



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA

INSTITUTO DE INGENIERÍA

INACTIVACIÓN DE HUEVOS DE *Ascaris suum* PRESENTES EN AGUA MEDIANTE EL PROCESO DE FENTON Y CON LUZ UV

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRÍA EN INGENIERÍA

INGENIERÍA AMBIENTAL- AGUA

P R E S E N T A :

MYRIAM SOLÍS LÓPEZ

TUTORA:

DRA. ROSA MARÍA RAMÍREZ ZAMORA

2009

Jurado Asignado

Presidente: M. C. Leal Ascencio María Teresa
Secretario: Dra. Ramírez Zamora Rosa María
Vocal: Dr. Pandiyan S. Thangarasu
1er Suplente: Dr. Luna Pabello Víctor Manuel
2do Suplente: Dra. Orta Ledesma María Teresa

Lugar donde se realizó la tesis:
Instituto de Ingeniería, UNAM

TUTORA DE TESIS:
Dra. Ramírez Zamora Rosa María



El presente trabajo se realizó en el Laboratorio de Bioprocesos e Ingeniería Ambiental del Instituto de Ingeniería, de la UNAM, bajo la dirección de la Dra. Rosa María Ramírez Zamora.

A mi madre con todo mi amor

Agradecimientos

A la Universidad Nacional Autónoma de México por darme la oportunidad de seguir creciendo dentro de sus instalaciones

Al Instituto de Ingeniería por todo el apoyo en el desarrollo de este trabajo.

A Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por su apoyo financiero a través del proyecto CONACYT-SEP-2004-C01-480897/A “EVALUACIÓN DE LOS REACTIVOS DE FENTON CLÁSICO Y MODIFICADO PARA REMOVER PARÁSITO (*Ascaris lumbricoides*) DEL AGUA RESIDUAL TRATADA PARA LA PRODUCCIÓN DE EFLUENTES DE REÚSO”

A la Dra. Rosa María Ramírez Zamora, que me permitió trabajar bajo su dirección, por su apoyo y sus enseñanzas. Con admiración y respeto, muchas gracias.

A la M. en C. Matilde Galván, con su valiosa colaboración fue posible dilucidar muchas dudas que surgieron a lo largo del desarrollo del trabajo y, con ello concretarlo.

Al mí jurado M. en C. Teresa Leal Ascencio, Dr. Víctor Manuel Luna Pabello, Dra. María Teresa Orta Ledesma y a el Dr. Pandiyan S. Thangarasu, por sus valiosas aportaciones al mi trabajo de tesis.

A mi madre, pieza fundamental de este logro, su apoyo y comprensión es y será invaluable para mi, todo mi cariño y mi respeto para ella.

A mi padre, gracias por esa fortaleza que fue y es toda una inspiración en mi.

A mis hermanos: Balam, Jazmín y Javier. Cada uno parte de mí, a cada uno le agradezco infinitamente el estar siempre cerca de mí en todo momento. Los amo

A mi hermana del alma Natalia, no se necesita los lazos de sangre para sentirte mi hermana, gracias a ti y a mi distinguido cuñado (Adán) por todo el apoyo a lo largo de estos últimos 11 años. Parece que fue ayer que los conocí y hoy que hemos compartido toda una vida. Los quiero.

A Montserrat, de quien aprendí indudablemente, a disfrutar de esto que llamamos vida y sobrellevar los pesares que se nos presentan en ella. ¡Que admirable verte “vivir” cada instante Montse! Hoy que no estas presente físicamente, recurro a mi memoria e imagino que aun me sigues enseñando y haciendo ver lo sencillo que puede ser gozar de cada momento, gracias desde donde estés.

A mi queridos y bien amados Juan y Paco, gracias por las tantas y tantas dosis paciencia que han usado para con su humilde servidora pero sobre todo gracias por estar ahí, escucharme y darme un hombro (dos) en que llorar y, ¿por qué no?, gracias por una, dos, tres, n- zarandeadas ante mi necesidad. Porque al sentirme sola basto voltear y ver que ustedes estaban ahí.

A Jesús, por ti descubrí algo diferente en mí y fue grato, un tanto tempestuoso pero al final grandioso. Fuiste lo primero más amado ajeno a mi familia y por consiguiente serás inolvidable.

A mis “hermanas del cubil” Thala y Kity, una prueba reasenté de las pequeñas vueltas que da la vida, ayer compañeras casi extrañas, hoy casi hermanas. Deseo fervientemente seguir muy cerca de ustedes y cultivando, día con día, nuestra amistad.

A Pachos (Oswaldo), un amigo muy particular al que adoro y quiero infinitamente. No recuerdo si te lo dije alguna vez, pero gracias, muchas, muchas gracias por ayudarme a salir del “abismo” en el que me hallaste inmersa cuando nos conocimos como amigos más que como compañeros, aunque sigas sin creerlo, eres una escuela para mí, en muchos sentidos, he aprendido muchas cosas buenas de ti y también alguna que otra mala, procuraré sólo lo bueno (mmm pero no prometo).

A Fabris, no sólo has sido mi compañero de trabajo, sino también un amigo. Eres una extraordinaria persona respeto y admiro tu profesionalismo en todo lo que haces. Gracias por tu apoyo en los dos sentidos, como compañero y sobretodo como amigo.

Contenido

Resumen	1
Capítulo 1 Introducción	5
Hipótesis.....	8
Objetivo General	8
Objetivos específicos.....	8
Capítulo 2 Marco Teórico	9
2.1 Generalidades de los huevos de helminto	9
2.1.1 Helmintiasis, definición e importancia.....	9
2.1.2 Helmintos (<i>Vermes</i> , gusanos).....	10
2.1.3 Generalidades de <i>Ascaris lumbricoides</i> y <i>Ascaris suum</i>	10
2.1.3.1 Morfología.....	11
2.1.3.2 Ciclo de vida	13
2.1.3.3 Epidemiología.....	15
2.1.3.3.1 Factores que determinan la prevalencia de ascariosis	15
2.1.3.3.2 Intensidad de la infección por <i>Ascaris</i>	15
2.1.3.3.3 Reinfecciones	15
2.1.3.3.4 La prevalencia mundial	16
2.1.3.4 Procesos de remoción e inactivación de huevos de helmintos	17
2.1.3.4.1 Lagunas de estabilización.....	18
2.1.3.4.2 Humedales artificiales	18
2.1.3.4.3 Reactores UASB.....	18
2.1.3.4.4 Filtración rápida (> 2m/h)	19
2.1.3.4.5 Embalses.....	19
2.1.3.4.6 Coagulación-floculación	19
2.1.3.4.7 Radiación con luz UV	20
2.1.3.4.8 Ozono	21
2.1.3.4.9 Reactivo de Fenton.....	21
2.2 Generalidades de proceso Fenton	21
2.2.1 Catalizadores. Hierro.....	23
2.2.2 Oxidante. Peróxido de hidróxido	24

2.2.3 Especie intermediaria. Radical $\cdot\text{OH}$	25
2.2.4 Cinética química.....	25
2.2.5 Tipos de procesos de Fenton.....	28
2.2.5.1 Proceso de Fenton clásico.....	29
2.2.5.2 Proceso Fenton modificado con complejos (fase homogénea).....	29
2.2.5.3 Electro-Fenton.....	30
2.2.5.4 Proceso Fenton asistido con luz UV y luz solar.....	31
2.2.5.5 Proceso de Fenton con catalizadores de hierro soportados.....	31
2.2.5.6 Fenton intensificado.....	32
2.2.6 Factores de influencia del proceso Fenton.....	32
2.2.6.1 Efecto del pH.....	32
2.2.6.2 Concentración de iones ferrosos.....	34
2.2.6.2 Concentración de peróxido de hidrógeno.....	35
2.2.6.3 Relación estequiométrica.....	35
2.2.6.3.1 Relación alta de $[\text{Fe}^{2+}]_0 / [\text{H}_2\text{O}_2]_0 (\geq 2)$	35
2.2.6.3.2 Relación media de $[\text{Fe}^{2+}]_0 / [\text{H}_2\text{O}_2]_0 (= 1)$	36
2.2.6.3.3 Relación baja de $[\text{Fe}^{2+}]_0 / [\text{H}_2\text{O}_2]_0 (\ll 1)$	36
2.2.6.4 Efecto de la temperatura.....	37
2.2.6.5 Efecto de la luz UV y la luz visible.....	37
2.2.6.6 Influencia del oxígeno disuelto.....	38
2.2.6.7 Tiempo de reacción.....	38
2.2.7 Aplicaciones del proceso Fenton.....	38
Capítulo 3 Metodología.....	39
3.1 Materiales y reactivos.....	40
3.1.1 Huevos de <i>Ascaris suum</i>	40
3.1.1.1 Obtención de los nemátodos de <i>Ascaris suum</i>	40
3.1.1.2 Obtención de huevos de <i>Ascaris suum</i>	40
3.1.2 Agua sintética.....	41
3.1.2.1 Preparación de la suspensión stock de <i>A. suum</i>	41
3.1.2.2 Preparación de las muestras sintéticas de agua con <i>Ascaris</i> por utilizar en los experimentos de oxidación.....	41
3.2 Sistema experimental.....	42

3.2.1	Sistemas de oxidación	42
3.2.2	Diseño experimental de los experimentos de oxidación con el proceso de Fenton y con luz UV	43
3.3	Técnicas experimentales	45
3.3.1	Pruebas de oxidación	45
3.4	Técnicas analíticas	46
3.4.1	Parámetros fisicoquímicos	46
3.4.2	Determinación del número y viabilidad de los huevos de <i>Ascaris suum</i>	46
Capítulo 4	Resultados y discusión	47
4.1	Monitoreo de la concentración de HH de la suspensión stock.....	47
4.2	Evaluación de la influencia de la aireación y agitación del sistema experimental sobre el de HH	47
4.3	Pruebas de inactivación u oxidación de HH	48
4.3.1	Proceso de Fenton clásico	48
4.3.2	Proceso de Fenton asistido con luz UV	56
Capítulo 5	Conclusiones y recomendaciones	64
	Glosario de términos	66
	Referencias	71
	Anexos	78
Anexo I	El agua, su problemática a nivel mundial.....	78
El problema del agua en México		78
Agua en la ciudad de México		80
Reúso de aguas residuales en México.....		81
Anexo II	Mecanismos de oxidación de células vía radicales libres	83
Anexo III	Cuantificación y determinación de la viabilidad de los huevos de helminto en la suspensión stock	89
Anexo III	Preparación de la suspensión intermedia de huevos de helminto para las pruebas de oxidación	91
Anexo IV	Preparación del reactivo de Fenton.....	92
FeCl ₃ .6H ₂ O		92
Peróxido de hidrógeno.....		93
Anexo V	Técnicas analíticas.....	94

Determinación de la concentración de la solución madre de peróxido de hidrógeno.....	94
Método iodométrico (concentración > 10 ⁻³ m) (34 mg/l).....	94
Preparación de solución de almidón como indicador (Estandar Methods):.....	95
Determinación de las concentraciones inicial y residual de soluciones de peróxido de hidrógeno.	95
Método colorimétrico (6.10 ⁻⁵ m < concentración < 10 ⁻³ m = 2.04 < concentración < 34 mg/l)95	
Preparación del sulfato de titanio (TiSO ₄) para la determinación del peróxido de hidrógeno96	
Determinación de la concentración de hierro en solución	97
Anexo VI Pruebas de oxidación	99

Índice de tablas

Tabla 2. 1 Clasificación de <i>Ascaris lumbricoides</i>	11
Tabla 2. 2 Límites máximos permisibles del contenido de huevos de helmintos en aguas para riego16	
Tabla 2. 3 Características de la pared de los huevos de helmintos	17
Tabla 2. 4 Aplicación práctica o teórica de los procesos PRFP de la US-EPA para lodos con alto contenido de huevos de helmintos.....	20
Tabla 2. 5 Límites de predominancia para algunas especies del Fe.....	23
Tabla 2. 6 propiedades físicas y químicas del peróxido de hidrógeno.....	24
Tabla 2. 7 Poder de oxidación relativa de las diferentes especies químicas	25
Tabla 2. 8 Tipos de reacciones electroquímicas de Fenton.	30
Tabla 3. 1 Matriz de diseño para el proceso Fenton clásico y con luz UV	44
Tabla 4. 1 Efecto de la aireación y la agitación en la viabilidad de los huevos de helminto.....	48
Tabla 4. 2 de suspensiones de huevos de <i>Ascaris suum</i> sometidos al proceso de Fenton clásico 48	
Tabla 4. 3 Parámetros fisicoquímicos finales de las suspensiones de huevos de <i>Ascaris suum</i> sometidas al proceso de Fenton clásico.....	49
Tabla 4. 4 Análisis de varianza para el % de inactivación aplicando Fenton clásico	53
Tabla 4. 5 Condiciones óptimas de operación del proceso de Fenton clásico para el máximo % de inactivación (89.19%) de HH.	55
Tabla 4. 6 de suspensiones de huevos de <i>Ascaris suum</i> sometidos al proceso de Fenton asistido con luz UV	56
Tabla 4. 7 Parámetros fisicoquímicos finales de las suspensiones de huevos de <i>Ascaris suum</i> sometidos al proceso de Fenton asistido con luz UV.....	57
Tabla 4. 8 Análisis de varianza para el % de inactivación aplicando Fenton asistido con luz UV.....	60
Tabla 4. 9 Condiciones óptimas (codificadas y reales) de operación del proceso de Fenton asistido con luz UV para el máximo % de inactivación (88.04%) de HH.	62

Tabla 4. 10 Condiciones óptimas de operación para alcanzar el mayor con los proceso Fenton clásico y Fenton asistido con luz UV	62
Tabla 4. 11 Composición bioquímica de los huevos de <i>Ascaris</i> de disección (o no embrionados) estimados como por ciento de huevo total en masa húmeda	63
Tabla A. 1 Fuentes de abastecimiento de agua potable en la ciudad de México	81
Tabla A. 2 Comparación de la frecuencia de enfermedades hídricas entre el valle del mezquital y una zona que emplea agua limpia	82
Tabla A. 3 Resultados de las pruebas de oxidación con Fenton clásico para inactivar huevos de helminto (primera réplica)	99
Tabla A. 4 Resultados de las pruebas de oxidación con fenton clásico para inactivar huevos de helminto (segunda réplica)	101
Tabla A. 5 Resultados de las pruebas de oxidación con fenton asistido con luz uv para inactivar huevos de helminto (primera réplica)	103
Tabla A. 6 Resultados de las pruebas de oxidación con fenton asistido con luz uv para inactivar huevos de helminto (segunda réplica)	105

Índice de figuras

Fig. 2. 1 Ciclo biológico de <i>A. lumbricoides</i>	14
Fig. 2. 2 Diagrama de Pourbaix para el hierro.....	24
Fig. 2. 3 Rompimiento del anillo aromático vía radical hidroxilo (reactivo de Fenton).....	27
Fig. 2. 4 Especies del ión hierro en el equilibrio en función del pH	33
Fig. 2. 5 Efecto del pH en la reacción del método Fenton	34
Fig. 3. 1 Diagrama de flujo de la metodología experimental	39
Fig. 4. 1 Monitoreo del % de viabilidad inicial de los huevos de <i>Ascaris suum</i> en la suspensión utilizada en las pruebas de oxidación con Fenton clásico (FC I) y Fenton fotoasistido (FF I).....	47
Fig. 4. 2 Variación del potencial redox (ORP) en las pruebas de oxidación con Fenton clásico para inactivar huevos de <i>Ascaris suum</i>	50
Fig. 4. 3 Hierro y peróxido residual en las pruebas de oxidación con Fenton clásico para inactivar huevos de <i>Ascaris suum</i>	51
Fig. 4. 4 Variación de la conductividad en las pruebas de oxidación con Fenton clásico para inactivar huevos de <i>Ascaris suum</i>	52
Fig. 4. 5 Variación de la temperatura en las pruebas de oxidación con Fenton clásico para inactivar los huevos de <i>Ascaris suum</i>	52
Fig. 4. 6 Gráfico de Pareto estandarizado para el de HH aplicando el proceso de Fenton clásico....	54
Fig. 4. 7 Superficie de respuesta estimada para el proceso de inactivación mediante el proceso de Fenton clásico.....	54

Fig. 4. 8 Variación del potencial redox (ORP) en las pruebas de oxidación con Fenton asistido con luz UV para inactivar huevos de <i>Ascaris suum</i>	57
Fig. 4. 9 Hierro y peróxido residual en las pruebas de oxidación con Fenton asistido con luz UV para inactivar huevos de <i>Ascaris suum</i>	58
Fig. 4. 10 Variación de la conductividad en las pruebas de oxidación con Fenton asistido con luz UV para inactivar huevos de <i>Ascaris suum</i>	59
Fig. 4. 11 Variación de la temperatura en las pruebas de oxidación con Fenton asistido con luz UV para inactivar los huevos de <i>Ascaris suum</i>	59
Fig. 4. 12 Gráfico de pareto estandarizado para el % de inactivación	61
Fig. 4. 13 Superficie de respuesta estimada para el proceso de inactivación mediante el proceso de Fenton asistido con luz UV	61
Fig. A. 1 Explotación de los mantos acuíferos en México.	79
Fig. A. 2 Distribución porcentual de los volúmenes concesionados para usos consuntivos.....	80
Fig. A. 3 Sustracción de hidrógeno de un pufa y su transformación a un juego de dos moléculas regio estereoisómeras LOOH	84
Fig. A. 4 Generación del radical peroxil por el ataque de un radical dienilalcoxi sobre un fosfolípido. R1, residuo alquilo.....	85
Fig. A. 5 Oxidación de alcoholes secundarios por sustracción de un hidrógeno de el enlace C-H adyacente a el grupo funcional.....	86
Fig. A. 6 Oxidación de residuos de lisina en proteínas (R, R', residuos de proteína)	86
Fig. A. 7 Peroxidación lipídica de residuos de arginina en proteínas (R, R', residuos de proteínas)	87
Fig. A. 8 Oxidación de prolina a 5-oxoprolina por radicales peroxilo	87
Fig. A. 9 Oxidación de histidina a 2-oxo-histidina	88

Índice de fotos

Foto 2. 1 Aspecto de la boca de <i>Ascaris</i>	11
Foto 2. 2 Forma adulta del macho y la hembra de <i>Ascaris lumbricoides</i>	11
Foto 2. 3 Algunos tipos de huevos de <i>A. lumbricoides</i>	12

Resumen

El objetivo del presente trabajo de tesis de maestría es: “Determinar la factibilidad de aplicar el reactivo de Fenton sin y con luz UV para inactivar huevos de *Ascaris suum* presentes en agua sintética, con base en pruebas de laboratorio”.

Esta tesis consta de cinco capítulos: *Introducción, Marco teórico, Metodología, Resultados y discusión*, y finalmente, *Conclusiones y recomendaciones*. A continuación se describe en forma breve cada uno de los capítulos mencionados.

El Capítulo 1 resume de forma general, la problemática que representan la escasez de agua y el uso de aguas residuales contaminadas con huevos de nemátodos o helmintos. Además, condensa la información encontrada en base de datos y bibliotecas sobre las generalidades más importantes del nemátodo *Ascaris suum* y del proceso de Fenton. Con base en esta revisión se planteó la hipótesis del trabajo y se estableció, el objetivo general y los objetivos específicos a cubrir en este trabajo.

En el Capítulo 2 se establece, con base en la información reportada, el estado del conocimiento científico y tecnológico de los huevos de *Ascaris suum* sobre las características de los huevos de helmintos, su persistencia en el medio ambiente, su problemática a nivel mundial y en el país, y los procesos que se aplican actualmente para removerlos y/o inactivarlos analizando las ventajas y desventajas de cada uno de ellos. Con base en esta información, se determinó aplicar el proceso de Fenton clásico y asistido con luz UV para inactivar huevos de helmintos. También se estableció el estado del conocimiento sobre el reactivo de Fenton (características del proceso Fenton, los tipos de proceso Fenton, y los parámetros de operación que influyen directamente en la eficiencia del proceso).

El Capítulo 3 describe la metodología experimental que se siguió a lo largo del trabajo, la cual se divide en dos partes: a) preparación de la suspensión de huevos de helmintos (*Ascaris suum*) y b) realización de pruebas de oxidación con el proceso Fenton y asistido con luz UV. La primera parte presenta la preparación de la suspensión de huevos de helminto que se empleó para realizar las pruebas de oxidación, también se describe la técnica para cuantificar la concentración y la viabilidad de los huevos. En la segunda etapa se realizaron pruebas de oxidación (Fenton clásico y asistido con luz UV) de una suspensión preparada en agua destilada con una concentración inicial de huevos de helminto (HH) igual a 2 HH/mL. El diseño experimental empleado para realizar las pruebas de oxidación fue de tipo superficie-respuesta (central compuesto) con tres variables o factores (tiempo de contacto, dosis de peróxido y relación másica de Fe/H₂O₂) y cinco niveles para cada factor, dando un total de 16 experimentos más una réplica para cada experimento. El pH se mantuvo alrededor de 3-3.5, en todas las pruebas. De igual forma, se mencionan las distintas técnicas analíticas que se utilizaron a lo largo de la fase experimental, para medir los distintos parámetros fisicoquímicos al inicio y al final de cada prueba.

El Capítulo 4 presenta los resultados del porcentaje de inactivación obtenido en cada uno de los experimentos de los procesos de oxidación y se discuten comparándolos con otros procesos de

inactivación reportados en bibliografía. Con base en los resultados obtenidos, se desarrolló un modelo matemático que predice el porcentaje de inactivación de huevos de helminto, en función de los valores de los tres factores o variables evaluados en los experimentos. Este modelo permitió calcular las condiciones óptimas de operación o valores de las tres variables para inactivar al máximo los huevos de helminto. Las condiciones óptimas calculadas para el reactivo de Fenton clásico y el de foto-Fenton (Fenton clásico asistido con luz UV), fueron respectivamente las siguientes: 89.14% y 88.04%.

En el Capítulo 5 se presentan las conclusiones y recomendaciones correspondientes, de las cuales las más importantes son las siguientes: bajo las condiciones óptimas calculadas, el porcentaje de inactivación de los huevos de *Ascaris suum* fue similar para ambos procesos; la ligera diferencia está asociada a la precisión de cada modelo. Sin embargo, el proceso de Fenton asistido con luz UV permitiría alcanzar el porcentaje de inactivación máxima en un poco más de la mitad de tiempo, respecto al del reactivo de Fenton clásico. Únicamente la dosis de peróxido de hidrógeno presentó una influencia significativa sobre el porcentaje de inactivación para el proceso de Fenton clásico. En el caso de Fenton asistido con luz UV, los factores con mayor influencia significativa sobre el porcentaje de inactivación fueron: el tiempo de contacto y la relación másica de reactivos (Fe^{3+} y H_2O_2).

Abstract

The objective of the present work is: "Determinate the feasibility to apply the Fenton reagent with and without light UV to inactivate *Ascaris suum* eggs in synthetic water, with basis in laboratory tests".

This thesis consists in five chapters: Introduction; Theoretical frame; Methodology; Results and discussion and finally, Conclusions and recommendations. Next one of the mentioned chapters, each is described in brief form.

Chapter 1 is an overview to the problematic that represents the water shortage and the use of residual water contaminated with nematodes or helminths eggs. In addition, it condenses the information found in the most important data base and libraries in relation with nematode, *Ascaris suum* and the Fenton process. With this basis the hypothesis of the work considered the general mission and the specific objectives to cover this work.

Chapter 2, its settle down, whit basis in the reported information, the scientific and technological state of knowledge in *Ascaris suum* eggs, the characteristics of helminths eggs, their persistence in the environment, her problematic at world-wide and in the country level, and the processes that are applied at the moment to remove them and/or to inactivate this eggs, and the analysis of the advantages and disadvantages of each one of them. With basis in this information, it was determined to apply the process of Fenton classic and attended with light UV to inactivate eggs of helminths. Also the state of the knowledge settled down on the reagent of Fenton (characteristic of the Fenton process, the types of Fenton process, and the parameters of operation that influences directly in the efficiency of the process).

Chapter 3 describes the experimental methodology that was followed throughout the work, which is divided in two parts: a) preparation of the helminth egg suspension (*Ascaris suum*) and b) accomplishment of tests of oxidation with attended the Fenton process and with light UV. The first part presents/displays the preparation of the helminth egg suspension that was used to make the oxidation tests, also describes the technique to quantify the concentration and the viability of eggs. In the second stage tests of oxidation (classic and attended Fenton with light UV) of a suspension prepared in water were made distilled with an initial egg concentration of helminth (2 HH) equal to HH/mL. The experimental design used to make the oxidation tests was of type surface-answer (central composed) with three variables or factors (contact time, peroxide dose and mass ratio of Fe/H₂O₂) and five levels for each factor, giving a total of 16 experiments plus a retort for each experiment. PH stayed around 3-3.5, in all the tests. Similarly, the different analytical techniques are mentioned that were used throughout the experimental phase, to measure the different physical and chemical parameters from the beginning and at the end of each test.

Chapter 4 presents/displays the results of the inactivation percent obtained in each experiment of the oxidation processes and they are discussed comparing them with other reported processes of inactivation in bibliography. With basis in these results, it was developed a mathematical model that

predicts the percentage of inactivation in helminth eggs, based on the values of the three factors or variables evaluated in the experiments. This model allowed calculating the optimal conditions of operation or values of the three variables to inactivate helminth eggs to the maximum. The optimal conditions calculated for the reagent of classic Fenton and the one of photo-Fenton (attended classic Fenton with light UV), were respectively the following ones: 89.14% and 88.04%.

In Chapter 5 appear the corresponding conclusions and recommendations, of which most important they are: under the calculated optimal conditions, the percent of inactivation of *Ascaris suum* eggs was similar for both processes; the slight difference its associate to the precision of each model. Nevertheless, the process of Fenton attended with light UV would allow to reach the percent of inactivation Maxima in a little more than half of time, with respect to the one of the reagent of classic Fenton. The dose of hydrogen peroxide solely presented/displayed a significant influence on the percentage of inactivation for the process of classic Fenton. In the case of attended Fenton they are light UV, the factors with greater significant influence on the percent of inactivation were: the time of contact and the mass ratio of reagents (Fe^{3+} and H_2O_2).

Capítulo 1 Introducción

En México, el mayor uso (76.8 %) del agua potable se destina al sector agrícola (CONAGUA, 2006), la alta demanda de este recurso ha ocasionado la sobreexplotación de los mantos acuíferos y la necesidad de implementar nuevas alternativas de fuentes de abastecimiento. Un recurso muy atractivo son las aguas residuales tratadas.

El reúso de aguas residuales tratadas en riego agrícola es una práctica generalizada en el país desde 1896 (BGS, 1998). Del total de agua residual generada se utiliza, para riego, 54% de la descarga total, el inconveniente es que sólo el 8.2 % recibe algún tipo de tratamiento, el resto se aplica sin depuración. El gran contenido de nutrientes y materia orgánica permite aumentar significativamente la productividad agrícola, sin embargo, el uso del agua sin tratamiento representa un serio problema de salud pública debido a que es un factor de riesgo para la transmisión de enfermedades parasitarias intestinales como las helmintiasis. Una de las helmintiasis más importantes es la ascariosis, causada por un gusano redondo (nemátodo) *Ascaris lumbricoides*. Este microorganismo es un parásito cosmopolita, el más prevalente de los helmintos que infecta a humanos. El hábitat normal de los gusanos adultos es en la parte media del intestino delgado (el yeyuno). La infección se adquiere por la ingestión de huevos embrionados, y las larvas pasan por una fase de maduración durante su migración pulmonar antes de instalarse en el intestino (Khuroo, 1996).

Los helmintos son gusanos los cuales se desarrollan durante parte de su ciclo de vida como organismos parásitos, produciendo una enfermedad llamada helmintiasis, la cual consiste en una infección ocasionada por la migración de las larvas de estos gusanos a los tejidos, órganos o cavidades del hospedador en donde sufren varias etapas de maduración, cuando llega al intestino, continúan su crecimiento y maduración hasta el estado adulto.

Existen varios tipos de helmintiasis; la ascariosis es la más común y es endémica en África, Latinoamérica y Lejano Oriente. En el mundo aproximadamente hay cerca de 1.3 billones de infectados y aunque no presenta una alta tasa de mortalidad, los niños menores de 15 años son el grupo más vulnerable ocasionando problemas de crecimiento. La presencia de síntomas en el huésped se correlaciona con el número de helmintos que lo parasitan.

Las helmintiasis son transmitidas por: (1) contacto directo con heces contaminadas o agua residual contaminada; (2) consumo de cultivos contaminados; e (3) ingestión de carne contaminada. Se distribuye en zonas tropicales y templadas del mundo, pero sobretodo en el medio rural, donde las condiciones socioeconómicas e higiénicas son deficientes. En México se estima que el 33 % de la población está parasitada, y al parecer el 6 % de los infectados presenta parasitosis masiva. Según datos del Sistema Nacional de Información de Salud (SINAIS) para el 2006 la ascariosis ocupa la decimoctava causa de enfermedad a nivel nacional dentro de las primeras veinte con 147,420 casos y una tasa de morbilidad 137.10 / 100,000 habitantes con el mayor índice en el grupo de edad de 5 a 9 años. Los estudios epidemiológicos de las aguas residuales en México y en otros países, han evidenciado el alto riesgo en la salud pública a infecciones gastrointestinales ocasionadas

principalmente por helmintos, lo que pone en manifiesto la necesidad de controlar la cantidad de huevos de helmintos presentes sobre todo en las aguas residuales empleadas para riego.

Para este efecto se han aplicado gran cantidad de métodos tanto físicos como químicos y biológicos tales como son: (a) lagunas de estabilización, que remueven hasta un 99 % de los huevos de helminto con tiempos de retención que van de 5 a 20 días (Shuval *et al.*, 1986; Grimason *et al.*, 1993; Mara, 2003), (b) Embalses, con remociones de hasta el 100 % de huevos de helminto con tiempos de retención mayores a 20 días, si se efectúa el proceso por lotes (Juanicó y Milstein, 2004), (c) Humedales artificiales, en los que puede obtenerse un porcentaje de remoción del 100 % con tiempos de retención de 4 días, pero este método es muy variable en su eficiencia y de un alto costo económico (Jiménez, 2003), (d) Métodos de coagulación – floculación, se trata de un tratamiento por medio de agentes floculantes y coagulantes de naturaleza química lo cual aumenta los costos, aunque pueden obtenerse buenas eficiencias de remoción con tiempos de retención que varían desde 9 hasta 12 horas, se generan grandes cantidades de lodos en los que se encuentran concentrados los huevos (Harlem y Murcott, 1999; Jiménez *et al.*, 2001; Jiménez, 2007), (e) Filtración rápida tiene un porcentaje de remoción de hasta 99 % de efectividad en huevos de helminto (Jiménez *et al.*, 2001), (f) Reactores anaerobios, operando a flujo ascendente y mediante los cuales pueden obtenerse porcentajes de remoción de 96 % con tiempos de retención de hasta 5.5 horas, (g) Procesos de radiación UV, están siendo muy usados actualmente para la remoción de compuestos orgánicos, aunque no se cuenta con muchos estudios para la remoción de huevos de helminto; su eficiencia depende de las condiciones de operación (De Lemos *et al.*, 2003. Un estudio por Brownell y Nelson (2006), reporta datos de inactivación en huevos de *A. suum* que van del 63.7 al 99.4 %, cuando se aumenta la dosis de radiación de 500 a 4 000 J/m² respectivamente, también observaron que el efecto de la luz UV en la inactivación de huevos descorticados es mayor por lo que infieren que las capas exteriores del huevo lo protegen de la radiación, (h) Tratamiento de aguas con ozono como germicida, operando a pH ácido puede obtenerse hasta un 99 % de remoción en tiempos de retención de 120 minutos (Orta De Velásquez *et al.*, 2004), (i) Procesos de oxidación avanzada (O₃ + UV, O₃ + H₂O₂, H₂O₂ + UV, reactivo de Fenton, etc.), se basan en la oxidación de material orgánico e inorgánico mediante la utilización de radicales [•]OH, obteniéndose resultados de remoción de hasta 28.5 % (Ramírez *et al.*, 2005), pero no se han reportado aún porcentajes de inactivación con este método, sin embargo, este tipo de procesos, en particular el reactivo de Fenton es una opción muy atractiva desde el punto de vista económico; actualmente se está comenzando a utilizar conjuntamente con radiación ultravioleta para aumentar su eficiencia.

El reactivo de Fenton clásico consiste en una mezcla de peróxido de hidrógeno y sales de hierro, y que al reaccionar, producen radicales [•]OH (especies transitorias), que debido a su alto potencial de oxidación podrían realizar una desactivación eficiente de los huevos de *Ascaris*. Este método reúne las ventajas para ser altamente factible debido a que el hierro y el peróxido de hidrógeno son económicos y de fácil acceso, requiere cortos tiempos de tratamiento para llevarse a cabo, y al adicionar radiación UV se podría aumentar significativamente la eficiencia de inactivación de huevos de helminto. Por ejemplo en los estudios de Ramírez *et al.* (2005) en agua residual aplicando el

reactivo de Fenton clásico se registró una remoción del 28.5 %, la cual podría incrementarse aplicando luz UV

Considerando esto último, en el presente estudio, se compararon, bajo condiciones óptimas de operación, el reactivo de Fenton clásico y el modificado con luz ultravioleta para inactivar huevos de helminto presentes en agua sintética.





Hipótesis

La aplicación de luz UV de manera conjunta con el reactivo de Fenton clásico, aumentará significativamente la inactivación de huevos de helminto.

Objetivo General

Determinar la factibilidad de aplicar el proceso de Fenton clásico (sin luz UV) y asistido con luz UV (FF) para la inactivación de huevos de *Ascaris suum* presentes en agua sintética, con base en pruebas de laboratorio.

Objetivos específicos

-  Establecer el estado del conocimiento científico y tecnológico del reactivo de Fenton y de los huevos de *Ascaris suum*, con base en la información reportada en bases de datos y bibliotecas.
-  Evaluar la influencia de la dosis de peróxido de hidrógeno, de la relación másica de H_2O_2/Fe y del tiempo de contacto del proceso de Fenton clásico y asistido con luz UV sobre el porcentaje de inactivación de huevos de *Ascaris suum*, mediante pruebas de laboratorio basadas en un diseño experimental y utilizando suspensiones sintéticas preparadas en agua destilada.
-  Calcular las condiciones óptimas teóricas de oxidación de *Ascaris suum* por los dos procesos evaluados, mediante un modelo matemático desarrollado en función de: dosis de peróxido de hidrógeno, relación másica de H_2O_2/Fe y tiempo de contacto.
-  Evaluar la eficiencia de inactivación de *Ascaris suum* por el reactivo de Fenton clásico y asistido con luz UV, bajo condiciones óptimas teóricas de oxidación.

Capítulo 2 Marco Teórico

2.1 Generalidades de los huevos de helminto

En México, el mayor uso del agua potable se destina al sector agrícola, cerca del 76.8 % de su extracción se emplea para el riego de 6.3 millones de hectáreas, sin embargo, la alta demanda de este recurso ha ocasionado la sobreexplotación de los mantos acuíferos y la necesidad de implementar nuevas alternativas de fuentes de abastecimiento. Un recurso muy atractivo es el reúso de aguas residuales (CONAGUA, 2007).

En México, la utilización de aguas residuales crudas en riego agrícola es una práctica generalizada iniciada desde 1896 (BGS, 1998). La descarga total de agua residual en nuestro país es de 200 m³/s de este volumen, para el riego se destina un total de 108 m³/s, el inconveniente es que de sólo el 8.2 % recibe algún tipo de proceso de tratamiento, el resto se aplica sin tratamiento alguno (Jiménez, 2002). El gran contenido de nutrientes y materia orgánica permite aumentar significativamente la productividad agrícola. Sin embargo, el uso del agua sin tratamiento representa un serio problema de salud pública debido a que puede dar origen a enfermedades parasitarias intestinales como las helmintiasis. Las principales rutas de exposición a microorganismos patógenos asociados con el uso de aguas residuales en la agricultura (Campos, 2008) se derivan de:

- 💧 El contacto humano con las aguas residuales (o cultivos contaminados) antes, durante o después de la irrigación (agricultores, sus familias, vendedores, comunidades locales);
- 💧 El consumo de productos irrigados con aguas residuales;
- 💧 El consumo de animales (por ejemplo, la carne de vacuno o cerdo) o productos de origen animal (por ejemplo, leche) que han sido contaminados a través de la exposición a las aguas residuales.

Una de las helmintiasis más importantes es la ascariosis, causada por el nemátodo *Ascaris lumbricoides*. Este organismo es un parásito cosmopolita, de los más prevalente y grandes de los helmintos humanos. El hábitat normal de los gusanos adultos es el yeyuno. La infección se adquiere por la ingestión de huevos embrionados, y las larvas pasan por una fase maduración durante su migración pulmonar (Khuroo, 1996).

2.1.1 Helmintiasis, definición e importancia

La helmintiasis se define como una infección producida por helmintos, gusanos que residen o migran a los tejidos, órganos o cavidades del hospedador, en estadio juvenil o adulto (Cruz *et al.*, 2004). Esta enfermedad se transmite por vía digestiva y da lugar a un parasitismo intestinal, en la mayoría de los casos es asintomático, lo que explica su gran difusión. La helmintiasis es una enfermedad común con gran distribución alrededor del mundo, en países en vías de desarrollo, la población afectada es del 25 al 33 % mientras que en países desarrollados es menor al 1.5 %. En regiones donde existen malas o deficientes condiciones sanitarias, la incidencia de helmintiasis puede llegar a ser hasta del 90% (Bratton y Nesse, 1993).

2.1.2 Helmintos (*Vermes*, gusanos)

Del griego *elmins* o *helmins* = gusano, en sentido estricto, “gusano parásito”. Nombre genérico que se aplica a organismos invertebrados de vida libre y parásitos. Los gusanos presentan un cuerpo blando sin apéndices, segmentados o no, con simetría bilateral (Cruz *et al.*, 2004). Son gusanos pluricelulares; no son microorganismos aunque sus huevos son microscópicos. Los helmintos tienen diferentes tipos y tamaños (de alrededor de un milímetro a varios metros de largo) con varios ciclos de vida y tipos de ambientes ideales.

Los helmintos de importancia en el tratamiento de aguas residuales pertenecen a dos phyla: (1) el phylum Platyhelminthes (gusanos aplanados) que incluyen los tremátodos y céstodos; (2) los nemátodos, phylum Nematoda, corresponde a los verdaderos gusanos redondos (Cruz *et al.*, 2004). Una característica común de los helmintos es que se reproducen a través de huevos. Huevos de diferentes helmintos difieren en forma y tamaño pero en general, los que tienen importancia en aguas residuales varían de 20 a 80 μm , tienen una densidad de 1.06 a 1.15 (Ayres *et al.*, 1992) y pueden adherirse a hortalizas debido a que presentan propiedades hidrofílicas producto de la composición química de las membranas que constituyen a los huevos, en particular, por la presencia de aminoácidos como el triptófano, fenilalanina, tirosina y prolina presentes en la capa externa y en la membrana vitelina (Jaskoski 1962; Capizzi y Schwartzbrod, 2001). Además, aunque la función de la capa exterior del huevo es incierta, el material pegajoso que la constituye podría brindar protección contra la desecación o la acción de disolventes. Este material pegajoso consta de una proteína y un mucopolisacárido que proporcionan residuos de ácido sulfúrico. Esta estructura externa parece proporcionar una carga superficial negativa y conferirle dichas propiedades (Gaspard, 1994). El nemátodo *Ascaris* es el huevo de helminto más comúnmente observado en aguas residuales y lodos. En aguas residuales, los huevos no son infectivos. Para ser infectivos necesitan desarrollar larva, para lo cual requieren de cierta temperatura (entre 22 y 33 ° C) y humedad (> 40 %). Estas condiciones son usualmente encontradas en suelos o cultivos irrigados con aguas residuales donde los huevos pueden desarrollar larvas en 10 días. Los huevos pueden sobrevivir en agua, suelo y/o cultivos por varios meses/años (Feachem *et al.*, 1983)

2.1.3 Generalidades de *Ascaris lumbricoides* y *Ascaris suum*

El Orden *Ascaridia* comprende un gran número de nemátodos que vive habitualmente en el tubo digestivo de sus hospedadores definitivos. Un grupo de la *Ascaridia*, la *Ascaridoidea*, tiene dos diferentes formas. Los machos tienen una o dos espículas copulatorias, algunos miembros de la *Ascaridoidea* son parásitos en la etapa adulta en los seres humanos, tales como *A. lumbricoides* y *Lagochilascaris*, mientras que otros lo son como larvas por ejemplo, *Toxocara canis* un ascárido común del perro, y *Toxocara cati* ascárido huésped del gato. Sin embargo, aunque no son helmintiasis intestinales del humano, pueden infectarlo y ocasionarle por migración larvaria tisular, síndromes de Migración Larvaria Visceral u Ocular (Acuña *et al.*, 2003) El agente causal de ascariosis en los seres humanos es *A. lumbricoides* y es el mayor nemátodo del tracto gastrointestinal.

La tabla 2.1 presenta la clasificación propuesta por Lineo en 1958 para el nemátodo *A. lumbricoides*.

El parásito más estrechamente relacionado con *A. lumbricoides* es el de cerdo *A. suum*. Durante mucho tiempo, el *Ascaris* de cerdo estuvo considerado como sinónimo de *A. lumbricoides* por la gran similitud morfológica y fisiológica que presentan. Se cree que *A. lumbricoides* fue originalmente un parásito de cerdos que se adaptó al hombre durante su domesticación y el contacto directo, o quizás fue un parásito del hombre que se adaptó a cerdos, debido a que la fisiología del humano y del cerdo son similares. Sin embargo, actualmente, se reconocen como dos especies distintas. Se diferencian con base en su composición de hidratos de carbono, que los distingue a nivel antigénico (formación de anticuerpos), y que en el extremo anterior de *A. lumbricoides* se encuentra la boca provista de tres labios salientes con bordes dentados y bien diferenciados (Foto 2.1), que lo hacen distinto de *A. suum* ya que éste último no presenta esta característica morfológica (Khuroo, 1996). Por otra parte, cuando una especie infecta al hospedero de la otra, ocurre una migración incompleta (Rojas, 1998).

Debido a esto, y a la fácil disección y obtención de ejemplares, se pueden utilizar los huevos de *Ascaris* de la especie del cerdo, en lugar de la especie que infecta al humano, en pruebas de inactivación.

2.1.3.1 Morfología de *Ascaris lumbricoides*

Como adulto (Foto 2.2), la hembra mide de 20 a 49 cm de largo y de 3 a 6 mm de diámetro; el macho mide de 15 a 30 cm con un ancho de 2 a 4 mm. Es cilíndrico con un extremo posterior puntiagudo y uno anterior romo. Los cordones laterales son muy grandes y tienen el aspecto de estrías de color blanquecino que recorren longitudinalmente todo el cuerpo del nemátodo.

La cabeza está provista de tres labios bien diferenciados que poseen diminutos dientes o

TABLA 2. 1 CLASIFICACIÓN DE *Ascaris lumbricoides*

Phyllum:	<i>Aschelminthes</i>
Clase:	<i>Nematodo</i>
Superfamilia:	<i>Ascaridoidea</i>
Género:	<i>Ascaris</i>
Especie:	<i>Ascaris lumbricoides</i>



FOTO 2. 1 ASPECTO DE LA BOCA DE *Ascaris*
<http://www.thelifetree.com/roundworms.htm>

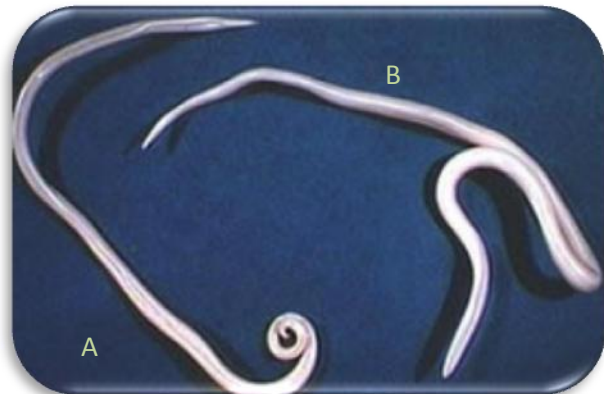


FOTO 2. 2 FORMA ADULTA DEL MACHO(A) Y LA HEMBRA (B) DE *Ascaris lumbricoides*

<http://www.merckvetmanual.com/mvm/index.jsp>

dentículas. Cada labio tiene pequeñas papilas gemelas en los bordes laterales, y localizada en el centro existe una pequeña cavidad bucal de forma triangular que continúa con el esófago e intestino tubular, terminando en la cloaca sexual en el macho y el ano en la hembra.

En el macho, el extremo posterior está curvado hacia la posición ventral. Sus órganos genitales consisten en un tubo largo formado sucesivamente por los testículos, el vaso deferente y el conducto eyaculador, que desemboca en la cloaca de localización subterminal, junto con el recto las espículas copuladoras.

La hembra no presenta el enrollamiento del macho. Su vulva es de localización medio ventral, se abre cerca de la unión de los tercios anterior y medio del cuerpo, se continúa con la vagina cónica que se bifurca para formar un par de tubos genitales, cada uno de los cuales consta de útero, receptáculo seminal, oviducto y ovario. Pueden contener hasta 27 millones de huevos y se calcula que la producción diaria por la hembra es de 200 000 huevos aproximadamente. El promedio de vida de los gusanos adultos es de 6 a 18 meses (Khuroo, 1996; Tay *et al.*, 2002; Vázquez, 2003).

Existe una cierta variación en el tamaño y la morfología de los huevos de *Ascaris*. En general, hay dos tipos de huevos, los fecundados y los no fecundados. Los primeros, son ovalados, de cápsula gruesa y transparente formada por capas, una carcasa exterior irregular (mamelonada). El interior presenta una masa amorfa de citoplasma, por lo general con evidencia de la segmentación o desarrollo embrionario (Foto 2.3 A). Estos huevos miden de 40 a 80 micras de largo por 25 a 50 micras de ancho. Los huevos no fecundados son depositados por las hembras que no se aparearon con machos, son más largos y estrechos, la cubierta es muy delgada y generalmente carecen de mamelones, tienen una estructura interna pobremente diferenciada compuesta de gránulos retractables de tamaño variable. Miden 85 a 90 micras de largo por 30 a 40 micras de ancho (Foto 2.3 B). Tanto los huevos fecundados como los no fecundados, pierden a menudo la capa mamelonada, al resultado se le denomina huevo descorticado (Foto 2.3 C).

La ascariosis es una geohelminthiasis, es decir, tienen la necesidad de cumplir una etapa de su ciclo vital en el suelo, ya sea para la maduración de los huevos y/o el desarrollo de larvas y adultos de vida libre. En el caso de la ascariosis, los huevos que salen al exterior con las heces y se depositan en el suelo, necesitan de un período de maduración de alrededor de 20 días para transformarse en infectantes, temperatura óptima entre 22 y 33 ° C, y buenas condiciones de humedad, existen reportes de lodos sépticos y almacenados que se someten a deshidratación durante 20 meses, la viabilidad de los huevos de *Ascaris* presentes comienza a decrecer en paralelo con la disminución de la humedad del lodo (por debajo del 40 %) sin

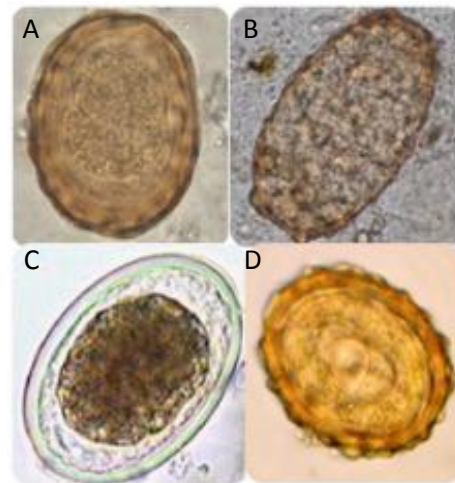


FOTO 2. 3 ALGUNOS TIPOS DE HUEVOS DE *A. lumbricoides*: (A) HUEVO FECUNDADO, (B) HUEVO NO FECUNDADO, (C) HUEVO FECUNDADO DESCORTICADO Y (D) HUEVO LARVADO EN SEGUNDO ESTADIO.

http://www.cdfound.to.it/html/at_ind_a.htm#a

embargo, puede mantenerse un poco de su viabilidad incluso con una humedad del 26% (Sanguinetti *et al.*, 2005). Las larvas sufren dos mudas, y la tercera etapa es la forma infecciosa (Foto 2.3 D). La incubación de los huevos no se produce en el suelo sino en la parte superior del intestino. Los huevos en el suelo siguen siendo viables y capaces de infectar por un período de hasta 10 años. Son resistentes a los métodos habituales de los productos químicos de purificación de agua. La ebullición, sin embargo, mata a los huevos de *Ascaris* en minutos. Mueren frente a la desecación, y las bajas temperaturas retardan su maduración. Esto indica que no existe autoinfección en el paciente, y los huevos en las heces recién emitidas, no son infectantes. También se ha descrito que en zonas de alta incidencia existe transmisión trasplacentaria de larvas de *Ascaris* (Chiarpenello, 2004).

2.1.3.2 Ciclo de vida

La hembra fecundada se aloja en el lumen del intestino delgado (figura 2.1 A), deposita huevos que son eliminados junto con la materia fecal (2.1 B), en el suelo, el huevo sufre una división blastomérica desarrollándose el embrión que se transforma en larva móvil del primero y luego el segundo estadio (2.1 C). Los huevos infectantes al ser ingeridos por el hombre (2.1 D), pasan la barrera de los ácidos estomacales y se instalan en la segunda porción del duodeno (2.1 E). Las larvas de 200 a 300 micras perforan la membrana ovular por uno de sus polos, penetran la pared intestinal, alcanzan los vasos mesentéricos y en 24 horas por vía corta llega al hígado donde permanece de 3 a 5 días. Aumenta de tamaño hasta alcanzar las 900 micras de longitud y el tercer estadio. Continúa su migración por las venas suprahepáticas, vena cava inferior aurícula y ventrículo derecho, arterias pulmonares, atraviesa la membrana alveolocapilar y cae en alvéolos donde muda y se transforma en larva del cuarto estadio (2.1 F). Llega a medir 1.5 cm, asciende por los bronquiolos, bronquios, tráquea y es deglutida, pasando a esófago y estómago y finalmente llega al intestino delgado, donde se convierte en larva del quinto estadio (2.1 G) y se desarrolla hasta alcanzar la madurez sexual 50 días después de la infección. Si hay un gusano macho y uno hembra, se produce la fecundación y 10 días más tarde se pueden encontrar huevos en materia fecal (figura 2.1). Todo el crecimiento de la larva hasta su madurez sexual lo hacen utilizando sustancias nutritivas del huésped.

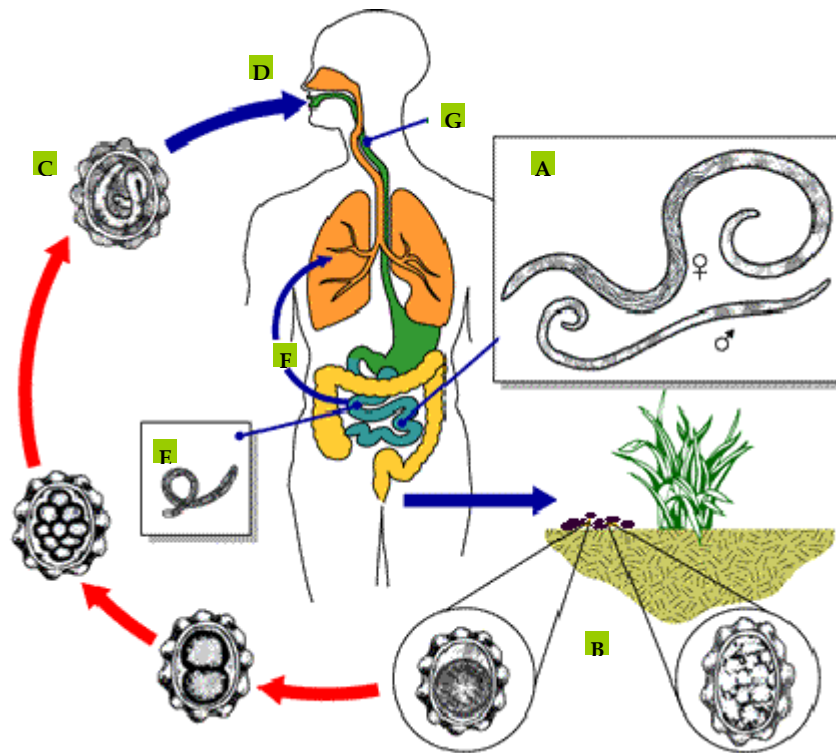


FIG. 2. 1 CICLO BIOLÓGICO DE *A. lumbricoide*S. IMAGEN MODIFICADA

<http://www.dp.cdc.gov/dpdx>

Otra característica es que producen parasitismo errático, los gusanos adultos pueden ir al estómago y ser expulsados por la boca o por la nariz, o ir al intestino grueso y ser expulsados por el ano; o desde la faringe penetrar por la trompa de Eustaquio, perforar el tímpano y salir por el oído externo; o ascender por las fosas nasales y llegar al conducto lagrimal y salir por el ángulo interno del ojo. Cuando el parasitismo es muy intenso, puede penetrar en el conducto pancreático, el colédoco, la vesícula biliar y hasta los conductos biliares intrahepáticos. También el apéndice y producir perforación. Las larvas en los casos de invasión masiva, pueden ir al corazón por vía venosa y ser lanzadas al ventrículo izquierdo y, por la arteria aorta, a los distintos órganos: ganglios linfáticos, tiroides, timo, bazo, cerebro, médula espinal, riñón y, en las embarazadas, pasa a la placenta.

La migración larvaria ocasiona una respuesta inflamatoria tóxico-alérgica variable, que puede manifestarse clínicamente como neumonitis asmatiforme y radiológicamente con infiltrados pulmonares intersticiales lábiles y puede haber también una elevada eosinofilia (Síndrome de Loëffler). Los *Ascaris* adultos en el intestino delgado pueden ocasionar dolores abdominales, náuseas y vómitos, pueden producir o favorecer manifestaciones extraintestinales como retardo del desarrollo pondo-estatural, desnutrición, anemias carenciales y alteraciones en el aprendizaje. La distensión abdominal es signo de una parasitosis masiva. El aumento de la temperatura corporal y los íleos, son factores que estimulan la migración de los *Ascaris* y su agrupamiento, esto favorece las diversas complicaciones graves en el huésped, por ejemplo:

💧 Oclusión intestinal en general, pero no en forma excluyente, por gran número de gusanos.

- ☁ Perforación intestinal. Muchas veces los adultos atraviesan la pared a través de suturas o divertículos.
- ☁ Pasaje de adultos a peritoneo, pleura y otros sitios aberrantes.
- ☁ Obstrucción de vías biliares: ictericia, infecciones de vías biliares, pancreatitis, abscesos hepáticos.
- ☁ Apendicitis, diverticulitis.
- ☁ Obstrucción de la vía respiratoria, penetración en fosas nasales, senos y trompa de Eustaquio, secundarias al ascenso hacia la boca de ejemplares adultos.
- ☁ Íleo paralítico de causa no bien determinada. Se ha observado en relación con la presencia de adultos en la válvula íleo-cecal.

2.1.3.3 Epidemiología

2.1.3.3.1 Factores que determinan la prevalencia de ascariosis

En zonas endémicas, la prevalencia de *Ascaris* aumenta bruscamente durante los primeros 2 ó 3 años de edad, se mantiene en un máximo entre las edades de 4 a 14 años, y disminuye en los adultos. Su prevalencia en el mundo es proporcional a la densidad de población humana, el nivel de educación, el nivel de saneamiento y desarrollo de la agricultura, las condiciones geoclimáticas regionales y los hábitos alimenticios de la población. La ascariosis es más prevalente en las zonas rurales de hacinamiento, la falta de instalaciones sanitarias contribuye a la contaminación fecal de los suelos y a la propagación de la infección. Prácticas agrícolas como el uso de heces fecales humanas como fertilizante eleva su prevalencia.

2.1.3.3.2 Intensidad de la infección por *Ascaris*

El interés de los epidemiólogos se ha centrado en la intensidad de la infección por *Ascaris* debido a que la enfermedad clínica se limita a persona con alta carga de gusanos. *A. lumbricoides* no se multiplica dentro del huésped, los gusanos se adquieren por la exposición continua a huevos infectantes. Las infecciones fuertes son más comunes en los niños que en adultos (70% frente a 49%) en zonas endémicas. Por otra parte, no es raro que el 80 % de los helmintos infecte únicamente al 20 % de los huéspedes potenciales; la mayoría de las personas infectadas tiene un nivel bajo de número de parásitos. Esta distribución desigual puede ser resultado del aumento de la susceptibilidad o la superposición de varias dispersiones al azar.

2.1.3.3.3 Re infecciones

Los datos sobre la tasa de reinfección después del tratamiento vermícida de masas en zonas endémicas han demostrado que más del 80 % de la población es infectado de nuevo en 6 meses. La intensidad de la reinfección no es al azar y se agrega cada vez más en casos en que las personas previamente habían sido fuertemente infectadas. En general, el 10 % de todos los sujetos fueron fuertemente infectados después de múltiples terapias de tratamiento vermícida; más del 60 % fueron fuertemente infectados al menos una vez. Estos datos indican que algunos individuos parecen ser más susceptibles a una fuerte infección, así como a la reinfección.

2.1.3.3.4 La prevalencia mundial

La ascariosis tiene una distribución mundial. Se ha estimado que más de 1.4 billones de personas en todo el mundo están infectados con *A. lumbricoides*. La mayoría de las infecciones se producen en Asia, mientras que en países desarrollados se presentan las más bajas tasas de infección. La ascariosis es altamente endémica en China y el Sudeste de Asia, con tasas de prevalencia de 41 a 92 %. Su prevalencia en Japón se redujo considerablemente después de la Segunda Guerra Mundial: 70 a 80 % en 1955, 13 % en 1962 y 0.04% en 1992. En el subcontinente indio, la ascariosis es altamente endémica en Kashmir (70%), Bangladesh (82%), y en el Centro y Suroeste de la India (20 a 49 %). En África la prevalencia varía entre el 15 y el 27 %. En América Latina su prevalencia es alta y no ha cambiado a lo largo de los años. Tanto en Europa como en las grandes urbes su prevalencia es baja, sin embargo, en zonas rurales es alta y puede alcanzar tasas hasta del 52 %. En Estados Unidos, es la tercera infección más común transmitida por helmintos (superada sólo por la anquilostomiasis e infecciones por *Trichuris trichiura*) De los 4 millones de personas infectadas en los Estados Unidos, un gran porcentaje son inmigrantes de países en desarrollo con tasas de infección del 20 al 60%.

En México, de acuerdo con el Sistema Nacional de Información de Salud (SINAIS) de la Secretaría de Salud (SSA), en 2003 las enfermedades gastrointestinales ocuparon la decimoctava causa de muerte general en la población con 4,561 casos y la primera entre la población infantil preescolar (de 1 a 4 años) con 648 casos. En el 2004, la Dirección Nacional de Epidemiología indicó que se tuvieron a nivel nacional, 185,424 casos de ascariosis, 388 de teniasis, 524,646 casos de otras helmintiasis. Para el 2006 la ascariosis ocupó la decimoctava causa de enfermedad a nivel nacional dentro de las primeras veinte con 147,420 casos y una tasa morbilidad de 137.10/ 100 000 hab con el mayor índice en el grupo de edad de 5 a 9 años.

Los estudios epidemiológicos de las aguas residuales en México (Cifuentes *et al.*, 1993; Cifuentes *et al.*, 1994; Blumenthal *et al.*, 2001; Mara *et al.*, 2007) y en otros países (Habbari, *et al.*, 1999; Ensink *et al.*, 2005; Bastos *et al.*, 2008), han evidenciado el alto riesgo en la salud pública por infecciones gastrointestinales ocasionadas principalmente por helmintos. Esto dio como resultado la actual legislación sobre el contenido de huevos de helmintos en las aguas residuales tratadas para riego, así, la Norma vigente [NOM-003-SEMARNAT-1997](#), establece los límites permisibles del contenido de huevos de helmintos en aguas para riego (tabla 2.2).

TABLA 2. 2 LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES DEL CONTENIDO DE HUEVOS DE HELMINTOS EN AGUAS PARA RIEGO (NOM-003-SEMARNAT-1997)

Tipo de reúso	Huevos de helminto (HH/L)
Servicios al público con contacto directo	1
Servicios al público con contacto indirecto	5

Con el fin de proteger a la salud pública y cumplir con los límites que señalan las normas, existe una gama muy amplia de opciones de tratamiento de aguas residuales que incluyen métodos físicos, químicos, biológicos y su combinación. La selección de cualquiera de ellos deberá tomar en cuenta las

características de estas formas infectivas, como su gravedad específica (1.056 a 1.238), su tamaño (30 a 80 μm), las propiedades adherentes de su superficie y su resistencia a las condiciones adversas del entorno. Las propiedades anteriores determinan su comportamiento durante el tratamiento.

2.1.4 Procesos de remoción e inactivación de huevos de helmintos

Como se mencionó anteriormente, los huevos de helminto poseen un caparazón formado por 3 ó 4 capas (Tabla 2.3). Estas capas hacen muy resistentes a los huevos. Para inactivar los huevos la temperatura debe elevarse por encima de los 40 °C de 10 a 20 días o la humedad debe reducirse por debajo del 5 % (Feachem *et al.*, 1983; Hays, 1997). Dichas condiciones son más favorables de evaluar en el tratamiento de lodos, por lo que en aguas residuales, es poco común inactivar huevos de helmintos aunque si removerlos.

TABLA 2. 3 CARACTERÍSTICAS DE LA PARED DE LOS HUEVOS DE HELMINTOS¹

Pared	Composición	Función
Capa interna lipídica	<ul style="list-style-type: none"> ● Lípidos <ul style="list-style-type: none"> ● (75 %) ascarosidos (3,6 dideoxi-L-arabinohexosa vinculado a una larga cadena de alcohol (manoles y dioles secundarios que contienen de 22 a 37 átomos de carbono) por un enlace glucosídico). ● (25 %) Proteínas 	<ul style="list-style-type: none"> ● Permeabilidad selectiva (evita la penetración de sustancias polares). ● Cambio con el ambiente (resistencia a la desecación)
Capa quitinosa	<ul style="list-style-type: none"> ● Microfibras de quitina (un homopolímero de N-acetil-D-glucosamina unido por enlaces β (1→4) dentro de una matriz proteica). 	<ul style="list-style-type: none"> ● Resistencia estructural
Capa vitelina	<ul style="list-style-type: none"> ● Lipoproteínas 	<ul style="list-style-type: none"> ● Adhesión
Capa externa o uterina	<ul style="list-style-type: none"> ● Mucopolisacáridos ● Proteínas ● Lípidos 	<ul style="list-style-type: none"> ● Adhesión ● Casi impermeable (excepto a gases y solventes de lípidos)

¹ Gaspard, (1995); Brownell y Nelson, (2006); Quilès *et al.*,(2006)

Los procesos de remoción y de inactivación de huevos de helminto se dividen en dos grandes grupos: biológicos y fisicoquímicos. Dentro del primer grupo se pueden mencionar: las lagunas de estabilización, los humedales artificiales y los reactores UASB. En el grupo de los procesos fisicoquímicos se tiene a la filtración rápida, embalses, coagulación- floculación, radiación con luz UV. Además de los procesos fisicoquímicos convencionales, destacan los procesos de oxidación avanzada en los que se pueden señalar: el ozono y el reactivo de Fenton. No todos estos procesos son capaces de inactivar los huevos de helminto, eso depende de los mecanismos y las condiciones de operación de cada uno. Básicamente los procesos de oxidación serían los únicos procesos capaces de inactivar los huevos de helminto. A continuación se presenta un resumen de los principales estudios analizados para cada proceso, los primeros seis que se enlistan sólo consiguen remover los huevos del agua mientras que con los tres últimos es posible llegar a inactivarlos.

2.1.4.1 Lagunas de estabilización

Las lagunas de estabilización constituyen un proceso muy eficiente para la remoción de agentes patógenos debido a que remueve hasta 6 unidades log de bacterias, 5 unidades log de virus y 100 % de los protozoarios y de los huevos helmintos, en comparación con los tratamientos convencionales que presentan 1 a 2 unidades log de remoción de bacteria y virus y de 90 - 99 % de remoción de quistes de protozoarios y huevos de helmintos. Son diversos los factores que favorecen la remoción (tiempo de retención, temperatura, luz solar, pH, la depredación de los microorganismos, la adsorción y la absorción) sin embargo, con respecto a los huevos de helminto, la sedimentación es el principal mecanismo. Para remover huevos de helminto con estos sistemas se requiere tener, como mínimo, tiempos de retención que van de 5 a 20 días, dependiendo de la concentración inicial y, al menos, el doble de tiempo para disminuir la concentración de coliformes termotolerantes por debajo de 1000 UF/100 mL. Para controlar *Cryptosporidium*, se necesitan cerca de 38 días (Shuval *et al.*, 1986; Grimason *et al.*, 1993; Mara, 2003)

Estos sistemas se recomiendan en los países en desarrollo con climas cálidos, para la reutilización de aguas residuales en la agricultura siempre y cuando la tierra está disponible a un precio razonable. Sin embargo, en zonas áridas, donde las tasas de evapo-transpiración son altas, los estanques contribuyen a la pérdida de agua.

2.1.4.2 Humedales artificiales

Los humedales artificiales consisten en depósitos o estanques donde se cultivan plantas. Se construyen sobre una superficie inclinada para que el agua fluya por gravedad, y generalmente superficiales para permitir una mejor remoción de los contaminantes. Los humedales son también eficaces en la eliminación de nitrógeno, fosforo y metales pesados (Brix, 1993). Aunque en muchos países se han instalado humedales, son pocos los estudios microbiológicos realizados en estos sistemas. La mayoría se enfocan a la remoción de organismos indicadores de la calidad del agua como coliformes y bacteriófagos (Gersberg *et al.*, 1989; Sheuerman *et al.*, 1989), pero no los correlacionan con protozoarios patógenos como *Giardia* y *Cryptosporidium*. Sin embargo, estos sistemas son eficientes no sólo para remover éstos y otros patógenos como las amebas *Etamoeba*, *Acanthamoeba* y *Naegleria*, y los huevos de *Ascaris* (Rivera *et al.*, 1993).

La remoción de patógenos depende del clima, el tipo de humedal y la planta utilizada. El proceso remueve del 90 al 98 % de coliformes termotolerantes, 67 al 64 % de colifagos MS2 y del 60 al 100 % protozoarios (Jiménez, 2003). Los mejores rendimientos se obtienen al emplear tiempos de retención de 4 días en la superficie del terreno de los humedales. Un humedal de flujo horizontal, con 100 m de largo, construido sobre una capa fina de grava hidropónica, puede remover hasta el 100 % de los huevos de helmintos en los primeros 25 m (Rivera *et al.*, 1995; Stott *et al.*, 1999)

2.1.4.3 Reactores UASB

Los sistemas anaerobios de flujo ascendente son reactores biológicos anaerobios que pueden remover huevos de helmintos a través de la sedimentación y filtración de los lodos en el lecho. Von Sperling *et al.*, (2002) en un UASB con tiempo de retención de 5.5 h trataron aguas residuales que contenían entre 64 y 320 HH/L, y produjeron un efluente con 1.3 a 45 HH/L con un valor medio de 16

HH/L y una eficiencia de remoción del 96 %. Se ha recomendado a la par de los sistemas UASB utilizar lagunas de estabilización con el fin de eliminar completamente las fluctuaciones observadas en el efluente.

2.1.4.4 Filtración rápida (> 2m/h)

Es un tratamiento útil para remover huevos de helmintos y protozoarios de los efluentes fisicoquímicos o biológicos (Landa *et al.*, 1997). La filtración rápida remueve el 90 % de los coliformes fecales, bacterias patógenas (*Salmonella* y *Pseudomonas aeruginosa*) y enterovirus, del 50 al 80 % de los quistes de protozoos (*Giardia* y *Entamoeba coli*, *E. histolytica*) y del 90 al 99 % de los huevos de helmintos (Jiménez *et al.*, 2001).

2.1.4.5 Embalses

Al igual que las lagunas de estabilización, los embalses se pueden emplear para remover los huevos de helminto de aguas residuales si los tiempos de retención son mayores de 20 días. Estos sistemas son útiles tanto para la remoción de huevos de helminto como para conciliar la constante producción de aguas residuales a la demanda variable de agua para los cultivos. Se remueven el 100 % de los huevos cuando los embalses funcionan como sistemas por lote (Juanicó y Milstein, 2004)

2.1.4.6 Coagulación-floculación

Jiménez *et al.* (1997) así como Harlem y Murcott (1999) recomiendan el uso de la coagulación – floculación para producir agua para reúso agrícola. Cuando estos procesos utilizan bajas dosis de coagulante combinado con un floculante de alto peso molecular y alta densidad de carga, el tratamiento se denomina tratamiento primario mejorado químicamente CEPT (por sus siglas en inglés), y si además de esto es acoplado con un sedimentador secundario de alta tasa en vez de uno convencional, entonces se le llama tratamiento primario avanzada (TPA). Los dos procesos son eficientes para la remoción de huevos de helmintos además, permiten que la materia orgánica, el nitrógeno y fósforo permanezcan en el agua en la fracción disuelta o como partículas muy pequeñas, lo que mejora la productividad de la tierra. Aunque el efluente tiene un bajo contenido en sólidos en suspensión y huevos de helmintos, aun debe pasar por un proceso de desinfección para inactivar bacterias.

Al aplicar dosis de cal de 1000 mg/L para aumentar el pH a 11 con tiempos de retención de 9 a 12 horas se remueven 4 unidades log de huevos de helmintos y 4.5 unidades log de coliformes fecales, produciendo un efluente seguro para riego no restringido. Sin embargo, se generan grandes cantidades de lodo (alrededor de 0.14 m³/m³), lo que representa un serio inconveniente del proceso (Jiménez, 2007). Las dosis de coagulantes se pueden reducir considerablemente si se combinan con polímeros (generalmente aniónicos) y, finalmente, el tiempo de retención hidráulica se reduce de 4 a 6 horas. Mientras que para el TPA son solo de 0.5 a 1 h. El TPA remueve una unidad log de coliformes fecales, una de *Salmonella sp.*, del 50 al 80 % de quistes de protozoarios (*Giardia* y *Entamoeba coli*, *E. histolytica*) y del 90 al 99 % de huevos de helmintos (Jiménez *et al.*, 2001).

En resumen, los procesos de coagulación y floculación, sedimentación y filtración permiten “obtener” un efluente que cumple con las normas mexicanas para reúso de aguas residuales tratadas son: sedimentación, filtración, floculación/coagulación y lagunas de estabilización. Sin embargo, estos

procesos solo transfieren los huevos de helminto de la fase líquida a una fase sólida, sin destruirlos ni afectar su viabilidad, es decir la capacidad de desarrollarse hasta la etapa infectiva.

Debido a lo anterior, la mayoría de los estudios realizados para inactivar huevos de helmintos se enfocan en el tratamiento de lodos. Podemos mencionar la post-estabilización alcalina, el tratamiento ácido, la digestión anaerobia, el secado térmico de los lodos anaerobios, la desinfección con metales y la deshidratación (Méndez *et al.*, 2002; Barrios *et al.*, 2004; Paulino *et al.*, 2001; Aguilar *et al.*, 2006). La tabla 2.4 muestra los procesos para aumentar la reducción de patógenos PRFP por sus siglas en inglés acordados por la US-EPA en 1992, para lodos con un alto contenido de huevos de helmintos.

TABLA 2. 4 APLICACIÓN PRÁCTICA O TEÓRICA DE LOS PROCESOS PRFP DE LA US-EPA PARA LODOS CON ALTO CONTENIDO DE HUEVOS DE HELMINTOS¹

Proceso	Eficiencia reportada (%)	Contenido inicial HH/g ST	Contenido final ^{A, B}	Datos experimentales ^B
Post estabilización con cal	100	8	0	5-12 HH/g ST
Digestión anaerobia termofílica (48 °C)	70-78	2-8	21-60	19-39 HH/g ST
Tratamiento térmico (108 °C)	90-93	9.5	5-16	ND
Irradiación a 1000 Gy	100	88	0	ND
Pasteurización a 70 °C	100	8	0	ND

¹ Aguilar *et al.*, 2006.

A Usando la eficiencia reportada.

B En lodos con 75-200 HH/ g ST.

Los estudios realizados para inactivar huevos de helmintos en agua, implican el tratamiento con luz UV y procesos de oxidación avanzada así como la combinación de éstos.

2.1.4.7 Radiación con luz UV

Aunque el uso de la desinfección con luz UV es cada vez más común su aplicación en los sistemas de tratamiento de aguas residuales y de agua potable, son pocos los estudios del efecto de la luz UV sobre los huevos de *Ascaris*. Tromba en 1978, determinó que los huevos viables de *A. suum* expuestos a dosis de 240 a 960 J/m² fueron inactivados con eficiencias que fluctuaron entre 1.9 a 2.3 unidades log; sin embargo, no se observó relación alguna entre la dosis y la inactivación de los huevos. En 2003 Lemos *et al.*, lograron inactivar 0.77 unidades log de huevos no embrionados de *A. lumbricoides* sometiéndolos a luz UV (254 nm) en un foto reactor pequeño. Estos autores ensayaron diferentes dosis y tiempos de exposición 20, 40 y 60 segundos y observaron que la viabilidad de los huevos se ve afectada significativamente ante la exposición a la luz UV incluso en radiaciones bajas de 20 segundos (dosis de 6.7 mW*s*cm²), cuando sólo alrededor del 45% de los huevos se mantuvo en etapa de célula única, y sólo el 17 % desarrolló larva móvil. Los mejores resultados fueron obtenidos en los tiempos de radiación de 40 y 60 segundos (dosis de 13.6 y 20.3 mW*s*cm²), aproximadamente

el 60-65 % de los huevos se mantuvo en la etapa de célula única (sin desarrollo de larva móvil) y tan sólo el 9 - 10 % desarrollaron larva móvil. Finalmente, también observaron que cerca del 86 % de los huevos que no son expuestos a la luz UV desarrollaron larvas móviles. En 2006, Brownell y Nelson realizaron estudios con huevos descorticados e intactos de *A. suum* empleando una lámpara UV de baja presión. Para los huevos intactos se emplearon lámparas con dosis que van de 0 a 8000 J/m² mientras que, para los huevos descorticados se usaron lámparas que van de 0 a 500 J/m². Con una dosis de 500 J/m², se logró inactivar 0.44 ± 0.2 unidades log (63.7 %), mientras que con una dosis de 4000 J/m² resulta en 2.23 ± 0.49 unidades log (inactivación del 99.4 %). Por otro parte, cuando se realizó la exposición de los huevos descorticados a la luz UV, se redujeron 1.80 ± 0.32 unidades log (98.4 %) con una dosis 500 J/m². Esto sugiere que las capas exteriores del huevo, lo protegen de la inactivación por la radiación con luz UV.

2.1.4.8 Ozono

En el 2002 Orta De Velásquez *et al.*, emplearon como agente germicida al ozono sobre huevos de *A. suum*. Realizaron pruebas a nivel laboratorio en un reactor por lote operando con tasas de transferencia de 9.2 y 18.4 mg O₃/ min. En una primera etapa de la experimentación, se observó que los huevos de a pH menores de 5, con una dosis de 18.4 mg O₃/min, presentó una tasa de inactivación del 94 %. En una segunda etapa, se trabajó a pH 3 con la dosis de 18.4 mg O₃/min durante una hora, y el 96.7 % de los huevos mostraron daños en su cobertura externa. Años más tarde, el ozono se aplicó en muestras sintéticas, la concentración de ozono disuelto en la fase líquida oscilaba generalmente entre 3.5 a 4.7 mg / L, y el valor pH 5.9. Una inactivación del 90% (t₉₀) se obtuvo en 1 h, el 10 % restante fue inactivado en 2 h. La inactivación de 2 unidades log ocurrió en un valor cercano 4.7 mg/min/L. El mejor porcentaje de reducción fue del 99 % en 120 min. (Orta De Velásquez *et al.*, 2004)

2.1.4.9 Reactivo de Fenton

La gran parte de los estudios en agua residual empleando el reactivo de Fenton se enfocan a la eliminación de compuestos orgánicos e inorgánicos, son pocos los estudios realizados para evaluar su efecto en la eliminación de parásitos. Al respecto, Ramírez *et al.*, en 2005 usaron el reactivo de Fenton en agua residual y registraron un por ciento de remoción de huevos de helminto del 28.5 % sin embargo, no reportaron el por ciento de inactivación.

2.2 Generalidades de proceso Fenton

El reactivo de Fenton o proceso Fenton se define como un proceso de oxidación avanzada (POA) o tecnología de oxidación avanzada (TOA) es decir, un proceso que involucra la generación y uso de especies transitorias altamente oxidantes, en el cual los radicales hidroxilos ([•]OH) son los principales oxidantes implicados (Glaze *et al.*, 1987).

El “reactivo de Fenton o proceso de Fenton” se refiere a una mezcla de peróxido de hidrógeno y un metal de transición (comúnmente sales ferrosas y férricas). En 1894 Fenton informó que, en presencia de bajas concentraciones de sales ferrosas y H₂O₂, el ácido tartárico se oxida a ácido dihidroxi maleico. Más tarde demostró que otros hidroxiaácidos también se oxidan en presencia de estos reactivos. Del mismo modo, cuatro años después Ruff observó que el ácido glucónico con el reactivo de Fenton se degrada por vía descarboxilación oxidativa a arabinosa. En 1934 Haber y Wess

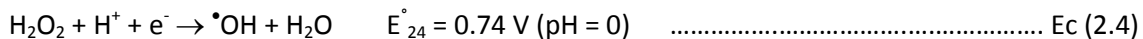
sugirieron que en la descomposición del peróxido por sales de hierro, se forma el radical $\cdot\text{OH}$ un intermediario activo a través de la oxidación del ion ferroso por el peróxido de hidrógeno (ecuación 2.1).



En 1946 Baxendale *et al.*, confirmaron la formación de los radicales $\cdot\text{OH}$ en el reactivo de Fenton mostrando que inicia y activa la polimerización de oleofinas a través de la adición del radical $\cdot\text{OH}$ a los dobles enlaces. Así, el hecho de que en muchos sistemas el reactivo de Fenton es un eficiente agente de hidroxilación apoya la formación de radicales hidroxilos como intermediarios reactivos.




Numerosos iones metálicos y sus complejos, en sus estados de oxidación más bajo (por ejemplo, Fe(II), Cu(II), Ti(III), Cr(II), Co(II)), tienen características oxidativas como en el reactivo de Fenton, por lo tanto, las mezclas de estos compuestos metálicos con el H_2O_2 se les ha llamado reactivos “tipo Fenton”. Cabe señalar que el H_2O_2 no puede ser oxidado por complejos de metales de transición en sus estados de oxidación más altos, por ejemplo, Ce(IV), Np(VI), U(VI), Ag(II), Mn(III), Co(III), para producir $\text{HO}_2\cdot$. Se ha demostrado que inicialmente se forma un intermediario entre el peróxido y el ión metálico, posteriormente, se descompone el intermediario para producir $\text{HO}_2\cdot$. Los estados transitorios entre el peróxido y el ión metálico pueden oxidar una amplia variedad de sustratos a través del denominado “mecanismo iónico” (Goldstein *et al.*, 1993)

La reacción de Fenton (ecuación 2.2) se puede describir como la suma de dos medias reacciones (ecuaciones 2.3 y 2.4)



El cambio en el nivel de potencial de la reacción 2.2 es igual a $(0.74 - E_M^\circ) \text{ V}$

Según Martínez y López (2001), bajo condiciones ácidas y a temperaturas adecuadas (entre 20 y 40 °C), el empleo del proceso de Fenton en compuestos orgánicos puede provocar:

-  Un cambio estructural de los compuestos orgánicos que posibilitan un eventual tratamiento biológico posterior.
-  Una oxidación parcial del contaminante, que puede disminuir la toxicidad del efluente.
-  Una oxidación total de los compuestos orgánicos y el efluente puede descargarse en los cuerpos de agua, sin la necesidad de un tratamiento posterior.

El reactivo de Fenton involucra a los procesos de coagulación-floculación y oxidación avanzada, que se pueden llevar a cabo de manera simultánea en un solo reactor, (Huh *et al.*, 1996; Lee *at al.*, 1996). Lo anterior resulta muy atractivo, ya que presenta muchas ventajas en lo que respecta la calidad del agua tratada, en comparación a la obtenida con los tradicionales tratamientos biológicos, además de

que puede ser aplicado *in-situ*. Otra ventaja es que el peróxido de hidrógeno, usado como oxidante, es más barato que otros oxidantes y que el hierro, usado como catalizador, es el segundo metal más abundante y el cuarto elemento más abundante en la tierra (Rodríguez, 2003).

Para que se lleve a cabo exitosamente la formación de radicales OH^\bullet , es necesaria la presencia de un oxidante y un catalizador.

2.2.1 Catalizadores: Hierro

Particularmente en la reacción de Fenton, se ha encontrado que el Fe (II) y el Fe (III) son los metales más eficientes para la activación del peróxido de hidrógeno (Anipsitakis y Dyonysios, 2004).

La especie Fe^{3+} es un catión más ácido que la especie Fe^{2+} por lo que es más estable en un medio acuoso ácido, pero estas especies no son las únicas ya que existen $\text{Fe}(\text{OH})^{2+}$, $\text{Fe}^2(\text{OH})_2^{4+}$, y $\text{Fe}(\text{OH})_2^+$ con una concentración importante en medios alcalinos que pueden precipitar como sales básicas de color pardo rojizo. En la tabla 2.3 se muestran las zonas de predominancia para las diferentes especies de hierro en el equilibrio en función del pH.

TABLA 2. 5 LÍMITES DE PREDOMINANCIA PARA ALGUNAS ESPECIES DEL Fe

Especies químicas	Potencial en función del pH
$\text{Fe}^{2+}/\text{HFeO}_2^-$	pH = 10.53
$\text{Fe}^{3+}/\text{FeOH}^{2-}$	pH = 2.43
$\text{FeOH}^{2+}/\text{FeOH}_2^-$	pH = 4.69
$\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$	$E^\circ = 0.771$
$\text{Fe}^{2+}/\text{FeOH}^{2-}$	$E^\circ = 0.914 - 0.0591\text{pH}$
$\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}(\text{OH})_2^+$	$E^\circ = 1.197 - 1.182\text{pH}$
$\text{HFeO}_2^-/\text{FeO}_4^{2-}$	$E^\circ = 1.001 - 0.0738\text{pH}$
$\text{Fe}^{3+}/\text{FeO}_4^{2-}$	$E^\circ = 1.700 - 0.1580\text{pH}$
$\text{FeOH}^{2+}/\text{FeO}_4^{2-}$	$E^\circ = 1.652 - 0.1379\text{pH}$
$\text{Fe}(\text{OH})_2^+/\text{FeO}_4^{2-}$	$E^\circ = 1.559 - 0.1182\text{pH}$

Con ayuda de los diagramas de Pourbaix se pueden visualizar las zonas de predominio para las diversas especies formadas por el Fe, las cuales son la zona de pasivación, zona de inmunidad y zona de corrosión.

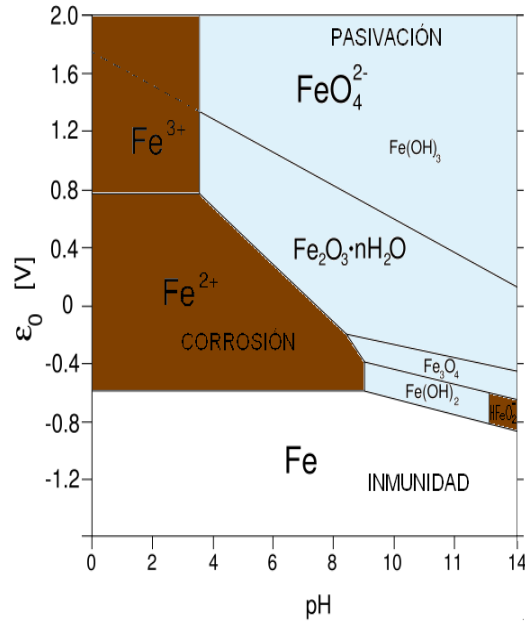


FIG. 2. 2 DIAGRAMA DE POURBAIX PARA EL HIERRO (1M, TEMPERATURA 25 °C). *Andel Früh*

http://en.wikipedia.org/wiki/Pourbaix_diagram

2.2.2 Oxidante. Peróxido de hidrógeno

El peróxido de hidrógeno (H_2O_2), es un compuesto químico con características de un líquido altamente polar, incoloro con sabor amargo, por lo general es ligeramente más viscoso que el agua, es inestable y se descompone rápidamente en agua con liberación de calor. Es un oxidante fuerte, su potencial estándar es de 1.80 y 0.87 a pH de 0 y 4 respectivamente. Aunque no es inflamable, puede causar combustión espontánea cuando se pone en contacto con la materia orgánica o algunos metales como el cobre o la plata.

En la tabla 2.6 se señalan algunas de sus propiedades físicas y químicas

TABLA 2. 6 PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS DEL PERÓXIDO DE HIDRÓGENO

Propiedades físicas	
Densidad	1400 kg/m ³
Masa	34.0147 u
Punto de fusión	272,6 °K (-0.4 °C)
Punto de ebullición	373.15 °K (100)°C
Viscosidad	1.245 cP a 20 °C
Propiedades químicas	
Acidez (pK _a)	11.65
Solubilidad en agua	miscible
Momento dipolar	2.26 D

Debido a que es un agente oxidante seguro, eficaz, de gran alcance y versátil su campo de aplicación es muy amplio. Se han realizado estudios de remoción de contaminantes en aguas residuales, tales como sulfitos, hipocloruros, nitratos, cianuros y cloruros. También es útil en el tratamiento de óxido de sulfuro y óxido de nitrógeno gaseosos. Se emplea en el blanqueo de pulpa y papel y la síntesis orgánica. Sin embargo, por sí sola la oxidación con H_2O_2 no es efectiva para altas concentraciones de contaminantes refractarios como compuestos aromáticos clorados y compuestos inorgánicos (Neyers y Baeyens, 2003).

2.2.3 Especie intermediaria. Radical $\cdot OH$

El radical hidroxilo es una molécula de alta reactividad. Contiene un electrón no apareado formado por la ruptura de enlaces covalentes, esto da origen a su inestabilidad y rápida reactividad generando reacciones en cadena, su poder de oxidación es de 2.06 con respecto al del Cl_2 y con respecto al NHE es de 2.8 V por lo que se le considera una de las especies más reactivas con un alto poder oxidante. Dicha especie es capaz de existir independientemente, tiene una vida media de $1 \cdot 10^{-4}$ s. Su poder oxidante es comparable con el de otras especies (ver tabla 2.7) y sólo lo supera el flúor.

TABLA 2. 7 PODER DE OXIDACIÓN RELATIVA DE LAS DIFERENTES ESPECIES QUÍMICAS¹

Especies	Poder de oxidación relativo ($Cl_2 = 1.0$)	Poder de oxidación (V°)
Fluoruro	2.23	3.03
Radicales hidroxilo	2.06	2.80
Ozono		2.07
Oxígeno atómico	1.78	2.42
Peróxido de hidrógeno	1.31	2.07
Radicales perhidroxilo	1.25	1.77
Permanganato	1.24	1.59
Ácido hipobromoso	1.17	1.50
Bióxido de cloro	1.15	1.49
Ácido hipocloroso	1.10	1.45
Ácido hipoyodoso	1.07	1.36
Cloruro	1.00	0.54

¹ Beltran *et al.*, 1997; Monter *et al.*, 2001; Martínez y López, 2001

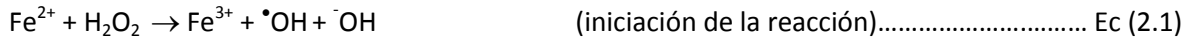
En el laboratorio, los principales métodos utilizados para la identificación de radicales $\cdot OH$ (Goldstein *et al.*, 1993) son:

1. Captura de spin.
2. Reacciones conocidas con el radical $\cdot OH$, identificando los productos que se forman
3. Análisis de los rendimientos relativos de los productos formados en la reacción de la entidad oxidante con uno o dos reactivos
4. Uso de isótopos de oxígeno

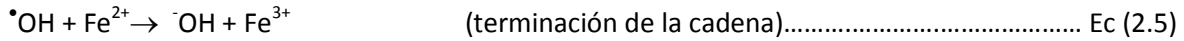
2.2.4 Cinética química

Como se señaló anteriormente, el reactivo de Fenton es una mezcla de H_2O_2 y hierro, que genera radicales hidroxilo (Ec 2.1). El hierro ferroso (Fe^{2+}) inicia y cataliza la descomposición del peróxido de

hidrógeno, como resultado ocurre la generación de radicales hidroxilo. La generación de estos radicales involucra una serie de reacciones complejas en solución acuosa.

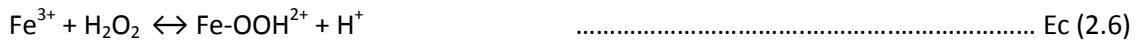


$$k_1 \approx 70 \text{ M}^{-1}\text{s}^{-1} \text{ (Rigg et al., 1954)}$$

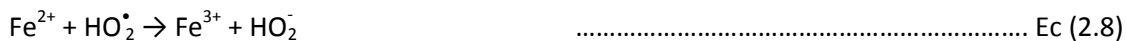


$$k_2 = 3.2 \times 10^8 \text{ M}^{-1}\text{s}^{-1} \text{ (Buxton y Greenstock, 1988)}$$

Los iones férricos (Fe^{3+}) formados pueden también catalizar la reacción de descomposición del peróxido de hidrógeno en agua y oxígeno. También se forman iones ferrosos y radicales en las reacciones (ecuaciones 2.6-2.10)



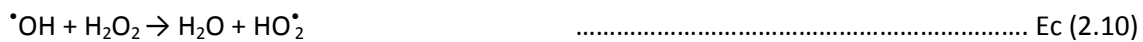
$$k_3 = 0.001 \text{ M}^{-1}\text{s}^{-1} \text{ (Walling y Goosen, 1973)}$$



$$k_5 = 1.3 \times 10^6 \text{ M}^{-1}\text{s}^{-1} \text{ (a pH=3, Bielski et al., 1985)}$$



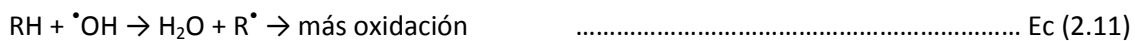
$$k_6 = 1.2 \times 10^6 \text{ M}^{-1}\text{s}^{-1} \text{ (a pH=3, Bielski et al., 1985)}$$



$$k_7 = 1.2 \times 10^6 \text{ M}^{-1}\text{s}^{-1} \text{ (Buxton y Greenstock, 1988)}$$

En las ecuaciones 2.6 y 2.7 el peróxido de hidrógeno reacciona con el ion férrico, dichas reacciones, se denominan reacciones tipo Fenton (Walling y Goosen, 1973; De Laat y Gallard, 1999). Por otra parte, en la ecuación 2.10 se observa que el $\cdot\text{OH}$ puede actuar como inhibidor así como un iniciador en la reacción de Fenton (ecuación 2.1).

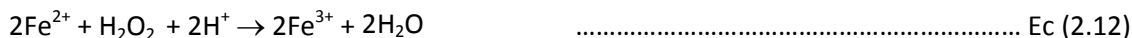
Los radicales hidroxilos pueden reaccionar con compuestos orgánicos (RH) por captación de electrones produciendo radicales orgánicos ($\text{R}\cdot$) que son muy reactivos y pueden ser oxidados aún más (Lind y Lo, 1997)



En vista de que $k_1 \approx 70 \text{ M}^{-1}\text{s}^{-1}$ mientras que $k_2 > 10^8 \text{ M}^{-1}\text{s}^{-1}$ se puede efectuar la reacción de la Ec. 2.11, sin importar mantener una alta relación de $[\text{RH}]/[\text{H}_2\text{O}_2]$.

Si la concentración de los reactivos no está limitada, la toxicidad de los compuestos orgánicos puede ser completamente eliminada y convertirse hasta CO₂ y agua, en el caso de orgánicos sustituidos, hasta sales inorgánicas si el tratamiento es continuo.

En 1975, Walling simplificó de forma general la reacción de Fenton (ecuación 2.1), considerando la disociación del agua, así:



Esta ecuación sugiere que la presencia de H⁺ es requerida en la descomposición de H₂O₂, indicando la necesidad de un entorno ácido para producir la mayor cantidad de radicales hidroxilo. En estudios de Fenton anteriores, se ha demostrado que a niveles ácidos de pH, cerca de 3, suelen ser óptimos para la oxidación con Fenton (Hickey *et al.*, 1995). En presencia de sustratos orgánicos (RH), del ion ferroso en exceso, y bajo valor de pH, los radicales hidroxilos pueden agregarse a los anillos aromáticos o heterocíclicos (así como a los enlaces insaturados de alquenos o alquinos) (figura 2.3).

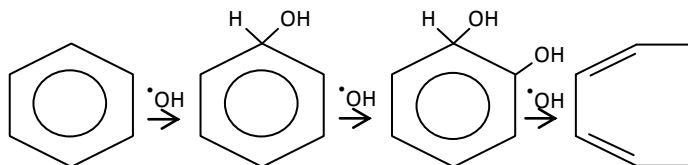
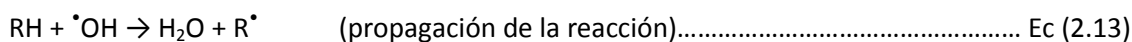
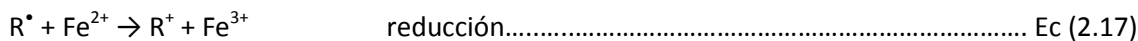
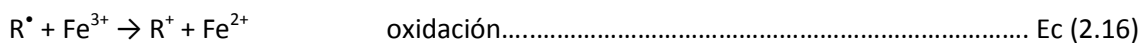


FIG. 2. 3 ROMPIMIENTO DEL ANILLO AROMÁTICO VÍA RADICAL HIDROXILO (REACTIVO DE FENTON). Neyes,(2003).

También pueden quitar un átomo de hidrógeno, iniciando una oxidación en cadena vía radical (Walling, 1975; Lipzynska-Kochany *et al.*, 1995)



Los radicales libres orgánicos producidos en la reacción (ecuación 2.13) pueden ser oxidados por el Fe³⁺, reducidos por el Fe²⁺, o dimerizarse de acuerdo a las siguientes reacciones:

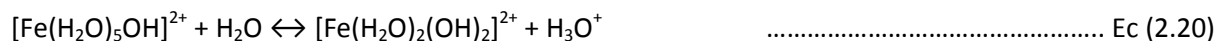


La reacción 2.16 compite con la reacción de terminación (ecuación 2.5) y con la reacción de propagación (ecuación 2.13). Esta competencia por el radical hidroxilo entre el Fe²⁺, RH y el Fe³⁺ conduce a la descomposición no productiva del peróxido de hidrógeno y limita la producción de

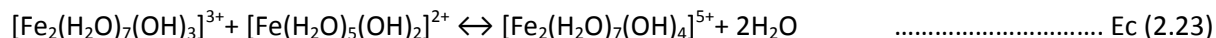
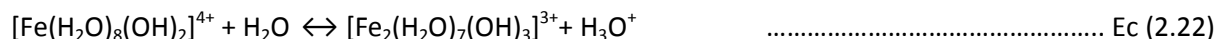
compuestos orgánicos hidroxilados (oxidados). Por esta razón, la relación estequiométrica entre Fe^{2+} , RH y el Fe^{3+} tiene que establecerse para maximizar el proceso de degradación.

La secuencia de las reacciones (2.1), (2.5), (2.13) y (2.16) constituyen el esquema aceptado para la reacción en cadena del reactivo de Fenton (Tag y Tasso, 1997)

Los iones ferrosos generados en las anteriores reacciones (ecuaciones 2.11 y 2.12) reaccionan con los iones hidronios para formar complejos hidroxí férricos (Walling y Kato, 1971; Lin y Lo, 1997) de acuerdo a las siguientes reacciones:



En la zona de pH 3 y 7, estos complejos existen como:



Lo anterior explica la capacidad de coagulación del reactivo de Fenton. Los sólidos disueltos en suspensión son capturados y precipitados. Grandes cantidades de pequeños flóculos son observados constantemente en la etapa de oxidación de la reacción de Fenton. Estos flóculos toman mucho tiempo para estructurarse por lo que es necesario utilizar un polímero para la coagulación química (Neyes, 2003). Se conoce que el reactivo de Fenton tiene diferentes funciones de tratamiento, dependiendo de la relación H_2O_2/Fe^{2+} . Cuando la cantidad de Fe^{2+} es superior a la de H_2O_2 , el tratamiento suele tener efecto de coagulación química. En el caso contrario, el tratamiento suele tener el efecto de oxidación química.

2.2.5 Tipos de procesos de Fenton

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 (con el hierro en soportes, membranas nafion, zeolitas, etc.).

El proceso Fenton es un POA con un gran poder oxidante y para hacer aún más fuerte el poder de oxidación se han llevado a cabo modificaciones al proceso clásico donde la reacción del peróxido de hidrógeno con el catalizador genera los radicales $\cdot OH$. Dentro de estas variantes destacan las siguientes: Foto Fenton o Fenton Foto-asistido con luz ultravioleta (UV), y Electro Fenton, donde se genera electroquímicamente uno o ambos reactivos para que se lleve a cabo la reacción.

2.2.5.1 Proceso de Fenton clásico

Para que se lleve a cabo la reacción de Fenton clásico se requiere de los siguientes pasos:

- 🚰 Ajustar el pH de las aguas residuales entre 3 y 5.
- 🚰 Añadir hierro (solución de FeSO_4 o FeCl_3); y

Añadir lentamente el H_2O_2 . Si el pH es alto, el hierro precipita como $\text{Fe}(\text{OH})_3$ y catalíticamente se descompone el peróxido de hidrógeno a oxígeno creando situaciones peligrosas.

Una vez terminado el tiempo de reacción se ajusta el pH a neutro con la finalidad precipitar el hierro que permanece disuelto produciendo una mayor cantidad de flóculos y consecuentemente una mayor precipitación.

En el proceso de Fenton clásico, se produce una cantidad significativa de lodos con hierro. El Fe^{2+} que no se regenera (Qiang, *et al.*, 2002).

Algunos autores como Sawyer *et al.* (1993) mencionan que el radical OH^\bullet libre no es un reactivo y que el hierro reacciona directamente con los sustratos. Por otra parte, Wink *et al.* (1994) proponen una reacción reversible entre Fe^{2+} y H_2O_2 hasta un punto intermedio "x" cuya reactividad se enfoca hacia el complejo hierro y no con el radical OH^\bullet . Por otro lado, en un estudio de oxidación del complejo ácido mandélico-hierro con peróxido de hidrógeno, Walling y Amarnath, (1982) concluyeron que tanto el hierro y los radicales hidroxilo están involucrados en la reacción.

Sawyer (1997) menciona que la química de la reacción de Fenton implica la formación de hidroperóxido (ROOH). Esta reacción se lleva a cabo junto con los metales de transición reducidos [Fe (II), Cu (I) y Co (II)].

Durante la reacción de oxidación-reducción, se forman una gran cantidad de flóculos. Esos flóculos son complejos hidroxio-férricos formados por complejas reacciones en cadena entre el peróxido y los iones ferrosos. Esta serie de reacciones también producen compuestos intermediarios que son generalmente ácidos carboxílicos.

2.2.5.2 Proceso Fenton modificado con complejos (fase homogénea)

En el proceso modificado con complejos se utilizan ligantes, para "inmovilizar" el hierro y que no precipite a pH altos o para que la reacción sea continua y se utilice menos peróxido al haber una producción continua de radicales OH^\bullet . La quelatación hace más amplio el intervalo de pH sobre el cual el hierro es soluble porque los ligandos quelantes compiten favorablemente con los iones hidróxidos por la coordinación y los complejos quelados que forman son típicamente solubles. La quelatación puede acelerar la reacción de Fenton (ecuación 2.1) (Wells y Salam, 1968) y en otros casos retardar la reacción tipo Fenton (ecuaciones 2.6 y 2.7) (Gallard *et al.*, 1999)

En 1992 Sun y Pignatello, encontraron muchos ligandos polidentados (orgánicos e inorgánicos) que pueden ser eficaces para catalizar el Fe^{3+} en el proceso de oxidación por el reactivo de Fenton del 2,4-D a pH 6 en solución homogénea comparando con un control que contiene oxihidroperóxidos de hierro a pH 6. Entre los agentes quelantes activos que hallaron se pueden mencionar: los

aminopolicarboxilatos (por ejemplo, el ácido nitrilotriacético, NTA), policarboxilatos (por ejemplo el ácido mucico), carboxilatos heterocíclicos (por ejemplo el ácido picolínico), y polihidroxiaromáticos (por ejemplo el ácido 1,2 dihidroxibenzoico). El quelato NTA es efectivo para la degradación del tetracloroetileno en agua (Howsawkung *et al.*, 2001). Los compuestos polihidroxiaromáticos tienen como ventaja su habilidad de reducir el Fe^{3+} (Rodríguez *et al.*, 1999)

2.2.5.3 Electro-Fenton

Otra manera de aumentar la velocidad de oxidación del reactivo de Fenton se basa en la electrogeneración de peróxido de hidrógeno, de Fe(II) o de ambos simultáneamente. En presencia del ión hierro y un medio acuoso ácido, el poder de oxidación aumenta debido a la producción de un reactivo puro que es el radical hidroxilo oxidante (HO^\bullet), junto con un electrón ($E^\circ (\text{HO}^\bullet, \text{H}^+ / \text{H}_2\text{O}) = 2.72 \text{ V/NHE}$). Este proceso de electro-Fenton puede generar HO^\bullet por la oxidación simultánea de O_2 por medios electroquímicos, en presencia cantidades catalíticas de iones de hierro (Otura, 2000; Wang *et al.*, 2008). La generación de los reactivos depende principalmente del potencial de celda, de las condiciones de la solución y de la naturaleza de los electrodos. Hay diferentes tipos de reacciones electro-Fenton (Pignello, 2006) que se resumen en la siguiente tabla.

TABLA 2. 8 TIPOS DE REACCIONES ELECTROQUÍMICAS DE FENTON

Tipo	Reacción en el ánodo	Reacción en el cátodo	Reactivo introducido externamente
1	$\text{Fe}^\circ \rightarrow \text{Fe}^{2+} + 2\text{e}^-$	$2\text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2 + 2\text{OH}^-$	H_2O_2
2	$\text{Fe}^\circ \rightarrow \text{Fe}^{2+} + 2\text{e}^-$	$\text{O}_2 + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2\text{O}_2$ $\text{Fe}^{3+} + \text{e}^- \rightarrow \text{Fe}^{2+}$	—
3	$2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 4\text{H}^+ + \text{O}_2 + 2\text{e}^-$	$\text{O}_2 + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2\text{O}_2$	Fe^{2+}
4	$2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 4\text{H}^+ + \text{O}_2 + 2\text{e}^-$	$\text{Fe}^{3+} + \text{e}^- \rightarrow \text{Fe}^{2+}$	H_2O_2

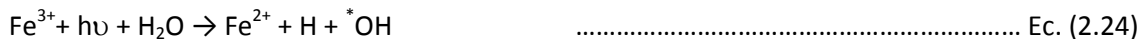
En principio, el proceso electro-Fenton más prometedor es el tipo 4, en donde el ión férrico es reducido a ferroso en el cátodo. Sin embargo la regeneración de Fe^{2+} es lenta aún en la densidad corriente óptima, y tanto la densidad corriente como la eficacia corriente se apagan precipitadamente por encima de pH 2.5.

Las técnicas electroquímicas son más amigables para el ambiente que los métodos químicos de tratamiento de aguas contaminadas. Un inconveniente significativo importante son las reacciones “parásitas”, p. e., la electrólisis del agua, que a menudo compite con la reducción de O_2 , la electrólisis de los contaminantes y disminuye la eficiencia de energía (Rodgers y Bunce, 2001). Además, en la mayor parte de las condiciones, las impurezas contaminantes están presentes en concentraciones tan bajas que los procesos electroquímicos son controlados por el fenómeno de difusión (Conway *et al.*, 2001). Las reacciones resultantes en la difusión limitada pueden mejorarse aumentando el área de los poros de los electrodos los cuales pueden pasar de 2-dimensiones electroquímicas a casi 3-dimensiones cambiando la distribución del área (Conway *et al.*, 2001; Wang *et al.*, 2008).

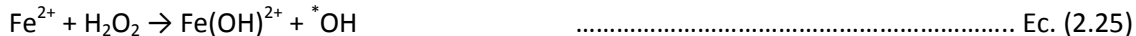
2.2.5.4 Proceso Fenton asistido con luz UV y luz solar

Este proceso se basa en el empleo de la luz (solar y UV) para llevar a cabo la reacción de reducción fotocatalítica de iones Fe^{3+} a Fe^{2+} . De esta manera, se puede conseguir una mayor concentración de Fe^{2+} en el medio, esto se logra mediante la radiación con luz ultravioleta (UV) considerando longitudes de onda que van de 300 a 400 nm, en dichos intervalos se puede conseguir la mineralización de compuestos orgánicos, muchos de los cuales son de naturaleza tóxica o considerados como refractarios para los procesos biológicos convencionales e influyentes como es el caso de los colorantes debido a las complejas estructuras poli aromáticas (aminas aromáticas) (Arslan *et al.*, 1999).

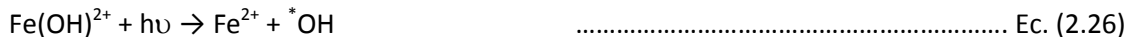
La reacción de foto-Fenton está formada por:



Se efectúa la foto reducción del hierro y un radical hidroxilo ($\cdot\text{OH}$) es generado, produciéndose un ion Fe^{2+} , éste reaccionará con el H_2O_2 para producir Fe^{3+} y $\cdot\text{OH}$ y de esta manera continuar el ciclo.



Algunas investigaciones atribuyen que esta descomposición $\text{Fe}(\text{OH})^{2+}$ conduce a la formación del radical OH^{\cdot} y la regeneración, quedando expresado con la siguiente reacción (Feng *et al.*, 2004):



En el 2004, Feng empleó el proceso de foto Fenton para la degradación de fenol utilizando una lámpara de mercurio y obtuvo remociones significativas en menos de una hora, con una concentración inicial de 100 mg/L del contaminante. En el mismo año, Silva *et al.*, realizaron estudios para el tratamiento de efluentes de una industria de tintas con concentraciones de 662.3 ppm y 21786 ppm, de COT, obteniendo remociones del 75% en un periodo de una hora cuando aplicaron luz UV en un intervalo de longitud de onda comprendido entre 320 a 400 nm. Los estudios que emplea la luz solar denominan el proceso como Fenton solar.

La radiación solar (rayos UV) puede atacar y descomponer moléculas orgánicas rompiendo enlaces y generando radicales libres, pero usualmente se requieren tiempos muy largos y dan como resultado bajas eficiencias de descomposición. Para mejorar los tiempos de descomposición, se generan los rayos UV en fase homogénea o heterogénea (Chu *et al.*, 2004).

La combinación de luz UV y el reactivo Fenton, es capaz de descomponer a los contaminantes mucho más efectivamente. Por ejemplo, la fotólisis directa de ácido 2,4 – diclorofenoxi acético (2,4-D), usando solo radiación UV, llega a ser insignificante en cuanto a la velocidad de la reacción, pero ésta aumenta cuando existe la presencia de H_2O_2 durante la fotólisis (Chu *et al.*, 2001).

2.2.5.5 Proceso de Fenton con catalizadores de hierro soportados







El proceso homogéneo asistido con luz UV ha atraído interés debido a su costo relativamente bajo y alto rendimiento en la generación de los radicales del OH para la descomposición de los compuestos

orgánicos refractarios. Este proceso, sin embargo, produce lodos durante el tratamiento, que limita su uso amplio en el tratamiento de aguas residuales. Para superar esta desventaja del proceso homogéneo, se han realizado estudios dedicados a preparar catalizadores heterogéneos del hierro depositando los iones del Fe o el óxido del Fe sobre los materiales de soporte, generalmente, sólidos porosos.

Un buen catalizador heterogéneo del hierro debe presentar dos requisitos: a) una alta actividad catalítica y b) una disolución baja del Fe. El catalizador heterogéneo basado α -FeOOH tiene alta eficacia demostrada en pruebas de foto oxidación de colorantes azo. Fernandez *et al.*, (1999) reportaron resultados muy exitosos en la preparación de un catalizador de Fe³⁺-Nafion para la degradación foto-asistida de la naranja II. Sin embargo, el catalizador es demasiado costoso para ser utilizado en la práctica aun cuando el catalizador se puede separar fácilmente de la solución.

2.2.5.6 Fenton intensificado

El término intensificación se refiere al remplazo de equipos de gran tamaño, costosos e intensivos en consumo de energía por otros que son más pequeños, menos costosos y más eficientes. En el proceso de Fenton intensificado se utiliza H₂O₂ y nanopartículas de hierro (1-10nm), la intensificación del proceso se logra en tres etapas: la primera etapa consiste en la adsorción del contaminante en las nanopartículas de hierro cerovalente. Posteriormente, ocurre una formación *in situ* de radicales libres y, finalmente la oxidación *in situ*. El proceso de Fenton intensificado ofrece ciertas ventajas que pueden garantizar su eficiencia y eficacia en aplicaciones industriales (Martínez, INGAR) como son:

-  Permite operar a cualquier temperatura entre 25 y 130 °C, estableciendo tiempos de residencia muy cortos (segundos),
-  No requiere ajuste de pH,
-  Control avanzado de la dosificación de catalizadores y reactivos,
-  Incorpora la integración energética para aprovechar la energía exotérmica de la reacción,
-  Tiene elevada eficiencia térmica y de mezclado,
-  Utiliza instalaciones compactas

Estas características permiten ampliar el espectro de aplicación del proceso de Fenton.

2.2.6 Factores de influencia del proceso Fenton

Existen factores que influyen significativamente la eficiencia del proceso Fenton. Los factores que han sido reportados como los que presentan mayor sobre el proceso son: la concentración del catalizador y del oxidante, el estado de oxidación del catalizador, el pH, la temperatura, el tiempo de reacción y el tipo de reacción (clásico, modificado e intensificado). A continuación se hace una descripción del tipo de influencia que ejerce cada uno de éstos factores.

2.2.6.1 Efecto del pH

Se ha demostrado en estudios previos (Barbeni *et al.*, 1987; Sedlak y Andren, 1991; Arnold *et al.*, 1995; Lin y Lo, 1997; Kang y Hwang, 2000; Nesheiwat y Swanson, 2000; Benitez *et al.*, 2001) que el efecto del pH en la oxidación de Fenton es muy significativo, observando resultados óptimos con un

valor cercano a 3 en la mayoría de los casos (Venkatadri y Peters, 1993; Tang y Huang, 1996; Kwon *et al.*, 1999; Benitez *et al.*, 2001) por lo que se recomienda trabajar alrededor de este valor. A pH menores a 2,5 ocurre la formación de $[\text{Fe}(\text{OH})_2]^{2+}$, que reacciona más lentamente con el peróxido de hidrógeno y, por lo tanto, produce una cantidad menor de radicales hidroxilo, de tal forma, que disminuye la eficiencia del proceso (Gallard *et al.*, 1998). Además, también la reacción de los iones hidronio con los radicales hidroxilo llega a ser muy importante a pH bajo (Tang y Huang, 1996) y la reacción de H_2O_2 con Fe^{3+} se inhibe (Pignatello, 1992) A $\text{pH} > 4$, la tasa de descomposición disminuye debido a la disminución de hierro libre en solución, posiblemente esto se deba a la formación de los complejos de Fe^{3+} que inhiben la formación de radicales libres y también debido a la precipitación de los oxihidróxidos férricos (Bigda, 1995; Lin y Lo, 1997; Nesheiwat y Swansun, 2000) los cuales inhiben la regeneración de iones ferrosos. Por otra parte, se sabe que el potencial de oxidación del radical $\cdot\text{OH}$ disminuye con el aumento de pH (Kwon *et al.*, 1999).

En una reacción de Fenton con un pH mayor a 5, la eficiencia de remoción de la DQO disminuye rápidamente, no sólo por la descomposición del peróxido de hidrógeno, sino además por la desactivación del catalizador ferroso con la formación de complejos hidroxio-férricos (Bishop, 1968; Walling, 1975). Waite (2002) reportó que el reactivo de Fenton es más efectivo en un pH de 2 a 4. En sus investigaciones Jeplaar *et al.* (2002) demostraron que para aguas residuales con un alto contenido de contaminantes, los plaguicidas se removieron en un 100% a un pH de 5 y en 20 % a un pH de 7.5.

El hierro en solución puede encontrarse en forma de ion férrico o ferroso, el cual forma complejos con los iones hidroxilo dependiendo del pH y la temperatura. En las figuras 2.4A y 2.4B se pueden apreciar los diagramas de equilibrio de las diferentes especies de los ion Fe (III) y (II) respectivamente, en función de la del pH. En la figura 2.4B se puede apreciar que en un intervalo de pH comprendido entre 2 y 7 a 25 °C, el hierro se encuentra como ion Fe^{2+} en su forma soluble, especie que actúa en la reacción de Fenton.

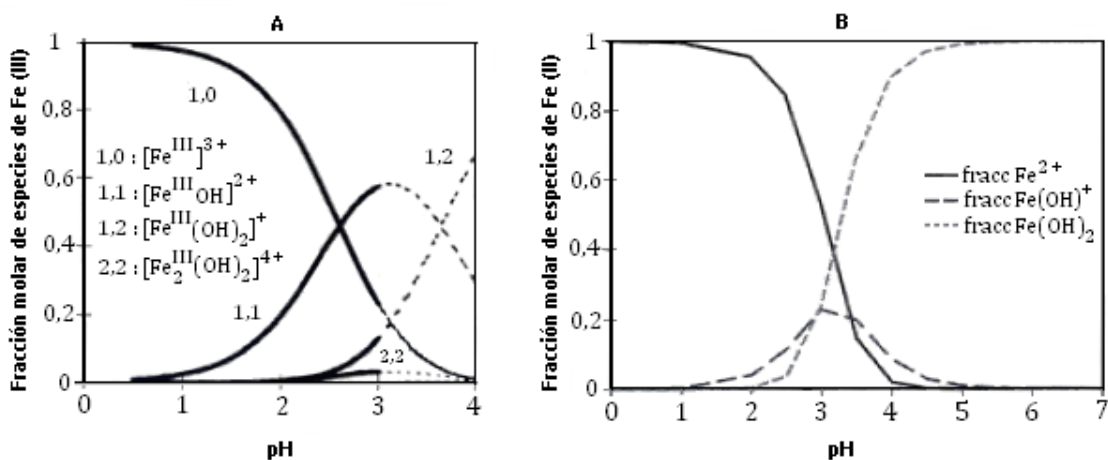


FIG. 2. 4 ESPECIES DEL IÓN HIERRO EN EL EQUILIBRIO EN FUNCIÓN DEL pH: (A) HIERRO III (0.1 M, 25 °C) Y (B) HIERRO II (1 M, 25 °C). Gallard *et al.*, 1999; Pignatello *et al.*, 2006

Es así que, idealmente, el pH debe mantenerse en un intervalo ácido entre 2 y 4, para evitar de esta manera la precipitación del catalizador que tiene lugar cuando el pH es mayor a 4. Sin embargo, con agentes quelantes que mantienen al hierro en suspensión, es posible operar en condiciones de pH neutro (Martínez y López, 2000). Existe también un desarrollo reciente que emplean agentes secuestrantes (por ejemplo los ácidos gálicos) para trabajar en un pH de 8-9, no se conocen sus aplicaciones comerciales. La disminución de eficiencia de la reacción Fenton en el intervalo de pH ácido es poco pronunciada dada la función logarítmica del pH, y generalmente concierne solamente a las aplicaciones con altas dosis de reactivo.

Un segundo aspecto del efecto del pH en la reacción Fenton tiene que ver con la evolución de este parámetro durante el transcurso de la reacción- La figura 2.5 ilustra, para un agua residual con un pH inicial de 6.0, el perfil típico de evolución del pH durante la reacción de Fenton.

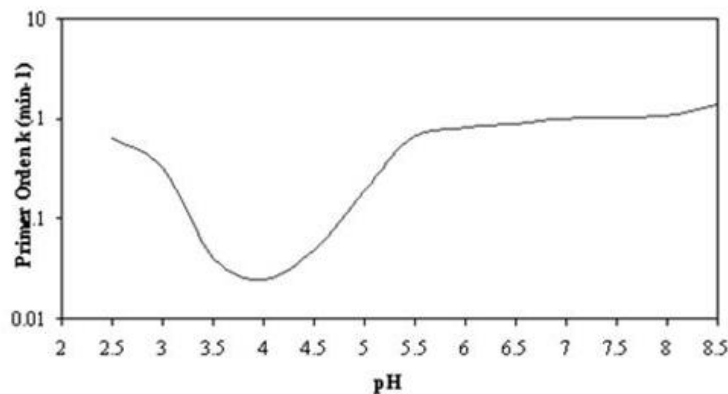


FIG. 2. 5 EFECTO DEL pH EN LA REACCIÓN DEL MÉTODO FENTON

La primera inflexión es causada por la adición de FeSO_4 , el cual contiene típicamente residuos de H_2SO_4 . Una segunda y más pronunciada inflexión ocurre con el pH cuando el peróxido de hidrógeno es añadido y continúa gradualmente a una velocidad que depende de la concentración del catalizador. Este comportamiento en el pH se atribuye a la fragmentación de la materia orgánica en ácidos orgánicos. El monitoreo de la evolución del pH permite asegurarse que la reacción se desarrolla como se ha planeado. Una ausencia de tal disminución de pH puede significar que la reacción se ha inhibido y que la concentración de peróxido está aumentando en la mezcla de reacción lo cual puede significar un peligro potencial (Malpica de la Torre J. 2002).

En aguas residuales altamente cargadas (>10 g/L DQO) puede ser necesario llevar la oxidación por pasos, reajustando el pH a 4-5 después de cada paso de manera a evitar que el pH descienda demasiado y la reacción se inhiba.

2.2.6.2 Concentración del ión ferroso

Normalmente la velocidad de degradación incrementa con el incremento de la concentración del ión ferroso (Lin y Lo, 1997; Benitez *et al.*, 2001), sin embargo el grado de aumento en algunos casos parece ser marginal por encima de cierta concentración, como lo reportan ciertos autores (Lin *et al.*, 1999; Kang y Hwang, 2000; Rivas *et al.*, 2001). Por otro lado, un gran incremento en la concentración

del ión ferroso provoca un aumento en la cantidad de hierro no útil para la reacción de Fenton, lo que contribuye a un aumento del contenido de STD en el efluente. Por tanto, se requieren estudios a escala de laboratorio para establecer la carga óptima de iones ferrosos en condiciones similares, a no ser que los datos estén disponibles en la literatura.

2.2.6.2 Concentración de peróxido de hidrógeno

La concentración del peróxido de hidrógeno juega un papel crucial para decidir la eficacia global del proceso de degradación. Por lo general, ha sido observado que el porcentaje de degradación de los contaminantes se incrementa con un aumento de la dosificación de peróxido de hidrógeno (Lin y Peng, 1995; Lin y Lo, 1997; Kwon *et al.*, 1999; Lin *et al.*, 1999; Kang y Hwang, 2000; Rivas *et al.*, 2001). Sin embargo, se debe tener cuidado en seleccionar la dosis de oxidante para operar. El peróxido de hidrógeno residual contribuye a la DQO (Lin y Lo, 1997) y por lo tanto no se recomienda utilizar cantidades en exceso. Además, la presencia de peróxido de hidrógeno es perjudicial para muchos microorganismos y afecta la eficiencia global perceptiblemente, en sistemas donde la oxidación con Fenton se utiliza como tratamiento previo a la oxidación biológica. Otro efecto negativo del peróxido de hidrógeno, si está presente en grandes cantidades, es que actúa como inhibidor de los radicales hidroxilos generados. Debido a esto, la carga de peróxido de hidrógeno debería ser ajustada de tal modo que sea utilizada completamente.

2.2.6.3 Relación estequiométrica

Las características fundamentales del sistema Fenton son las concentraciones de Fe^{2+} , Fe^{3+} y H_2O_2 . Debido a que estos parámetros determinan la eficiencia de la reacción, es necesario conocer su relación en términos de la producción y el consumo de los radicales hidroxilo (Neyes, 2003)

Yoon *et al.* (2001) estudiaron dicha relación y establecieron tres categorías (alta, media y baja) de acuerdo a la relación $[\text{Fe}^{2+}]_0/[\text{H}_2\text{O}_2]_0$ (concentración inicial de Fe^{2+} contra concentración inicial de H_2O_2). A continuación se describe cada una de estas categorías.

2.2.6.3.1 Relación alta de $[\text{Fe}^{2+}]_0 / [\text{H}_2\text{O}_2]_0 (\geq 2)$

Cuando la reacción de Fenton en ausencia de materia orgánica comienza con una relación $[\text{Fe}^{2+}]_0/[\text{H}_2\text{O}_2]_0 (\geq 2)$, la razón de consumo ($\Delta[\text{Fe}^{2+}]_0/\Delta[\text{H}_2\text{O}_2]_0$) se acerca a 2, y las reacciones en cadena del radical se terminan. Esto se debe que los radicales $\cdot\text{OH}$ producidos durante la reacción (ecuación 2.1) reaccionan principalmente con el ion ferroso (ecuación 2.5) y no con el peróxido de hidrógeno (ecuación 2.10). Esta explicación se apoya en el hecho de que la reacción entre $\cdot\text{OH}$ y el ion ferroso es diez veces más rápida que la reacción entre el $\cdot\text{OH}$ y el peróxido ($k_2= 3.2 \times 10^8 \text{ M}^{-1}\text{s}^{-1}$ (Buxton y Greenstock, 1988) y $k_7= 1.2 \times 10^6 \text{ M}^{-1}\text{s}^{-1}$ (Buxton y Greenstock, 1988)). Por otro lado, la presencia de materia orgánica afecta el comportamiento de los iones ferrosos, no del peróxido de hidrógeno. Esto es porque la materia orgánica compite con los iones ferrosos por los radicales $\cdot\text{OH}$. La presencia de materia orgánica reduce la relación ($\Delta[\text{Fe}^{2+}]_0/\Delta[\text{H}_2\text{O}_2]_0$) a menos de dos (aproximadamente 1.3) lo que significa que el ion ferroso se utiliza principalmente como reactivo y no como catalizador en la reacción Fenton.

2.2.6.3.2 Relación media de $[Fe^{2+}]_0 / [H_2O_2]_0 (= 1)$

Independientemente de la presencia de materia orgánica, con una relación media ($\Delta[Fe^{2+}]_0/\Delta[H_2O_2]_0$), el peróxido de hidrógeno convierte rápidamente todo el hierro ferroso en férrico a través de una reacción de óxido-reducción. En ausencia de materia orgánica, el peróxido de hidrógeno se descompone lentamente por el ión férrico producido en las reacciones en cadena del radical (ecuación 2.6) únicamente después del rápido consumo del peróxido de hidrógeno. La reducción del ión férrico (ecuaciones 2.6 y 2.7) es significativamente menor que oxidación del ión ferroso (ecuación 2.1) y es la etapa que determina la velocidad de reacción. Para la disminución continua del peróxido de hidrógeno, los iones ferrosos deben formarse por la reducción de los iones férricos. Así, la reacción de Fenton puede ser caracterizada por dos sistemas específicos, estos son, el sistema ferroso y el sistema férrico, que dependen de la etapa de oxidación del hierro inicialmente añadido y del estado de oxidación principal del hierro presente. El sistema ferroso se refiere al caso de la reacción primaria, que produce $\cdot OH$, es la reacción entre el ión ferroso y el peróxido de hidrógeno (ecuación 2.1). El sistema férrico se refiere al caso en el que el ión férrico induce las reacciones de reducción (ecuaciones 2.6 y 2.7) y debe ser precedido con el fin de favorecer la producción de radicales $\cdot OH$ a través de la reacción.

Sin embargo, la presencia de materia orgánica impacta el comportamiento del peróxido de hidrógeno de dos maneras: (1) no ocurre más descomposición de peróxido de hidrógeno después del decremento inicial de éste, ya que la materia orgánica reacciona con el radical $\cdot OH$ (ecuación 2.11), como consecuencia, disminuye la reacción del peróxido de hidrógeno con el hidroxilo $\cdot OH$ (ecuación 2.10); (2) la presencia de materia orgánica en exceso puede dificultar la reacción entre el radical $\cdot OH$ y el ión ferroso, el cual puede ser la principal ruta de consumo del $\cdot OH$ en ausencia de materia orgánica. Por lo tanto, el resto del ión ferroso puede reaccionar con el peróxido de hidrógeno y mostrar un consumo ligeramente mayor del peróxido en la etapa inicial de la reacción, en comparación al que se observa en ausencia de materia orgánica.

2.2.6.3.3 Relación baja de $[Fe^{2+}]_0 / [H_2O_2]_0 (\ll 1)$

En ausencia de materia orgánica, se produce una lenta descomposición del peróxido de hidrógeno, que inducen las reacciones en cadena por el radical (sistema férrico) inmediatamente después del agotamiento rápido inicial del peróxido. Sin embargo, la presencia de materia orgánica detiene la descomposición del peróxido de hidrógeno por el ion férrico (sistema férrico). Una diferencia entre la relación baja y la relación media es que la cantidad de descomposición de peróxido de hidrógeno, inducida por los ion ferroso inicial (sistema ferroso) en presencia de materia orgánica, es menor que en ausencia de materia orgánica: a una baja tasa de consumo ($\Delta[Fe^{2+}]_0/\Delta[H_2O_2]_0 \ll 1$), el radical $\cdot OH$ reacciona en mayor medida con el H_2O_2 , produciendo $HO_2\cdot$ (ecuación 2.10). Por lo tanto, los radicales $HO_2\cdot$ adicionales pueden participar en la propagación de las reacciones en cadena vía radical mediante la reducción del ion férrico a ferroso (ecuaciones 2.9 y 2.10), y puede dar lugar a un mayor consumo del peróxido de hidrógeno que se tiene en ausencia de materia orgánica.

2.2.6.4 Efecto de la temperatura

No muchos estudios están disponibles representando el efecto de la temperatura sobre la velocidad de degradación, pero lo que se ha encontrado es que a condiciones ambientales puede utilizarse el reactivo con un buen rendimiento. De hecho, Lin y Lo (1997) han señalado una temperatura óptima de 30 °C mientras que Rivas *et al.* (2001), divulgaron que la eficacia de degradación se realiza de manera espontánea y no hay diferencia significativa de la eficiencia, si la temperatura se incrementa de 10 a 40 °C. Durante el proceso, la velocidad de reacción se incrementa con la temperatura, siendo el efecto más pronunciado a temperaturas menores de 20 °C. A temperaturas mayores a 40 ó 50 °C se acelera la descomposición del peróxido en oxígeno y agua, como consecuencia la eficiencia decrece. La temperatura recomendada se sitúa entre 30 y 40 °C, ya que debajo de esta temperatura, hay un incremento en la concentración de la DQO, debido a una baja rapidez de reacción. La aplicación comercial del reactivo de Fenton ocurre a temperaturas entre 20-40 °C.

Cuando la dosis de peróxido de hidrógeno excede de 10-20 g/L se debe moderar la temperatura no sólo por razones económicas sino también por razones de seguridad, ya que se pueden presentar explosiones (González, 2001).

2.2.6.5 Efecto de la luz UV y la luz visible

El empleo de irradiación UV, en soluciones de $\text{Fe}^{2+}/\text{H}_2\text{O}_2$ o $\text{Fe}^{3+}/\text{H}_2\text{O}_2$, acelera la reacción de Fenton. Como consecuencia de esto, incrementa significativamente la velocidad de degradación de algunas sustancias orgánicas (Oliveros *et al.*, 1997). Otro estudio que apoya este fenómeno fue el realizado por Chen *et al.* (2001) Estos autores concluyen que la reacción de Fenton y Fotofenton en la degradación de colorantes con la presencia de irradiación de luz visible acelera fuertemente la reacción de Fenton. El efecto de la luz UV se atribuye a la formación directa del radical OH^\bullet y a la regeneración de Fe^{2+} de la fotólisis del complejo $[\text{Fe}(\text{OH})]^{2+}$ en solución.

Existen dos tipos de lámparas ultravioleta en el mercado que producen eficientemente una descomposición fotocatalítica. La principal característica de estas lámparas es básicamente el ancho de longitud de onda en que emiten la luz en el espectro UV.

Las lámparas UV emiten en longitudes de onda entre 100 y 400 nm, y dos de éstos tipos son utilizadas en este tipo de sistemas (Legrini *et al.*, 1993). Las lámparas policromáticas emiten en longitudes de onda entre 180-400 nm, mientras que las monocromáticas emiten a 254 nm.

Si bien, los mejores resultados se han obtenido con lámparas policromáticas (Froelich, 1992), las lámparas monocromáticas son más efectivas cuando se trata de oxidar únicamente compuestos orgánicos aromáticos (Sundstrom *et al.*, 1989; Guittonneau *et al.*, 1990; Rupper *et al.*, 1994). Las lámparas policromáticas (Karametaxas *et al.*, 1995) son menos selectivas que las monocromáticas y por consiguiente mejores cuando se tienen diferentes tipos de compuestos orgánicos en el efluente a ser tratado (Malaiyandi *et al.*, 1980; Froelich, 1992).

Diversos estudios han demostrado que la fuente de irradiación presenta una gran influencia en el proceso de mineralización de compuestos orgánicos, como el caso del fenol y el nitrobenzeno. Rodríguez, 2003 reporta que para éstos compuestos la lámpara UV a 254nm es más eficiente en

comparación con las lámpara negra policromática (300-400 nm) y con una lámpara de xenon (300-560 nm).

Algunos resultados interesantes se obtuvieron cuando se usó la radiación solar. Por ejemplo, 90% de mineralización fue alcanzado para el fenol en 2 horas utilizando un colector parabólico. A pesar de estos resultados alentadores, no se recomienda mucho la aplicación de radiación solar, porque el tubo de cuarzo del foto-reactor que se requiere para realizar estos experimentos, es muy costoso para sistemas a gran escala (Rodríguez, 2003).

2.2.6.6 Influencia del oxígeno disuelto

Se tienen reportes que señalan que la aeración aumenta significativamente los índices de degradación de la reacción de Fenton. Huston y Pignatello (1996) estudiaron el uso del aire y lo compararon con el oxígeno, observaron que ocurre mayor degradación con aire que con oxígeno puro, esto sugiere que se requieren concentraciones mínimas de oxígeno.

2.2.6.7 Tiempo de reacción

El tiempo de reacción depende de las dosis del catalizador y de las características del agua residual, entre otras. Por ejemplo, para una oxidación simple con Fenol (menos de 250 mg/L) el tiempo de reacción típico es de 30-60 min. Para aguas más concentradas y complejas la reacción puede tomar varias horas. En tales casos, la reacción en pasos es más efectiva que añadiendo al inicio todo el hierro y el peróxido.

2.2.7 Aplicaciones del proceso Fenton

Actualmente, el proceso tiene una gran cantidad de aplicaciones: ha resultado efectivo para degradar compuestos alifáticos y aromáticos clorados, PCBs, nitroaromáticos, colorantes azo, clorobenceno, PCP, fenoles, fenoles clorados, octacloro-p-dioxina y formaldehído. Son pocos los compuestos que no pueden ser atacados por este reactivo, entre ellos la acetona, el ácido acético, el ácido oxálico, las parafinas y los compuestos organoclorados. Es un buen oxidante de herbicidas y otros contaminantes del suelo tales como los hexadecano o Dieldrin. Puede decolorar aguas residuales con distintos tipos de colorantes y otros residuos industriales, disminuyendo así la DQO. También se ha aplicado en reducción de DQO de aguas municipales y subterráneas y en el tratamiento de lixiviados. Es útil como pretratamiento de compuestos no biodegradables.

Capítulo 3 Metodología

Para evaluar el efecto del proceso Fenton y sus modificaciones, sobre la viabilidad en los huevos de *A. suum* el trabajo experimental fue dividido en cinco etapas principales, la figura 3.1 las ilustra.

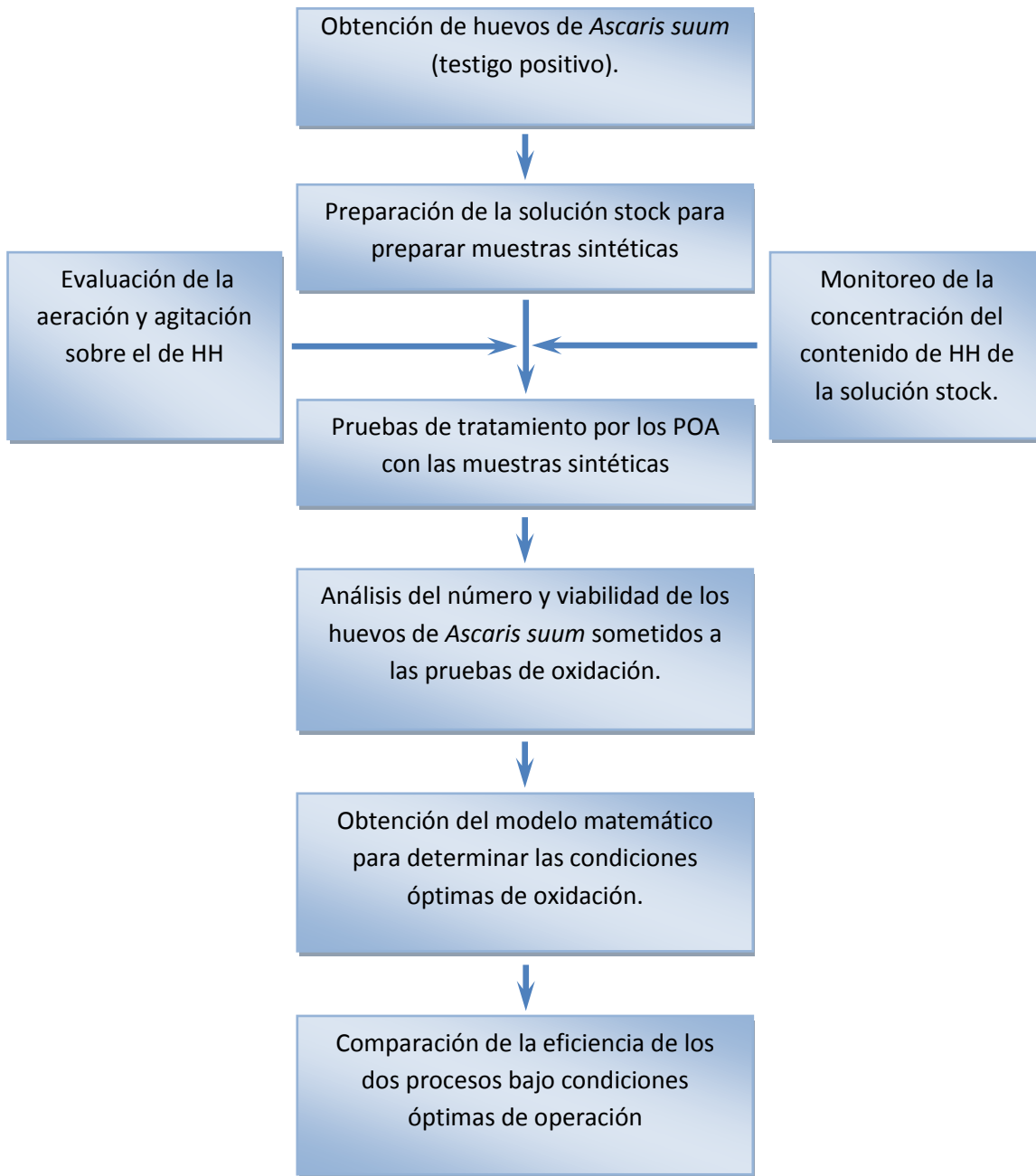


FIG. 3. 1 DIAGRAMA DE FLUJO DE LA METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

3.1 Materiales y reactivos

Enseguida se describen cada uno de los materiales y reactivos necesarios para llevar a cabo las pruebas de oxidación con el proceso de Fenton clásico y con luz UV.

3.1.1 Huevos de *Ascaris suum*

Como se señaló anteriormente, debido a la gran similitud morfológica y fisiológica entre *A. lumbricoides* y *A. suum* se optó por trabajar con esta última y también para minimizar cualquier riesgo de infección del experimentador.




Para realizar los experimentos en los sistemas de oxidación, se requiere obtener los nemátodos, extraer sus huevos, preparar una suspensión stock y cuantificarla para posteriormente emplearla en la preparación de la muestra sintética. Cada una de estas etapas se describe a continuación.

3.1.1.1 Obtención de los nemátodos de *Ascaris suum*

Para obtener los nemátodos (lombrices), se visitó el rastro de Tlanepantla, donde se recolectaron intestinos de cerdos sacrificados, de los cuales se extrajeron las lombrices. Para evitar su deshidratación, las lombrices se almacenaron en un frasco con una solución de NaCl al 0.85 %w.

3.1.1.2 Obtención de huevos de *Ascaris suum*

Una vez obtenidos los nemátodos, la extracción de los huevos de *A. suum*, se llevó a cabo con ayuda de una tabla de uniel, alfileres, equipo de disección, mortero, manta de cielo y embudo. La mayor parte del material es de plástico debido a que los huevos de helminto tienen una cubierta exterior de mucopolisacárido que se adhiere al material de vidrio. Se procede de la siguiente manera:

-  Primero hay que separar las hembras de los machos, para lo cual se colocan los especímenes sobre la lámina de uniel y se observan los extremos apicales. Si éstos son curvados, los ejemplares son machos y si son rectos son hembras.
-  Una vez seleccionadas las hembras, se hace la disección de los nemátodos. Para esto, se extienden los ejemplares sobre la lámina de uniel para que queden rectos, se fijan con alfileres. Se realiza un corte longitudinal, iniciando de la cola hasta la cabeza, fijando cada una de las secciones abiertas del cuerpo cada 2 cm a la tabla de uniel.
-  Una vez abierto el nemátodo, se extraen los órganos reproductores con ayuda de las tijeras y pinzas, se colocan en un mortero adicionando un poco de solución salina isotónica (NaCl al 0.85%). Posteriormente, con el pistilo se tritura hasta formar una suspensión espesa, la cual se filtra por un trozo de manta de cielo. Al terminar de filtrar toda la suspensión, se enjuaga el mortero un par de veces con solución salina isotónica y se juntan los filtrados en el mismo recipiente. Ésta será nominada la suspensión madre.

Los huevos se conservan en una solución de formaldehído al 2 %, dicha solución se prepara a partir de una solución de formaldehído al 37.2 %, marca Baker. La solución permanece bajo refrigeración (5 °C) a lo largo de la experimentación, se deja a temperatura ambiente únicamente para su uso en la

preparación de la suspensión intermedia, el monitoreo de su concentración y de la viabilidad de los huevos en suspensión.




3.1.2 Agua sintética

Los experimentos se realizaron utilizando muestras sintéticas preparadas en agua destilada, a partir de una suspensión madre de huevos de *A. suum*. A continuación se describe la preparación de la suspensión y de la muestra sintética de agua.



3.1.2.1 Preparación de la suspensión stock de *A. suum*

Para preparar la suspensión stock, se emplean tubos de plástico para centrífuga (marca Solbac, modelo C-600) de 50 mL, un homogenizador de tejidos marca Ten Broeck Pirex de 15 mL de capacidad. Se usan soluciones de Tritón X-100 al 0.1 % marca Baker al 0.1%, una solución salina isotónica (cloruro de sodio al 0.85 %) preparada a partir de cloruro de sodio con una pureza del 100 % y formol al 2% utilizando formaldehído al 37.2 % estos dos últimos reactivos son también de la marca Baker.

Para preparar esta suspensión se utilizó la suspensión madre preparada en el subinciso 3.1.1.2 y se siguió el siguiente procedimiento:

-  Para asegurar que los huevos queden lo más libre posible de materia adherida en la suspensión, se emplea un homogenizador de tejidos, de esta manera los huevos son liberados sin sufrir daños.
-  Para remover los materiales adheridos, la suspensión se coloca en los tubos de centrífuga y se centrifuga a 2,000 rpm durante 5 minutos; se decanta el sobrenadante y el sedimento se resuspende con solución de Tritón X-100 al 0.1 %; se centrifuga de nuevo y se resuspende el sedimento con solución salina isotónica; se repite este procedimiento dos veces más.
-  Finalmente, el sedimento se resuspende en una solución de formaldehído al 2 % y se guarda en un frasco de plástico en refrigeración (5 °C) para que no se afecte su viabilidad.

Para determinar el número y por ciento de viabilidad de los huevos se utiliza una cámara de Neubauer (de 0.1 mL de capacidad) y un microscopio binocular de campo claro (marca Leica Microscopy, Leitz, modelo Laborlux S) usando adicionalmente las siguientes soluciones:

-  Azul de tripán al 0.1 %, colorante biológico marca Sigma
-  Soluciones de alcohol etílico al 80 y 99.7 %, la primera preparada por dilución de la segunda (marca Baker) en agua destilada

3.1.2.2 Preparación de las muestras sintéticas de agua con *Ascaris* por utilizar en los experimentos de oxidación

Para preparar las muestras sintéticas se utilizó un matraz aforado de 1 L y uno de 100 mL para el llenado del foto reactor, pipetas automáticas, agua destilada y la suspensión de huevos. Las muestras

se preparan con una concentración de 2 HH/mL. Debido a que la concentración de la suspensión stock es muy alta para poder disponer de un volumen que pueda ser medido y preparar las muestras, se requiere preparar una suspensión intermedia con la que sea posible hacerlo. Para ello se realiza una dilución 0.5 mL de la suspensión stock en 3,100 mL de agua destilada.

Para realizar las pruebas de oxidación con las muestras sintéticas con el reactivo de Fenton clásico y sus modificaciones, se utiliza peróxido de hidrógeno al 30 % marca Merck, sal de cloruro férrico ($\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) marca Baker. El pH se ajusta empleando una solución 1N de ácido sulfúrico (preparada con ácido sulfúrico con 97.3 % de pureza, marca Baker) y con una solución de hidróxido de sodio 0.1N (preparada a partir de perlas con un grado de pureza del 98.2 %, marca Baker). Finalmente, para detener la reacción se añade una solución al 10 % de tiosulfato de sodio ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) con 99 % de pureza, marca Reasol. El diseño experimental y el análisis estadístico de los resultados, se hacen con ayuda del programa de cómputo Statgraphics Plus versión 5.1

3.2 Sistema experimental

A continuación se describen el sistema de oxidación que se empleó para desarrollar la parte experimental.

3.2.1 Sistemas de oxidación

El sistema experimental de los procesos FC y FF está constituido por un foto-reactor batch construido en acero inoxidable al alto brillo de un volumen útil de 3 litros de capacidad, con un dispositivo de agitación magnética, una lámpara de UV de baja presión con una salida de 15 Watts de potencia marca Lumiaction FI 15GER, la cual irradia a una longitud de onda de 253.7 nm y controladores de encendido y apagado para la protección del usuario por apertura accidental del reactor. Para el proceso FC la lámpara se mantiene apagada.

El foto-reactor está colocado sobre una parrilla de agitación magnética (Mistral Pyro Multi-Stirrer), cuenta en su interior con pequeños bordes que sostienen una tubería de teflón con pequeños orificios que recorren todo el perímetro del reactor y por la que se alimenta aire al sistema. Esto junto con tres imanes colocados proporcionalmente dentro del reactor garantizan la homogenización de las muestras sintéticas a tratar (figura 3.2).

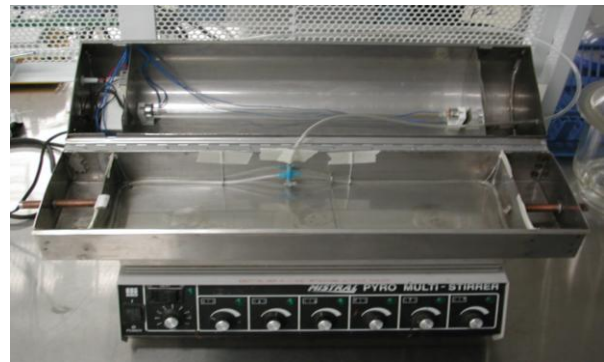


FIG. 3.2 FOTO-REACTOR UTILIZADO EN LAS PRUEBAS DE OXIDACIÓN CON EL PROCESO DE FOTO-FENTON DE LAS SOLUCIONES DE HUEVOS DE HELMINTO (*Ascaris suum*).

3.2.2 Diseño experimental de los experimentos de oxidación con el proceso de Fenton y con luz UV

En adelante se describe el diseño experimental a seguir para desarrollar los experimentos de oxidación.

Se seleccionó un diseño de experimentos del tipo composición central (Biles y Swain, 1980), con la metodología de Superficie Respuesta y con ayuda del programa estadístico Statgraphics versión 5.1. Este tipo de diseño permite obtener una mayor información con un número menor de experimentos y permite también variar simultáneamente todos los factores que afectan un proceso dado (Fotis, 2003).

Los factores de influencia a evaluar que se seleccionaron son los siguientes:

- $X_1 = \text{H}_2\text{O}_2$ (mg/L)
- $X_2 =$ Tiempo de contacto (min)
- $X_3 =$ Relación $\text{Fe}^{3+} / \text{H}_2\text{O}_2$ (mg/mg)

El pH de la reacción y la intensidad de la luz ultravioleta se establecieron como constantes.

El número de experimentos (N) se calculó como sigue:

$$N = 2^k + 2k + n_c \dots\dots\dots$$

Donde,

N = número de experimentos a realizar

k = número de factores

n_c = número de réplicas del punto central

Para 2 réplicas del punto central se tiene:

$$N = 2^3 + (2 \cdot 3) + 2 = 16 \text{ experimentos}$$

La distancia del punto axial del centro, está dada por la siguiente relación:

$$\alpha = \left[\frac{(NF)^{1/2} - F}{2} \right]^{1/2} \dots\dots\dots \text{Ecuación 3.1}$$

$$F = 2^k$$

$$\alpha = 1.28$$

El diseño experimental de composición central, permite con 16 experimentos, estudiar un amplio intervalo de valores (-1.28, 0, 1.28) ya que si se utilizara un diseño factorial general 2^k , donde k es el número de factores, tendríamos 8 pruebas, considerando solamente dos niveles de investigación el -1 y +1, el superior y el inferior para cada factor, mientras que con un diseño factorial 3^k , tendríamos 21, con tres niveles +1, 0 y -1, con lo cual se incrementa significativamente el número de experimentos.

La siguiente tabla muestra los valores reales de las condiciones experimentales para cada valor codificado (-1.28, -1, 0,+1 y +1.28) de cada factor (X_1 , X_2 , X_3).

TABLA 3.1 VALORES REALES DE LOS NIVELES CODIFICADOS PARA LAS PRUEBAS DE OXIDACIÓN DE LAS SOLUCIONES DE *A. suum* CON EL PROCESO FENTON SIN Y CON LUZ UV.

Factores	Niveles				
	-1.28	-1	0	1	1.28
$X_1 = H_2O_2$ (mg/L)	2.8	10	25	40	47.2
$X_2 =$ tiempo de reacción (min)	6.55	15	32.5	50	58.45
$X_3 = Fe^{3+}/H_2O_2$ (mg/mg)	0.07	2	6	10	11.93

Al ejecutar el programa de Statgraphics, automáticamente se generan las combinaciones de los niveles, obteniendo las condiciones experimentales para cada prueba de oxidación de las soluciones de *Ascaris suum* con el reactivo de Fenton clásico y con luz UV, como se muestra en la tabla 3.2.

La experimentación se realizó por duplicado, para cada uno de los procesos a estudiar:



-  Fenton clásico y
-  foto-Fenton

TABLA 3. 2 MATRIZ DE DISEÑO DE EXPERIMENTOS PARA EL PROCESO FENTON CLÁSICO Y CON LUZ UV

No. de experimento	Valores codificados			Valores reales		
	X_1	X_2	X_3	$X_1=H_2O_2$ (mg/L)	$X_2=$ Tiempo (min)	$X_3 =$ Rel (Fe^{3+}/H_2O_2)
1	0	0	0	22.5	32.5	6
2	0	0	0	22.5	32.5	6
3	1	-1	-1	40	15	2
4	1	1	1	40	50	10
5	-1	-1	-1	5	15	2
6	-1	-1	1	5	15	10
7	-1	1	1	5	50	10
8	0	0	1.28	22.5	32.5	11.93
9	0	-1.28	0	22.5	6.55	6
10	-1.28	0	0	3.45	32.5	6
11	1.28	0	0	48.45	32.5	6
12	1	-1	1	40	15	10
13	1	1	-1	40	50	2
14	0	1.28	0	22.5	58.45	6
15	0	0	-1.28	22.5	32.5	0.07
16	-1	1	-1	5	50	2

3.3 Técnicas experimentales

3.3.1 Pruebas de oxidación

A continuación se describe la técnica utilizada para realizar las pruebas de oxidación en el foto-reactor:

1. Preparar 10 mL de las soluciones de hierro (80 y/ó 2 mg/L) y de peróxido (11.56 mg/L) y revisar su concentración con las técnicas correspondientes.
2. Conectar el aire y colocar tres agitadores magnéticos distribuidos dentro del fotoreactor.
3. Adicionar 3.1 L de agua destilada con los matraces aforados, y encender la parrilla de agitación magnética con la finalidad de obtener una mezcla homogénea.
4. Adicionar 0.5 mL de la suspensión intermedia de huevos de *Ascaris* dentro del foto-reactor para obtener una solución con 2 huevos de helminto por mililitro.
5. Esperar 5 minutos a que se homogenice la solución y medir los parámetros iniciales de pH, ORP, y temperatura.
6. Tomar 2 muestras de 50 mL (blancos) con ayuda de jeringas y hacerlas pasar por membranas de nitrocelulosa de 8.0 μm contenidas en un swinnex.
7. Ajustar el pH, con el potenciómetro utilizando soluciones de H_2SO_4 1N y de NaOH 0.1 N.
8. Una vez acondicionada la solución al pH requerido, agregar la cantidad necesaria de la solución de cloruro férrico y posteriormente de la solución de peróxido de hidrógeno a la concentración establecida para cada experimento de acuerdo al diseño experimental. Después de adicionados los reactivos, inmediatamente se cierra el foto-reactor. Para las pruebas de foto Fenton se enciende la lámpara de luz UV.
9. El foto-reactor se deja funcionando el tiempo de reacción establecido para cada experimento, de acuerdo al diseño experimental.
10. Al terminar el tiempo de reacción, lo más rápido posible, se apaga la lámpara y se abre el foto-reactor y con una jeringa se toma una muestra de 50 mL para determinar peróxido de hidrógeno residual. La determinación de peróxido de hidrógeno se realiza mediante una técnica colorimétrica con sulfato de titanio
11. Adicionar en el reactor 1.2 mL de una solución de tiosulfato de sodio al 10% para detener la reacción.
12. Adicionalmente se toman 3 jeringas con 50 mL de muestra cada una, 2 para determinar el % de viabilidad de HH y una para medir hierro residual con una técnica colorimétrica.
13. Al agua que queda en el reactor se le miden los parámetros finales de pH, ORP y temperatura.

3.4 Técnicas analíticas

Los parámetros a medir en el influente y efluente serán: contenido de *Ascaris suum*, viabilidad de los huevos de *Ascaris suum*, pH, potencial óxido-reducción (ORP), conductividad eléctrica, contenido residual de peróxido y de hierro.

3.4.1 Parámetros fisicoquímicos

Se determinarán con base en las técnicas propuestas por el *Standard Methods for the examination of water and wastewater* (APHA *et al.*, 1998), mediante los equipos de laboratorio Thermo Orion Model 555A pH/ORP/Conductivity Meter, y el espectrofotómetro Spectroquant Nova 60 de Merck.

3.4.2 Determinación del número y viabilidad de los huevos de *Ascaris suum*

Para determinar y cuantificar el efecto de los experimentos de oxidación en la viabilidad de los huevos de *Ascaris* se procede de la siguiente forma:

1. Las muestras colectadas del foto-reactor se deben filtrar en membranas de nitrocelulosa de 8.0 μm colocadas dentro de swinnex.
2. Realizar un lavado con 30 mL de agua destilada a la membrana, con la finalidad de neutralizar la solución, y que funcione adecuadamente el indicador azul de tripán.
3. Agregar 5 mL de azul de tripán al 0.1% a las membranas de las muestras de agua obtenidas al final de experimento en el foto-reactor (efluentes) y del agua cruda, utilizando jeringas de 5 mL. La adición debe ser lenta en forma de goteo, para llevar a cabo una adecuada tinción para observar la viabilidad de los huevos de *Ascaris*.
4. Deshidratar las membranas, filtrando 3 mL de alcohol etílico al 80% y después otros 3 mL de alcohol etílico al 100%.
5. Destapar los swinnex y dejar que se evapore el alcohol, posteriormente colocar las membranas en portaobjetos a los cuales previamente se le adicionó una gota de glicerina. Esparcir dicha gota con la finalidad de aclarar la membrana para poder observar, adecuadamente en el microscopio.
6. Dejar transcurrir unos minutos para que se transparente la membrana y posteriormente colocar un cubreobjetos, escribiendo en la parte inferior del portaobjetos el número de experimento, la fecha y el tipo de muestra.
7. Las membranas contenidas en los portaobjetos, se llevan al microscopio y se cuantifica la cantidad de huevos de *Ascaris* que se encuentran en cada muestra; también se cuantifican los huevos que se tiñeron y los que no, para poder obtener el porcentaje de viabilidad inicial y la viabilidad después del tratamiento en el foto-reactor.

Capítulo 4 Resultados y discusión

4.1 Monitoreo de la concentración de HH de la suspensión stock

La concentración de la suspensión madre preparada con los nemátodos recolectados del rastro de Tlalnepantla fue de: 325 500 HH/mL a partir de ésta, se preparó una suspensión intermedia para ser usada para la elaboración de las muestras sintéticas. Por otro lado, se realizó el monitoreo de la viabilidad de la suspensión durante los ensayos de cada corrida, la siguiente figura muestra los resultados.

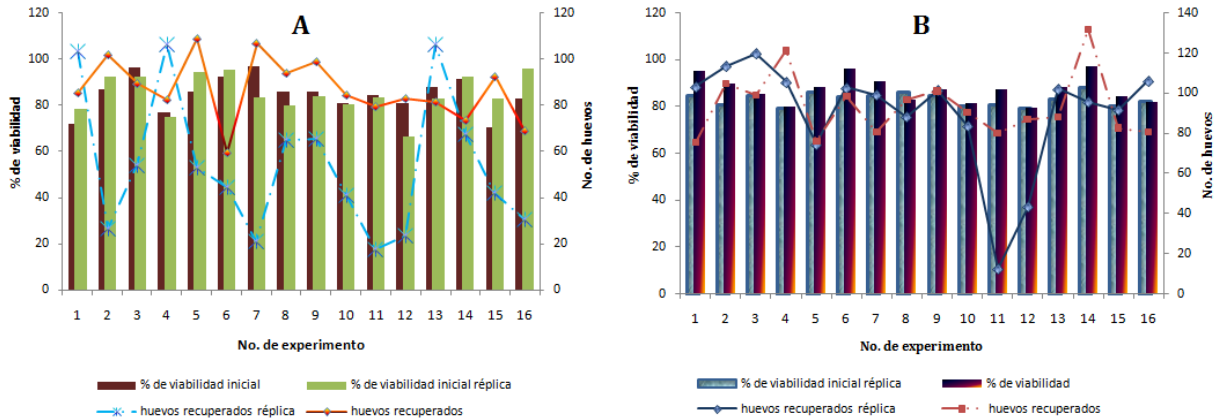


FIG. 4. 1 MONITOREO DEL % DE VIABILIDAD INICIAL DE LOS HUEVOS DE *Ascaris suum* EN LA SUSPENSIÓN UTILIZADA EN LAS PRUEBAS DE OXIDACIÓN CON (A) FENTON CLÁSICO (FC I) Y SU RÉPLICA (FC II), Y (B) FENTON FOTOASISTIDO (FF I) Y SU RÉPLICA (FF II)

La figura muestra el porcentaje de viabilidad en cada una de las pruebas de cada proceso de oxidación y su réplica. La primera réplica Fenton clásico (FC I), corresponden al periodo de los meses julio/agosto del 2007 mientras que, la última réplica de los experimentos realizados con Fenton fotoasistido (FF II) son del periodo noviembre/diciembre del mismo año. Para la primera réplica, el % de viabilidad de los huevecillos oscila alrededor del 85 % mientras que, para el periodo noviembre/diciembre la viabilidad está alrededor del 83 % por lo que podemos apreciar que el deterioro de la viabilidad de la suspensión de huevos a lo largo de la fase experimental fue de tan sólo un 2%.

4.2 Evaluación de la influencia de la aireación y agitación del sistema experimental sobre el de HH

Adicionalmente se determinó el efecto de la aireación y agitación sobre la viabilidad de los huevos de helminto para verificar que no interfiriera sobre los experimentos de oxidación, los resultados se muestran en la siguiente tabla:

TABLA 4. 1 EFECTO DE LA AIREACIÓN Y LA AGITACIÓN EN LA VIABILIDAD DE LOS HUEVOS DE HELMINTO

Problema	Tiempo de homogenización (min)	Tiempo de agitación (min)	Muestra α % de viabilidad de HH	Muestra b % de viabilidad de HH
1	1	30	84,5	85,1
2	1	30	86	84,3
3	1	30	85,1	87,5
Testigo	1	-	85,7	Se rompió el filtro

Como se observa en la tabla no existe efecto sobre la viabilidad de los huevos de helminto por la acción de la agitación y aireación al sistema debido que la viabilidad se mantiene aún después de someterlos a la agitación y aireación. Esta prueba es útil para garantizar que la inactivación de los huevos de helminto es consecuencia de la acción del reactivo de Fenton y no de otros factores adicionales a los que analizamos. Anteriormente, en un estudio de Brownell y Nelson en el 2006, señalan que pueden inactivarse hasta el 20 % de los huevos de *Ascaris suum* únicamente sometiéndolos a agitación posiblemente la suspensión de huevos estaba muy deteriorada.

4.3 Pruebas de inactivación u oxidación de HH

4.3.1 Proceso de Fenton clásico

La siguiente tabla presenta el diseño experimental y el promedio de resultados de cada prueba con el proceso de Fenton clásico.

TABLA 4. 2 DE SUSPENSIONES DE HUEVOS DE *Ascaris suum* SOMETIDOS AL PROCESO DE FENTON CLÁSICO

No. de experimento	Valores codificados			Valores reales			Variable de respuesta
	X_1, X_2, X_3	$X_1 = H_2O_2$ (mg/L)	$X_2 =$ Tiempo (min)	$X_3 =$ Rel (Fe^{3+}/H_2O_2)			
1	0	0	0	22.5	32.5	6	58.57
2	0	0	0	22.5	32.5	6	69.62
3	1	-1	-1	40	15	2	34.23
4	1	1	1	40	50	10	74.29
5	-1	-1	-1	5	15	2	37.52
6	-1	-1	1	5	15	10	65.42
7	-1	1	1	5	50	10	52.43
8	0	0	1.28	22.5	32.5	11,93	74.21
9	0	-1.28	0	22.5	6.55	6	83.66
10	-1.28	0	0	3.45	32.5	6	29.84
11	1.28	0	0	48.45	32.5	6	55.46
12	1	-1	1	40	15	10	48.97
13	1	1	-1	40	50	2	25.43
14	0	1.28	0	22.5	58.45	6	87.02
15	0	0	-1.28	22.5	32.5	0.07	60.89
16	-1	1	-1	5	50	2	47.69

Como se observa, en más del 50 % de las pruebas se alcanza un por ciento de inactivación superior al 50 %. El mayor porcentaje de inactivación de los huevos se obtuvieron con las condiciones de la prueba 14 donde se alcanza un del 87.02 % y corresponde a una dosis de H₂O₂ de 22.5 mg/L, tiempo de reacción de 58.45 min y una relación másica de Fe/ H₂O₂ (mg/mg) igual a 6. Los estudios de Orta De Velásquez *et al.*, en el 2004, con una suspensión sintética de huevos de *A. suum* reportan el 90 en una hora, un tiempo ligeramente superior al de las pruebas de oxidación con Fenton clásico. La concentración de ozono disuelto en la fase líquida oscilaba generalmente entre 3.5 a 4.7 mg / L, dicha concentración en promedio 5.5 veces mayor a la concentración de peróxido utilizada en la prueba con mayor por ciento de inactivación. Sin embargo, para aumentar en una unidad log la inactivación de los huevos es decir, alcanzar el 99 se requiere de una hora más del tratamiento con ozono.

Como se indicó en la metodología, además de cuantificar el en cada prueba de oxidación se midieron los siguientes parámetros fisicoquímicos al final de la reacción. La tabla 4.3 resume estos resultados.

TABLA 4. 3 PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS FINALES DE LAS SUSPENSIONES DE HUEVOS DE *Ascaris suum* SOMETIDAS AL PROCESO DE FENTON CLÁSICO.

No. de experimento	Variable de respuesta	Parámetros fisicoquímicos finales				
		% de inactivación	H ₂ O ₂ (mg/L)	%H ₂ O ₂ consumido	Fe (mg/L)	ORP (mV)
1	58.57	13.21	41.29	4.61	584.33	1121.23
2	69.62	10.19	54.71	4.75	576.50	1161.2
3	34.23	34.38	14.05	4.64	623.45	874.5
4	74.29	22.38	44.05	4.80	562.03	532.98
5	37.52	4.05	19.00	4.73	486.65	721.5
6	65.42	2.33	53.40	4.48	481.75	763.5
7	52.43	2.40	52.00	4.58	514.90	997
8	74.21	10.00	55.56	4.44	587.35	2332.5
9	83.66	9.70	56.89	4.53	579.00	1426
10	29.84	3.00	13.04	4.36	436.35	288.2
11	55.46	20.97	56.72	4.45	594.50	660.75
12	48.97	33.50	16.25	3.92	644.80	3790
13	25.43	29.19	27.03	4.54	597.27	835.5
14	87.02	13.29	40.93	4.59	596.20	1280
15	60.89	16.84	25.16	3.63	473.03	151.65
16	47.69	4.00	20.00	4.41	482.65	785

Un parámetro que es útil de considerar es el ORP debido a que existe una correlación entre su valor y la eficiencia de reacción del proceso de Fenton, si se mantiene entre 350-400 mV en una operación por lotes, puede interrumpirse la adición de H₂O₂ y considerar que el proceso ha concluido. En la gran mayoría de los casos el valor de ORP permanece por encima del intervalo señalado (figura 4.2) lo que sugiere que la reacción aún no concluyó.

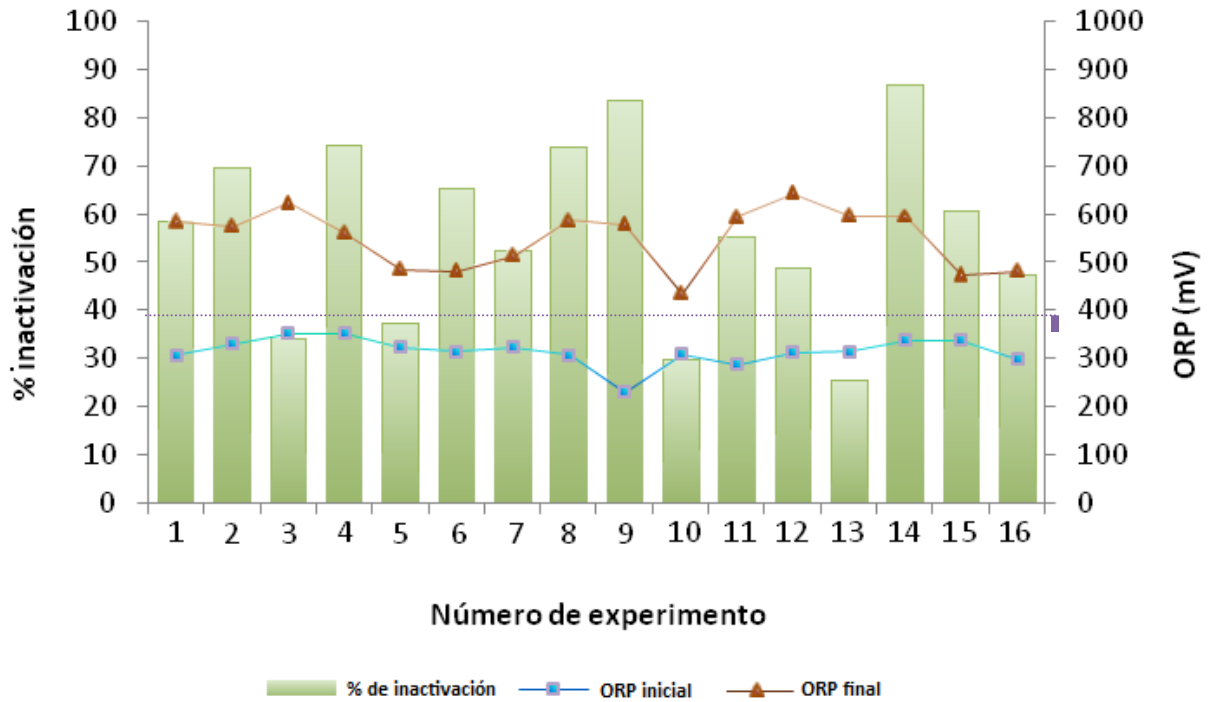


FIG. 4. 2 VARIACIÓN DEL POTENCIAL REDOX (ORP) EN LAS PRUEBAS DE OXIDACIÓN CON FENTON CLÁSICO PARA INACTIVAR HUEVOS DE *Ascaris suum*

Si correlacionamos esta gráfica con los valores de hierro y peróxido residual, podemos percatarnos de que en el valor promedio de hierro residual oscila alrededor de 4.5 mg/L mientras que el valor de peróxido es variable en cada prueba. Para el caso del experimento número 14, el que presentó mayor porcentaje de inactivación (87.02 %), los valores residuales de peróxido, hierro y ORP fueron de 29.19 mg/L, 4.54 mg/L y de 597.27 mV respectivamente. Para este valor de potencial las especies de hierro que predominan en el equilibrio son $Fe^{2+}/FeOH^{+2}$, por lo que el proceso de Fenton puede seguir llevándose a cabo sin inconvenientes.

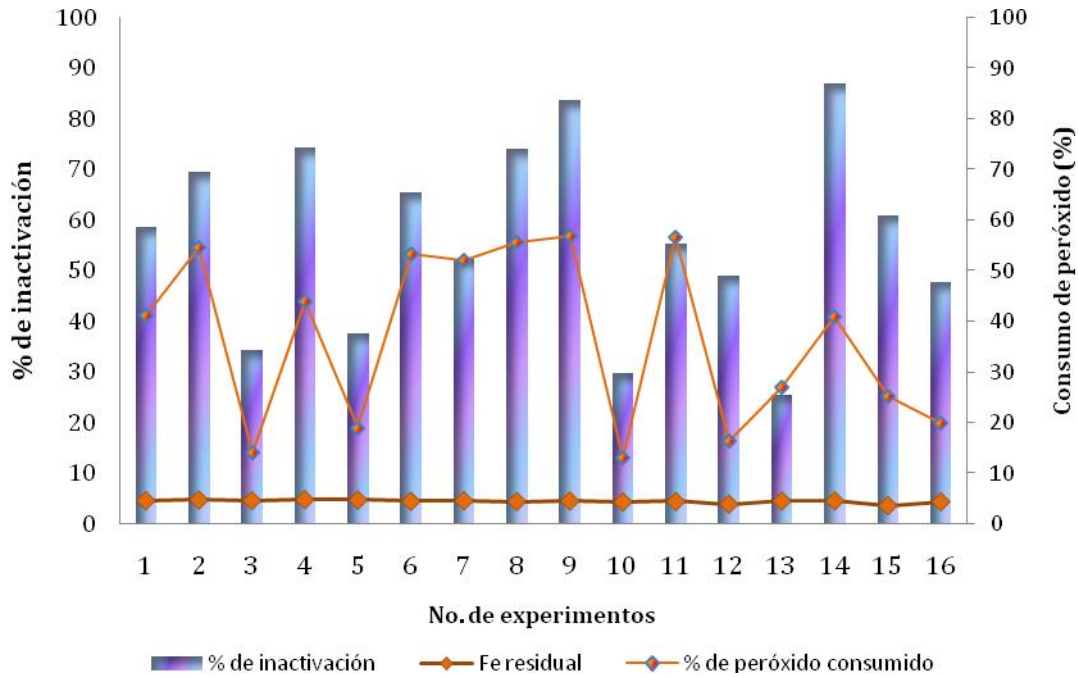


FIG. 4. 3 HIERRO Y PERÓXIDO RESIDUAL EN LAS PRUEBAS DE OXIDACIÓN CON FENTON CLÁSICO PARA INACTIVAR HUEVOS DE *Ascaris suum*

Otro parámetro que también se midió fue la conductividad, aunque no se obtuvo una correlación entre este parámetro y el porcentaje de inactivación. La conductividad en medios líquidos está relacionada con la presencia de sales en solución, cuya disociación genera iones positivos y negativos capaces de transportar la energía eléctrica si se somete el líquido a un campo eléctrico. Es un parámetro que puede usarse para determinar las solubilidades de electrólitos escasamente solubles basándonos en que las soluciones saturadas de electrólitos escasamente solubles pueden ser consideradas como infinitamente diluidas. Por lo que la conductividad en este tipo de soluciones debe ser limitada. Como se indicó anteriormente, en el proceso de Fenton se generan especies de hierro poco solubles (lodos). Una baja conductividad en el sistema puede relacionarse indirectamente con la producción de lodos. Para las pruebas con Fenton clásico el valor de conductividad menor al final del experimento se tiene en la prueba 9 donde la relación másica es la misma que el de la prueba número 14 (6 mg Fe/mg H₂O₂) sin embargo, el tiempo de reacción es el mínimo en el primer caso (6,55 min), lo que pudo haber evitado la formación de lodos (figura 4.4).

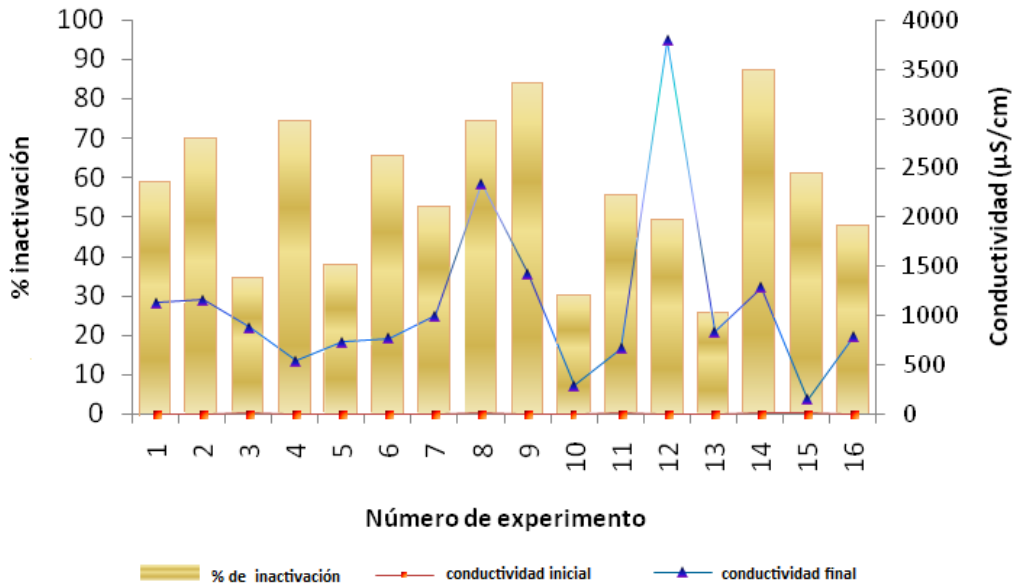


FIG. 4. 4 VARIACIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD EN LAS PRUEBAS DE OXIDACIÓN CON FENTON CLÁSICO PARA INACTIVAR HUEVOS DE *Ascaris suum*

El siguiente parámetro, la temperatura, se mantuvo constante en todos los casos (figura 4.5). El valor promedio de la temperatura de trabajo para los experimentos de oxidación con Fenton clásico fue de 19.8 °C. Dicha temperatura está dentro del intervalo propuesto para que el proceso de degradación se lleve a de manera natural adecuadamente sin alteración alguna de los reactivos (Rivas *et al.*, 2001).

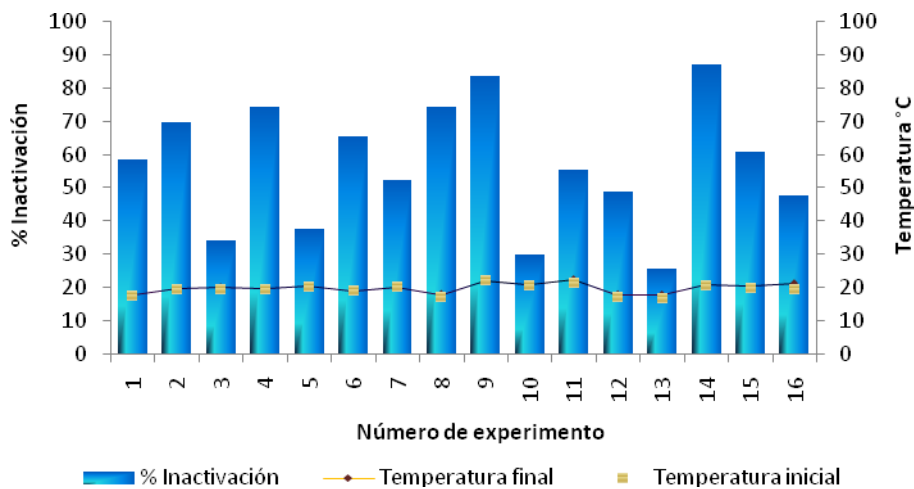


FIG. 4. 5 VARIACIÓN DE LA TEMPERATURA EN LAS PRUEBAS DE OXIDACIÓN CON FENTON CLÁSICO PARA INACTIVAR LOS HUEVOS DE *Ascaris suum*

Con el fin de determinar la validez y precisión de los resultados de inactivación obtenidos y, para determinar los factores que influyen significativamente el proceso, se realizó un análisis

estadístico. A continuación se presenta la tabla de análisis de varianza (ANOVA) para los resultados obtenidos del porcentaje de inactivación de los huevos de helminto tratados por el proceso de Fenton clásico.

TABLA 4. 4 ANÁLISIS DE VARIANZA PARA EL % DE INACTIVACIÓN APLICANDO FENTON CLÁSICO

Factor	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Media de cuadrados	Cociente F	Valor de P
X₁= A: Dosis H₂O₂	14.56	1	14.56	0.07	0.80
X₂=B: Tiempo	28.71	1	28.71	0.14	0.72
X₃=C: Relación Fe/ H₂O₂	1136.34	1	1136.34	5.40	0.05
AA	2317.45	1	2317.45	11.01	0.01
AB	46.75	1	46.75	0.22	0.65
AC	119.81	1	119.81	0.57	0.47
BB	149.64	1	149.64	0.71	0.43
BC	15.01	1	15.01	0.07	0.79
CC	167.08	1	167.08	0.79	0.40
Error total	1263.30	6	210.55		
Total	5258.68	15			

R-cuadrado = 75.97 por ciento

R-cuadrado (ajustado para grados de libertad) = 39.94 %

Error Estándar de Est. = 14.51

Error absoluto de la media = 7.45

El estadístico R² es relativamente bajo e indica que el modelo así ajustado describe tan solo el 75.97 % de la variabilidad en % de inactivación en los datos experimentales. El efecto que pueden tener los factores experimentales sobre la variable de respuesta se observa al comparar el valor de P de cada factor y la interacción entre factores sobre el valor de P general. Todos los valores de los factores que estén por debajo del valor de P general, tendrán un efecto significativo sobre la variable de respuesta (% de inactivación). En este caso, uno de los efectos tiene p-valor inferior a 0.05, indicando que es significativamente diferente de cero al 95.0% de nivel de confianza.

La figura 4.6 muestra la gráfica de Pareto que representa cómo afectan cada uno de los factores y/o sus interacciones en el proceso de inactivación de los huevos de *Ascaris suum*. Como se aprecia en la figura, es la interacción dosis de peróxido-dosis de peróxido (AA = X₁X₁) la que ejerce una influencia significativa en el proceso. Si revisamos cuál fue la concentración residual de hierro y peróxido en la prueba con mayor por ciento de inactivación (prueba 14, % de inactivación 87.02) vemos que la concentración de peróxido se reduce de 22.5 a 13.29 mg/L de acuerdo a la figura si disminuye la interacción AA hay mayor influencia en el proceso. Otro factor que podría ejercer influencia en el proceso, aunque no de forma significativa, fue la relación másica sobretudo si esta relación aumenta lo que sugiere un valor límite para dicho factor.

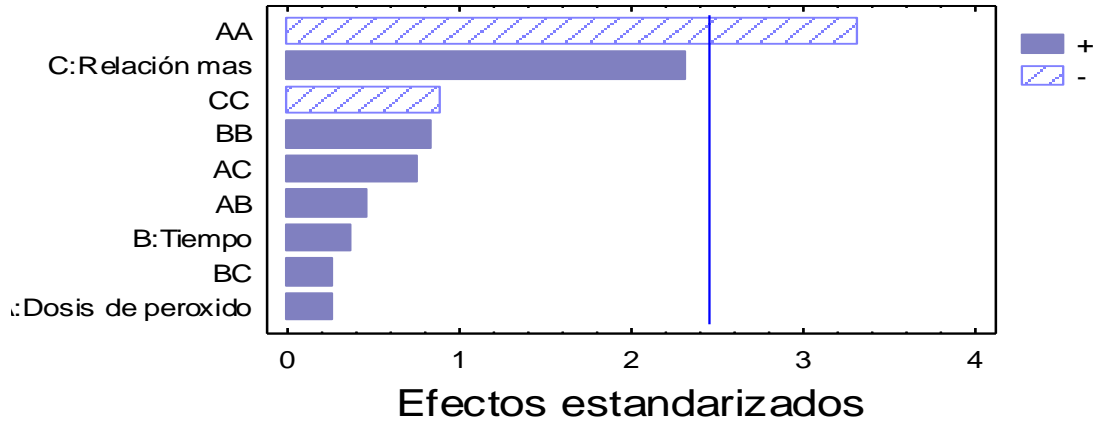


FIG. 4. 6 GRÁFICO DE PARETO ESTANDARIZADO PARA EL DE HH APLICANDO EL PROCESO DE FENTON CLÁSICO.

Variando el tiempo de reacción y la dosis aplicada de peróxido, éste último con influencia significativa sobre el de HH, manteniendo la relación másica de reactivos constante en su valor central, y aplicando el modelo matemático desarrollado, la superficie de respuesta que se genera se puede apreciar en la siguiente figura

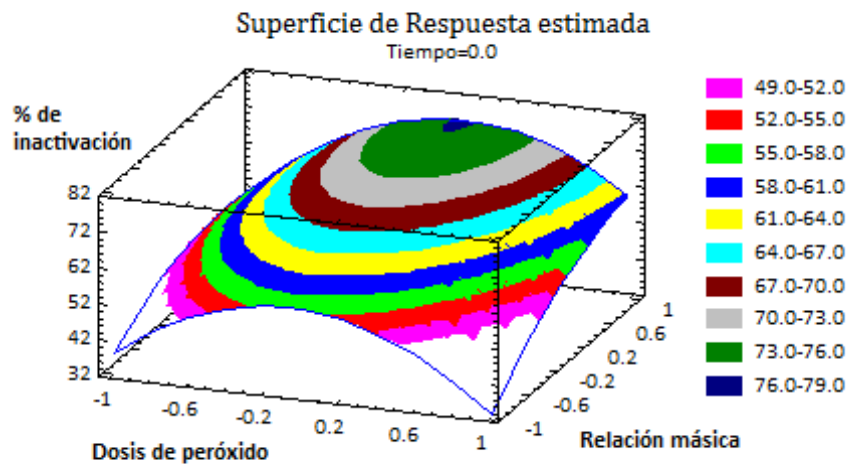


FIG. 4. 7 SUPERFICIE DE RESPUESTA ESTIMADA PARA EL PROCESO DE INACTIVACIÓN MEDIANTE EL PROCESO DE FENTON CLÁSICO

Cada una de las regiones coloreadas representa una serie de combinaciones con las que se puede obtener el que se señala en cada región. La ecuación del modelo ajustado es:

$$\% \text{ de inactivación} = 71.31 + 1.13 \cdot \text{Dosis de peróxido} + 1.59 \cdot \text{Tiempo} + 10.02 \cdot \text{Relación másica} - 20.54 \cdot \text{Dosis de peróxido}^2 + 2.41 \cdot \text{Dosis de peróxido} \cdot \text{Tiempo} + 3.87 \cdot \text{Dosis de peróxido} \cdot \text{Relación másica} + 5.22 \cdot \text{Tiempo}^2 + 1.37 \cdot \text{Tiempo} \cdot \text{Relación másica} - 5.51 \cdot \text{Relación másica}^2$$

siendo los valores de las variables especificados en sus unidades originales.

Aplicando el modelo y un método de iteración la tabla 4.5 muestra la combinación de niveles (codificados y reales) de factores que maximiza el % de inactivación por encima de la región indicada.

TABLA 4. 5 CONDICIONES ÓPTIMAS DE OPERACIÓN DEL PROCESO DE FENTON CLÁSICO PARA EL MÁXIMO % INACTIVACIÓN (89.19%) DE HH.

Variables	Valor codificado	Valor real
$X_1 = \text{H}_2\text{O}_2$ (mg/L)	0.21	28.64
$X_2 = \text{Tiempo}$ (min)	1.28	58.45
$X_3 = \text{Rel} (\text{Fe}^{3+}/\text{H}_2\text{O}_2)$	1.14	11.24

Si analizamos las condiciones de operación para alcanzar máximo (89.19 %) con las condiciones ensayadas en la prueba 14 donde se alcanza un del 87.02 %, y corresponde a una dosis de H_2O_2 de 22.5 mg/L, tiempo de reacción de 58.45 min y una relación másica de $\text{Fe}/\text{H}_2\text{O}_2$ (mg/mg) igual a X, podemos darnos cuenta que la dosis de peróxido y tiempo es muy similar, sin embargo, la relación másica aumenta casi al doble. Aún optimizando el modelo que describe el proceso de inactivación de huevos de helmintos con el proceso de Fenton clásico, los estudios de Orta De Velásquez *et al.*, en el 2004, con una suspensión sintética de huevos de *A. suum* reportan el 90 en una hora, un tiempo ligeramente superior, pero la concentración de ozono disuelto en la fase líquida oscilaba generalmente entre 3.5 a 4.7 mg/L, dicha concentración en promedio 6 veces menor a la concentración de peróxido a utilizar para conseguir el máximo con Fenton clásico. Esto último representa una desventaja del proceso Fenton respecto al empleo de ozono como proceso de inactivación de huevos de helminto.

4.3.2 Proceso de Fenton asistido con luz UV

La tabla 4.6 resume las condiciones y los resultados de de HH obtenidos en las pruebas de oxidación el proceso de Fenton asistido con luz UV (fotoFenton).

TABLA 4. 6 DE SUSPENSIONES DE HUEVOS DE *Ascaris suum* SOMETIDOS AL PROCESO DE FENTON ASISTIDO CON LUZ UV

No. de experimento	Valores codificados			Valores reales			Variable de respuesta
	X ₁ ,X ₂ ,X ₃	X ₁ =H ₂ O ₂ (mg/L)	X ₂ =Tiempo (min)	X ₃ = Rel (Fe ³⁺ /H ₂ O ₂)	% de inactivación		
1	0	0	0	22.5	32.5	6	87.93
2	0	0	0	22.5	32.5	6	84.17
3	1	-1	-1	40	15	2	68.32
4	1	1	1	40	50	10	38.95
5	-1	-1	-1	5	15	2	51.84
6	-1	-1	1	5	15	10	68.61
7	-1	1	1	5	50	10	16.31
8	0	0	1.28	22.5	32.5	11.93	47.04
9	0	-1.28	0	22.5	6.55	6	83.96
10	-1.28	0	0	3.45	32.5	6	68.31
11	1.28	0	0	48.45	32.5	6	64.57
12	1	-1	1	40	15	10	46.35
13	1	1	-1	40	50	2	42.56
14	0	1.28	0	22.5	58.45	6	43.94
15	0	0	-1.28	22.5	32.5	0.07	63.56
16	-1	1	-1	5	50	2	42.35

Como se observa, en el 50% de las pruebas se alcanza un porcentaje de inactivación superior al 50 %. El mayor porcentaje de inactivación de los huevos se obtuvieron con las condiciones de la prueba 1 que corresponde al punto central del diseño experimental, aunque el por ciento de inactivación de su réplica (prueba 2) no es el mismo, si es muy cercano: 87.93 y 84.17 respectivamente, las condiciones de experimentación corresponden a una dosis de H₂O₂ de 22.5 mg/L, tiempo de reacción de 32.5 min y una relación másica de Fe/ H₂O₂ (mg/mg) igual a 6. Si comparamos nuestro estudio con los % de inactivación reportado por otros autores (Tromba, 1978; Lemos *et al.*, 2003; Brownell y Nelson, 2006) que aplicaron únicamente luz UV, el por ciento de inactivación es menor. Por ejemplo, Brownell y Nelson en el 2006, obtuvieron 98,4 aplicando una dosis de 500 J/m² cuando se realizó la exposición de los huevos descortificados a la luz UV. Sin embargo cabe señalar que a diferencia de nuestro sistema, la suspensión de huevos empleada por ellos, los huevos presentaban daños únicamente a la acción de la agitación con un deterioro de ésta del casi el 20 %.

Al igual que en las pruebas de oxidación con Fenton clásico, además de cuantificar el en cada prueba de oxidación se midieron los siguientes parámetros fisicoquímicos al final de la reacción.

TABLA 4. 7 PARÁMETROS FISIQUÍMICOS FINALES DE LAS SUSPENSIONES DE HUEVOS DE *Ascaris suum* SOMETIDOS AL PROCESO DE FENTON ASISTIDO CON LUZ UV

No. de experimento	Variable de respuesta	Parámetros fisicoquímicos finales				
	% de inactivación	H ₂ O (mg/L)	% H ₂ O consumido	Fe (mg/L)	ORP (mV)	Conductividad (µS/cm)
1	87.93	6.62	79.47	4.83	559.8	1417
2	84.17	6.66	70.40	4.53	540.1	1109
3	68.32	36.54	73.65	4.61	609	1208
4	38.95	4.02	14.95	4.67	572.1	2065
5	51.84	4.55	29.00	4.69	477.9	0,41
6	68.61	2.19	48.20	4.70	517	835,5
7	16.31	0.41	11.80	4.89	517	1053
8	47.04	0.94	46.93	5.45	578.2	2241
9	83.96	26.05	72.22	4.43	554.2	675
10	68.31	0.93	67.25	4.26	442.3	176,6
11	64.57	7.55	80.29	4.86	579.8	2558
12	46.35	28.58	28.55	4.60	609.8	0,41
13	42.56	3.14	24.65	5.21	529.1	1214
14	43.94	7.85	65.11	4.79	561.5	1520
15	63.56	1.54	62.04	4.70	530.1	640
16	42.35	6.14	40.00	5.27	471	594

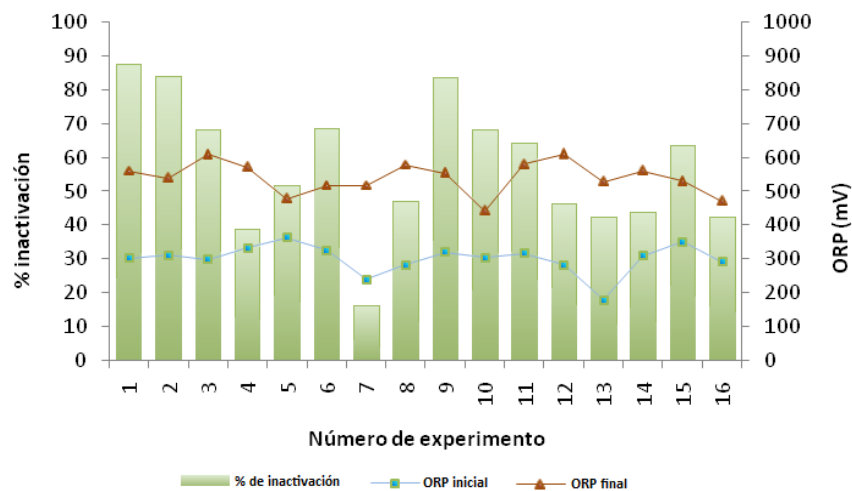


FIG. 4. 8 VARIACIÓN DEL POTENCIAL REDOX (ORP) EN LAS PRUEBAS DE OXIDACIÓN CON FENTON ASISTIDO CON LUZ UV PARA INACTIVAR HUEVOS DE *Ascaris suum*

Al igual que el caso de las pruebas de oxidación con Fenton clásico, el valor de ORP al final de cada prueba de oxidación con Fenton foto asistido están por arriba del que señalan debe mantenerse

para una buena eficiencia de la reacción (350-400 mV). Sin embargo, los valores de ORP final en estas pruebas no estuvieron tan alejadas del intervalo señalado, a diferencia de la pruebas con el reactivo de Fenton clásico. Si ahora analizamos los valores de hierro y peróxido residual, el consumo de peróxido de hidrógeno es mayor en las pruebas con Fenton fotoasistido que con Fenton clásico como es de esperarse ya que con la luz UV se favorezca la fotólisis del H_2O_2 y el ciclo redox del hierro y finalmente se lleve a cabo la reacción de Fenton.

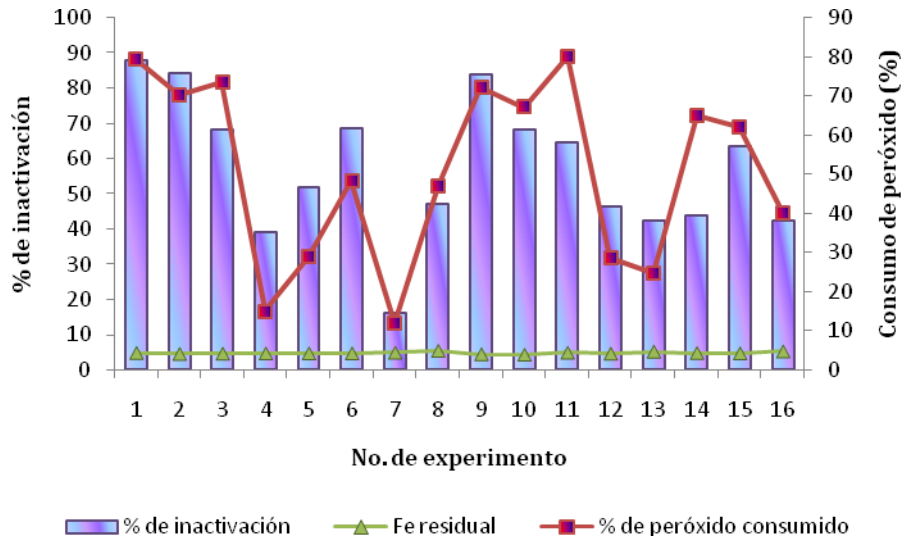


FIG. 4. 9 HIERRO Y PERÓXIDO RESIDUAL EN LAS PRUEBAS DE OXIDACIÓN CON FENTON ASISTIDO CON LUZ UV PARA INACTIVAR HUEVOS DE *Ascaris suum*

Los dos parámetros siguientes por analizar son conductividad y temperatura. El primer parámetro no mostró alguna correlación con el porcentaje de inactivación. Por una parte, se aprecian dos casos en los que el valor de conductividad es cercano a cero (041 $\mu S/cm$) pruebas 5 y 12, en dichas pruebas se tiene el por ciento de inactivación de 51.84, 46,35 respectivamente. Por otra parte, la prueba en dónde se registró una conductividad de 2558 $\mu S/cm$ alcanzó un por ciento de inactivación del 64.57 finalmente, en las pruebas con mayor por ciento de inactivación (87.93 y 84.17%) la conductividad oscila entre los 1109 y los 1417 $\mu S/cm$ por lo que es difícil correlacionar la conductividad con el (figura 4.10)

El otro parámetro temperatura, el valor promedio fue de 19.7 °C y se mantuvo constante en todos los casos al inicio y al final de cada una de las pruebas de oxidación (figura 4.11). Al igual que en Fenton clásico, dicha temperatura está dentro del intervalo propuesto para que el proceso de degradación se lleve a de manera natural adecuadamente sin alteración alguna de los reactivos (Rivas *et al.*, 2001).

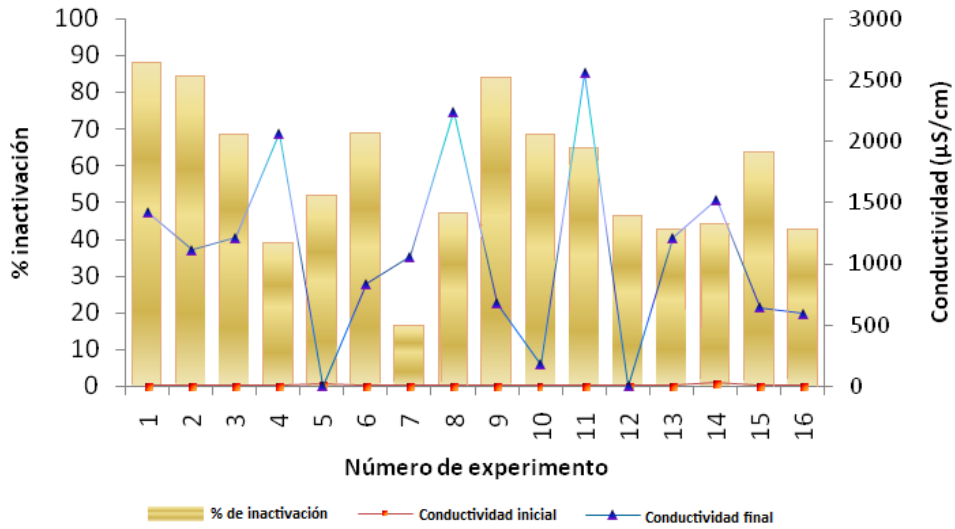


FIG. 4. 10 VARIACIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD EN LAS PRUEBAS DE OXIDACIÓN CON FENTON ASISTIDO CON LUZ UV PARA INACTIVAR HUEVOS DE *Ascaris suum*

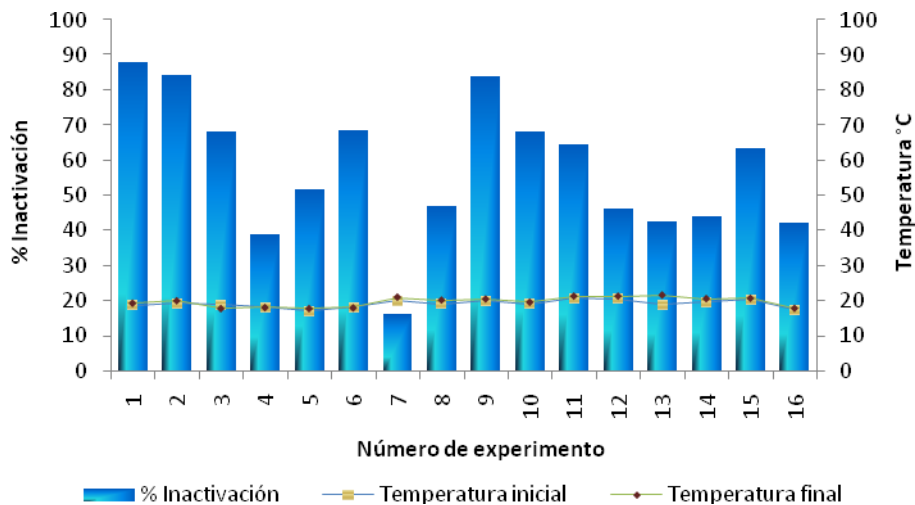


FIG. 4. 11 VARIACIÓN DE LA TEMPERATURA EN LAS PRUEBAS DE OXIDACIÓN CON FENTON ASISTIDO CON LUZ UV PARA INACTIVAR LOS HUEVOS DE *Ascaris suum*

Como en el caso del proceso de Fenton clásico, para determinar la validez y precisión de los resultados de inactivación obtenidos y, para determinar los factores que influyen significativamente el proceso, se realizó un análisis estadístico. A continuación se presenta la tabla

de análisis de varianza (ANOVA) para los resultados obtenidos del porcentaje de inactivación de los huevos de helminto tratados por el proceso de Fenton asistido con luz UV.

TABLA 4. 8 ANÁLISIS DE VARIANZA PARA EL % DE INACTIVACIÓN APLICANDO FENTON ASISTIDO CON LUZ UV

Factor	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Media de cuadrados	Cociente F	Valor de P
X ₁ = A: Dosis H ₂ O ₂	13.27	1	13.27	0.14	0.7208
X ₂ =B: Tiempo	1896.06	1	1896.06	20.04	0.0042
X ₃ =C: Relación Fe/ H ₂ O ₂	278.31	1	278.31	2.94	0.1371
AA	535.37	1	535.37	5.66	0.0549
AB	102.46	1	102.46	1.08	0.3381
AC	33.25	1	33.25	0.35	0.5749
BB	710.72	1	710.72	7.51	0.0337
BC	74.72	1	74.72	0.79	0.4084
CC	1512.62	1	1512.62	15.99	0,0071
Error total	567.66	6	94.61		
Total	5724.47	15			

R-cuadrado = 90.08 por ciento

R-cuadrado (ajustado para grados de libertad) = 75.20 por ciento

Error Estándar de Est. = 9.72

Error absoluto de la media = 5.11

Estadístico Durbin-Watson = 1.93 (P=0.48)

El modelo ajustado describe el 90.08 % de la variabilidad en el % inactivación. Si comparamos este valor con el que obtuvimos en la pruebas de oxidación de Fenton clásico (75.97 %) podemos apreciar que la dispersión entre los valores obtenidos en las pruebas de oxidación aplicando Fenton asistido con luz UV es menor que en Fenton clásico. Lo anterior se debió a que en el caso del reactivo de Fenton asistido con luz UV (FF) se tuvo en general un porcentaje de recuperación de huevos de *Ascaris* (86 %) superior respecto al obtenido (70 %) para el reactivo de Fenton clásico.

Por otra parte, para el reactivo de Fenton asistido con luz UV, tres de los efectos tienen los p-valores inferiores a 0.05, indicando que son significativamente diferentes de cero al 95.0% de nivel de confianza. En la siguiente figura se aprecia con mayor claridad la influencia de dichos efectos en el proceso de inactivación de los huevos de *Ascaris suum*.

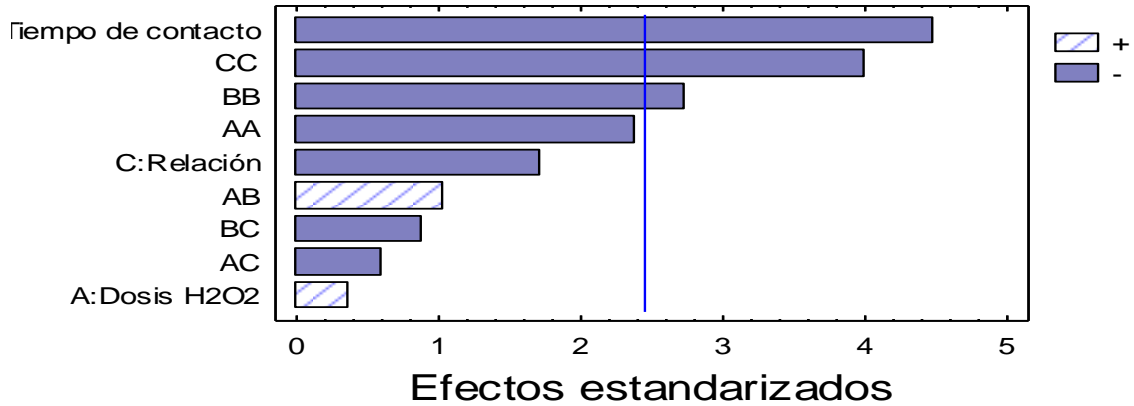


FIG. 4. 12 GRÁFICO DE PARETO ESTANDARIZADO PARA EL % DE INACTIVACIÓN

En la figura 4.2 puede observarse, que los factores que presentan una influencia significativa sobre el proceso son en orden decreciente: el tiempo de contacto o de reacción ($X_2 = B$) seguido de la interacción relación másica: relación másica ($X_3 X_3 = CC$) y la interacción dosis de peróxido-dosis de peróxido ($AA = X_1 X_1$). En los tres casos, si disminuimos el valor de los factores y/o interacciones aumenta su influencia en la eficiencia del proceso de inactivación. Esto se verá reflejado al determinar las condiciones óptimas de operación para el por ciento de inactivación máximo alcanzado al optimizar la ecuación del modelo obtenido.

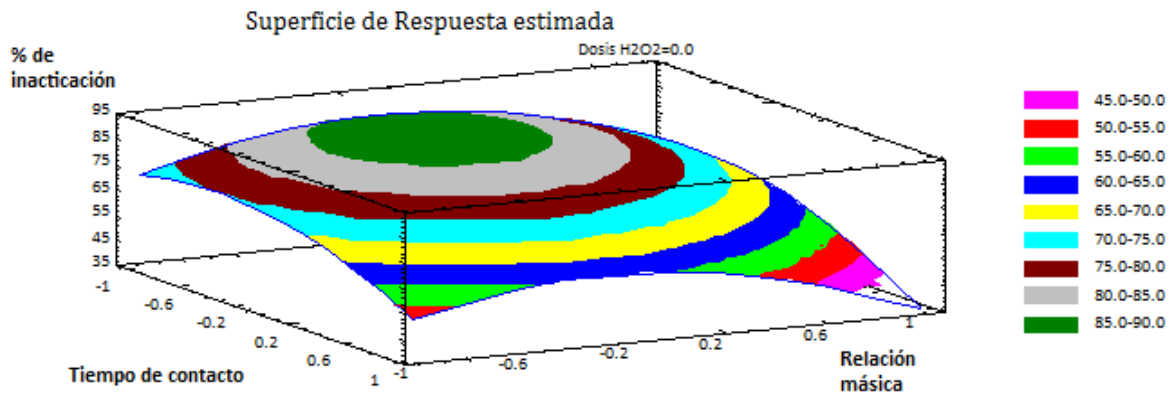


FIG. 4. 13 SUPERFICIE DE RESPUESTA ESTIMADA PARA EL PROCESO DE INACTIVACIÓN MEDIANTE EL PROCESO DE FENTON ASISTIDO CON LUZ UV

La figura muestra cada una de las combinaciones entre el tiempo de contacto y la dosis de peróxido manteniendo constante la relación másica en el valor del punto central (valores codificados), para porcentajes de inactivación que van desde 45 hasta 90 %. Cada una de las regiones coloreadas representa el por ciento de inactivación y la serie de combinaciones a realizar para obtenerlo de acuerdo al modelo obtenido.

La ecuación del modelo ajustado es:

$$\begin{aligned} \% \text{ de inactivación} = & 84.18 + 1.08 * \text{Dosis peróxido} - 12.94 * \text{Tiempo de contacto} - 4.95 * \text{Relación} \\ & \text{másica} - 9.87 * \text{Dosis peróxido}^2 + 3.57 * \text{Dosis peróxido} * \text{Tiempo de contacto} - \\ & 2.03 * \text{Dosis peróxido} * \text{Relación másica} - 11.37 * \text{Tiempo de contacto}^2 - \\ & 3.055 * \text{Tiempo de contacto} * \text{Relación másica} - 16.59 * \text{Relación másica}^2 \end{aligned}$$

Con este modelo se calcularon las siguientes condiciones óptimas (tabla 4.9) y el valor del factor de respuesta (% de inactivación): Valor Optimo = 88.04 %.

TABLA 4. 9 CONDICIONES ÓPTIMAS (CODIFICADAS Y REALES) DE OPERACIÓN DEL PROCESO DE FENTON ASISTIDO CON LUZ UV PARA EL MÁXIMO % INACTIVACIÓN (88.04%) DE HH.

Variables	Valor codificado	Valor real
X ₁ = H ₂ O ₂ (mg/L)	- 0.03	21.90
X ₂ = Tiempo (min)	- 0.56	21.28
X ₃ = Rel (Fe ³⁺ /H ₂ O ₂)	- 1.28	0.07

Esta tabla muestra la combinación de niveles de factores que maximizar % de inactivación por encima de la región indicada. Puede determinar el valor de uno o más factores para una constante fijando los límites inferior y superior en ese valor.

La tabla 4.10 compara las condiciones óptimas de operación de los sistemas de oxidación Fenton clásico y Fenton asistido con luz UV para inactivar huevos de helminto.

TABLA 4. 10 CONDICIONES ÓPTIMAS DE OPERACIÓN PARA ALCANZAR EL MAYOR CON LOS PROCESO FENTON CLÁSICO Y FEENTON ASISTIDO CON LUZ UV

Variables	Fenton clásico	Fenton asistido con luz UV
	89.19 % de inactivación	88.04 % de inactivación
X ₁ = H ₂ O ₂ (mg/L)	28,64	21.90
X ₂ = Tiempo (min)	58.45	21.28
X ₃ = Rel (Fe ³⁺ /H ₂ O ₂)	11.24	0.07

La tabla anterior muestra las condiciones de operación para alcanzar el por ciento de inactivación máximo en cada proceso. Como se aprecia en primera instancia, los por cientos de inactivación que pueden alcanzarse por ambos procesos fueron muy similares, ambos cercanos al 90 %. La diferencia se explica por la precisión de cada modelo, siendo mayor la del proceso de fotoFenton (90%) respecto a la de Fenton clásico o convencional (75%). Como es de esperarse, el tiempo para alcanzar el máximo en los dos procesos difiere, el tiempo se reduce un poco más de la mitad al aplicar Fenton asistido con luz UV lo que coinciden con otros reportes en donde señalan que la velocidad de degradación de un contaminante aumenta al aplicar luz UV al sistema de Fenton. Por otro lado, otra diferencia muy significativa es la relación másica, nuevamente en Fenton asistido con luz, es menor el valor que reportamos para conseguir un por ciento de inactivación muy similar al que de Fenton clásico, esto puede deberse a que en Fenton fotoasistido no solo se favorece la lisis del peróxido de hidrógeno para generar radicales hidroxilo, sino que también se favorece el ciclo redox del hierro ante este último hecho, la demanda del catalizador al sistema

para producir los radicales puede disminuir. Es así, que si comparamos las condiciones de operación de Fenton clásico y Fenton asistido con luz UV este último ofrece grandes ventajas, en cuanto la disminución del tiempo requerido para alcanzar la máxima inactivación, sobre el proceso Fenton clásico.

Si recordamos la composición bioquímica de la cubierta de los huevos de helminto (tabla 4.11) y que presenta de aminoácidos como el triptófano, fenilalanina, tirosina y prolina en la capa externa y en la membrana vitelina. Podemos considerar cada una de las rutas de degradación señaladas anteriormente y la enorme posibilidad del reactivo de Fenton de atacar la cubierta y hacer posible la inactivación de los huevos de helminto derivado de la pérdida de permeabilidad y la formación de poros que los hacen más susceptible a las condiciones del medio ambiente.

TABLA 4. 11 COMPOSICIÓN BIOQUÍMICA DE LOS HUEVOS DE *Ascaris* DE DISECCIÓN (O NO EMBRIONADOS) ESTIMADOS COMO POR CIENTO DE HUEVO TOTAL EN MASA HÚMEDA¹

Huevo no embrionado	
Triglicéridos	24,8
Fosfolípidos	3,3
Ascarosidos	7,9
Lípidos totales	36-29,7
Glucógeno	6,9
Trehalosas	7,4
Hidratos de carbono totales	14,3-24,9
Proteínas	41,4

¹ Quilès *et al.*, 2006

Capítulo 5 Conclusiones y recomendaciones

Con base en los resultados obtenidos en este trabajo de tesis de maestría se determinó de manera general que el reactivo de Fenton con luz UV (FF) presentó una mayor factibilidad, respecto al reactivo de Fenton concencional, de ser aplicado para inactivar huevos de *Ascaris suum* (HH) presentes en agua sintética.

De manera específica también se determinó lo siguiente:

1. Con base en el establecimiento del estado del conocimiento sobre la aplicación del reactivo de Fenton para inactivar huevos de *Ascaris* y, se determinó que existe solamente un estudio reportado sobre el tema. Sin embargo, debido a las ventajas técnico-económicas del reactivo de Fenton, y al hecho de que inactiva no solamente remueve a los huevos de helminto, se considera muy importante desarrollar más estudios para determinar la factibilidad de este proceso y sus modificaciones, en particular con luz UV, para inactivar HH.
2. Con base en el análisis estadístico realizado a los resultados de las pruebas de inactivación de huevos de *Ascaris suum*, para el reactivo o proceso de Fenton clásico (FC) únicamente la dosis de peróxido de hidrógeno presentó una influencia significativa sobre el % de inactivación. En el caso de Fenton asistido con luz UV o fotoFenton (FF), los factores con influencia significativa sobre el de HH fueron: el tiempo de contacto y la relación másica de reactivos (Fe^{3+} y H_2O_2).
3. Las condiciones óptimas calculadas para los procesos del reactivo de Fenton clásico y el de foto-Fenton, fueron las siguientes:

Variables	Fenton clásico	Fenton asistido con luz UV
	89.19 % de inactivación	88,04 % de inactivación
$X_1 = \text{H}_2\text{O}_2$ (mg/L)	28.64	21.90
$X_2 =$ Tiempo (min)	58.45	21.28
$X_3 =$ Rel ($\text{Fe}^{3+}/\text{H}_2\text{O}_2$)	11.24	0.07

Bajo estas condiciones, el de los huevos de *Ascaris suum* no fue significativamente diferente entre ambos procesos. Aunque se esperaba una mayor eficiencia para el caso del reactivo de Fenton asistido con luz UV no se obtuvo este resultado calculado debido probablemente a la menor precisión (76%) del modelo de inactivación desarrollado para el reactivo de Fenton clásico respecto al modificado con luz UV (90%). Sin embargo, como se observó en los experimentos, el segundo proceso permitiría alcanzar el máxima en un menor tiempo (50% menos), respecto al tiempo del reactivo de Fenton clásico y al reportado por Orta De Velásquez *et al.*, (2002), empleando ozono (90% de inactivación). Además, la relación másica de reactivos ($\text{Fe}/\text{H}_2\text{O}_2$) calculada fue significativamente menor para FF respecto a FC, es decir se disminuyó significativamente la cantidad de hierro a adicionar al sistema. Lo anterior se atribuye probablemente a que la luz UV contribuye en la formación de radicales OH, a través de su acción sobre el peróxido de hidrógeno. Debido a las dos ventajas anteriores, el reactivo de Fenton asistido con luz UV podría ser más eficiente para inactivar HH que el clásico y otros procesos de oxidación como la ozonación.

4. Al emplear Fenton con luz UV la relación de Fe/H_2O_2 que se determina bajo condiciones óptimas debido a que es mucho menor que en Fenton clásico (cerca de 100 veces menos) esto influye directamente en la producción de lodos, lo que representa una ventaja adicional sobre Fenton clásico puesto que el tratamiento de los lodos es difícil y aumenta también el costo del proceso.
5. Considerando la estructura química de las cuatro capas principales que constituyen los HH se proponen los siguientes principales mecanismos de oxidación: a) una lipoxidación, debido al alto contenido de lípidos, que son los constituyentes primordiales de la membrana y a que se reporta que son las macromoléculas más susceptibles a sufrir este proceso por acción de los radicales hidroxilos, b) seguido de una oxidación de los ascarósidos y c) finalmente, la oxidación de proteínas que dan rigidez estructural a la membrana.

Recomendaciones

Realizar las pruebas de oxidación utilizando un fotoreactor que permita aplicar una mayor radiación UV y con un mejor sistema de agitación.

Las pruebas de oxidación realizadas en este estudio, tanto de Fenton clásico como asistido con luz UV, se realizaron con agua sintética, por lo que es recomendable evaluar el proceso utilizando agua residual clarificada y empleando un diseño experimentos. Es de esperarse que el comportamiento no sea el mismo que el observado en agua sintética debido a las características del agua residual y a que el reactivo de Fenton actúa de forma inespecífica por lo que la presencia de contaminantes puede influir en el proceso de inactivación de los huevos de helminto.

Otros estudios que podrían ser útiles para reforzar el efecto del reactivo de Fenton en la viabilidad de los huevos, serían estudios de cambios morfológicos en las membranas a través de la observación con microscopía electrónica de transmisión y/o barrido.

Realizar un estudio económico para determinar la viabilidad del proceso.

Glosario de términos

Ascariosis	Infección causada por el parásito nematelminto <i>Ascaris lumbricoides</i>
Ascaridia	Orden de nemátodos
<i>Ascaris lumbricoides</i>	Parásito nemátodo del intestino delgado del hombre.
<i>Ascaris suum</i>	Parásito nemátodo del intestino delgado del cerdo.
Asintomático	adj. <i>Med.</i> Que no presenta síntomas de la enfermedad
Cloaca sexual	Porción final, ensanchada y dilatada, del intestino en la cual desembocan los conductos genitales.
Colédoco	adj. <i>Anat.</i> Se dice del conducto formado por la unión de los conductos cístico y hepático, procedentes de la vesícula biliar y del hígado, respectivamente, y que desemboca en el duodeno.
Coliformes	La denominación genérica de coliformes designa a un grupo de especies bacterianas que tienen ciertas características bioquímicas en común e importancia relevante como indicadores de contaminación del agua y los alimentos. Comprende a todos los bacilos aerobios o anaerobios facultativos Gram negativos, no esporulados que fermentan lactosa a 35-37 °C con producción de gas y ácido en un periodo de 24 a 48 horas.
Coliformes fecales (termotolerantes)	Comprende todos los bacilos aerobios o anaerobios facultativos, Gram negativos, no esporulados que fermentan la lactosa con producción de ácido y gas a 44 ± 1 °C en un plazo de 24 horas.
<i>Cryptosporidium</i>	Es un género de protistas parásito al que se asocia con una enfermedad llamada criptosporidiosis diarreica en seres humanos. El parásito se transmite en el medio ambiente mediante quistes resistentes (ooquistes). Las principales especies que causan enfermedad en humanos son <i>C. parvum</i> y <i>C. hominis</i> .
Dentículas	Se refiere a los elementos individuales (uno o más) cuyo conjunto (o unidad) construyen el filo o borde denticulado.
Denticulado	Nombre asignado a la pieza que posee una forma de retoque elaborado mediante muescas consecutivas que dejan entre una y otra una pequeña punta y que en conjunto, semejan un borde serrado o dentado.
División blastomérica	

Duodeno	<i>Anat.</i> Primera porción del intestino delgado de los mamíferos, que comunica directamente con el estómago y remata en el yeyuno.
Embrionados	huevos fecundados, que presentan desarrollo de embrión
Endemia	f. <i>Med.</i> Enfermedad que predomina habitualmente, o en épocas fijas o en un país o comarca
Endémico	<i>adj.</i> Relativo a la endemia
Eosinofilia	Incremento anormal en la cantidad de eosinófilos (500 células por mm ³) circulantes en la sangre (valor normal: 0 a 35 células por mm ³ , es decir del 1 al 4 % del total de leucocitos en humanos). Comúnmente asociada con el inicio de infecciones parasitarias crónicas o estados alérgicos. Generalmente sucede cuando los helmintos parásitos invaden tejidos por migración normal o errática.
Espículas	Unidades esqueléticas calcáreas o silíceas que forman parte de un esqueleto.
Fisiológica	f. Ciencia que tiene por objeto el estudio de las funciones de los seres vivos.
Geoclimáticas	
Geohelmintiasis	Infección ocasionada por nematodos de ciclo de vida directo, cuyos huevos requieren de ciertas características del suelo y del ambiente (humedad, temperatura e intensidad luminosa) para el desarrollo, ya sea huevo embrionado o larva infectante L ₃ . Ejemplos: ascariosis, tricuriasis, uncinariosis.
Hacinamiento	Aglomeración en un mismo lugar de un número de personas o animales que se considera excesivo y sin orden
Helmintiasis	o <i>Verminosis</i> . Infección producida por helmintos, gusanos que residen o migran a los tejidos, órganos o cavidades del hospedador, en estadio juvenil o adulto. Dichas parasitosis generalmente producen eosinofilia local en tejidos, en sangre o en ambos. Las principales alteraciones en humanos en orden de frecuencia e importancia además de la hipereosinofilia (eosinofilia) son: hepatomegalia, síndrome de Löeffler, asma bronquial, urticaria, estados alérgicos, formación de quistes o tumores, trastornos neurológicos y alteraciones del comportamiento, retardo en el crecimiento corporal, disminución de la capacidad de aprendizaje.

Helmintos	Vermes, “gusanos”. Del griego <i>elmins</i> o <i>helmins</i> : gusano, en sentido estricto, “gusano parásito”. Nombre genérico que se aplica a organismos invertebrados de vida libre y parásitos.
Hospedador	Hospedero, huésped, mesonero. Organismo vivo, planta o animal que tiene, recibe o proporciona condiciones de subsistencia para un parásito, como puede ser: alimento, estímulo en el crecimiento o simple protección. Los tipos de hospedador son: anormal, anfitriónico, definitivo, terminal o final, específico, facticio, heterólogo, intermediario, normal, natural, homólogo o típico, paratónico o de transporte.
Íleos	Del latín <i>ileus</i> , cólico violento. Detención de la progresión del contenido intestinal, gas, líquidos y sólidos.
Incidencia	Término epidemiológico, que denota cantidad de nuevos casos de una enfermedad (parasitosis) dividido entre la población de una comunidad, zona geográfica o grupo de edad por unidad de tiempo. La incidencia es una medida para conocer los factores etiológicos de un padecimiento, tanto en casos agudos como crónicos. Ver tasa de incidencia
Lumen	<i>Anat.</i> Espacio libre o vacío de una cavidad u órgano del cuerpo, por el cual puede circular gases o líquidos. Ejemplo, el lumen del intestino delgado
Morbilidad	f. Grupo de personas que enferman en un sitio y tiempo determinado.
Morfología	f. Parte de la biología que trata de la forma de los seres vivos y de las modificaciones o transformaciones que experimenta.
Morfológica	adj. Perteneciente o relativo a la morfología.
Mortalidad	Tasa de muertes producidas en una población durante un tiempo dado, en general por una causa determinada.
Nemátodos	Nemathelminths, Nematoda (del griego <i>nema</i> , “hilo”, eídés, “con aspecto de”) Son uno de los filo más comunes de animales, se conocen como gusanos redondos, debido a la forma de su cuerpo en un corte transversal. Existen muchas especies parasitarias de plantas y animales, incluyendo al hombre. Los nemátodos incluyen también especies de vida libre.
Papilas	f. <i>Anat.</i> y <i>Bot.</i> Cada una de las pequeñas prominencias cónicas de la piel, las mucosas y ciertos órganos de algunos vegetales y, en especial, las que existen en la lengua, a través de las cuales captamos el sentido del gusto: papila olfativa, gustativa.

Parásito	Del griego <i>parasito</i> : el que vive o come a expensa de otro. Organismo que habita y se alimenta de su hospedador durante toda o parte de su vida.
Parasitismo	Estado de simbiosis en el cual el simbiote se beneficia de la asociación, y el hospedador es dañado de manera “metabólica” y/o “ecológica”. Proceso donde un organismo vive un estadio o todo su ciclo de vida sobre o dentro del hospedador, del cual obtiene energía; es decir, existe una interacción bioquímica o molecular en la relación hospedador-parásito.
Parasitismo errático	Ocurre cuando el parásito se sitúa en sitio ectópico: órgano o tejido no habitual.
Parasitosis	Parasitiasis. Acción entre dos organismos (hospedador- parásito) en la que el parásito es potencialmente patogénico y puede dañar al hospedador (humanos, animales domésticos y silvestres), causándoles signos y síntomas de enfermedad.
Recalcitrante	adj. Terco, reacio, reincidente, obstinado, aferrado a una opinión o conducta.
Romo	adj. Obtuso y sin punta.
Tasa	Número relativo que expresa la cantidad de eventos (enfermedad, natalidad, morbilidad, mortalidad), en un determinado número de personas o habitantes de una comunidad, multiplicado por una constante.
Tasa= $\frac{a}{a+b} \times$	<p>a= número de veces que ocurre un evento en un lapso determinado.</p> <p>b= número de veces que pudiera ocurrir el mismo evento, pero no ocurre en el mismo lapso.</p> <p>x = un multiplicador, 100, 1 000, 10 00, 100 000, etc</p>
Tasa de incidencia	Se denomina la razón entre el número de nuevos casos de una enfermedad o padecimiento específico, diagnosticado o notificados en el curso de un periodo (numerador), y el número de individuos en la población en que ocurre (denominador). Generalmente se expresa en términos del número de casos por 1000, 10 000 ó 100 000 habitantes por año. Esta tasa puede ser específica por edad, sexo, o bien por cualquier otra característica o subdivisión de la población.
Tasa de prevalencia	Es el número de personas que tiene una enfermedad específica en un momento determinado por 1000 habitantes expuestos. Esta tasa

	comprende todos los casos existentes con anterioridad, así como los casos nuevos que se presenten durante el periodo especificado.
Trompa de Eustaquio	<i>Anat.</i> Es el tubo medio que se extiende entre el oído medio y la faringe y que regula la presión del oído alrededor del tímpano.
Vena cava	<i>Anat.</i> La mayor del cuerpo, una superior que recoge la sangre de la mitad superior del cuerpo, y otra inferior que la recoge de los órganos situados debajo del diafragma.
Yeyuno	m. <i>Anat.</i> Segunda porción del intestino delgado de los mamíferos, situada entre el duodeno y el íleon.

Referencias

- Acuña, A., Calegari, L., Lindner, C., Rosa, R., Salvatella, R., Savio, M. y Zanetta, E. (2003) Helminthiasis intestinales. Manejo de las Geohelminthiasis. PAHO/WHO.
- Aguilar, P., Jiménez, B., Maya, C., Orta, T. y Luna, V. (2006). Disinfection of sludge with high pathogenic content using silver and other compounds. *Water Sci. Technol.*, **54**(5): 179–187.
- Arnold, S. M., Hickey W. J. y Harris R. F. (1995). Degradation of atrazine by Fenton's reagent: Condition optimization and product quantification. *Environ. Sci. Technol.*, **29**(8): 2083–2089.
- Ayres, R., Alabaster, G., Mara, D. y Lee, D. (1992). A design equation for human intestinal nematode egg removal in waste stabilization ponds. *Water Res.*, **26** (6): 863-886.
- Bastos, R., Bevilacqua, P., Silva C. A. y Silva C. (2008). Waster irrigation of salad crops: further evidencie for evaluation of the WHO guidelines. *Water Sci. Technol.* **57**(8): 1213-1219.
- Barrios, J., Jiménez, B. y Maya, C. (2004). Treatment of sludge with peracetic acid to reduce the microbial content. *J. Residuals Sci. Technol.*, **1**(1): 69–74.
- Barbeni, M., Minero, C., Pelizetti, E., Borgarello E. y Serpone N. (1987) Chemical degradation of chlorophenols with Fenton's reagent. *Chemosphere*. **16**(10-12): 2225- 2237.
- Baxendale, J. H., Evans, M.G. y Park, G.S. (1946). The mechanism and kinetics of the initiation of polimerisation by systems containing hydrogen peroxide. *Trans. Faraday Soc.* **42**: 155-169.
- Benitez, F.J., Acero, J.L., Real, F.J., Rubio, F.J., y Leal, A.I. (2001). The role of hydroxyl radicals for the decomposition of *p*-hydroxy phenylacetic acid in aqueous solutions. *Water Res.* **35**(5): 1338-1343.
- Bigda, R.J. (1995). Consider Fenton's chemistry for wastewater treatment. *Chem. Eng. Prog.* **12**: 62-66.
- Bigda, R.J. (1996). Fenton's chemistry: an effective advanced oxidation process. *J. Adv. Sci. Eng.* **6**(3): 34.
- Bishop, D.F. Stern, G., Fleschman, M. y Warshall, L. S. (1968). Hidrogen peroxide catalytic oxidation of refractory municipal waste waters. *IE-EC Proc. Design Dev.* **7**: 110-117.
- Blumental, U., Cifuentes, E., Bennett, S., Quigley, M. y Ruiz-Palacios, G. (2001). The risk of enteric infections associated with wastewater reuse: the effect of season and degree of storage of wasterwater. *Trans. R. Soc. Trop. Med. Hyg.* **95**: 131-137.
- Braton, R. y Nesse, R. (1993). *Ascaris*: An infection to watch for in inmigrants. *Posgraduate Med.*, **93**: 171-178.

- British Geological Survey, Comisión Nacional del agua, London School of Hygiene and Tropical Medicine and University of Birmingham (1998). Impacto of wastewater reuse on groundwater in the Mezquital Valle, Hidalgo State, Mexico final report- November, BGS Technical Report wc/98/42.
- Brix, H. (1993). Chapter 2: Wastewater treatment in constructed wetlands: System design, removal process and treatment performance. In *Constructed Wetlands for Water Quality Improvement*, in Moshiri, G. (de), CRC Press USA
- Brownell, S. A. y Nelson, K. L. (2006). Inactivation of Single-Celled *Ascaris suum* Eggs by Low-Pressure UV Radiation. *Appl. Environ. Microbiol.* **72**: 2178-2184.
- Buxton, G.V. y Greenstock, C. L. (1988) Critical review of rate constants for reaction of hydrated electrons, hydrogen atoms and hydroxyl radicals ($^{\bullet}\text{OH}/^{\bullet}\text{O}$) in aqueous solutions. *J. Phys. Chem. Ref. Data* **17**(2): 513-886.
- Capizzi, S. y Schuartzbrod, J. (2001). Surface properties of *Ascaris suum* eggs: hydrophobic potential and Lewis acid-base interactions. *Colloids and Surfaces B* **22**: 99-105
- Campos, C. (2008). New perspectives on microbiological water control for wastewater reuse. *Desalination* **218**: 34-42.
- Chiarpenello, J. (2004). Actualización: Infecciones por helmintos. *Evid. Actual. Práct. Ambul.* **7**: 178-181.
- Cifuentes, E., Ruiz, G., Quigley, M. y Romero, H. (1993). Problemas de salud asociados al riego agrícola con agua residual en México. *Salud Pública Mex.* **35**: 614-619
- Cifuentes, E., Blumenthal, U., Ruiz-Palacios, G., Bennett, S., y Peasey, A. (1994). Escenario epidemiológico del uso agrícola del agua residual : Valle del Mezquital, México *Salud Pública de Mex.* **36**: 3-9.
- Conway, B.E., Ayranci, E. y Al-Maznai, H. (2001). Use of quasi-3-dimensional porous electrodes for adsorption and electrocatalytic removal of impurities from waste-waters *Electrochim. Acta* **47**(5): 705–718.
- CONAGUA. Estadísticas del agua en México Edición 2007. SEMARNAT
- Cruz-Reyes, A. y Camargo-Camargo B. (2001). Glosario de términos en parasitología y ciencias afines. Instituto de Biología, Programa Universitario de Investigación en Salud, Universidad Nacional Autónoma de México, y Plaza y Valdés Editores. México, D.F. 347 pp.
- De Laat, J. y Gallard, H. (1999). Catalytic decomposition of hydrogen peroxide by Fe(III) in homogeneous aqueous solutions: mechanism and kinetic modeling. *Environ. Sci. Technol.* **33** (16): 2726-2732.

- De Lemos Chernicharo, C. A., de Castro Silva J. C., Zerbini, A. M. y Godinho V. M. (2003). Inactivation of *E. coli* and helminth eggs in aerobic and anaerobic effluents using UV radiation. *Water Sci. Technol.* **47**: 185–192.
- Ensink, J. H. J., Van der Hoek, W., Mukhtar, M., Tahir, Z. y Amerasinghe, P. (2005). High risk of hookworm infection among wastewater farmers in Pakistan. *Trans. R. Soc. Trop. Med. Hyg.* **99**(11): 809-818
- Feachem, R., Bradley, D., Garelick, H. y Mara, D. (1983). Sanitation and disease: Health aspects of excreta and wastewater management, John Wiley and Sons, New York, NY.
- Feng, J., Hu, X., Yue, P. L., Zhu, H. Y., Lu, G. Q. (2003). A novel laponite clay-based Fe nanocomposite and its photo-catalytic activity in photo-assisted degradation of Orange II. *Chemical Engineering Science* **58**: 679-685.
- Fernández, J., Bandara, J., López, A., Buffat, P., y Kiwi, J. (1999). Photoassisted Fenton degradation of nonbiodegradable azo dye (orange II) in Fe-free solutions mediated by cation transfer membranes, *Lagmuir* **15**(1): 185-192.
- Gallard, H., De Laat, J., Legube, B., (1999). Spectrophotometric study of formation of iron (III)-hydroperoxy complexes in homogeneous aqueous solutions. *Water Res.* **33**: 2929-2936.
- Gallard, H., De Laat, J., Legube, B., (1998). Influence du pH sur la vitesse d'oxydation de composés organiques par Felly H₂O₂. Mécanismes réactionnels et modélisation. *New J. Chem.* **22**(3): 263-268.
- Gaspard, P., Wiart, J. y Schwartzbrod, J. (1994). Experimental study of the helminth eggs adhesion (*Ascaris suum*): analysis of the environmental implications. *Rev. Sci. Eau.* **7**(4): 367-376.
- Goldstein, S., Meyerstein, D., Czapski, G. (1993). The Fenton Reagents. *Free Radio. Biol. Med.*, **15**: 435-445.
- Grimason, A., Smith, H., Thiatai, W., Smith P., Jackson, M. y Girwood, R. (1993). Occurrence and removal of *Cryptosporidium* oocyst and *Giardia* cysts in Kenyan wastewater stabilization ponds. *Water Sci. Technol.*, **27**(3-4): 97-104.
- Habbari, K., Tifnouti, A., Bitton, G. y Mandil, A. (1999). Helminthic infections associated with the use of wastewater for agricultural purposes in Beni Mallal. Morocco. *East. Mediterr. Health J.* **5**: 912-921.
- Harleman, D.R.F. y Murcott, S. (1999). The role of physical-chemical wastewater treatment in the mega-cities of the developing world. *Water Sci. Technol.* **40** (4-5): 75-80.
- Hays, B. (1997). Potential for parasitic disease transmission with land application of sewage plant effluents and sludge. *Water Res.*, **11**: 583-595.

- Hickey, W. J., Arnold, S. M. y Harris, R.F. (1995). Degradation of atrazine by Fenton's reagent: condition optimization and product quantification. *Environ. Sci. Technol.* **29**(8): 2083-2089.
- Howsawkung, J., Walts, R., Washigton, D., Teel, A., Hees, T. y Crawford, R. (2001). Evidence for simultaneous abiotic-biotic oxidations in a microbial-Fenton's system. *Environ. Sci. Technol.* **35**: 2961-2966.
- Jaskoski, B. J. (1962). Paper chromatography of some fractions of *Ascaris suum* eggs. *Exp. Parasitol.* **12**(1): 19-24.
- Jiménez, B. (2007) Helminth ova removal from wastewater for agriculture and aquaculture reuse. *Water Sci. Technol.*, **55**(1-2): 485-493.
- Jiménez, B., Maya, C., Sánchez, E., Romero, A., Lira, L., Barrios, J.A. (2002). Comparison of the quantity and quality of the microbiological content of sludge in countries with low and high content of pathogens. *Water Sci. Technol.*, **46**(10): 17-24.
- Jiménez, B., Maya, C., y Salgado, G. (2001). The elimination of helminth ova, fecal coliforms, salmonella and protozoan cyst by various physicochemical processes in water and sludge. *Water Sci. Technol.* **43**(12): 179-182.
- Jiménez, B. y Chávez, A. (1997). Treatment of Mexico City wastewater for irrigation purposes. *Environ. Technol.* **18** (7): 721-729.
- Juanicó, M. y Milstein, A. (2004). Semi-intensive treatment plants for wastewater reuse in irrigation. *Water Sci. Technol.* **50**(2): 55-60.
- Kang, Y.W., y Hwang, K.-Y. (2000). Effects of reaction conditions on the oxidation efficiency in the Fenton process. *Water Res.* **34**(10): 2786-2790.
- Khuroo, M. 1996. *Ascariasis*. Gastroenterology (2002) *Clinics of North America*, **25**(3): 553-557.
- Kwon, B.G., Lee, D.S., Kang, N., Yoon, J., (1999). Characteristics of *p*-chlorophenol oxidation by Fenton's reagent. *Water Res.* **33**(9): 2110-2118.
- Landa, H., Capella, A. y Jiménez, B. (1997). Particle size distribution in an effluent from an advanced primary treatment and its removal during filtration. *Water Sci. Technol.* **36**(4): 159-165.
- Lin, S.H., Lin, C.M., y Leu, H.G. (1999). Operating characteristics and kinetic studies of surfactant wastewater treatment by Fenton oxidation. *Water Res.* **33**(7): 1735-1741.
- Lin, S. H. y Lo, C. C. (1997) Fenton process for treatment of desizing wastewater. *Water Res.* **31**(8): 2050-2056.
- Lin, S.H. y Peng, C.F. (1995). Treatment of textile wastewater by Fenton's reagent. *J. Environ. Sci. Health A* **30**(1): 89-98.

- Lipezyska-Kochany, E., Sprah, G. y Harms, S. (1995). Influence of some groundwater and surface waters constituents on the degradation of 4-chlorophenol by the Fenton reaction. *Chemosphere* **30**: 9-20.
- Mara, D., Sleight, P., Blumenthal, U. y Carr, R. (2007). Health risks in wastewater irrigation: Comparing estimates from quantitative microbial risk analyses and epidemiological studies. *Journal of Water and Health*. **5**(1): 39-50.
- Martínez, E. C., y López, G. D. (2001). Tratamiento químico de contaminantes orgánicos -El proceso Fenton. *Revista de Ingeniería Química (España)*, **375**: 149-153.
- Mendez, J.M., Jimenez, B.E. y Barrios, J.A. (2002). Improved alkaline stabilization of municipal wastewater sludge, *Water Sci. Technol.* **46** (10): 139–146.
- Nesheiwat, F.K., y Swanson, A.G., (2000). Clean contaminated sites using Fenton's reagent. *Chem. Eng. Prog.* **96** (4): 61-66.
- Neyens, E. y Baeyens, J. (2003). A review of classic Fenton's peroxidation as an advanced oxidation technique. *J. Hazard. Mater. B* **98**: 33-50.
- Oturan, M.A. (2000). An ecologically effective water treatment technique using electrochemically generated hydroxyl radicals for in situ destruction of organic pollutants: Application to herbicide 2, 4-D. *J. Appl. Electrochem.* **30**: 475–482
- Orta De Velásquez, M. T., Martínez, J.L., Monje, I., y Rojas, M. N. (2004). Destruction of helminth (*Ascaris suum*) eggs by ozone. *Ozone: Science & Engineering*, **26** (4): 359 – 366
- Orta De Velásquez, M. T., Rojas, M. N., y Vaca-Mie, M. (2002). Destruction of helminth eggs (*Ascaris suum*) by ozone: Second stage. *Water Sci. Technol.* **2**: 227 – 233.
- Paulino, R., Castro, E. and Thomaz-Soccol, V. (2001). Helminth eggs and protozoan cysts in sludge obtained by anaerobic digestion process *Revista da Sociedade Brasileira de Medicina Tropical* **34**(5): 421–428.
- Pignatello, J.J. (1992). Dark and photo-assisted Fe³⁺ catalyzed degradation of chlorophenoxy herbicides by hydrogen peroxide. *Environ. Sci. Technol.* **26**(5): 944-951.
- Ramírez, R.M., Galván, M., Retama, I., Rigas, F. y Durán, A. (2006). Viability reduction of parasites (*Ascaris spp.*) in water with photo-Fenton reaction via response surface methodology. *Water Practice & Technol.*, **1**(2) doi:10.2166/WPT.2006043.
- Rivas, F.J., Beltran, F.J., Frades, J., Buzeda, P., (2001). Oxidation of *p*-hydroxybenzoic acid by Fenton's reagent. *Water Res.* **35**(2): 387-.
- Rivera, F., Warren, A., Ramirez, E., Decamp, O., Bonilla, P., Gallegos, E., Calderón, A. y Sánchez, J.T. (1995). Removal of pathogens from wastewater by the root zone method (RZM). *Water Sci. Technol.*, **32**(3): 211–218.







- Rodger, J.D. y Bunce, N.J. (2001). Electrochemical treatment of 2, 4, 6 -trinitrotoluene and related compounds. *Environ. Sci. Technol.* **35**(2): 406-410.
- Rodríguez, J., Contreras, D., Parra, C., Freer, J., Baeza, J y Duran, N. (199). Pulp mill effluent treatment by Fenton-type reactions catalyzed by iron complexes. *Water Sci. Technol.* **40**: 351-355.
- Rojas, M. N. (1998). Evaluación de la factibilidad de utilizar colorantes biológicos para determinar la viabilidad de huevos de helmintos. Tesis de Maestría. UNAM.
- Sanguinetti, G. G., Tortul, C., García, M.C., Ferrer, V., Montangero, A. y Strauss M. (2005). Investigating helminth eggs and *Salmonella sp.* In stabilization ponds treating septage. *Water Sci. Technol.*, **51**(12): 239-247.
- Sanguinetti, G. S., Tortul, C., Ferrer, V., Montangero, A. y Strauss M. (2005). Investigating helminth eggs and *Salmonella sp.* in stabilization ponds treating septage. *Water Sci. Technol.* **50** (12): 239-247.
- Scott, R., Jenkins, T., Baghat, M. y Ahalaby, I. (1999). Capacity of constructed wetlands to remove parasite eggs from wastewater in Egypt. *Water Sci. Technol.*, **40**(3): 117-123.
- Sedlak, D. L. y Andren, A. W. (1991). Oxidation of chlorobezene with Fenton's reagent. *Environ. Sci. Technol.*, **25**(4): 777-782.
- Shuval, H., Adin, A., Fattal, B., Rawutz, E. y Yekutieli, P. (1986). Wastewater irrigation in developing countries – Health effects and technical solutions. The World Bank, Washington, DC. World Bank technical paper No. 51.
- Sun, Y. y Pignatello, J.J. (1992). Chemical treatment of pesticide wastes. Evaluation of Fe(III) chelates for catalytic hydrogen peroxide oxidation of 2,4-D at circumneutral pH. *J. Agric. Food Chem.* **40**: 332-337.
- Tang, W.Z., y Huang, C.P. (1996). 2,4-dichlorophenol oxidation kinetics by Fenton's reagent. *Environ. Technol.* **17**(12): 1371-1378.
- Tay, Z., Lara, A., Velasco, O., y Gutiérrez, Q., (2002). Parasitología médica. Mendez Editores: 309-320.
- Vázquez, O., Martínez, I. y Campos, T. (2003). Ascariasis. Review of the literatura. *Acta Pediatr Méx.* **24**(2): 100-107.
- Venkatadri, R. y Peters, R.V., (1993). Chemical oxidation technologies: ultraviolet light/hydrogen peroxide, Fenton's reagent and titanium dioxide assisted photocatalysis. *Hazard. Waste Hazard. Mater.* **10**(2): 107-149.
- Von Sperling, M., Chernicharo, C.A., Soares, A.M. y Zerbini, A.M. (2002). Coliform and helminth eggs removal in a combined UASB reactor-baffled pond system in Brazil: performance evaluation and mathematical modeling. *Water Sci. Technol.* **45**(10): 237-242.
- Walling, C. (1975). Fenton's reagent revisited. *Acc. Chem. Res.* **8**: 125.

- Walling, C. y Goosen, A. (1973). Mechanism of the ferric ion catalysed decomposition of hydrogen peroxide: effects of organic substrate. *J. Am. Chem. Soc.* **95**(9): 2987-2991.
- Walling, C. y Kato, S. (1971). The oxidation of alcohols by Fenton's reagent: the eff of copper ion. *J. Am. Chem. Soc.* **93**: 4275-4281.
- Wang, A., Qu, J., Liu, H. y Ru, J. (2008). Mineralization of an azo dye Acid Red 14 by photoelectro-Fenton process using an activated carbon fiber cathode. *Appl. Catal. B.* doi:10.1016/j.apcatb.2008.04.016.
- Wells, C.F. y Salam, M.A. (1968). The effect of pH on the kinetics of reaction of iron (II) with hydrogen peroxide in perchlorate media. *J. Chem. Soc. A.* : 24-29
- Yoon, J., Lee, Y. y Kim, S. (2001). Investigation of the reaction pathway of OH radicals produced by Fenton oxidation in the conditions of wastewater treatment. *Wat. Sci. Technol.* 44(5): 15-21.
- http://en.wikipedia.org/wiki/Pourbaix_diagram. Página modificada el 18 de Febrero del 2008, a las 22:54. Todo el texto está disponible bajo los términos de la GNU Free Documentation License. Wikipedia® es una marca registrada de Wikimedia Foundation, Inc, registradas en EE.UU.

Anexos

Anexo I El agua, su problemática a nivel mundial

El agua es uno de los recursos más abundantes de la Tierra sin embargo, el 97% se encuentra en los océanos. La mayoría del agua restante está atrapada en los casquetes de hielo de la Antártida o bajo tierra, lo cual deja menos del 1% disponible para uso humano en lagos y ríos de agua dulce de fácil acceso. A diferencia del petróleo o del carbón, el agua es un recurso infinitamente renovable. Día a día, el ciclo hidrológico renueva los recursos mundiales de agua dulce por medio de la evaporación y la precipitación. La pluviosidad mundial anual sobre la superficie terrestre es de 110 000 km³ sin embargo, alrededor de 70 000 km³ se evaporan antes de llegar al mar. Los restantes 40 000 km³ están potencialmente disponibles para su aprovechamiento humano. El consumo mundial de agua dulce es actualmente de 4 000 km³, es decir, tan sólo el 10 por ciento del suministro renovable anual. Aún así, son distintos los factores que agudizan su escasez entre los que podemos citar:

-  La distribución del agua en las distintas regiones del planeta: algunos países tienen mucho más que otros.
-  La distribución del crecimiento demográfico.
-  El uso del agua.
-  La sobreexplotación de los recursos hídricos.
-  La calidad del agua.
-  La poca cultura del agua.

El problema del agua en México

En nuestro país, la panorámica no es muy distinta de la que se presenta a nivel mundial, anualmente recibe del orden de 1.51 billones de metros cúbicos de agua en forma de precipitación. De esta agua, el 72.5% se evapotranspira y regresa a la atmósfera, el 25.6% escurre por los ríos o arroyos y el 1.9% restante se infiltra al subsuelo y recarga los acuíferos, es así que el país cuenta anualmente con 465 mil millones de metros cúbicos de agua dulce renovable.

México tiene buenos antecedentes en cuanto a la gestión del agua en muchas áreas. Pero en la parte norte y central del país, la demanda de agua para riego y para actividades industriales está sobrepasando a la oferta (figura A.1). La extracción de agua subterránea ha venido a cubrir esta brecha. Sin embargo, a partir de la década de los setenta, ha venido aumentando sustancialmente el número de acuíferos sobreexplotados, 32 en 1975, 36 en 1981, 80 en 1985, 97 en 2001, 102 en 2003 y 104 en el 2006. De éstos se extrae casi el 60% del agua subterránea para todos los usos.

Son cinco los principales usos del agua en nuestro país: agrícola, abastecimiento público, industria, termoeléctricas e hidroeléctricas.

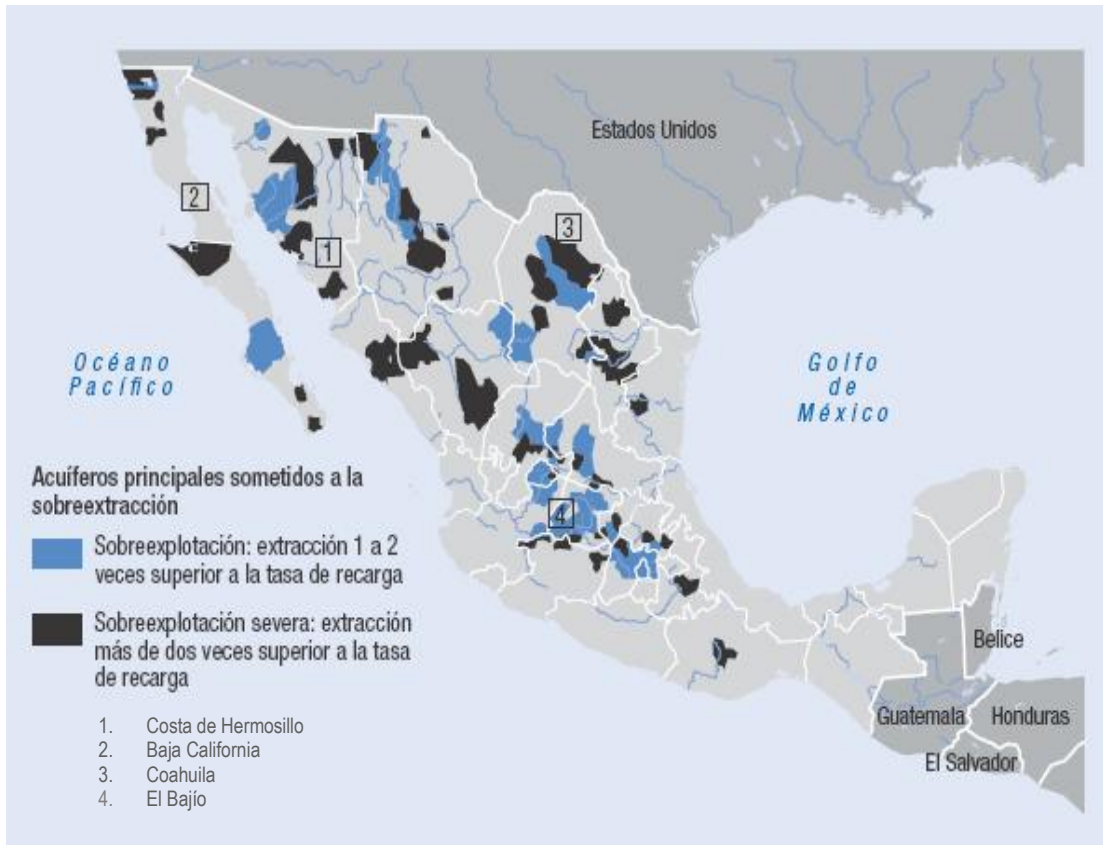


FIG. A. 1 EXPLOTACIÓN DE LOS MANTOS ACUÍFEROS EN MÉXICO. Guevara-Saninés 2006

México es de los países con mayor infraestructura de riego en el mundo debido a ello, el mayor volumen del agua concesionado corresponde a la agricultura, está representa cerca del 80% (figura A.2). Los cultivos de regadío representan más de la mitad de la producción agrícola total y aproximadamente las tres cuartas partes de las exportaciones, dominados por productos de riego intensivo como por ejemplo la fruta, la verdura y el ganado. El 63% del agua utilizada en el país proviene en fuentes superficiales mientras que el 37% proviene de fuentes subterráneas, pero más de 100 de los 653 acuíferos del país están siendo sobreexplotados, lo cual causa un daño ambiental considerable y socava la actividad de los pequeños productores agrícolas.

La extracción en exceso, alentada por los subsidios a la electricidad, es una amenaza para la productividad agrícola a largo plazo.

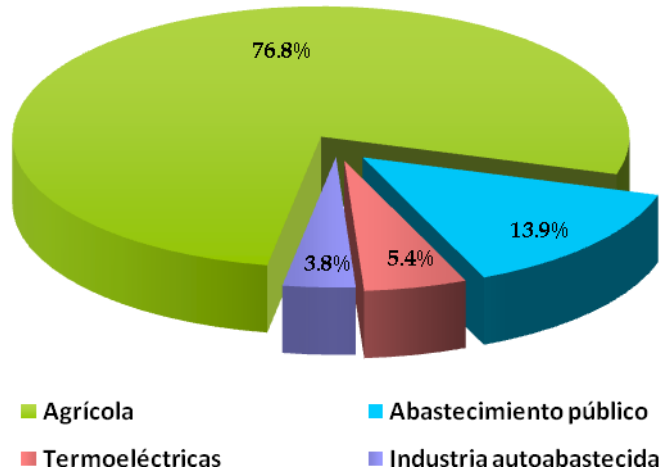


FIG. A. 2 DISTRIBUCIÓN PORCENTUAL DE LOS VOLÚMENES CONCESIONADOS PARA USOS CONSULTIVOS, CONAGUA 2006

Por su ubicación geográfica, nuestro país presenta condiciones extremas a lo largo y ancho del territorio; principalmente de escasez y sequía en el norte y de abundancia en el sur.

Las partes centrales del país han sido las más demandadas debido a condiciones climatológicas menos severas y a la relativa abundancia de recursos naturales, principalmente suelo y agua, que favorecieron su explotación para el beneficio económico de sus habitantes.

La creciente expansión desordenada e incontrolada de la Ciudad de México ha generado la disminución y pérdida de sus recursos naturales, provocado cambios climáticos importantes como la pérdida de humedales que proporcionan un control natural de las inundaciones, almacenamiento de carbono y purificación natural del agua, que conlleva al aumento constante de la temperatura promedio de la ciudad, que se resume en una deuda ecológica de consideraciones importantes para la sustentabilidad de la Ciudad

Agua en la ciudad de México

Anualmente, el acuífero de la subregión del Valle de México percibe una infiltración de 689 millones de m³; sin embargo, por medio de los pozos se extrae un volumen mayor a 1500 millones de m³, lo que significa que anualmente el acuífero pierde un volumen de agua de 895 millones de m³. El déficit acumulado en el Distrito Federal alcanza 3 m³/s, mientras que el déficit en el estado de México ya llegó a los 10 m³/s.

Por tal motivo, la Ciudad de México está identificada como una de las zonas que presentan situaciones críticas respecto al abasto del agua, debido a su ubicación, con fuentes superficiales prácticamente agotadas, el reto que vive actualmente el Distrito Federal es el abastecimiento de agua para sus habitantes, ante el crecimiento y expansión incontrolada de la población y la demanda del líquido.

El acuífero del Valle de México y los manantiales, ríos y presas de la zona surponiente del Distrito Federal abastecen cerca del 57% del agua que consume la Zona Metropolitana del Valle de México, mientras que el 43% restante proviene del Valle del Lerma y del Cutzamala. Prácticamente, el abastecimiento de la Ciudad de México proviene de dos fuentes: el acuífero de la cuenca de México y de los sistemas del Alto Lerma y del Cutzamala.

El 67% del agua suministrada se obtiene de fuentes subterráneas a través de la operación de pozos profundos, mientras que el 33 % del caudal restante se obtiene de fuentes superficiales.

En suma, del agua que se obtiene del acuífero del Valle de México, el 96% son aguas subterráneas y el 4% restante proviene de manantiales ubicados en la región poniente y sur de la ciudad (tabla A.1).

Tabla A. 1 Fuentes de abastecimiento de agua potable en la ciudad de México

Subregión	Internas		Externas		Sumas	
	Subterránea	Superficial	Subterránea	Superficial	Subterránea	Superficial
Valle de México	43.32 m ³	2.05 m ³	5.86 m ³	13.46 m ³	49.18 m ³	15.51 m ³
	(96%)	(4%)	(14%)	(29%)	(67%)	(33%)
	45.37 m ³		19.32 m ³		64.69 m ³	

Fuente: PAOT. Informe Annual 2003

La reutilización del agua en la agricultura constituye una alternativa de gran relevancia en los estados áridos y semiáridos del país ya que en la actualidad se descarga un total de 200 m³/s (6.3 km³ por año) de los cuales un volumen total de 108 m³/s (3.4 km³ por año) son aprovechados en riego agrícola; sin embargo, sólo el 8.2% tiene algún proceso de tratamiento, mientras que el 91.8% se aplica sin tratamiento alguno en 254,597 ha distribuidas en 26 Distritos de Riego

El reúso de agua residual es un recurso valioso y su demanda va en aumento en la medida que decrezca la disponibilidad y se incremente la necesidad de agua.

Reúso de aguas residuales en México

En México el reúso en riego agrícola es una práctica generalizada iniciada desde 1896 sin embargo, no fue sino hasta 1920 cuando se empezó a visualizar la importancia económica de aprovecharla para fines agrícolas. Debido a su gran contenido de nutrientes y materia orgánica, esta agua es altamente valorada por los agricultores, ya que permite aumentar significativamente la productividad agrícola (Jiménez et al., 1998).

Actualmente en México se reusan 150 m³/s de los cuales el 70% corresponden a agua de origen municipal y el 30% a no municipal. El reúso en la industria, servicios municipales, usos secundarios y recarga de acuíferos, se práctica en pequeña proporción.

Sin embargo, el uso de aguas residuales sin tratamiento representa un serio problema de salud pública debido a que es origen de enfermedades parasitarias intestinales.

Un estudio por Cifuentes y colaboradores en 1992, demostró que el empleo del agua negra en riego es la causa principal de la transmisión de enfermedades diarreicas ocasionadas por Helminthos en la

región del valle del Mezquital. Concluyeron que los niños entre 4 y 16 años sufren 16 veces más de Ascariosis que en las zonas donde se emplea agua limpia, mientras que tienen tasas de morbilidad similares para enfermedades diarreicas originadas por otro tipo de patógenos (tabla A.2).

Tabla A. 2 Comparación de la frecuencia de enfermedades hídricas entre el valle del mezquital y una zona que emplea agua limpia

Especie	Población afectada por edades	Zona regada con aguas negras (A)	Zona regada con aguas negras (B)	Relación (A/B)
<i>Ascaris lumbricoides</i> (Helmineto)	0 a 4	15.3	2.7	5.7
	5 a 14	16.1	1.0	16
	> 15	5.3	0.5	11.0
<i>Giardia lamblia</i> (Protozoario)	0 a 4	13.6	13.5	1.0
	5 a 14	9.6	9.2	1.0
	> 15	2.3	2.5	1.0
<i>Entamoeba histolytica</i> (Protozoario)	0 a 4	7.0	7.3	1.0
	5 a 14	16.4	12.0	1.3
	> 15	16	13.8	1.2

Cifuentes y Blumenthal, 1992

Anexo II Mecanismos de oxidación de células vía radicales libres

Para entender nuestro sistema podemos hacer referencia a un sistema superior y compararlo.

El cuerpo humano mantiene un balance de óxido-reducción constante, preservando el equilibrio entre la producción de pro-oxidantes que se generan como resultado del metabolismo celular y de los sistemas de defensa antioxidantes. La pérdida en este balance oxido-reducción lleva a un estado de estrés oxidativo y este estado se caracteriza por un aumento en los niveles de los radicales libres y especies reactivas, que no alcanza a ser compensado por los sistemas de defensa antioxidantes causando daño y muerte celular. El metabolismo oxidativo, siempre se acompaña de reacciones de transferencia de un electrón que involucra la generación de especies reactivas de oxígeno (ROS, por sus siglas en inglés). Las especies de oxígeno parcialmente reducidas son una fuente continua de ROS. La reducción de un e^- de O_2 y sus productos intermediarios, producen las ROS más peligrosas como $\bullet O_2^-$, H_2O_2 , y $\bullet OH$, que son generadas en presencia de metales de transición y oxígeno. Las reacciones de un e^- con otras moléculas llevan a la formación de ROS secundarios tales como radicales peroxilo, alcoxi y otros radicales orgánicos. Estos radicales no son tan reactivos como el radical $\bullet OH$, que son muy electrofílicos, pero inducen y promueven una reacción en cadena que conduce a la co-oxidación y peroxidación de biomoléculas (Dorado *et al.*, 2003)

En membranas celulares, los ácidos grasos poliinsaturados (PUFA) son moléculas biológicas susceptibles al estrés oxidativo y su degradación se denomina peroxidación lipídica. Esta peroxidación es el efecto más importante de los radicales libres sobre las células, ya que la destrucción de los PUFA de la membrana junto a los puentes disulfuro en las cadenas proteicas y las cadenas de éstas, provoca un desmoronamiento en la estructura de la membrana que conduce a la pérdida de la permeabilidad y, posteriormente, a la muerte celular (Spiteller, 2006). La susceptibilidad de las membranas biológicas a la peroxidación depende, en gran medida, del grado de insaturación y de la posición de los dobles enlaces en la membrana, así como la existencia de los iones hierro (Ursini *et al.*, 1991), ya que son los que catalizan en su mayoría las reacciones de oxidación, además de activar el oxígeno en la formación de las ROS para producir.

El proceso de peroxidación lipídica consta de una serie de reacciones en cadena, que demuestran la capacidad de las ROS para producir reacciones bioquímicas dañinas para la célula (Livingstone, 1991). Son reacciones dañinas porque provocan la formación de distintas especies afines, las cuales a su vez tiene la capacidad de degradar las membranas.

Los PUFA se caracterizan por la presencia de uno o más elementos estructurales que contiene un grupo CH_2 entre dobles enlaces:



Los hidrógenos del grupo activo alílico ($-CH_2-$) pueden ser fácilmente removidos, sólo requieren de una cantidad muy baja de energía, incluyendo la luz UV, la adición de iones bivalentes metálicos como iones de hierro, y muchos otros procesos que generan radicales (iniciación)(Porter, 1986; Gardner,

1989; Halliwell, 1992; Frankel, 2005). Los modelos no enzimáticos de los procesos de peroxidación lipídica (LOP) y la descomposición de las moléculas que se generan (LOOH) han sido estudiados en detalle en el modelo de reacciones (Porter, 1986; Gardner, 1989; Frankel, 2005): la remoción de un hidrógeno del grupo alílico los PUFA genera un radical mesomérico dienil (L^{\bullet} , figura A.3), que reacciona con el oxígeno en forma instantánea produciendo cuatro radicales peroxydienilo regio y estereoisómicamente conjugados. Estos son, a su vez, capaz de eliminar el hidrógeno de un grupo de CH_2 de otro PUFA para generar moléculas de hidroperóxidos de lípidos y los nuevos radicales dienilo, esto induce una reacción en cadena (propagación).

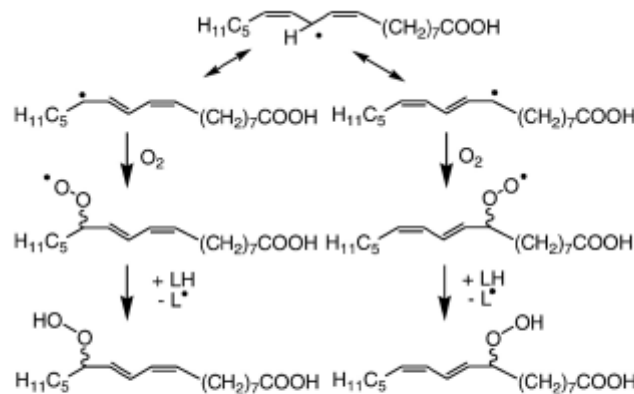


FIG. A. 3 SUSTRACCIÓN DE HIDRÓGENO DE UN PUFA Y SU TRANSFORMACIÓN A UN JUEGO DE DOS MOLÉCULAS REGIO ESTEREOISÓMERAS LOOH

Se han postulado distintos iniciadores de la peroxidación lipídica, siendo la teoría más extendida la que propone a las ROS como promotores de la fase de iniciación. Destaca como iniciador, en primer lugar, el radical hidroxilo ($\dot{O}H$), son distintos los hechos que señalan este radical como el iniciador de la peroxidación lipídica. En primer lugar, que sea un agente oxidante inespecífico, que reacciona con todo tipo de biomoléculas, mientras que la peroxidación lipídica es un fenómeno de localización específica. Además, los captadores de radical hidroxilo no siempre inhiben el fenómeno como se esperaría. Estos hechos han orillado en la postulación de una teoría alterna que propone al hierro como el posible iniciador. Así en esta teoría se considera la formación de especies como los radicales perferrilo (con escasa reactividad), los ferrilo, originados por la reacción de proteínas hemo con el H_2O_2 (sin embargo, la catalasa, enzima captadora de H_2O_2 , no inhibe la peroxidación dependiente del hierro) o los complejos formados por el $Fe^{2+}-O-Fe^{3+}$ con una relación $Fe^{2+}: Fe^{3+}$ de 1:1 (su existencia no se ha podido demostrar). Por otro, Aruma *et al.*, en 1989 comprobaron que el Pb^{2+} y el Al^{3+} eran capaces de reemplazar al Fe^{3+} en la aceleración de la peroxidación lipídica catalizada por Fe^{2+} , lo cual indica que no es necesario un complejo de hierro para la iniciación. Respecto a la validez de ambas teorías, existen demasiadas dudas sobre cual es la verdadera, ya que las dos han sido rebatidas por distintos autores, sin concluir cual es iniciador del proceso oxidativo.

A la fase de propagación le sucede la formación de la fase de terminación, en la cual se produce la combinación de los productos iniciales de la peroxidación (radicales lípidicos) para dar lugar a compuestos no radicales del tipo del malonildialdehído (MDA) o del 4-hidroxiálqueno (4-HNe) (ecuación 2.27) o a la producción de compuestos no reactivos mediante reacciones con antioxidantes tipo barredores, como la vitamina E (ecuaciones 2.28 y 2.29)

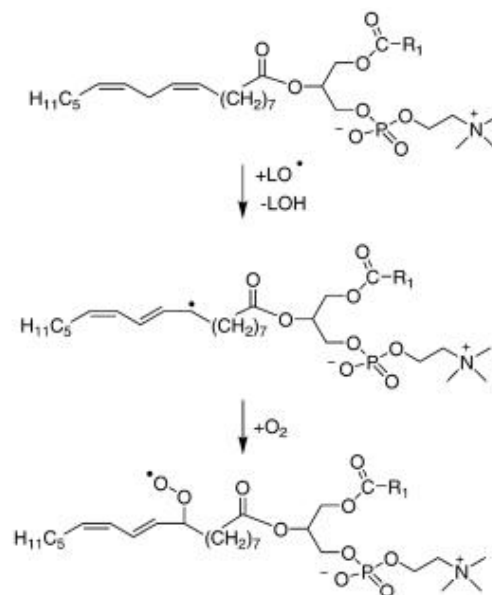
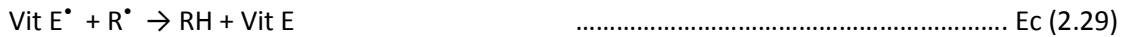
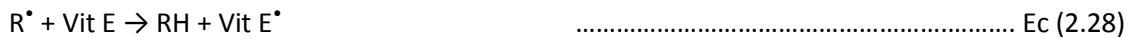


FIG. A. 4 GENERACIÓN DEL RADICAL PEROXIL POR EL ATAQUE DE UN RADICAL DIENILALCOXI SOBRE UN FOSFOLÍPIDO. R1, RESIDUO ALQUILO

Los hidrógenos de alcoholes secundarios derivados de los procesos LPO de PUFA como ácidos hidroxióctadecadienoico son activados adicionalmente por sus dobles enlaces. Por lo tanto, estos compuestos son fácilmente transformados a su correspondiente 2,4 ceto-ácidos insaturados (Goodfriend *et al.*, 2004) (figura A.5). Contenido de azúcares, como el glicerol, grupos CH(OH) adyacentes a otros grupos CH(OH). Lo último contribuye a la activación de enlaces C-H vecinos. Por tanto, los azúcares se transforman por autooxidación (Welles-Knecht *et al.*, 1995) o por los hidroperóxidos de lípidos y los iones hierro en una gran variedad de compuestos dicarbonilos, incluyendo a glicolaldehído y glioxal (Jahn *et al.*, 1996) Considerando los resultados de la oxidación radical inducido del isopropanol, se espera que la reacción radical-inducido de los azúcares esté también relacionada con la liberación de radicales peróxido de hidrógeno ($\bullet\text{O}_2\text{H}$).

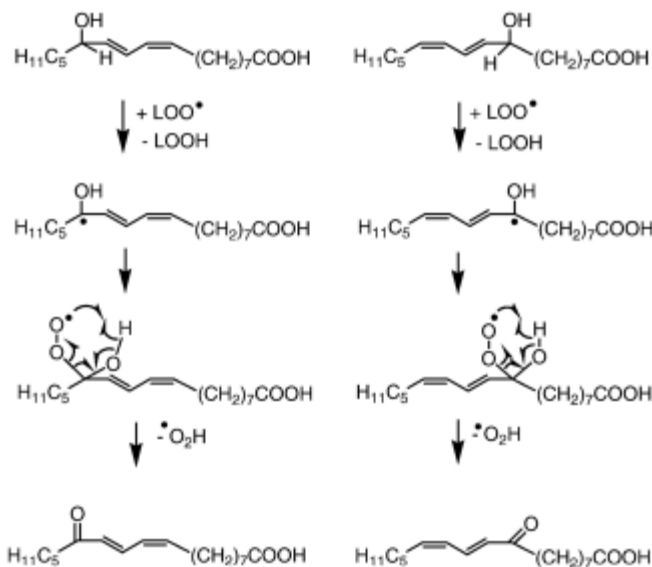


FIG. A. 5 OXIDACIÓN DE ALCOHOLES SECUNDARIOS POR SUSTRACCIÓN DE UN HIDRÓGENO DE EL ENLACE C-H ADYACENTE A EL GRUPO FUNCIONAL, EJEMPLIFICADO POR LA GENERACIÓN DEL ÁCIDO 13-OXO-9,11 OCTADECADIENOICO Y EL ÁCIDO 9-OXO-10,12OCTADECADIENOICO

Procesos similares a los descritos anteriormente parecen ser los que participan en la oxidación de los grupos amino básicos en la lisina, la cual genera un semialdehído adipic α -amino como el principal producto de la oxidación (figura A.6).

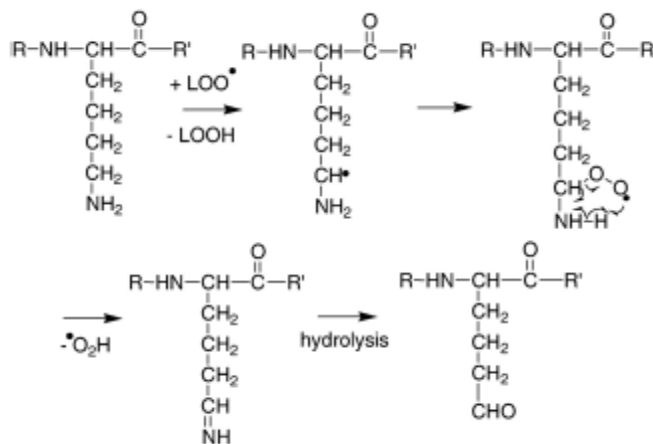


FIG. A. 6 OXIDACIÓN DE RESIDUOS DE LISINA EN PROTEÍNAS (R, R', RESIDUOS DE PROTEÍNA)

Del mismo modo la oxidación de los residuos de arginina generan semialdehído glutamilo, que posteriormente se oxida a ácido piroglutámico (figura A.7). Reacciones idénticas se asumen que ocurren en la oxidación de la prolina (figura A.8).

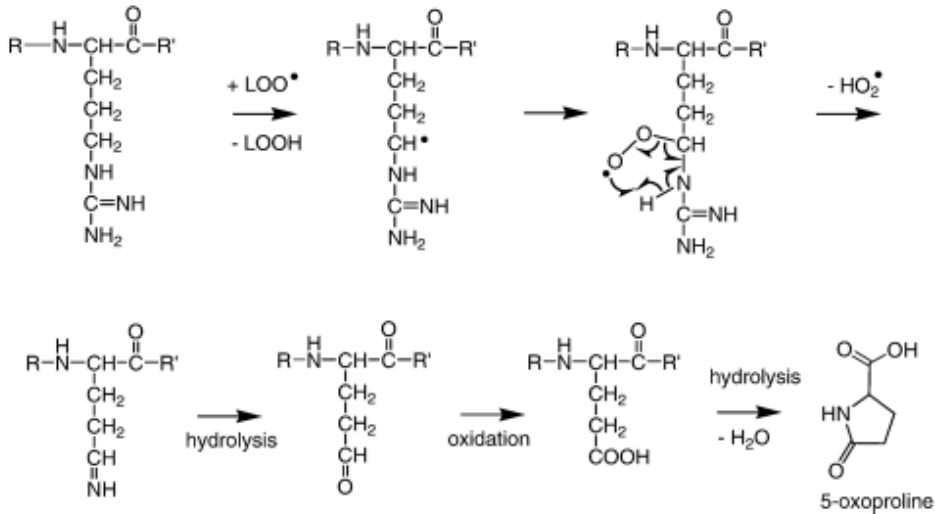


FIG. A. 7 PEROXIDACIÓN LIPÍDICA DE RESIDUOS DE ARGININA EN PROTEÍNAS (R, R', RESIDUOS DE PROTEÍNAS)

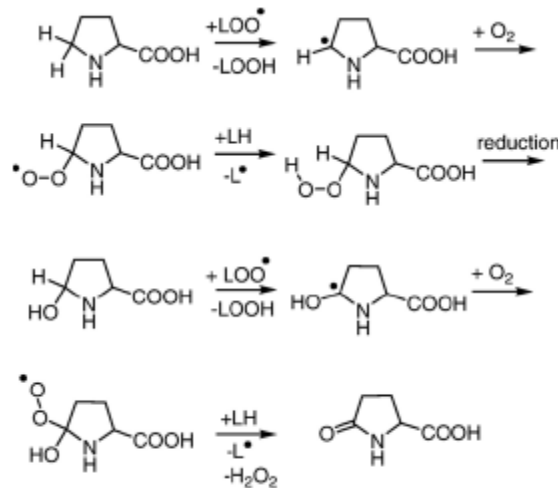


FIG. A. 8 OXIDACIÓN DE PROLINA A 5-OXOPROLINA POR RADICALES PEROXILO

La liberación de radicales peróxido de hidrógeno parece también acompañar a la oxidación biológica de aminoácidos que contienen grupos hidroxilo, como la serina o treonina, o compuestos aldehídicos correspondientes (Christensen y Meldal, 2001). Los proteínas que contienen residuos de metionina, como la Metencafalina, son fácilmente oxidadas por los radicales peróxido a sus correspondientes sulfoxidos (Vogt, 1995; Stadtman *et al.*, 2003)

Los residuos de histidina son evidentemente atacados en su forma quinoid tautomérica por radicales peróxido para remover un hidrógeno del enlace C-H en la posición 2. Después de la adición del oxígeno el radical peróxido resultante se supone que se transforma por la pérdida del radical peróxido de hidrógeno a 2-oxo-histidina (figura A.9)

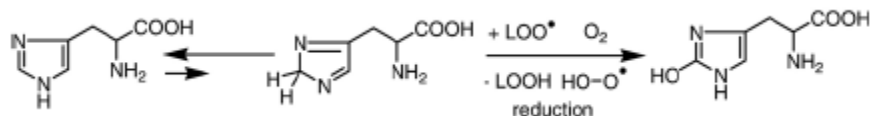


FIG. A. 9 OXIDACIÓN DE HISTIDINA A 2-OXO-HISTIDINA

El triptófano es muy sensible al ataque de los radicales peroxilo, generando quinurenina e hidroxitriptófano y una gran variedad de productos incluyendo dímeros (Domingues *et al.*, 2003)

Los aminoácidos aromáticos (tirosina) son atacados por peroxinitrito y peroxycarbononitroso (Tu *et al.*, 2005). Los productos resultantes son 3-nitrotirosina y ditirosina. El peroxinitrito se genera por la reacción de superóxidos con el óxido nítrico. Porque los superóxidos y el peróxido de hidrógeno aparentemente son derivados de la oxidación de aminas y alcoholes por radicales peroxil, la producción de peroxinitrito parece ser un proceso secundario, de acuerdo con las observaciones de que el 3-nitrotirosina como un compuesto marcador del estrés oxidativo.

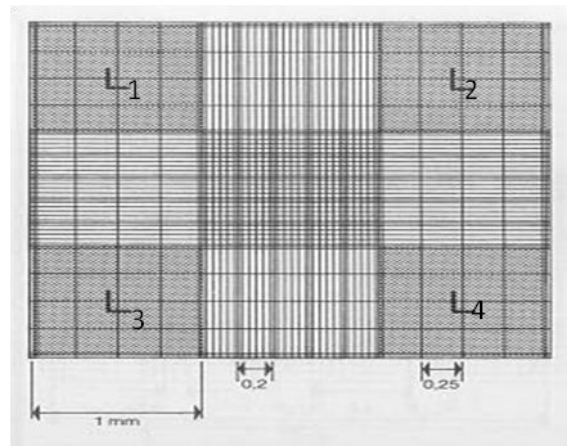
En virtud de la generación de aldehídos 2,3 insaturados superiores, 2-enals como el 4-HNE estos reaccionan fácilmente en una reacción del tipo Michael con nucleófilos, por ejemplo, con residuos de proteínas como cisteína, histidil, o lisil

Anexo III Cuantificación y determinación de la viabilidad de los huevos de helminto en la suspensión stock

El conteo se realizó en una cámara de Neubauer, en la cual se colocó un volumen conocido de muestra de la suspensión stock y, se contaron los huevos de *Ascaris* en un microscopio binocular de campo claro. Se cuantificaron los huevos en los cuadros de los extremos (área sombreada y marcada con una L), que corresponden a un milímetro cúbico ó 0.1 microlitro. A continuación se da un ejemplo de cómo se determina la concentración y la viabilidad de la suspensión

Determinación de la concentración de la suspensión Stock de HH

- L1= 1er cuadrante
- L2= 2do cuadrante
- L3= 3er cuadrante
- L4= 4to cuadrante



cuadrante	Primera cámara		Segunda cámara	
	viabiles	no viabiles	viabiles	no viabiles
1	21	3	0	0
2	10	3	0	0
3	13	4	0	0
4	2	1	0	0
subtotal	46	11	0	0
		57		0

cuadrante	Primera cámara		Segunda cámara	
	viabiles	no viabiles	viabiles	no viabiles
1	3	0	12	0
2	1	0	15	2
3	0	1	8	3
4	0	0	4	5
subtotal	4	1	39	10
		5		49

cuadrante	Primera cámara		Segunda cámara	
	viabiles	no viabiles	viabiles	no viabiles
1	8	4	4	0
2	10	1	0	0
3	2	2	12	1
4	0	0	5	2
subtotal	20	4	26	2
total	24		28	

cuadrante	Primera cámara		Segunda cámara	
	viabiles	no viabiles	viabiles	no viabiles
1	6	0	1	1
2	11	3	0	1
3	22	4	6	1
4	3	6	3	0
subtotal	42	13	10	3
	55		13	

cuadrante	Primera cámara		Segunda cámara	
	viabiles	no viabiles	viabiles	no viabiles
1	6	1	8	1
2	8	2	6	1
3	9	3	19	1
4	19	1	21	3
subtotal	42	7	54	6
	49		60	

Por ciento de viabilidad:	
No promedio de HH (x)	34
No promedio de HH viabiles	28,3
No promedio de HH no viabiles	5,7
% Viabilidad	83,2353

Concentración de la suspensión stock (HH/mL)		
[HH/mL]=	10000 (x/4)=	85000

Anexo III Preparación de la suspensión intermedia de huevos de helminto para las pruebas de oxidación

La suspensión sintética utilizada en las pruebas de oxidación con el foto-reactor debe tener una concentración inicial de 2,000 huevos por litro ó 2HH/mL y debido a que la concentración de la suspensión stock es muy alta, para tomar un volumen adecuado para preparar esta agua con la precisión adecuada, es necesario preparar una suspensión en formaldehído con concentración intermedia (14,250 HH/mL). Se prepararon 100 mL de esta suspensión intermedia, de acuerdo a la siguiente dilución:

$$\frac{142,500H / mL * 10mL}{100mL} = 14,250HH / mL$$

El reactor debe contener 3,100 mL ó 3.1 L de una solución de 2 HH/mL, (3 L son para las pruebas de oxidación y 100 mL para usarlos como blanco), por lo que a 3, 100 mL de agua destilada se adicionaron 0.435 mL de la suspensión de concentración intermedia (14 250 HH/mL), para obtener la concentración deseada.

$$C_1V_1 = C_2V_2$$

$$(2HH / mL)(3100mL) = (14,250)(V_2)$$

$$V_2 = 0.435mL$$

Anexo IV Preparación del reactivo de Fenton

El método de cálculo para preparar las soluciones de hierro fue el siguiente. Las soluciones se prepararon a una concentración de 80 mg/mL y 2 mg/mL.

$FeCl_3 \cdot 6H_2O$

Para Co= 80 mg/mL

$$\frac{270.317(FeCl_3)}{55.847Fe_{3+}} * 80 \frac{mg}{mL} Fe_{3+} = 387.22 \frac{mg}{mL} FeCl_3$$

$$387.22 \frac{mg}{mL} * \frac{1g}{1000mg} = 0.387 \frac{g}{mL} FeCl_3$$

Para preparar 10 mL de Fe^{3+}

$$0.387 \frac{g}{mL} FeCl_3 * 10mL = 3.87g FeCl_3 \text{ Aforando en 10 mL}$$

Para Co= 2 mg/mL

$$\frac{270.317(FeCl_3)}{55.847Fe_{3+}} * 2 \frac{mg}{mL} Fe_{3+} = 9.68 \frac{mg}{mL} FeCl_3$$

$$9.68 \frac{mg}{mL} * \frac{1g}{1000mg} = 0.00968 \frac{g}{mL} FeCl_3$$

Para preparar 10 mL de Fe^{3+}

$$0.00968 \frac{g}{mL} FeCl_3 * 10mL = 0.0968g FeCl_3 \text{ Aforando en 10 mL}$$

Peróxido de hidrógeno

Partiendo de una solución madre de peróxido de hidrógeno al 30%, con densidad de 1.11 g/mL se procedió de la forma siguiente:

$$1 \text{ mL H}_2\text{O}_2 * 0.3 * 1100 \frac{\text{mg}}{\text{mL}} = 333 \frac{\text{mg}}{\text{mL}} \text{ H}_2\text{O}_2$$

La concentración de la solución madre determinada experimentalmente con la técnica iodométrica es de 346.8 g/L = 346.8 mg/mL

Se tomó un factor de dilución de X=30 para obtener una solución con una concentración C_0 .

$$\frac{346.8 \frac{\text{mg}}{\text{mL}}}{30} = 11.56 \frac{\text{mg}}{\text{mL}} \text{ H}_2\text{O}_2$$

Para preparar 10 mL de H_2O_2 a $C_0=11.56 \text{ mg/mL}$

$$\frac{11.56 \frac{\text{mg}}{\text{mL}} * 10 \text{ mL}}{346.8 \frac{\text{mg}}{\text{mL}}} = 0.333 \text{ mL de H}_2\text{O}_2 \text{ al 30\%}$$

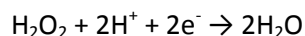
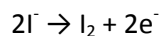
Anexo V Técnicas analíticas

Determinación de la concentración de la solución madre de peróxido de hidrógeno

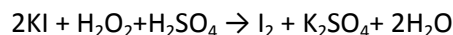
Método iodométrico (concentración > 10⁻³ m) (34 mg/l)

Las soluciones madres de peróxido de hidrógeno pueden cuantificarse por este método. En medio ácido, la reacción de oxidación del yoduro a yodo es catalizada por la presencia de molibdato de amonio.

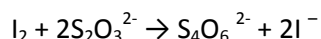
Las semi reacciones son:



La reacción completa es:







La reacción de yodo con los iones tiosulfato es:



Para conocer la concentración de una solución madre de peróxido con una concentración teórica de aproximadamente 300g/L hay que hacer una dilución 1:500 y determinar mediante este método.

Para la determinación se introducen sucesivamente en un matraz Erlenmeyer:

-  0.162 g de KI
-  2 mL de una solución de H₂SO₄ 1N,
-  50 mL de la solución a cuantificar,
-  0.1 g de molibdato de amonio.

El yodo se forma a partir de una solución de tiosulfato de sodio 0.1N, en presencia de tiodeno o de una solución de almidón como indicador. Para la determinación, hay que titular con la solución de tiosulfato hasta que el color castaño de la mezcla contenida en el matraz cambie a color amarillo pálido. En ese momento hay que adicionar con la espátula una pequeña cantidad de tiodeno o 1 mL del indicador de almidón; la mezcla tomará una coloración azul intenso y se continúa titulado hasta que el color azul desaparezca.

La concentración de peróxido se calcula de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$[\text{H}_2\text{O}_2] \text{ (mg/L)} = (V_{\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3} * N_{\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3} * 34) / (VE * 2)$$

Donde:

$V_{\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3}$ = Volumen de solución titulante (L)

$N_{\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3}$ = Normalidad de la solución titulante (0.1 mol/L)

34 = Peso molecular del H_2O_2

VE = Volumen total de muestra (L)

Preparación de solución de almidón como indicador (Estandar Methods):

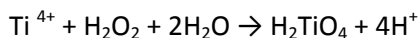
Para 5g de almidón, adicionar una pequeña cantidad de agua fría y triturar en el mortero hasta obtener una pasta suave. Poner en un matraz de 1L con agua destilada hirviendo, agitar y dejar que sedimente durante toda la noche. Se utiliza el sobrenadante. Conservar con 1.25g de ácido salicílico, 4g de cloruro de zinc o con una combinación de 4g de propionato de sodio y 2g de azida de sodio por litro de solución de almidón.

Determinación de las concentraciones inicial y residual de soluciones de peróxido de hidrógeno.

Una vez confirmada la concentración de la solución madre de peróxido de hidrógeno, el siguiente procedimiento se utiliza para determinar la concentración de soluciones de peróxido que se adicionan al inicio del experimento, así como la concentración residual al final del mismo.

Método colorimétrico ($6.10^{-5} \text{ m} < \text{concentración} < 10^{-3} \text{ m} = 2.04 < \text{concentración} < 34 \text{ mg/l}$)

El principio de este método es la medida espectrofotométrica de un complejo formado por la reacción selectiva de los iones Ti(V) con el peróxido de hidrógeno en medio ácido (Eisenberg, 1943).



La medición se realiza en un matraz aforado de 10 mL con un contenido de 0.5 mL de una solución de $\text{Ti}(\text{SO}_4)_2$ la cual se completa hasta la línea de aforo con la solución a medir. Después de la homogeneización de la mezcla se forma un complejo color amarillo que es estable por seis horas a la oscuridad. Para hacer la determinación se prepara un blanco con agua destilada. La medición de la densidad óptica a 410 nm se realiza en un espectrofotómetro con cubetas de 1cm de trayectoria óptica. Las concentraciones de H_2O_2 son calculadas como sigue:

$$[\text{H}_2\text{O}_2] \text{ (mg/L)} = (\Delta\text{D}\cdot\text{O}_{410\text{nm}}\text{VT } 34) / \epsilon\text{VE}$$

Donde:

$\Delta\text{DO}_{410\text{nm}}$ = (densidad óptica de la muestra - densidad del banco) a 410 nm

VT = volumen total de mezcla (10 mL)

ϵ = coeficiente de extinción molar ($790.32 \text{ L mol}^{-1} \text{ cm}^{-1}$)

VE = volumen de muestra dosificado

Otra forma de determinar la concentración de peróxido y el coeficiente de extinción molar es mediante una curva de calibración de la siguiente manera:

- 🔹 Preparar muestras de H_2O_2 de concentraciones conocidas: 0.5, 1, 2, 2.5, 5, 10, 20, 30 y 40 mg/L.
- 🔹 En un matraz aforado de 10 mL, agregar 0.5 mL de sulfato de titanio en y llenar hasta la marca del aforo con la solución de peróxido de hidrógeno.
- 🔹 Preparar un matraz con 0.5 mL de sulfato de titanio y llenar con agua destilada a fin de usarlo como blanco.
- 🔹 Medir la absorbancia a la longitud de onda máxima ($\lambda=410 \text{ nm}$) para las distintas concentraciones.
- 🔹 Construir una curva de calibración Absorbancia vs Concentración.

Las soluciones anteriores deben prepararse a partir de una solución de H_2O_2 de la cual se conoce perfectamente la concentración o con una solución de H_2O_2 normalizada con permanganato de potasio (patrón secundario), la cual debe normalizarse con oxalato de sodio (patrón primario). (ASTM, Designation: E 200-86, Preparation, standardization and storage of standard solutions for chemical analysis).

Se recomienda que las soluciones de peróxido de hidrógeno a adicionar en el experimento se preparen el mismo día para evitar su degradación.

Preparación del sulfato de titanio (TiSO_4) para la determinación del peróxido de hidrógeno

- 🔹 Pesar 1 g de TiO_2 y disolver en 100 mL de H_2SO_4 concentrado.
- 🔹 Dejar en digestión a 180°C durante 72 h para la disolución total.
- 🔹 Ya disuelto el TiO_2 , dejar enfriar.
- 🔹 Aforar la solución obtenida a 500 mL con agua destilada. (Agregar lentamente el agua – reacción exotérmica -)
- 🔹 Filtrar con fibra de vidrio de ser necesario. Lavar previamente la fibra de vidrio con agua destilada





Determinación de la concentración de hierro en solución

Para determinar la concentración de hierro en la solución que se adiciona al inicio del experimento, así como la concentración residual al final del mismo, se utilizó un método colorimétrico Ferrospectral® de Merck en donde el hierro reacciona sólo en forma iónica divalente. Esto se consigue por la adición de un reactivo que contiene tioglicolato amónico (Fe-AN), el cual mineraliza complejos de hierro débiles y reduce hierro (III), mostrando una coloración violeta azulado. Al mismo tiempo sirve como tampón de pH.

La reacción de color no muestra prácticamente ninguna influencia de la temperatura.

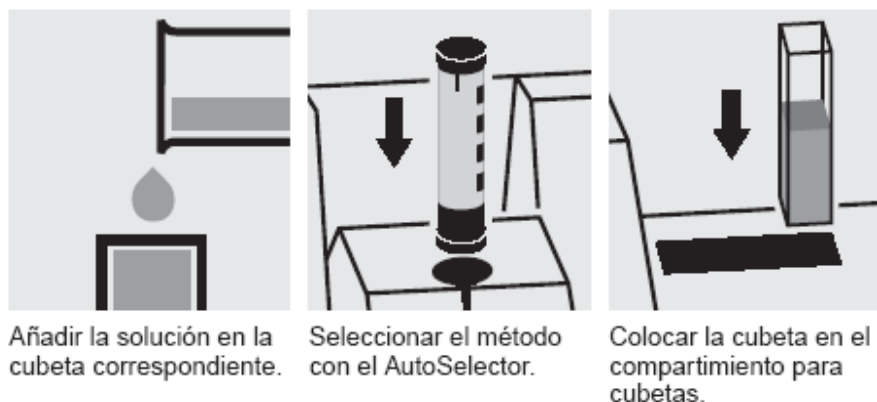
Intervalo de medida: 0.010 – 5.0 mg/L en cubeta de 10 mm

El procedimiento es el siguiente

-  Tomar 10 ó 20 mL de la muestra a analizar.
-  Adicionar 5 gotas de Fe:AN y mezclar.
-  Esperar a que reaccione durante 3 minutos.
-  Medir frente a la muestra en blanco a 565 nm

Tratándose de cubetas rectangulares, se prepara la muestra primero en tubos de ensayo, mientras que en el caso de cubetas frasco y redondas se hace la mezcla directamente en éstas, comprobando que el volumen de muestra es suficiente para cubrir el camino de los rayos del fotómetro.

La medición se hace en el espectrofotómetro Nova-60 introduciendo el tubo autoselector de acuerdo al esquema abajo mostrado. La lectura se da directamente en mg/L de Fe.



Estabilidad con el tiempo: Si el hierro está presente en forma ionógena, el complejo de color prácticamente se desarrolla inmediatamente después de la adición de reactivos, y al cabo de 10 horas, disminuye solamente en un 1%, ya que el ácido tioglicólico solo disgrega lentamente el hierro hidrolizado. En la práctica se utilizan tiempos estándar de 3 a 30 minutos. Un aumento del color creciente indica siempre hierro en esta forma.

Anexo VI Pruebas de oxidación

TABLA A. 3 RESULTADOS DE LAS PRUEBAS DE OXIDACIÓN CON FENTON CLÁSICO PARA INACTIVAR HUEVOS DE HELMINTO (PRIMERA RÉPLICA)

Exp	INFLUENTE								
	HH v BA	HH nv BA	Total	% viabilidad A	HH v BB	HH nv BB	Total	% viabilidad B	% v inicialp
1	65.00	25.00	90.00	72.22	76.00	5.00	81.00	93.83	72.22
26	92.00	23.00	115.00	80.00	84.00	5.00	89.00	94.38	87.19
22	82.00	3.00	85.00	96.47	85.00	9.00	94.00	90.43	96.47
20	61.00	18.00	79.00	77.22	79.00	7.00	86.00	91.86	77.22
11	93.00	22.00	115.00	80.87	94.00	9.00	103.00	91.26	86.07
4	60.00	5.00	65.00	92.31	50.00	4.00	54.00	92.59	92.45
6	97.00	6.00	103.00	94.17	111.00	0.00	111.00	100.00	97.09
9	88.00	11.00	99.00	88.89	74.00	15.00	89.00	83.15	86.02
23	66.00	18.00	84.00	78.57	106.00	8.00	114.00	92.98	85.78
16	72.00	19.00	91.00	79.12	65.00	13.00	78.00	83.33	81.23
13	66.00	10.00	76.00	86.84	68.00	15.00	83.00	81.93	84.38
7	73.00	15.00	88.00	82.95	62.00	16.00	78.00	79.49	81.22
5	60.00	18.00	78.00	76.92	84.00	1.00	85.00	98.82	87.87
10	59.00	9.00	68.00	86.76	76.00	3.00	79.00	96.20	91.48
25	77.00	22.00	99.00	77.78	54.00	32.00	86.00	62.79	70.28
15	49.00	11.00	60.00	81.67	66.00	12.00	78.00	84.62	83.14
Promedio			87.19	83.30			86.75	88.60	85.01

Continuación

EFLUENTE											
HH v P1	HH nv P1	Total	% viabilidad P1	% inactivación1	HH v P2	HH nv P2	Total	% viabilidad P2	% inactivación2	% v finalp	% inactivación
9.00	78.00	87.00	10.34	85.68	3.00	70.00	73.00	4.11	95.62	7.23	89.99
6.00	76.00	82.00	7.32	90.85	3.00	78.00	81.00	3.70	96.08	5.51	93.68
7.00	90.00	97.00	7.22	92.52	1.00	92.00	93.00	1.08	98.81	4.15	95.70
17.00	69.00	86.00	19.77	74.40	7.00	69.00	76.00	9.21	89.97	14.49	81.24
14.00	101.00	115.00	12.17	84.95	18.00	81.00	99.00	18.18	80.08	15.18	82.36
20.00	58.00	78.00	25.64	72.22	23.00	12.00	35.00	65.71	29.03	45.68	50.59
4.00	83.00	87.00	4.60	95.12	3.00	75.00	78.00	3.85	96.15	4.22	95.65
13.00	70.00	83.00	15.66	82.38	21.00	77.00	98.00	21.43	74.23	18.55	78.44
12.00	107.00	119.00	10.08	87.17	1.00	77.00	78.00	1.28	98.62	5.68	93.37
7.00	90.00	97.00	7.22	90.88	5.00	87.00	92.00	5.43	93.48	6.33	92.21
23.00	49.00	72.00	31.94	63.22	17.00	67.00	84.00	20.24	75.30	26.09	69.08
18.00	73.00	91.00	19.78	76.16	20.00	58.00	78.00	25.64	67.74	22.71	72.04
2.00	83.00	85.00	2.35	96.94	2.00	94.00	96.00	2.08	97.89	2.22	97.48
14.00	94.00	108.00	12.96	85.06	13.00	83.00	96.00	13.54	85.92	13.25	85.51
10.00	65.00	75.00	13.33	82.86	6.00	90.00	96.00	6.25	90.05	9.79	86.07
8.00	70.00	78.00	10.26	87.44	22.00	67.00	89.00	24.72	70.79	17.49	78.97
		90.00	13.17	84.19			83.88	14.15	83.68	13.66	83.93

TABLA A. 4 RESULTADOS DE LAS PRUEBAS DE OXIDACIÓN CON FENTON CLÁSICO PARA INACTIVAR HUEVOS DE HELMINTO (SEGUNDA RÉPLICA)

Exp	INFLUENTE									
	HH v BA	HH nv BA	Total	% viabilidad A	HH v BB	HH nv BB	Total	% viabilidad B	% v inicialp	
1	80	22	102.00	78.43	85	20	105.00	80.95	78.43	
26	35	3	38.00	92.11	14	1	15.00	93.33	92.72	
22	50	4	54.00	92.59	50	4	54.00	92.59	92.59	
20	75	25	100.00	75.00	84	29	113.00	74.34	75.00	
11	50	3	53.00	94.34	50	3	53.00	94.34	94.34	
4	37	2	39.00	94.87	48	2	50.00	96.00	95.44	
6	18	4	22.00	81.82	17	3	20.00	85.00	83.41	
9	53	15	68.00	77.94	51	11	62.00	82.26	80.10	
23	47	13	60.00	78.33	64	7	71.00	90.14	84.24	
16	37	9	46.00	80.43	29	7	36.00	80.56	80.50	
13	12	2	14.00	85.71	17	4	21.00	80.95	83.33	
7	7	5	12.00	58.33	26	9	35.00	74.29	66.31	
5	96	18	114.00	84.21	81	18	99.00	81.82	83.01	
10	65	4	69.00	94.20	60	6	66.00	90.91	92.56	
25	35	3	38.00	92.11	34	12	46.00	73.91	83.01	
15	54	5	59.00	91.53	2		2.00	100.00	95.76	
Promedio			55.50	84.50			53.00	85.71	85.05	

Continuación

EFLUENTE											
HH v P1	HH nv P1	Total	% viabilidad P1	% inactivación1	HH v P2	HH nv P2	Total	% viabilidad P2	% inactivación2	% v finalp	% inactivación
27	33	60.00	45.00	42.63	23	31	54.00	42.59	47.39	43.80	44.16
21	32	53.00	39.62	56.98	16	28	44.00	36.36	61.04	37.99	59.02
26	3	29.00	89.66	3.17	31	5	36.00	86.11	7.00	87.88	5.09
8	5	13.00	61.54	17.95	21	7	28.00	75.00	-0.89	68.27	8.97
17	14	31.00	54.84	41.87	29	17	46.00	63.04	33.17	58.94	37.52
20	58	78.00	25.64	72.97	31	75	106.00	29.25	69.54	27.44	71.24
44	32	76.00	57.89	29.24	44	32	76.00	57.89	31.89	57.89	30.59
11	39	50.00	22.00	71.77	10	42	52.00	19.23	76.62	20.62	74.26
11	87	98.00	11.22	85.67	22	111	133.00	16.54	81.65	13.88	83.52
33	31	64.00	51.56	35.90	35	22	57.00	61.40	23.77	56.48	29.83
13	16	29.00	44.83	47.70	47	5	52.00	90.38	-11.65	67.61	18.87
20	7	27.00	74.07	-26.98	5	27	32.00	15.63	78.97	44.85	32.36
53	35	88.00	60.23	28.48	47	27	74.00	63.51	22.37	61.87	25.47
12	79	91.00	13.19	86.00	9	79	88.00	10.23	88.75	11.71	87.35
18	44	62.00	29.03	68.48	29	55	84.00	34.52	53.29	31.78	61.72
5	5	10.00	50.00	45.37	5	5	10.00	50.00	50.00	50.00	47.79
		53.69	45.65	45.98			60.75	46.98	11.36	46.31	45.54

TABLA A. 5 RESULTADOS DE LAS PRUEBAS DE OXIDACIÓN CON FENTON ASISTIDO CON LUZ UV PARA INACTIVAR HUEVOS DE HELMINTO (PRIMERA RÉPLICA)

Exp	INFLUENTE								
	HH v BA	HH nv BA	Total	% viabilidad A	HH v BB	HH nv BB	Total	% viabilidad B	% v inicialp
1	60	3	63.00	95.24	80	8	88.00	90.91	95.24
2	97	11	108.00	89.81	91	10	101.00	90.10	89.96
3	81	14	95.00	85.26	87	16	103.00	84.47	85.26
4	88	22	110.00	80.00	106	26	132.00	80.30	80.00
5	54	6	60.00	90.00	80	12	92.00	86.96	88.48
6	98	3	101.00	97.03	92	4	96.00	95.83	96.43
7	77	8	85.00	90.59	69	7	76.00	90.79	90.69
8	62	13	75.00	82.67	98	20	118.00	83.05	82.86
9	64	7	71.00	90.14	111	20	131.00	84.73	87.44
10	80	20	100.00	80.00	67	14	81.00	82.72	81.36
11	72	12	84.00	85.71	68	8	76.00	89.47	87.59
12	72	18	90.00	80.00	66	18	84.00	78.57	79.29
13	81	14	95.00	85.26	74	7	81.00	91.36	88.31
14	120	3	123.00	97.56	136	4	140.00	97.14	97.35
15	69	14	83.00	83.13	70	12	82.00	85.37	84.25
16	65	15	80.00	81.25	67	14	81.00	82.72	81.98
Promedio			88.94	87.10			97.63	87.16	87.28

Continuación

EFLUENTE											
HH v P1	HH nv P1	Total	% viabilidad P1	% Inactivación 1	HH v P2	HH nv P2	Total	% viabilidad P2	% Inactivación 2	% v finalp	% Inactivación
12	58	70	17.14	82.	8	56	64	12.50	86.25	14.82	84.44
9	73	82	10.98	87	9	75	84	10.71	88.11	10.84	87.94
27	74	101	26.73	68	24	66	90	26.67	68.43	26.70	68.69
54	54	108	50.00	37	68	75	143	47.55	40.78	48.78	39.03
37	50	87	42.53	52	34	46	80	42.50	51.13	42.51	51.95
34	86	120	28.33	70	38	78	116	32.76	65.82	30.55	68.32
44	32	76	57.89	36	30	50	80	37.50	58.70	47.70	47.41
81	21	102	79.41	3	84	20	104	80.77	2.75	80.09	3.34
11	87	98	11.22	87	22	111	133	16.54	80.48	13.88	84.12
60	66	126	47.62	40	60	60	120	50.00	39.55	48.81	40.01
46	32	78	58.97	31	47	25	72	65.28	27.04	62.13	29.07
50	63	113	44.25	44	27	40	67	40.30	48.71	42.27	46.68
18	66	84	21.43	74	23	64	87	26.44	71.06	23.93	72.90
47	31	78	60.26	38	53	44	97	54.64	43.75	57.45	40.99
36	88	124	29.03	65	47	99	146	32.19	62.29	30.61	63.66
43	50	93	46.24	43	37	38	75	49.33	40.36	47.78	41.71
		96.25	39.50	54.65			97.38	39.10	59.94	39.30	54.97

TABLA A. 6 RESULTADOS DE LAS PRUEBAS DE OXIDACIÓN CON FENTON ASISTIDO CON LUZ UV PARA INACTIVAR HUEVOS DE HELMINTO (SEGUNDA RÉPLICA)

Exp	INFLUENTE								
	HH v BA	HH nv BA	Total	% viabilidad A	HH v BB	HH nv BB	Total	% viabilidad B	% v inicialp
1	72	13	85	84.71	80	12	92	86.96	84.71
26	84	22	106	79.25	73	15	88	82.95	81.10
22	79	14	93	84.95	90	22	112	80.36	84.95
20	78	20	98	79.59	67	16	83	80.72	79.59
11	54	6	60	90.00	56	12	68	82.35	86.18
4	68	13	81	83.95	81	14	95	85.26	84.61
6	81	20	101	80.20	62	7	69	89.86	85.03
9	64	13	77	83.12	66	8	74	89.19	86.15
23	69	9	78	88.46	78	18	96	81.25	84.86
16	68	17	85	80.00	47	11	58	81.03	80.52
13	8	2	10	80.00	9	2	11	81.82	80.91
7	23	6	29	79.31	36	9	45	80.00	79.66
5	59	12	71	83.10	87	17	104	83.65	83.38
10	67	15	82	81.71	78	4	82	95.12	88.41
25	65	17	82	79.27	61	14	75	81.33	80.30
15	75	16	91	82.42	75	16	91	82.42	82.42
Total			1229	1320.02			1243	1344.28	1332.15
Promedio			76.81	82.50			77.69	84.02	83.30

Continuación

EFLUENTE											
HH v P1	HH nv P1	Total	% viabilidad P1	% Inactivación 1	HH v P2	HH nv P2	Total	% viabilidad P2	% Inactivación 2	% v finalp	% Inactivación
10	56	66	15.15	82.11	10	74	84	11.90	86.31	13.53	84.03
7	65	72	9.72	87.73	7	64	71	9.86	88.11	9.79	87.93
19	53	72	26.39	68.93	15	42	57	26.32	67.25	26.35	68.98
34	36	70	48.57	38.97	65	66	131	49.62	38.53	49.09	38.32
36	48	84	42.86	52.38	29	43	72	40.28	51.09	41.57	51.76
29	89	118	24.58	70.73	32	78	110	29.09	65.88	26.83	68.28
26	37	63	41.27	48.54	37	48	85	43.53	51.56	42.40	50.13
46	12	58	79.31	4.58	53	8	61	86.89	2.58	83.10	3.55
9	73	82	10.98	87.59	18	94	112	16.07	80.22	13.52	84.06
41	46	87	47.13	41.09	30	32	62	48.39	40.29	47.76	40.69
24	17	41	58.54	26.83	20	12	32	62.50	23.61	60.52	25.20
18	23	41	43.90	44.64	24	33	57	42.11	47.37	43.00	46.01
18	55	73	24.66	70.33	20	58	78	25.64	69.35	25.15	69.84
37	51	88	42.05	48.54	37	34	71	52.11	45.21	47.08	46.75
26	74	100	26.00	67.20	41	84	125	32.80	59.67	29.40	63.39
27	32	59	45.76	44.47	41	44	85	48.24	41.47	47.00	42.97
		1174	586.85	55.54			1293	625.33	49.69	606.09	54.50
		73.38	36.68	55.54			80.81	39.08	49.69	37.88	54.52