenton. La tabla 15 y la figura 22 muestran los resultados obtenidos.

Tabla 15.- Pruebas de Múltiple Rangos para porcentaje de remoción por tratamiento

MINUTOS	hh/L ANTES DEL TRATAMIENTO	hh/L DESPUÉS DEL TRATAMIENTO	PORCENTAJE DE REMOCIÓN
5	6,300	3,024	52
10	6,300	1,375	78.1
15	6,300	1,656	73.7
30	6,300	1,440	77.1
60	6,300	1,416	77.5
90	6,300	1,140	81.9

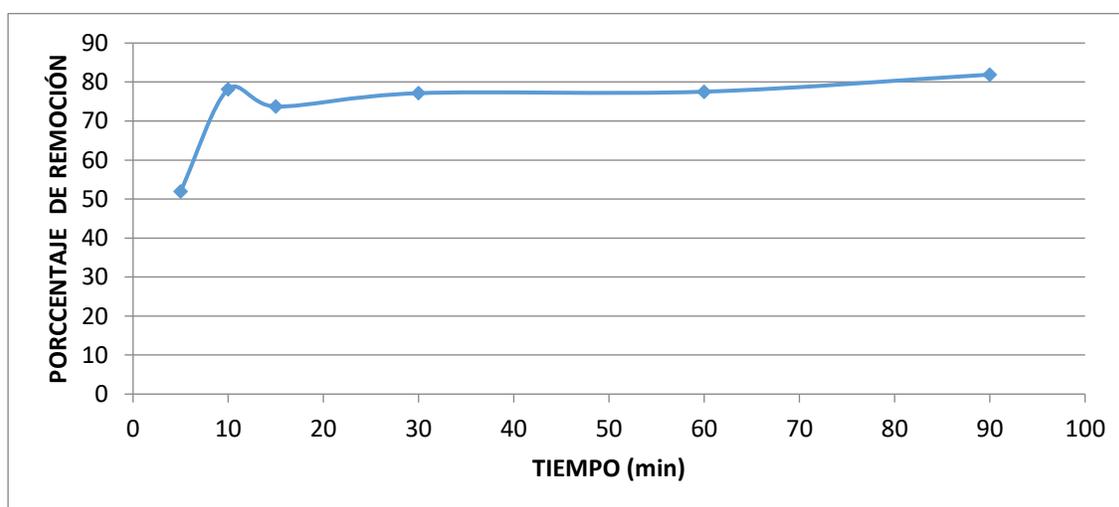


Figura 22.- Cinética de reacción

Analizando el comportamiento se puede suponer que la reacción Fenton reacciona en los primeros 10 minutos de contacto para estabilizarse a los 30 minutos, sin embargo, existe un incremento a las 2 horas de contacto lo que puede hacer suponer que existe un porcentaje de remoción mayor en un tiempo prolongado.

A pesar de contar con una inactivación alta (88.4 por ciento de remoción), estos lodos y aguas residuales no pueden ser utilizados ni como mejoradores de suelo o uso urbano ni para riego ya que no pasan el estándar establecido por la NOM-004-SEMARNAT-2002 y NOM-001-SEMARNAT-1996, que busca tener de 1 a 35 huevos de helminto para ser viables para su aprovechamiento.

VI. CONCLUSIONES

Se evaluó la inactivación de huevos de helminto por efecto del proceso Fenton Homogéneo demostrándose su efectividad para inactivar huevos de *Áscaris lumbricoides*.

Se determinó la dosis optima de proceso Fenton para inactivar huevos de *Áscaris lumbricoides* obteniéndose como mejores resultados las dosis de 60 mg/L de H₂O₂ trabajando a un pH de 4 y una relación Fe/H₂O₂ mg/mg de 12 logrando una remoción del 88.4 % siendo este proceso el más factible para su aplicación.

VI. RECOMENDACIONES

Se recomienda para futuras investigaciones evaluar el efecto del proceso Fenton con diversas especies de parásitos y no solamente con *Ascaris lumbricoides*.

Evaluar el grado de influencia que puede tener sobre la inactivación de los huevos de helminto un pH de 7.

VI. REFERENCIAS

Bandala E., González L., de la Hoz F., Pelaez M., Dionysiou D., Dunlop P., Byrne J., Sanchez J. (2011). Application of azo dyes as dosimetric indicators for enhanced photocatalytic solar disinfection (ENPHOSODIS). "Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry", 218, 185-191.

Biagi F. (1985). Enfermedades parasitarias. 2^{da} edición. La Prensa Médica Mexicana. D.F. México.

Botero J., Zuluaga N. (2001). Revisión de tema Nemátodos intestinales de importancia médica en Colombia: ¿un problema resuelto?, "IATREIA", 14 (1), 47-56.

CONAGUA (2015). Situación del Subsector Agua Potable, Drenaje y Saneamiento Edición 2015, Comisión Nacional del Agua, México, D.F.

Daud N., Hameed B. (2011). Acid Red 1 dye decolorization by heterogeneous Fenton-like reaction using Fe/kaolin catalyst. "Desalination", 269(1-3), 291-293.

Dirección General de Epidemiología (DGE) (2016), Boletín epidemiológico Sistema Nacional de Vigilancia Epidemiológica, Sistema Único de Información, DGE (38) p.22

Domènech X., Jardim W., Litter M. (2001). Eliminación de contaminantes por fotocatalisis heterogénea, Comisión Nacional de Energía Atómica, Unidad de Actividad Química, Texto colectivo elaborado por la Red CYTED VIII-G, Buenos Aires, Argentina.

Escobar I. (2014). Destrucción de huevos de helminto mediante procesos no convencionales. Ciencia y Desarrollo. Disponible en: <http://www.cyd.conacyt.gob.mx/272/articulos/destruccion-huevos-helminetos.html> Recuperado el 14 de marzo de 2016.

Forero J. E., Ortiz O. P., Rios F. (2005). Aplicación de procesos de oxidación avanzada como tratamiento de fenol en aguas residuales industriales de refinería. "Ciencia Tecnología y Futuro", (3)1, 97-109.

García J., Mejía L., Bandala E., Corona B. (2008). Inactivación de huevos de helminto mediante fotocatalisis homogénea. Aquaforum, 49, 14-18.

Guísar R., Herrera M., Bandala E., García J., Vasquez B. (2007). Inactivation of waterborne pathogens using solar photocatalysis. J. Adv. Oxid. Technol, 10, 435-438

González G. M. I., Chiroles R. S. (2011). Uso seguro y riesgos microbiológicos del agua residual para la agricultura. "Revista cubana de salud pública", (1) 37, 45-46.

Gutiérrez-Salinas. J. (2006). ¿Qué sabe usted acerca de... radicales libres?. "Revista Mexicana de Ciencias Farmacéuticas". México, D.F. octubre-diciembre, (37) 004, 69-73.

Hassan H., Hameed B.H. (2011). Fe-clay as effective heterogeneous Fenton catalyst for the decolorization of Reactive Blue 4. "Chemical Engineering Journal", 171(3), 912-918.

Heaselgrave W., Kilvington S. (2011) The efficacy of simulated solar disinfection (SODIS) against Ascaris, Giardia, Acanthamoeba, Naegleria, Entamoeba and Cryptosporidium. Acta Tropica 119, 138-143.

Hernández H. E. (2009) Inactivación de huevos de Helminthos bajo el efecto sinérgico de temperatura, óxido de calcio y humedad. Tesis de licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México, México.

Hernández, M. A. (1992). Depuración de aguas residuales, 9ª edición, Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Madrid, España, p. 713

Kitis C.D., Adams G.T., Daigger. (1999). The effects of Fenton's reagent pretreatment on the biodegradability of non-ionic surfactants. "Water Research", 33 (11), 2561–2568.

Lahera R. V. (2010). Infraestructura sustentable: las plantas de tratamiento de aguas. "Quivera", 12 (2), 58-69.

Leal A. T. (2006). Inactivación de huevos de helminto mediante fotocatalisis solar con TiO₂. En "XXX congreso interamericano de ingeniería sanitaria y ambiental", Asociación Interamericana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, Punta del Este, Uruguay, 1-5.

López C. M., Corredor A. y Nicholls R. (2006). Atlas de Parasitología, 1ª Edición, Manual

Marilyn E. S. (2008). Ascaris lumbricoides: Una revisión de su epidemiología y su relación con otras infecciones. "Anales Nestlé", 66, 7–22.

Lu M.C., Lin C. J., Liao C. H., Ting W. P., Huang R.Y. (2001). Influence of pH on the dewatering of activated sludge by Fentons reagent. "Water Science & Technology", 44(10), 327-332

Martínez E. C., López G. D. (2001) Tratamiento químico de contaminantes orgánicos el proceso Fenton. "Ingeniería Química", 375, 149-153.

Maness P., Smolinski S., Blake D., Huang Z., Wolfrum E., Jacoby W. (1999). Bactericidal activity of photocatalytic TiO₂ reaction: toward an understanding of its killing mechanism. "Applied and Environmental Microbiology" 65 (9), 4094-4098.

May. C. M. (2012). Efecto de dos métodos de desinfección en la viabilidad de huevos de *Ascaris lumbricoides* y Quistes de *Giardia lamblia*. Tesis de Maestría, Universidad Autónoma de Yucatán, México.

Metcalf y Eddy. (2005). Wastewater engineering treatment and reuse, 4ª edición, Metcalf & Eddy, Inc., Nueva York, EUA.

Morales P. A. A. (2013). Sistemas de inactivación de huevos de *ascaris suum* presentes en agua basados en nanocatalizadores de óxidos de hierro soportados en carbón activado y zeolita. Tesis de doctorado, Universidad Nacional Autónoma de México, México.

Nájera A. H. (2013) Aplicación del proceso Fenton para la eliminación de huevos de helminto. En "Primer Congreso de Ingeniería Ambiental e Ingeniería Química del Sureste de México". Consorcio de Instituciones de Educación Superior de Ingeniería Química y Ambiental, México, 57-62.

NOM-001-SEMARNAT-1996 (2018) Límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales.

NMX-AA-113-SCFI-2012 (2012), "Análisis de agua – medición del número de huevos de helminto en aguas residuales y residuales tratadas por observación microscópica".

OMS (2006). Guías para la calidad del agua potable. 3ª edición, Organización Mundial de la Salud. Suiza

OMS (2016). Helmintiasis transmitidas por el suelo. Organización Mundial de la Salud. Disponible en: <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs366/es/> Recuperado en 15 de marzo de 2016.

Oropeza G. N. (2006). Lodos residuales: estabilización y manejo. "Caos Conciencia", Departamento de Ingeniería, 1, 51-58.

Pignatello J., Oliveros E., Mackay A. (2006) Advanced oxidation processes for organic contaminant destruction based on the Fenton reaction and related chemistry. "Environmental Science and Technology", 36 (1), 1-84

Quiles F, Balandier J-Y, Capizzi-Banas S. (2006). In situ characterisation of a microorganism surface by Raman microspectroscopy: The Shell of *Ascaris* eggs. "Analytical and Bioanalytical Chemistry", 386, 249-255.

Ramírez J. H., Maldonado F., Pérez A., Moreno C., Costa C., Madeira L.M. (2007). Azo-dye Orange II degradation by heterogeneous Fenton-like reaction using carbon-Fe catalysts. "Applied Catalysis B: Environmental", 75(3-4), 312-323.

Ramírez Z. R. M., Galván M., Rodríguez A., Espejel F., Retama I. (2006a) Evaluación del reactivo de Fenton para reducir el porcentaje de viabilidad de huevos de helminto (Ascaris suum) en medio acuoso. En XV Congreso Nacional de Ingeniería Sanitaria y Ciencias Ambientales. Guadalajara, México, 22-23.

Ramírez Z. R. M., Galván G. M., Gallardo R., Rigas F., Duran M. A., (2006b), Viability Reduction of parasites (Ascaris spp.) in wáter with photo-Fenton reaction via response surface methodology. "Water Practice & Technology", 1 (2), 1-8.

Rojas V. (1998). Técnica de tinción rápida para determinar la viabilidad potencial de algunos huevos de helmintos. "Ingeniería y ciencias ambientales". 38, 22-26

Rojas R. (2002a). Sistemas de Tratamiento de Aguas Residuales. En Curso Internacional Gestión integral de tratamiento de aguas residuales, Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente, 1, 8-9.

Rojas V. (2002b). Avances en la desinfección de aguas residuales para eliminar huevos de helmintos y otros microorganismos. "Ingeniería Sanitaria y Ambiental", 60, 67-68

Rojas V., Orta M., Franco V. (2008) Comparación de mecanismos de acción de desinfección aplicados a las aguas residuales. Aquaforum, No.49, 19-22

Simón A. P., Lardín M. C. Pacheco B. S. (2010): Recuento e identificación de huevos de helmintos en aguas residuales urbanas de la Región de Murcia. Entidad de Saneamiento y Depuración de la Región de Murcia, 316, 30-36

Solís M. (2009) Inactivación de huevos de Ascaris suum presentes en agua mediante el proceso de Fenton y con luz. Tesis de maestría, Universidad Nacional Autónoma de México, México.

Stasinakis A.S. (2008). Use of selected advanced oxidation processes (AOPs) for wastewater treatment – a mini review. Global NEST Journal, 10(3), 376-385.

Vargas, F., Rivas, C., Nursamaa, A., Zoltan, T. (2007). Reacciones de radicales libres con relevancia biológica en la teoría del envejecimiento. "Avances en Química", 2 (2), 3-15.

Walling C., Kato S. (1971), The oxidation of alcohols by Fenton's reagent: the effect of copper ion, "Journal of the American Chemical Society", 93, 4275-4281.

WHO (2004). Integrated guide to sanitary parasitology. 121/E, World Health Organization, Amman, Jordan.

Winpenny J., Heinz I., Koo-Oshima S. (2013). Reutilización del agua en la agricultura: ¿Beneficios para todos? 35ª edición, FAO, 1020-1556.

WWAP (2015). Informe de las Naciones Unidas sobre los Recursos Hídricos en el Mundo 2015, Agua para un mundo sostenible, datos y cifras. UNESCO. Perusa, Italia.

Yoon, J., Lee, Y. Kim, S. (2001). Investigation of the reaction pathway of OH radicals produced by Fenton oxidation in the conditions of wastewater treatment. "Water Science and Technology", 44 (5), 15-21.

Anexo 1. Valores obtenidos

NO DE TRATAMIENTO		ANTES DEL TRATAMIENTO (HH/L)	DESPUÉS DEL TRATAMIENTO (HH/L)	PORCENTAJE DE REMOCIÓN
Tratamiento 1	R1	7595	4606	39.35
	R2		3738	50.78
	R3		3784	50.18
	R4		3895	48.72
	R5		2480	59.21
Tratamiento 2	R6	6080	2214	63.59
	R7		2000	67.11
	R8		2752	54.74
	R9		2244	59.20
Tratamiento 3	R10	5500	3906	28.98
	R11		1980	64.00
	R12		3400	38.18
Tratamiento 4	R13	6300	4250	32.54
	R14		4015	36.27
	R15		5777	8.30
	R16		6045	4.05
	R17		3360	30.00
Tratamiento 5	R18	4800	3306	31.13
	R19		2300	52.08
	R20		2365	50.73
Tratamiento 6	R21	5650	602	89.35
	R22		672	88.11
	R23		576	89.81
	R24		672	88.11
Tratamiento 7	R25	6300	4482	28.86
	R26		2904	53.90
	R27		4176	33.71
Tratamiento 8	R28	5320	1780	71.75
	R29		1740	67.29
	R30		1425	73.21

NO DE TRATAMIENTO	ANTES DEL TRATAMIENTO (HH/L)	DESPUÉS DEL TRATAMIENTO (HH/L)	PORCENTAJE DE REMOCIÓN
R31		1540	71.05
R32		1176	77.89
R33		968	78.39
Tratamiento 9 R34	4480	1920	57.14
R35		1815	59.49
R36		2718	39.33