

**EVALUACIÓN DE LOS PROCESOS DE OXIDACIÓN AVANZADA: FENTON,
UV/H₂O₂. Y FOTO-FENTON PARA LA DEGRADACIÓN DE CLORPIRIFÓS EN
AGUAS RESIDUALES A NIVEL LABORATORIO EN LA UNIVERSIDAD DE
CARTAGENA**

**VICTOR DANIEL BARLIZA COLORADO
DANIEL LEANDRO TORRES CHISINO**

**FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BOGOTÁ D.C.
2018**

**EVALUACIÓN DE LOS PROCESOS DE OXIDACIÓN AVANZADA: FENTON,
UV/H₂O₂. Y FOTO-FENTON PARA LA DEGRADACIÓN DE CLORPIRIFÓS EN
AGUAS RESIDUALES A NIVEL LABORATORIO EN LA UNIVERSIDAD DE
CARTAGENA**

**VICTOR DANIEL BARLIZA COLORADO
DANIEL LEANDRO TORRES CHISINO**

**Proyecto integral de grado para optar al título
INGENIERO QUÍMICO**

**FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BOGOTÁ D.C.**

2018

NOTA DE ACEPTACIÓN

Ing. Sandra Liliana Mesa Espitia.
Presidente del jurado

Ing. Jaime Eduardo Arturo Calvache
Jurado 1.

Ing. Felipe Correa Mahecha
Jurado 2.

Bogotá D.C. Octubre de 2018.

DIRECTIVAS DE LA UNIVERSIDAD

Presidente de la Universidad y Rector del Claustro

Dr. Jaime Posada Díaz

Vicerrector de Desarrollo y Recursos Humanos

Dr. Luis Jaime Posada García Peña

Vicerrectora Académica y de Posgrados

Dra. Ana Josefa Herrera Vargas

Decano General de la Facultad de Ingeniería

Ing. Julio Cesar Fuentes Arismendi

Director Programa de Ingeniería Química

Ing. Leonardo de Jesús Herrera Gutiérrez

Las directivas de la Universidad de América, los jurados calificadores y el cuerpo docente no son responsables por los criterios e ideas expuestas en el presente documento. Estos corresponden únicamente a los autores.

AGRADECIMIENTOS

Los autores reconocen a las personas y entidades que hicieron parte del desarrollo de este proyecto:

- Beatriz Jaramillo Colorado, directora del proyecto, por ofrecer su asesoría teórica y científica, su tiempo, sus comentarios y sugerencias durante el desarrollo de toda la investigación.
- Fundación Universidad de América, por brindar los conocimientos y las bases durante la formación como Ingenieros Químicos.
- Universidad de Cartagena, por ofrecer sus instalaciones y permitir la realización de las caracterizaciones de los vertimientos, así como el desarrollo experimental del proyecto.
- Al profesor Edison Duarte por su contribución en gran parte de este proyecto facilitándonos y proporcionándonos algunos de los medios necesarios para el desarrollo, por su paciencia y su ayuda.
- A nuestros padres, por su apoyo incondicional, y por la financiación de cada aspecto durante la investigación.
- A cada una de las personas que de una u otra forma facilitaron la culminación del proyecto.

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	18
OBJETIVOS	19
1. GENERALIDADES	20
1.1 COMPUESTOS ORGANOFOSFORADOS	20
1.2 AGUA RESIDUAL	22
1.3 TRATAMIENTO DE AGUAS	24
1.3.1 Clasificación de tratamientos de agua residual	25
1.3.2 Procesos de Oxidación avanzada (POAs)	26
1.3.2.1 Reactivo Fenton	28
1.3.2.2 UV/H ₂ O ₂	30
1.3.2.3 Foto-Fenton	32
1.4 MECANISMO DE REACCIÓN PARA LA DESCOMPOSICIÓN DEL CLORPIRIFÓS	33
1.5 MARCO LEGAL	34
1.6 PLANTA PILOTO	37
1.6.1 Escalamiento	37
2. DIAGNÓSTICO DE AGUAS RESIDUALES A NIVEL LABORATORIO	39
2.1 UBICACIÓN	39
2.2 ESTADO ACTUAL DE LOS VERTIMIENTOS	40
2.2.1 Caracterización del agua residual	40
2.2.2 Muestreo en los Laboratorios de agroquímica en la universidad de Cartagena	41
2.2.3 Evaluación cualitativa del vertimiento	42
2.2.4 Parámetros medidos del agua residual	42
2.3 CAUDAL DEL LABORATORIO	44
2.4 COMPARACIÓN DE MUESTRA CON MARCO LEGAL	44
3. DETERMINACIÓN DE LA EFICIENCIA DE LOS MÉTODOS DE OXIDACIÓN AVANZADA FENTON, FOTO-FENTON Y, UV / H ₂ O ₂	47
3.1 MATERIALES Y EQUIPOS	47
3.1.1 Peróxido de hidrógeno (H ₂ O ₂)	47
3.1.2 Sulfato ferroso heptahidratado (FeSO ₄ ·7H ₂ O)	47
3.1.3 Lorsban 4 EC	47
3.1.4 Reactor foto-catalítico	48
3.2 METODOLOGÍA	50
3.2.1 Espectrofotometría	52
3.2.1.1 Curva de calibración	53
3.2.1.2 Extracción líquido-líquido	54
3.2.2 Tratamiento Fenton	55
3.2.2.1 Temperatura	55

3.2.2.2 pH	55
3.2.2.3 Concentraciones H ₂ O ₂ y Fe ⁺² .	56
3.2.2.4 Tiempo	56
3.2.2.5 Metodología para tratamiento Fenton	56
3.2.3 Tratamiento Foto-Fenton	58
3.2.3.1 Temperatura	58
3.2.3.2 pH	58
3.2.3.3 Concentración de H ₂ O ₂ y Fe ⁺²	58
3.2.3.4 Tiempo	59
3.2.3.5 Metodología para tratamiento Foto-Fenton	59
3.2.4 Tratamiento H ₂ O ₂ -UV	61
3.2.4.1 Temperatura	61
3.2.4.2 pH	61
3.2.4.3 Concentración de peróxido de hidrogeno	61
3.2.4.4 Tiempo	61
3.2.4.5 Metodología para tratamiento H ₂ O ₂ -UV	62
3.3 ENSAYOS PRELIMINARES	63
3.3.1 Medición del pH	63
3.3.2 Resultados de los tratamientos preliminares	64
3.3.2.1 Ensayos del tratamiento Fenton	64
3.3.2.2 Ensayos del Tratamiento Foto-Fenton	65
3.3.2.3 Ensayos del Tratamiento UV/H ₂ O ₂	67
4. DISEÑO EXPERIMENTAL	70
4.1 RESULTADOS DEL DISEÑO EXPERIMENTAL	72
4.1.1 Análisis de varianza del diseño experimental	72
4.1.2 Análisis de la gráfica de efectos principales para el porcentaje de degradación de clorpirifós	73
4.1.3 Análisis de las gráficas de superficie respuesta y de contorno para la degradación de clorpirifós.	74
4.2 ANÁLISIS DE LA VARIABLE TIEMPO	76
4.2.1 Resultados del análisis de la variable tiempo	77
5. REQUERIMIENTOS TÉCNICOS	80
5.1 Tratamiento Foto-Fenton para agua contaminada con clorpirifós	80
5.1.1 Etapas del proceso	80
5.1.2 Caudal de diseño	82
5.2 EQUIPOS Y MATERIALES	82
5.2.1 Tanque de almacenamiento	82
5.2.2 Tanque Mezclador	83
5.2.3 Reactor	84
5.2.3.1 Balance de moles	86
5.2.3.2 Ley de velocidad primer orden	86
5.2.3.3 Tiempo de reacción	87
5.2.3.4 Dimensiones del Foto-reactor	88

5.3 Procedimiento operativos	90
5.4 Problemas ambientales	91
5.5 Disposición del agua residual tratada	91
6. CONCLUSIONES	92
7. RECOMENDACIONES	93
BIBLIOGRAFÍA	97
ANEXOS	102

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Tecnologías avanzadas de oxidación.	27
Tabla 2. Medición de las concentraciones del contaminante en el agua residual del laboratorio.	40
Tabla 3. medición volumen del laboratorio de agroquímica de la universidad de Cartagena.	44
Tabla 4. Comparación de la caracterización con la Resolución.	45
Tabla 5. Comparación concentración de clorpirifós con la resolución.	45
Tabla 6. Revisión bibliográfica asociada a parámetros influyentes	50
Tabla 7. Condiciones de experimentación para cada método de oxidación avanzada	63
Tabla 8. Eficiencia de las Pruebas Preliminares.	68
Tabla 9. Variables del proceso Foto-Fenton	70
Tabla 10. Distribución de los niveles de los factores del diseño de experimentos.	71
Tabla 11. combinaciones posibles de los niveles del diseño de experimentos.	71
Tabla 12. Porcentajes de remoción de clorpirifós obtenidos en el diseño experimental.	72
Tabla 13. Análisis de varianza para el porcentaje de degradación de clorpirifós en el diseño experimental.	72
Tabla 14. Porcentajes de degradación de clorpirifós en agua residual, experimentación.	77
Tabla 16. Constantes de velocidad de reacción de Fotodegradación de reacción directa y catalítica de clorpirifós en diversos tipos de agua.	85
Tabla 17. Tiempos de ciclo del tratamiento Foto-Fenton.	88

LISTA DE IMÁGENES

	pág.
Imagen 1. Estructura química de compuestos organofosforados.	21
Imagen 2. Estructura química clorpirifós	28
Imagen 3. mecanismo de reacción para la hidrolisis del clorpirifós.	34
Imagen 4. Ubicación geográfica del laboratorio de agroquímicas de la universidad de Cartagena	39
Imagen 5. Cromatograma agua residual	41
Imagen 6. Agua contaminada con clorpirifós	42
Imagen 7. Lorsban 4EC	48
Imagen 8. Reactor foto-catalítico	48
Imagen 9. Esquema Reactor Foto-Catalítico	49
Imagen 10. Espectrofotómetro Evolution 201 Thermo Scientific.	53
Imagen 11. Curva de calibración.	54
Imagen 12. Montaje extracción liquido-liquido	55
Imagen 13. Adición del reactivo Fenton.	77
Imagen 14. Velocidad de reacción vs Irradiación	90

LISTA DE GRÁFICAS

	pág
Gráfica 1. Disminución de la concentración de Clorpirifós tratamiento Fenton.	64
Gráfica 2. Disminución de la concentración de Clorpirifós tratamiento Foto-Fenton.	65
Gráfica 3. Disminución de la concentración de Clorpirifós tratamiento UV/H ₂ O ₂ .	67
Gráfica 4. Efectos para el porcentaje de degradación de clorpirifós.	74
Gráfica 5. Superficie respuesta.	74
Gráfica 6. Contorno de % degradación Vs Concentración de H ₂ O ₂ y Concentración de FeSO ₄ .	75
Gráfica 7. Disminución de la concentración de clorpirifós Prueba M1	78

LISTA DE DIAGRAMAS

	pág.
Diagrama 1. Procedimiento Pruebas Preliminares Fenton.	57
Diagrama 2. Procedimiento Pruebas Preliminares Foto-Fenton.	60
Diagrama 3. Procedimiento Pruebas Preliminares H ₂ O ₂ -UV.	62

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Diagrama de bloques para tratamiento Foto-Fenton para agua contaminada con clorpirifós.	81
Figura 2. Dibujo esquemático del foto-reactor y sistema de recirculación.	89

LISTA DE ECUACIONES

	pág.
Ecuación 1. Curva de calibración	54
Ecuación 2. Cálculo de Eficiencia	68
Ecuación 3. Porcentaje de degradación de clorpirifós.	73
Ecuación 4. Balance de materia	86
Ecuación 5. Balance de materia reactor por lotes.	86
Ecuación 6. Balance de materia reactor por lotes mezcla homogénea.	86
Ecuación 7. Ley de velocidad de primer orden para clorpirifós.	86
Ecuación 8. Ecuación de diseño.	87
Ecuación 9. Tiempo total de reacción	87
Ecuación 10. Volumen total del reactor	88
Ecuación 11. Relación estándar para reactores	89

LISTA DE SÍMBOLOS Y UNIDADES

DBO	Demanda Biológica de oxígeno
DQO	Demanda química de oxígeno
D_T	Diámetro del reactor
GIA	Grupo de investigaciones Agroquímicas
H	Altura del Reactor
HPLC	Cromatografía líquida de alta presión
PAOs	Procesos avanzados de oxidación
ppm	Partes por millón
PCBs	Policlorobifenilos
ppm	Partes por millón
λ	Longitud de onda
Tr	Tiempo de reacción
UPC	Unidades de platino y cobalto
UV	Ultravioleta
Vrxn	Volumen de reacción
λ	Longitud de onda

RESUMEN

Los procesos de oxidación avanzada hacen parte de los tratamientos de agua residual viables en el país, estos permiten la depuración de estas mediante la generación de radicales hidroxilos.

En el presente trabajo se evaluó la efectividad de los procesos de oxidación avanzada (Fenton, Foto-Fenton y UV/H₂O₂) en la disminución de plaguicidas organofosforados (clorpirifós) en los vertimientos provenientes de los laboratorios del grupo de investigación de agroquímica de la universidad de Cartagena; para esto, se realizaron ensayos preliminares y se determinaron las variables influyentes en los procesos de oxidación. Se aplicó un diseño factorial 2², con el cual se pudo observar el efecto de las variables del proceso (concentración de Fe⁺² y concentración de H₂O₂). La evaluación de la aplicación de los métodos de oxidación avanzada Fenton, Foto-Fenton y UV/H₂O₂ para la degradación de clorpirifós en aguas residuales a nivel laboratorio, se llevó a cabo en medio ácido para la formación del radical HO•, y así degradar el clorpirifós presente en el agua residual. Experimentalmente se determinó que la concentración de 2.5 ppm y 540 ppm de Fe⁺² y H₂O₂ respectivamente fue la más adecuada, llegando a una eficiencia del 96.53 % de disminución del clorpirifós del agua residual con el método Foto-Fenton. Se realizaron las especificaciones técnicas para implementar este proceso a escala piloto. Para la disposición de vertimientos, se tuvo como referencia la resolución 631 de 2015, norma legal que establece los parámetros y valores máximos de clorpirifós permitidos que debe cumplir un vertimiento.

Palabras claves: Fotólisis, Fenton, Peróxido de hidrogeno, sulfato de hierro, Foto-Fenton, Agua residual, Foto reactor, Procesos de Oxidación Avanzada.

INTRODUCCIÓN

El tratamiento de aguas residuales industriales es de vital importancia para disminuir impactos ambientales, restar problemáticas que puedan afectar la salud pública y en muchos casos estar dentro de la normatividad vigente, evitando así sanciones futuras. La contaminación por plaguicidas organofosforados es cada vez más grave por la cantidad, diversidad y uso de compuestos más agresivos y tóxicos, además de su gran utilidad en la industria para el control de insectos y plagas, que tienden a acumularse o dispersarse en los distintos medios del ecosistema. En países de economías emergentes como los de América Latina, no se han establecido los métodos de oxidación avanzada como una alternativa viable para el tratamiento de aguas residuales¹ por lo que se pretende cambiar esta situación difundiendo la aplicación de estas tecnologías de manera que puedan aplicarse a la remediación de aguas residuales.

Los procesos de oxidación avanzada son una alternativa factible para el tratamiento de aguas residuales², algunas de estas presentan contenidos tóxicos y componentes no biodegradables como pesticidas, formaldehído; además de ser útil para aguas residuales de la industria textil. En algunos casos favorables, estos procesos pueden oxidar contaminantes orgánicos formando CO₂, agua, sales inorgánicas y oxígeno³. Estos procesos se basan en la generación de radicales hidroxilos (OH), una especie muy reactiva en solución acuosa la cual puede reaccionar con diferentes sustancias orgánicas de baja selectividad⁴.

Partiendo de una problemática real que se presenta en la ciudad de Cartagena y teniendo en cuenta el contenido de clorpirifós presentes en los vertimientos que se generan en el laboratorio, el grupo de Investigación de Agroquímica de la Universidad de Cartagena vio la necesidad de evaluar un tratamiento efectivo para estas aguas residuales y se decide desarrollar una investigación mediante procesos de Oxidación Avanzada con reactivo Fenton, peróxido de hidrógeno y luz ultravioleta, que reduzcan el nivel del contaminante para su correcta disposición.

Con dicho fin se describieron generalidades junto con teoría relacionada con los procesos avanzados de oxidación inicialmente se desarrolló la caracterización a los vertimientos generados por el laboratorio. Posteriormente se desarrolló la metodología utilizada para la experimentación, y finalmente se analizaron los resultados obtenidos al implementar los procesos de oxidación a escala piloto avanzada.

¹ DOMÉNECH, Xavier, JARDIM, Wilson F. y LITTER, Marta I. Procesos avanzados de oxidación para la eliminación de contaminantes. Madrid. 2004. Pg. 2.

² GARCIA GOMEZ, C; GORTARES-MONOYOQUI, P y DROGUI, P. Contaminantes emergentes: efectos y tratamientos de remoción. En: Revista química viva. No 2 (agosto 2011); Pg. 96-104.

³ AINHOA, Clemente; CHICA, Edwin y PEÑUELA, Gustavo. Aplicación del proceso Fenton en el tratamiento de aguas residuales de origen petroquímico. En: Ingeniería y competitividad. Vol., 16. No 2 (junio de 2014); Pg. 211-223.

⁴ DOMÉNECH, Xavier, JARDIM, Wilson F. y LITTER, Marta I. Op. cit., Pg. 17.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Evaluar los procesos de oxidación avanzada: Fenton, UV / H₂O₂ y Foto-Fenton para la degradación de clorpirifós en aguas residuales a nivel laboratorio.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Diagnosticar el estado actual del agua proveniente de desechos generados por el laboratorio de investigaciones Agroquímicas de la Universidad de Cartagena.
- Determinar la eficiencia de los métodos de oxidación: Fenton, UV / H₂O₂ y Foto-Fenton con respecto a la disminución de la concentración de clorpirifós en aguas residuales.
- Determinar requerimientos técnicos para la implementación del proceso de oxidación avanzada más eficiente a escala piloto.

1. GENERALIDADES

La importancia con respecto al aspecto ambiental ha generado cambios en la industria relación con el buen uso del agua por lo que la normatividad cada día es más estricta, debido a que el agua es un recurso natural no renovable y de vital importancia. Esto ha generado investigaciones y búsquedas de nuevas tecnologías para el tratamiento del agua residual.

Debido a que la finalidad de este proyecto es evaluar los métodos de oxidación avanzada Fenton, Foto-Fenton y UV/ H₂O₂ para la degradación de clorpirifós presentes en el agua residual del laboratorio del (GIA) de la Universidad de Cartagena, con el fin de conocer cuál de los tres métodos es más efectivo para este entorno específico, es necesario dar claridad a algunos conceptos que servirán de apoyo y brindarán mayor entendimiento del tema a tratar en el proyecto.

El grupo de investigaciones Agroquímicas (GIA) hace parte de la facultad de ciencias exactas y naturales de la Universidad de Cartagena, en este grupo se “realizan investigaciones agroquímicas aplicadas a fertilizantes, pesticidas y suelos con el fin de reducir la contaminación ambiental producida por los agroquímicos”⁵.

Adicionalmente el GIA cuenta con servicios de “extracción y análisis de pesticidas organoclorados y organofosforados en muestras medioambientales”⁶, lo cual es de apoyo para el desarrollo de este proyecto ya que el contaminante a tratar es un compuesto organofosforado.

1.1 COMPUESTOS ORGANOFOSFORADOS

Son un grupo de sustancias orgánicas derivadas de la estructura química del fósforo los cuales se utilizan principalmente en la agricultura para controlar las plagas de insectos presentes en cultivos. Estos compuestos son liposolubles y volátiles por lo cual facilita su absorción; dentro de este grupo de compuestos organofosforados los más usados son los grupos fosfatos, los fosfanatos y sus derivados. En Colombia los organofosforados están clasificados como uno de los plaguicidas más tóxicos.⁷

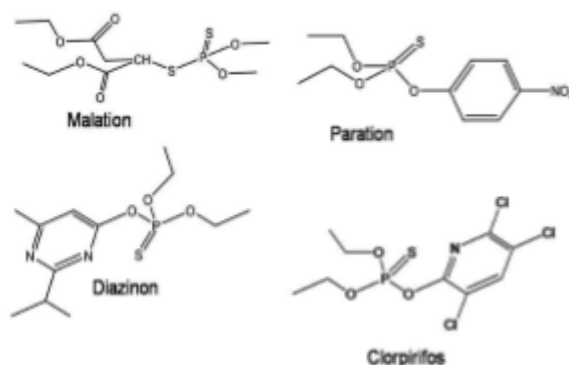
La estructura química de los organofosforados se basa en ésteres del ácido fosfórico y derivados los cuales son fácilmente hidrolizables. La imagen 1 muestra la estructura química de los organofosforados más utilizados como lo son los clorpirifós, el diazinon, matalion y paration.

⁵ UNIVERSIDAD DE CARTAGENA. Investigaciones Agroquímicas. [En línea]. [16 julio de 2018]. Disponible en: <http://investigaciones.unicartagena.edu.co/index.php/grupos-de-facultades/ciencias-exactas-y-naturales/investigaciones-agroquimicas/presentacion-gia>

⁶ COLCIENCIAS. Grupo de investigaciones agroquímicas. [En línea]. [16 julio de 2018]. Disponible en: <http://scienti.colciencias.gov.co:8085/gruplac/jsp/visualiza/visualizagr.jsp?nro=0000000004204>

⁷ FERNÁNDEZ, Daniel; MANCIPE, Liliana y FERNÁNDEZ, Diana. Intoxicación por Organofosforados. En: Rev.fac.Medic. Vol. 18. No. 1 (junio de 2010); Pg.84-92.

Imagen 1. Estructura química de compuestos organofosforados.



Fuente: Molina Pérez, Francisco José; Narváez Valderrama, John Fredy y Palacio Baena, Jaime Alberto. Persistencia de plaguicidas en el ambiente y su ecotoxicidad. 2 de noviembre del 2012. Disponible en: <http://www.bdigital.unal.edu.co/35839/1/36278-151112-1-PB.pdf>

Como los compuestos Organofosforados son tóxicos estos generan efectos adversos para la salud tanto del ser humano como de los animales que entren en contacto, su mecanismo de acción es ingresar al organismo ya sea por vía respiratoria, digestiva o cutánea actuando sobre el sistema nervioso central bloqueando a su vez la acción de la acetilcolinesterasa la cual es una enzima que interviene en la transmisión de impulsos nerviosos. Además, la severidad de la inhibición de esta enzima depende de factores como la toxicidad del pesticida, la cantidad involucrada, así como la frecuencia y el tiempo de exposición.⁸

Debido a que estos compuestos organofosforados son ampliamente producidos y usados además de la gran dificultad de degradar las moléculas de estos pesticidas en medio acuoso, se han empleado estudios en los cuales se destacan los procesos avanzados de oxidación (PAOs), (procesos Fenton, Foto-Fenton, procesos catalíticos y fotocatalíticos) en los cuales se emplean moléculas oxidantes como O_3 o H_2O_2 ⁹. Los Procesos de oxidación avanzada se caracterizan por la generación in situ de radical hidroxilo ($\bullet OH$) y perhidroxilo ($HO_2\bullet$), que atacan las moléculas orgánicas para oxidarlas a CO_2 y H_2O .¹⁰

Un estudio realizado a las aguas residuales procedentes de la producción de pesticidas organofosforados de una industria de Polonia mostro la eficacia de los procesos de oxidación avanzada, específicamente el Proceso Fenton con el cual se

⁸ ERASO GUERRERO, Edwin Giovanni y QUENGUAN CUARAN, Franklin. Determinación de plaguicidas organofosforados y carbamatos en agua para el consumo humano del departamento de Nariño mediante cromatografía líquida de alta eficiencia. San Juan de Pasto. 2015. Trabajo de grado (Químico). Universidad de Nariño. Facultad de ciencias exactas y naturales. Departamento de química.

⁹ M. I. Badawy, M. Y. Ghaly, and T. A. Gad-Allah. Advanced oxidation processes for the removal of organophosphorus pesticides from wastewater, *Desalination*. Vol. 194. No. 1–3(2006); Pg. 166–175.

¹⁰ CARRIAZO, Jose; SAAVEDRA, Martha y VELA, Cindy. Catalizadores homogéneos y Heterogéneos de Fe^{3+} , Co^{2+} y Cu^{2+} para la degradación de metalparation en medio acuoso diluido. En: *Tecnología*. Vol.19. No. 37 (julio-diciembre 2016); Pg.13-28.

obtuvo una degradación del 97-100% de estos compuestos organofosforados utilizando una dosis de 2,5 g/L de H₂O₂. También se realizaron estudios al agua residual procedente de la fabricación de resinas fenólicas utilizando el método de Foto-Fenton dando como resultado una degradación del 97% dejando en evidencia que los procesos de oxidación avanzada son eficientes para la degradación de compuestos orgánicos presentes en aguas residuales.¹¹

1.2 AGUA RESIDUAL

Las aguas residuales pueden definirse como aquel tipo de agua que contiene material disuelto y en suspensión como residuos orgánicos, biológicos e inorgánicos y generalmente estas aguas son líquidas turbias, es decir, sus características originales son modificadas luego de ser usadas por una comunidad o industria; esta es recogida por la red de alcantarillado debido a su calidad con el fin de enviarla hacia otro lugar en el cual se debe hacer un tratamiento antes de ser reutilizada o vertida a un cuerpo natural de agua.¹²

Según su origen, las aguas residuales son el resultado de la combinación de líquidos y residuos sólidos provenientes de agua domésticas, edificios comerciales e instituciones, junto con los residuos de las industrias y de actividades agrícolas, así como de las aguas subterráneas, superficiales o de precipitación que también pueden agregarse eventualmente al agua residual¹³.

Pueden ser clasificadas como: domésticas, industriales, infiltración, caudales adicionales y pluviales¹⁴.

Domésticas: Son aquellas aguas utilizadas con fines higiénicos, estas son procedentes de zonas de vivienda las cuales básicamente en residuos humanos (materia orgánica, sales, organismos patógenos) y actividades domésticas (detergentes, jabones, shampoo, grasa)¹⁵ estas llegan al alcantarillado por medio

¹¹ BAUTISTA CARMONA, Patricia. Tratamiento de aguas residuales de la industria cosmética mediante el proceso Fenton y con el sistema Fe/Al₂O₃/ H₂O₂. Madrid. 2008. Tesis Doctoral (Doctor en ciencias químicas). Universidad Autónoma de Madrid. Facultad de ciencias. Departamento de Ingeniería química.

¹² MINDESARROLLO. Reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico RAS-2000. Tratamiento de aguas. [En línea]. [16 julio de 2018]. Disponible en: <http://minvivienda.gov.co/Documents>

¹³ VASQUEZ NUÑEZ, Geinny del Carmen. Panorama del tratamiento de aguas residuales con tecnología anaerobia en la costa atlántica colombiana. Bogotá. 2013. Universidad Nacional de Colombia. [En línea]. [16 julio de 2018]. Disponible en: <http://bdigital.unal.edu.co/49437/1/panorama%20del%20tratamiento%20de%20aguas%20residuales%20con%20tecnologia%20anaerobia%20en%20la%20costa%20atlantica%20colombiana.pdf>

¹⁴ MENDONÇA, Sergio Rolim. Sistemas de lagunas de estabilización. Cómo utilizar aguas residuales tratadas en sistemas de regadío. Bogotá: Editorial McGraw-Hill. 2000. Pg. 1-2.

¹⁵ ALIANZA POR EL AGUA. Manual de depuración de aguas residuales urbanas. [Archivo PDF]. [16 julio de 2018]. Disponible en: <http://www.alianzaporelagua.org/saneamiento/publicaciones/11-monografico-3-manual-de-depuracion-de-aguas>.

de las tuberías de casas, edificaciones, establecimientos comerciales y públicos, etc.

Industriales: son aquellas aguas utilizadas para las actividades industriales, estas poseen unas composiciones muy variadas dependiendo del tipo de industria y el proceso en el cual se utilicen, debido a que aportan al trabajo de la industria este tipo de aguas se generan en grandes volúmenes.¹⁶

Infiltración y caudales adicionales: Este tipo de agua es llamada de infiltración debido a que penetra en los sistemas de alcantarillado por filtración desde el suelo en donde estén ubicadas, así como a través de paredes, tuberías defectuosas, estructuras de los pozos de registro, entre otros. Aquí también se incluye el agua procedente de diversos orígenes como canales, colectores de agua lluvia, desagües y drenajes.¹⁷ La composición de estas aguas depende de las condiciones climáticas y el tipo de suelo.

Pluviales: Son las denominadas agua lluvia la cual descarga grandes cantidades de agua sobre el suelo. Parte de estas aguas es drenada otro escurre por la superficie, arrastrando arena, tierra, hojas y otros residuos que pueden estar sobre el suelo y otra parte de este tipo de agua es absorbida por la vegetación. Su composición cambia también con la duración de las lluvias.¹⁸

Los principales contaminantes en la clasificación de aguas residuales y sus efectos se presentan en el cuadro 1.

Cuadro 1. Principales contaminantes en la clasificación de aguas residuales.

contaminante	Parámetro de caracterización	Tipo de efluente	Consecuencias
Sólidos Suspendidos	Sólidos suspendidos totales	*Domésticos *Industriales	* Problemas estéticos * Depósitos de lodo * Adsorción de contaminantes * Protección de patógenos
Sólidos Flotantes	Aceites y grasas	*Domésticos *Industriales	* Problemas estéticos
Patógenos	Coliformes	*Doméstico	* Enfermedades transmitidas por agua

¹⁶ FERNANDEZ, Antonio; GARCIA, Pedro; GARCIA, Roberto; SAENZ, Juana; VALDIÑO, Miriam; VILLAR, Susana. Tratamientos avanzados de aguas residuales industriales. [Archivo PDF]. [16 julio de 2018]. Pg.10-11.

¹⁷ ORELLANA, Jorge. Ingeniería sanitaria. Conducción de líquidos residuales.2005. [En línea]. [17 de julio 2018]. Disponible en:
https://www.frro.utn.edu.ar/repositorio/catedras/civil/ing_sanitaria/Ingenieria_Sanitaria_A4_Capitulo_09_Conduccion_de_Liquidos_Residuales.pdf

¹⁸ VILLALOBOS SALGADO, Yudis. Estudio del impacto ambiental de efluentes líquidos en las embarcaciones marítimas tipo fragata de la armada nacional. Cartagena de indias. 2011. Trabajo de grado (ingeniero mecánico). Universidad tecnológica de bolívar. Facultad de ingeniería mecánica y mecatrónica. Pg.16

Cuadro 1. (continuación)

Contaminante	Parámetro de caracterización	Tipo de efluente	Consecuencias
Nutrientes	* Nitrógeno * Fósforo	* Domésticos * Industriales	* Crecimiento excesivo de algas (eutrofización de cuerpo receptor) * Toxicidad para los peces (amonio) * Enfermedades en recién nacidos (nitritos) * Contaminación del agua subterránea
Compuestos no biodegradables	* Pesticidas * Detergentes * Otros	* Industriales * Agrícolas	* Toxicidad (varios) * Espumas (detergentes) * Reducción de la transferencia de oxígeno (detergentes) * No biodegradabilidad * Malos olores (Ej.: fenoles)
Metales Pesados	*Elementos específicos (As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Zn, entre otros)	* Industriales	* Toxicidad * Inhibición del tratamiento biológico de las aguas residuales * Problemas con la disposición de lodo en la agricultura * Contaminación del agua subterránea
Materia Orgánica Biodegradable	* DBO	* Domésticos * Industriales	* Consumo de oxígeno * Mortalidad de peces * Condiciones sépticas

Fuente: BARBA, Luz Edith. Conceptos básicos de la contaminación del agua y parámetros de medición. Santiago de Cali, 2002, 51p. Universidad del Valle. Disponible en: <http://www.bvsde.paho.org/bvsaar/e/fulltext/gestion/conceptos.pdf>

Con base en la información del cuadro anterior, se establece que el agua residual empleada para el desarrollo de este proyecto entra en la clasificación de compuesto orgánico no biodegradable, indicando así que es de tipo industrial.

1.3 TRATAMIENTO DE AGUAS

Las industrias en el desarrollo de sus actividades diarias pueden producir grandes cantidades de agua de vertimientos la cual debe necesariamente retornar al ecosistema para evitar impactos ambientales negativos, las características de estas aguas de vertimiento se deben considerar a la hora de planificar los tratamientos debido a la diversidad de sustancias contaminantes.

Estas características tienen:

- **Compuestos inorgánicos:** tienen como fuente el agua blanda (concentraciones inferiores de compuestos inorgánicos) y agua dura (o aguas saladas). En

muchos casos los procesos industriales agregan compuestos inorgánicos a las aguas de vertimiento para el tratamiento. La biodegradación de los compuestos orgánicos requiere cantidades adecuadas de fósforo, hierro, nitrógeno y sales acumuladas.

- **Compuestos orgánicos:** incluyen proteínas, hidratos de carbono, grasas y aceites, productos petroquímicos, sólidos y líquidos. Estos son los responsables en mayoría de los problemas de contaminación, causan un efecto negativo o positivo, dependiendo de su facilidad para degradarse sobre el medio ambiente.
- **pH y alcalinidad:** las aguas de desperdicio deben tener valores de pH que varían entre 6 y 9 para que el impacto sea mínimo en el medio ambiente. Inferiores a 6 son corrosivas, por otra parte, un pH superior a 9 tenderán a causar incrustaciones debido a la precipitación de iones metálicos. La alcalinidad es importante para mantener estos valores de pH en los valores adecuados.
- **Oxígeno disuelto:** es un factor ambiental crítico ya que la vida acuática requiere niveles adecuados de oxígeno, además de afectar indicadores, no solo bioquímicos, también físicos como el olor, claridad del agua, y sabor.
- **Temperatura:** las aguas en procesos industriales tienden a presentar una mayor temperatura que los cuerpos de agua, esto genera contaminación térmica si los vertimientos de agua superan los 37°C variando así la temperatura de los ecosistemas, lo cual es nocivo para algunos microorganismos.¹⁹

1.3.1 Clasificación de tratamientos de agua residual

Tratamiento preliminar: su función es acondicionar el agua de vertimiento para las etapas siguientes de tratamiento. Los principales métodos de pretratamientos son: Desarenador, Eliminación de grasas y aceites, Eliminación de sustancias tóxicas, Igualación, neutralización y la Trampa de grasas, este tratamiento es físico y es necesario para eliminar el contenido de sólidos gruesos y pesados, así como material flotante como (papel, madera, plástico, arena, piedras, grasas, aceites entre otros) con el fin de que estos sólidos suspendidos no presenten interferencia en las etapas posteriores del proceso.²⁰

Tratamiento primario: Este tipo de tratamiento se realiza con el fin de remover un porcentaje importante de sólidos en suspensión lo cual facilita el tratamiento de compuestos orgánicos disueltos, algunos procesos fisicoquímicos utilizados en el proceso son: sedimentación, flotación, filtración, extracción, coagulación-

¹⁹ PERRY H, Robert. Manual del Ingeniero Químico, Cuarta edición. México: McGraw-Hill. Cap.25-74.

²⁰ CASERO RODRIGUEZ, David. Gestión de aguas residuales y reutilización. Escuela de organización industrial. 2015-2016. [Archivo PDF]. [16 julio de 2018]. Pg. 52.

floculación, precipitación química, oxido-reducción. Estos procesos fisicoquímicos se aplican para reducir el contenido de fósforo y para evitar sobrecargas en el tratamiento biológico.²¹

Tratamiento secundario: Consiste en la remoción de DBO soluble y sólidos suspendidos por medio de procesos biológicos como lodos activos, filtros bacterianos, lagunas aireadas, degradación anaerobia y biodiscos. Debido a la normatividad se debe tener en cuenta la caracterización de la fuente receptora de acuerdo a la concentración y características del sistema de tratamiento.

Tratamiento terciario: En este tratamiento se eliminan elementos como N, P, K, Ca entre otros con el fin de hacer más eficiente el tratamiento secundario y el proceso de descontaminación²². Este tratamiento se fundamenta en la realización de una reacción química entre un reactivo y algún compuesto determinado que está presente en el agua residual, esta aplicación es muy específica y concreta a casos determinados pues el proceso es muy selectivo para cada compuesto a eliminar.²³ Con este tratamiento se genera un rendimiento medio de depuración de sólidos en suspensión del (90-95 %) y de remoción de DBO del (95-98 %).²⁴ Siendo este el tipo de tratamiento que se va a utilizar para el desarrollo del proyecto.

1.3.2 Procesos de Oxidación avanzada (POAs). En muchos casos los tratamientos convencionales no son suficientes para la remoción de contaminantes, como lo son los contaminantes emergentes los cuales provienen de productos farmacéuticos, aditivos industriales, plastificantes y plaguicidas los cuales se encuentran en bajas concentraciones (partes por billón) incumpliendo con los parámetros legales establecidos²⁵. Por lo que en la última década se han venido desarrollando nuevas tecnologías de oxidación avanzada como ozonización, ozono/peróxido de hidrógeno, procesos Fenton, ultravioleta/peróxido de hidrógeno, oxidación electroquímica, plasma no térmico, ultrasonido, fotólisis ultravioleta de vacío, Fotólisis/ Fenton y foto catálisis heterogénea²⁶ para la descontaminación de agua de diversos orígenes. La oxidación avanzada corresponde a un tipo de tratamiento terciario ya que involucra una reacción química entre un reactivo y algún

²¹ CARDENAS CASTAÑEDA, Diana Constanza. Optimización de la planta de tratamiento de aguas residuales industriales para su reuso en el proceso productivo de una industria de jabones. Bogotá D.C. 2008. Trabajo de grado (ingeniero ambiental y sanitario). Universidad de la Salle. Facultad de ingeniería ambiental y sanitaria. Pg.30.

²² PERRY H, Robert. Op.cit., Cap.25-74.

²³ CASERO RODRIGUEZ. Op.cit., Pg. 55-56.

²⁴ ALIANZA POR EL AGUA. Manual de depuración de aguas residuales urbanas. [Archivo PDF]. [16 julio de 2018]. Disponible en: <http://www.alianzaporelagua.org/saneamiento/publicaciones/11-monografico-3-manual-de-depuracion-de-aguas>. Pg.39.

²⁵ GARCIA GOMEZ, C; GORTARES-MONOYOQUI, P y DROGUI, P. Contaminantes emergentes: efectos y tratamientos de remoción. En: Revista química viva. No 2(agosto 2011); Pg. 96-104.

²⁶ FORERO, Jorge Enrique; ORTIZ, Olga y RIOS, Fabián. Aplicación del proceso de oxidación avanzada como tratamiento de fenol en aguas residuales industriales de refinería. En: Ciencia, tecnología y futuro. Vol.,3. No 1(diciembre 2005); Pg.97-19

compuesto presente en el agua residual además que se generan remociones de DBO del (95-98) %²⁷

Los procesos de oxidación avanzada ocasionan cambios profundos en la estructura química de los contaminantes²⁸. Los POAs son procesos que involucran la generación y uso de especies químicas transitorias poderosas. Principalmente el radical hidroxilo (OH⁻). Este radical puede ser generado por medios fotoquímicos (luz solar) o por otras formas de energía, posee alta efectividad para la oxidación de materia orgánica. Algunos TAOs (Tecnologías avanzadas de oxidación), como la fotocatalisis heterogénea, la radiólisis y otras técnicas avanzadas como la ultravioleta/ peróxido de hidrogeno (UV/H₂O₂), Fenton y Foto-Fenton, así como la combinación de ozono/ peróxido de hidrogeno²⁹, recurren además a reductores químicos que permiten realizar transformaciones en contaminantes tóxicos poco susceptibles a la oxidación, como iones metálicos o compuestos halogenados.³⁰

Tabla 1. Tecnologías avanzadas de oxidación.

Procesos no fotoquímicos	Procesos fotoquímicos
Ozonización en medio alcalino (O ₃ /OH ⁻)	Oxidación en agua sub/ y supercrítica
Ozonización con Peróxido de hidrogeno (O ₃ /H ₂ O ₂)	Procesos fotoquímicos
Procesos Fenton (Fe ⁺² /H ₂ O ₂) y relacionados	Fotólisis del agua en el ultravioleta de vacío (UVV)
Oxidación electroquímica	UV/peróxido de hidrogeno
Radiólisis y y tratamiento con haces de electrones	Foto-Fenton y relacionadas
Plasma no térmico	Fotocatalisis heterogénea
Descarga electrohidráulica-Ultrasonido.	

Fuente: DOMÉNECH, Xavier, JARDIM, Wilson F. y LITTER, Marta I. Procesos avanzados de oxidación para la eliminación de contaminantes.

²⁷ ALIANZA POR EL AGUA. Op.cit., Pg.39.

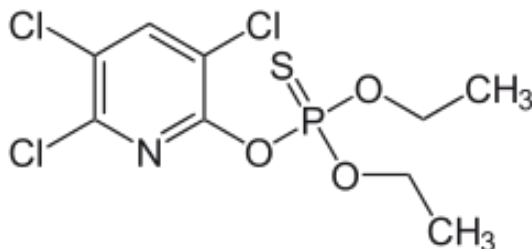
²⁸ GARCIA HERRERA, Juan Camilo. Procesos Fenton y Foto-Fenton para el tratamiento de aguas residuales de laboratorio microbiológico empleando Fe₂O₃ soportado en nanotubos de carbono. Bogotá D.C.2014. Trabajo de grado (Microbiólogo Industrial). Pontificia Universidad Javeriana. Facultad de ciencias. Departamento de microbiología.

²⁹ AINHOA, Clemente; CHICA, Edwin y PEÑUELA, Gustavo. Aplicación del proceso Fenton en el tratamiento de aguas residuales de origen petroquímico. En: Ingeniería y competitividad.Vol.,16. No 2 (junio de 2014); Pg.211-223.

³⁰ MORENO LOPEZ, Anabel. Aplicación de radiocatalisis en degradación de muestras orgánicas complejas. San Felipe del Progreso-México. 2014. Trabajo de grado (Ingeniero químico). Tecnológico de estudios superiores de san Felipe del progreso. Facultad de ingeniería química.

Estas tecnologías pueden ser usadas como pre-tratamiento (para contaminantes resistentes a la biodegradación) ³¹o como un tratamiento terciario (el cual involucra una reacción química y sirve para extraer contaminantes con bajas concentraciones como ppm) y son muy efectivas en la aplicación a compuestos orgánicos como el clorpirifós (C₉H₁₁Cl₃NO₃PS) gracias a su alto potencial de oxidación.³²

Imagen 2. Estructura química clorpirifós

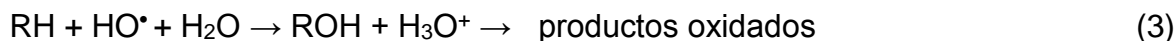


Fuente: INSTITUTO NACIONAL DE ECOLOGÍA Y CAMBIO CLIMÁTICO. Plaguicida Clorpirifós. Disponible en: http://www2.inecc.gob.mx/sistemas/plaguicidas/pdf/clorpirifos_etil.pdf

1.3.2.1 Reactivo Fenton. Los ensayos de Fenton de fines del siglo XIX demostraron que las soluciones de peróxido de hidrógeno y sales ferrosas (Fe⁺², Fe⁺³) eran capaces de oxidar los ácidos tartárico y málico, y otros compuestos orgánicos. El proceso Fenton consiste en adicionar sales de hierro en presencia de H₂O₂ en un medio ácido con el fin de obtener la formación de radicales HO• (ecuación 1), la combinación de las sales de hierro y el peróxido de hidrógeno se denomina reactivo de Fenton³³ (reacción 1 y 2).



En la reacción 1 se generan radicales HO• y en la reacción 2 se generan radicales perhidroxido (HO₂•) los cuales atacan los compuestos orgánicos y de esta forma promueven su oxidación (reacción 3), sin embargo, el radical HO₂• es menos reactivo.



³¹ LITTER, Marta Irene. Tecnologías avanzadas de oxidación: Tecnologías solares. [En línea]. [16 julio de 2018]. Disponible en: https://www.psa.es>05_Capitulo_05

³² ECHA (European Chemical Agency), <https://echa.europa.eu/substance-information/-/substanceinfo/100.018.969>.

³³ AINHOA, Clemente; CHICA, Edwin y PEÑUELA, Gustavo. Aplicación del proceso Fenton en el tratamiento de aguas residuales de origen petroquímico. En: Ingeniería y competitividad. Vol., 16. No 2 (junio de 2014); Pg.211-223.

La reacción 4 es una reacción alterna que se puede producir cuando el radical hidroxilo reacciona con un ion ferroso, además el Fe (II) se oxida a Fe (III) (reacción 1), generando radicales hidroxilos en segundos.³⁴

A pH < 3, la reacción 5 es autocatalítica, ya que el Fe (III) descompone H₂O₂ en O₂ y H₂O a través del mecanismo en cadena que se presenta a continuación (reacciones 5,6,7,8,9,10):



El proceso es potencialmente útil para destruir contaminantes, ya que es muy efectivo para la generación de HO[•], pero un exceso de iones Fe²⁺, puede atraparlos (reacción 2), al igual que los halógenos, el mismo H₂O₂ o el radical perhidroxilo.³⁵



Las reacciones 11 y 12 muestran que se puede producir la recombinación de radicales HO[•] o la reacción de este con el radical HO₂[•] lo cual genera una reducción en el rendimiento del proceso.³⁶

El proceso Fenton ha resultado efectivo para degradar compuestos alifáticos y aromáticos clorados, PCBs, nitroaromáticos, colorantes azo, clorobenceno, PCP, fenoles, fenoles clorados, octacloro-p-dioxina y formaldehído³⁷, así como su

³⁴ RAMIREZ MOREÑA, Alejandro. Degradación de resorcinol por Foto-Fenton (UV/Fe²⁺/H₂O₂). Pereira. 2010. Trabajo de grado (tecnólogo químico). Universidad tecnológica de Pereira. Facultad de tecnologías. Departamento de tecnología química.

³⁵DOMÉNECH, Xavier, JARDIM, Wilson F. y LITTER, Marta I. Procesos avanzados de oxidación para la eliminación de contaminantes. Pg. 7

³⁶ AINHOA, Clemente; CHICA, Edwin y PEÑUELA, Gustavo. Aplicación del proceso Fenton en el tratamiento de aguas residuales de origen petroquímico. En: Ingeniería y competitividad. Vol., 16. No 2 (junio de 2014); Pg.211-223.

³⁷ BONDIA, José. Eliminación de contaminantes emergentes mediante humedales artificiales como sistema alternativo o complementario a un tratamiento de aguas convencional. Valencia. Tesis

efectividad en la descontaminación de aguas residuales procedentes de la industria petroquímica, textil, farmacéutica, papelera, entre otros³⁸. Son muy 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.³⁹. Este proceso se ha aplicado exitosamente en la reducción de DQO de aguas municipales y subterráneas y en el tratamiento de lixiviados. Es útil como pretratamiento de compuestos no biodegradables.⁴⁰

Las ventajas del método son varias: el Fe (II) es abundante y no es tóxico, el peróxido de hidrógeno es fácil de manejar. No se forman compuestos clorados como en otras técnicas oxidantes, y no existen limitaciones de transferencia de masa por tratarse de un sistema homogéneo. Una desventaja de este proceso es que requiere la adición continua y estequiometría de Fe (II) y H₂O₂, es decir, necesita una alta concentración de Fe.⁴¹

1.3.2.2 UV/H₂O₂. La radiación UV combinada con peróxido de hidrogeno (UV/H₂O₂) es uno de los procesos de oxidación avanzada más apropiada para la remoción de compuestos orgánicos tóxicos presentes en las aguas residuales⁴². Este proceso combinado tiene la característica de acelerar la formación de radicales HO• los cuales son capaces de transformar los compuestos orgánicos presentes en el agua residual en productos más biodegradables.

El mecanismo de reacción de este tipo de oxidación avanzada ocurre por la acción de la radiación emitida por lámparas UV, ya que la luz ultravioleta interacciona con las moléculas presentes en el medio líquido provocando así la ruptura de los enlaces químicos, estas lámparas UV tienen longitudes de onda menores a 400nm las cuales son capaces de fotolizar las moléculas de H₂O₂.

El rompimiento o disociación de la molécula de H₂O₂ por fotones con energía genera un rendimiento el cual produce casi cuantitativamente dos HO• por cada molécula de H₂O₂.⁴³

Master (Ingeniería hidráulica y medio ambiente). UNIVERSIDAD POLITECNICO DE VALENCIA. Facultad de ingeniería hidráulica y medio ambiente

³⁸ AINHOA, Clemente; CHICA, Edwin y PEÑUELA, Gustavo. Op.cit., Pg.211-223

³⁹MARTINEZ, A.G; RODRÍGUEZ-BERNAL, O.F; CHIQUITO-COYOTL, O; ESCAROLA ROSAS, M; HERNÁNDEZ LARA, J.M; HERNÁNDEZ, Elvira; MÉNDEZ, G.A; MAGAÑA, J.C; MARTÍNEZ-CASTILLO, J. Alternativas actuales de manejo de lixiviados. En: Avances en química. Vol. 9 No 1 (abril de 2014); Pg. 37-47.

⁴⁰A. Safarzadeh-Amiri, J.R. Bolton y S.R. Cater, J. Adv. Oxid. Technol., 1, 18-26 (1996).

⁴¹ LITTER, Marta Irene. Tecnologías avanzadas de oxidación: Tecnologías solares. [En línea]. [16 julio de 2018]. Disponible en: https://www.psa.es>05_Capitulo_05

⁴² LOPEZ, Cristina. Procesos físico-químicos de oxidaciones avanzadas (H₂O₂/UV; Fe⁺²/H₂O₂/UV; TiO₂/H₂O₂/UV) y la mejora con un sistema de coagulación-floculación previo, en el tratamiento de aguas residuales para la eliminación de colorantes. Granada. 2016. Tesis Doctoral. Universidad de Granada. Facultad de ingenierías. Departamento de ingeniería civil.

⁴³ DOMÉNECH, Xavier, JARDIM, Wilson F. y LITTER, Marta I. Procesos avanzados de oxidación para la eliminación de contaminantes. Pg. 17.

Este Proceso de oxidación avanzada implica la formación de radical hidroxilo generado por el rompimiento de la molécula del H₂O₂ cuando se aplica la radiación UV (fotólisis), como se muestra en la reacción 13.



La fotólisis del H₂O₂ se realiza casi siempre utilizando lámparas de vapor de mercurio de baja o media presión. Generalmente se usan lámparas con emisión máxima 254 nm, ya que la absorción del H₂O₂ alcanza el máximo a los 220 nm.⁴⁴ Además si otro compuesto aparte del H₂O₂ puede absorber los fotones entonces se genera una mejor eficiencia en el proceso.

El uso de la radiación combinada con peróxido de hidrogeno (UV/H₂O₂) ofrece ventajas como costos de operación bajos, fácil manejo, breve lapso de radiación, no existen problemas de transferencia de masa asociados a gases.⁴⁵ Este Proceso de oxidación avanzada se puede utilizar para la degradación de contaminantes como son los tintes, los fenoles y los pesticidas, generando una tasa acelerada de oxidación.⁴⁶

Se debe tener en cuenta que el exceso en la aplicación del peróxido de hidrogeno sumado a altas concentraciones de HO•, originan reacciones competitivas que producen un efecto inhibitorio para la degradación de los compuestos.⁴⁷ (Reacciones 15 y 16)



En las reacciones (14) y (17) se genera un consumo del radical HO•, lo cual produce una disminución en el poder de oxidación del proceso. El peróxido de hidrogeno logra capturar los radicales hidroxilos formando el radical HO₂•, el cual es menos reactivo. Por esto se debe determinar en cada caso la cantidad óptima de H₂O₂ para

⁴⁴ BOTELHO, Diego; CLETO, Eduardo; Rodríguez, Tatiana. Tratamiento de efluentes industriales de naturaleza recalcitrante usando ozono, peróxido de hidrogeno y radiación ultravioleta. En: Rev. Fac. Ing. Univ. Antioquia. No 46 (Diciembre 2008); Pg.24-38.

⁴⁵ LITTER, Marta Irene. Op.cit., Pg. 79.

⁴⁶ LOPEZ, Cristina. Procesos físico-químicos de oxidaciones avanzadas (H₂O₂/UV; Fe⁺²/H₂O₂/UV; TiO₂/H₂O₂/UV) y la mejora con un sistema de coagulación-floculación previo, en el tratamiento de aguas residuales para la eliminación de colorantes. Granada. 2016. Tesis Doctoral. Universidad de Granada. Facultad de ingenierías. Departamento de ingeniería civil. Pg. 25

⁴⁷ N. H. Ince. Critical effect of Hydrogen Peroxide in Photochemical Dye Degradation. En: Water Research. Vol. 33. (1999); Pg. 1080-1084.

que no hallan efectos negativos en la degradación de los contaminantes presentes en el agua.⁴⁸

1.3.2.3 Foto-Fenton. El proceso Foto-Fenton se da en presencia de luz ultravioleta (UV/ H₂O₂/Fe⁺²) lo cual lo diferencia del proceso Fenton además de tener una mayor eficiencia la degradación de contaminantes orgánicos y se describe como “un tratamiento homogéneo fotocatalítico basado en la producción de radicales hidroxilo mediante el reactivo de Fenton (H₂O₂+Fe⁺²)”⁴⁹. Este proceso ha demostrado ser una buena alternativa para degradar gran variedad de contaminantes eficientemente especialmente para aguas residuales compuestos orgánicos como pesticidas, formaldehído además de ser útil para aguas residuales de la industria textil.⁵⁰

El mecanismo de reacción del proceso de Foto-Fenton inicia involucrando el reactivo de Fenton ya que los iones de Fe⁺² se oxidan y forman iones de Fe⁺³ generando a su vez radiales hidroxilo (reacción 18), posteriormente se da la fotólisis de los complejos de Fe⁺³ gracias a la lámpara e luz ultravioleta formando así los iones Fe⁺² fotoreducidos y los radicales HO• (reacción 19) los cuales son altamente reactivos con el fin de iniciar la destrucción oxidativa de compuestos orgánicos presentes en el agua.⁵¹ El Fe⁺² fotoreducido proporciona en presencia de peróxido de hidrogeno (H₂O₂) radicales hidroxilo (HO•) adicionales a través de la ecuación (18) y así continúa el ciclo.⁵²



⁴⁸ BOTELHO, Diego; CLETO, Eduardo; Rodríguez, Tatiana. Tratamiento de efluentes industriales de naturaleza recalcitrante usando ozono, peróxido de hidrogeno y radiación ultravioleta. En: Rev. Fac. Ing. Univ. Antioquia. No 46 (Diciembre 2008); Pg.24-38.

⁴⁹ FERNANDEZ, Antonio; GARCIA, Pedro; GARCIA, Roberto; SAENZ, Juana; VALDIÑO, Miriam; VILLAR, Susana. Tratamientos avanzados de aguas residuales industriales. [Archivo PDF]. [16 julio de 2018]. Pg.10-11.

⁵⁰ RAMIREZ MOREÑA, Alejandro. Degradación de resorcinol por Foto-Fenton (UV/Fe⁺²/H₂O₂). Pereira. 2010. Trabajo de grado (tecnólogo químico). Universidad tecnológica de Pereira. Facultad de tecnologías. Departamento de tecnología química.

⁵¹AUGSTEN, Eva. Effects of the Parameters Temperature, Iron Concentration and Irradiation on the Reaction Rate of the Photo-Fenton Process using Alachlor as a Model Compound. Bingen-Alemania.2004. Tesis (en protección del medio ambiente). Universidad de ciencias aplicadas bingen. Facultad de medio ambiente.

⁵² MARTINEZ, A.G; RODRÍGUEZ-BERNAL, O.F; CHIQUITO-COYOTL, O; ESCAROLA ROSAS, M; HERNÁNDEZ LARA, J.M; HERNÁNDEZ, Elvira; MÉNDEZ, G.A; MAGAÑA, J.C; MARTÍNEZ-CASTILLO, J. Alternativas actuales de manejo de lixiviados. En: Avances en química. Vol. 9 No 1(abril de 2014); Pg. 37-47.

Ya que el proceso de Foto-Fenton involucra la radiación UV se puede generar (usando radiaciones menores de 360nm) que el peróxido de hidrogeno presente en la reacción Fenton también se involucre formando el radical hidroxilo gracias al rompimiento de sus enlaces debido a este tipo de radiación⁵³ (reacción 20).

La velocidad de degradación de proceso Foto-Fenton es mayor que la del proceso Fenton gracias a la radiación con luz ultravioleta en el cual para este proceso se usan longitudes de onda que van de los 300 nm hasta la región visible.⁵⁴

Una de las ventajas de este método, es que la concentración de Fe^{+2} puede ser menor que la empleada en proceso Fenton con lo cual se reducen costos que van asociados al tratamiento del agua residual⁵⁵. Otra ventaja es que el proceso tiene altas velocidades de reacción y puede ser alimentado con luz solar, además que el peróxido de hidrogeno es un oxidante asequible. Entre sus desventajas están que debe adicionarse continuamente H_2O_2 al medio de reacción, así como la necesidad de trabajar con pH inferiores a 3 pues con un pH mayor los iones Fe^{+3} podrían precipitar.⁵⁶ Los usos más frecuentes de esta tecnología han sido en el tratamiento de aguas industriales, suelos y lixiviados. Trata con éxito compuestos nitroaromaticos, fenoles policlorados, herbicidas y plaguicidas.⁵⁷

1.4 MECANISMO DE REACCIÓN PARA LA DESCOMPOSICIÓN DEL CLORPIRIFÓS

El clorpirifós es un plaguicida organofosforado, la estructura química del organofosforado se basa en ésteres de ácidos fosfóricos que son fácilmente hidrolizables, por lo tanto, la aplicación de los métodos de oxidación avanzada permite degradar estos compuestos, los cuales presentan una alta estabilidad química y/o una baja biodegradabilidad⁵⁸.

⁵³ RAMIREZ MOREÑA, Alejandro. Degradación de resorcinol por Foto-Fenton (UV/ Fe^{+2} / H_2O_2). Pereira. 2010. Trabajo de grado (tecnólogo químico). Universidad tecnológica de Pereira. Facultad de tecnologías. Departamento de tecnología química. Pg. 29

⁵⁴ FERNANDEZ, Antonio; GARCIA, Pedro; GARCIA, Roberto; SAENZ, Juana; VALDIÑO, Miriam; VILLAR, Susana. Tratamientos avanzados de aguas residuales industriales. [Archivo PDF]. [16 julio de 2018]. Pg.10-11.

⁵⁵ MARTINEZ, A.G; RODRÍGUEZ-BERNAL, O.F; CHIQUITO-COYOTL, O; ESCAROLA ROSAS, M; HERNÁNDEZ LARA, J.M; HERNÁNDEZ, Elvira; MÉNDEZ, G.A; MAGAÑA, J.C; MARTÍNEZ-CASTILLO, J. Alternativas actuales de manejo de lixiviados. En: Avances en química. Vol. 9 No 1(abril de 2014); Pg. 37-47.

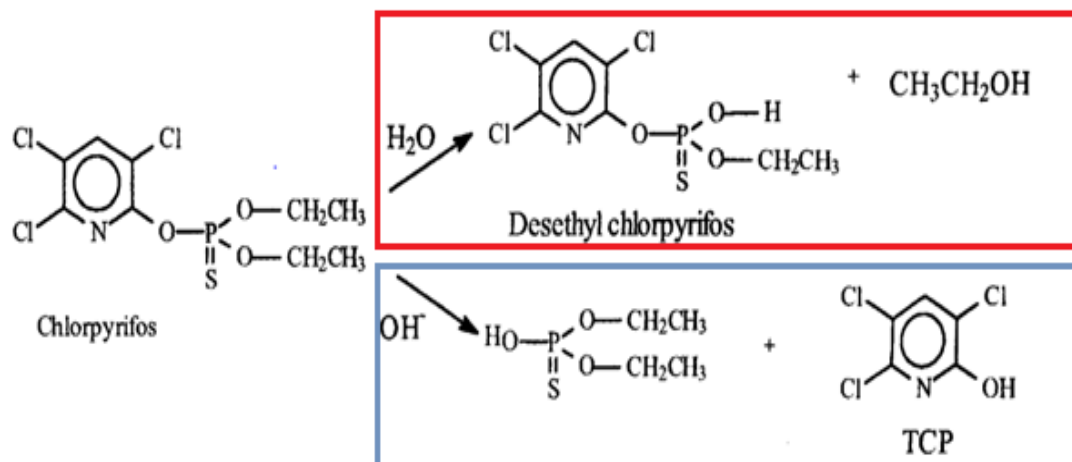
⁵⁶ AUGSTEN, Eva. Effects of the Parameters Temperature, Iron Concentration and Irradiation on the Reaction Rate of the Photo-Fenton Process using Alachlor as a Model Compound. Bingen-Alemania.2004. Tesis (en protección del medio ambiente). Universidad de ciencias aplicadas bingen. Facultad de medio ambiente.

⁵⁷ BAUTISTA CARMONA, Patricia. Tratamiento de aguas residuales de la industria cosmética mediante el proceso Fenton y con el sistema $Fe/Al_2O_3/ H_2O_2$.Madrid. 2008. Tesis Doctoral (Doctor en ciencias químicas). Universidad Autónoma de Madrid. Facultad de ciencias. Departamento de Ingeniería química. Pg. 42.

⁵⁸ WATTS, Meriel. Clorpirifós: Un posible COP a nivel global. [Archivo PDF]. [16 agosto de 2018]. p.12-14. Disponible en: https://rap-al.org/wp-content/uploads/2017/09/Clorpirifos_Rev_-2.pdf

La degradación hidrolítica llega a ser la ruta principal de degradación del clorpirifós en matrices ambientales bajo las siguientes condiciones: temperatura (25 °C) y pH ácido. Los principales metabolitos producto de la degradación por hidrolisis son TPC (3,5,6-tricloro-2-piridinol), desetil clorpirifós, O-etil-O-fosfototiato⁵⁹.

Imagen 3. mecanismo de reacción para la hidrolisis del clorpirifós.



Fuente: LIU, B; MCconnell, L.L y TORRENTS, A. Hydrolysis of chlorpyrifos in natural waters of the chesapeake bay. en: Chemosphere. Vol. 44. (2001);p.1315-1323.

La **imagen 3** muestra los 2 posibles mecanismos de reacción para la hidrolisis del clorpirifós; en el recuadro rojo se observa la hidrolisis neutra de clorpirifós la cual implica el ataque nucleofílico del agua en el carbono menos saturado con la pérdida del grupo alquilo. El recuadro azul muestra la hidrolisis del clorpirifós y otros ésteres, esta inicia mediante el ataque nucleofílico del ion hidroxilo (OH^-) en el átomo de fósforo, lo cual provoca la pérdida del grupo fenólico⁶⁰.

Los metabolitos producidos en la hidrolisis del clorpirifós pueden ser menos tóxicos o mas fotosensibles que los compuestos parentales (Clorpirifós). En algunos casos la hidrolisis de plaguicidas organofosforados conduce a la formación de p-nitrofenoles, los cuales son fácilmente degradados a hidroquinonas, consecuentemente, estos productos de degradación son menos tóxicos para los organismos acuáticos⁶¹.

1.5 MARCO LEGAL

El desarrollo de este proyecto de investigación además de su propósito académico también tiene como fin dar cumplimiento a la normatividad colombiana que regula los vertimientos en cuerpos de agua superficiales. Para la disposición adecuada del

⁵⁹ Ibid., p.13.

⁶⁰ LIU, B; MCCONNELL, L.L y TORRENTS, A. Hydrolysis of chlorpyrifos in natural waters of the chesapeake bay. En: CHEMOSPHERE. Vol. 44. (2001);p.1315-1323.

⁶¹ MOLINA, Francisco; NARVAEZ, Jhon y PALACIO, Jaime. Persistencia de plaguicidas en el ambiente y su ecotoxicidad. En: revista gestión y ambiente. Vol., 15. No 3 (Diciembre 2012); p.27-38.

recurso hídrico el presente proyecto se centrará, principalmente en las siguientes normas vigentes:

Cuadro 2. Normatividad Ambiental Colombiana.

Norma	Año	Contenido	Observaciones
Decreto 2811 ⁶²	1974	Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente	Reglamentado por el Decreto Nacional 1608 de 1978, Reglamentado parcialmente por el Decreto Nacional 1715 de 1978, Reglamentado Parcialmente por el Decreto Nacional 704 de 1986, Reglamentado Parcialmente por el Decreto Nacional 305 de 1988, Reglamentado por el Decreto Nacional 4688 de 2005, Reglamentado por el Decreto Nacional 2372 de 2010.
Ley 9 ⁶³	1979	Medidas sanitarias	Reglamentado Parcialmente por el Decreto Nacional 1594 de 1984
Decreto 1594 ⁶⁴	1984	Usos del agua y residuos líquidos	Derogado por el art. 79, Decreto Nacional 3930 de 2010, salvo los arts. 20 y 21.
Resolución 631 ⁶⁵	2015	Establece los parámetros y los valores límites máximos permitidos que deben cumplirse en vertimientos puntuales	*artículo 7. Fija los parámetros de ingredientes activos de plaguicidas de las categorías toxicológicas Ia, Ib y II.
Decreto 3930 ⁶⁶	2010	Reglamenta los vertimientos de aguas residuales	*artículo 28. Fija los parámetros y límites máximos permisibles de los vertimientos a las aguas superficiales, sistemas de alcantarillado público y suelo.

⁶² COLOMBIA. PRESIDENTE DE LA REPÚBLICA DE COLOMBIA. Decreto 2811. (18, diciembre, 1974). Por el cual se dicta el Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente. Bogotá D.C. 1974.

⁶³ COLOMBIA. CONGRESO DE COLOMBIA. Ley 9. (24, enero, 1979). Por la cual se dictan medidas sanitarias. Bogotá D.C. 1979.

⁶⁴ COLOMBIA. PRESIDENTE DE LA REPÚBLICA DE COLOMBIA. Decreto 1594. (26, junio, 1984). Por el cual se reglamenta parcialmente el título VI - parte III – libro II y el título III de la parte III – libro I – del decreto 2811 de 1974 en cuanto a usos del agua y residuos líquidos. Bogotá D.C. 1984.

⁶⁵ COLOMBIA. CONGRESO DE COLOMBIA. Resolución 631. (2015). Por la cual se Establece los parámetros y los valores límites máximos permitidos que deben cumplirse en vertimientos puntuales. Bogotá D.C 2015.

⁶⁶ COLOMBIA. PRESIDENTE DE LA REPÚBLICA DE COLOMBIA. Decreto 3930. (2010). Por la cual se Reglamenta los vertimientos de aguas residuales. Bogotá D.C 2010.

Cuadro 2. (Continuación)

Ley 99⁶⁷	1993	Creación del ministerio de ambiente.	se reordena el Sector Público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables, se organiza el Sistema Nacional Ambiental, SINA.
Ley 373⁶⁸	1997	Programa para el uso eficiente y ahorro del agua	* Artículo 1ro. Obligatoriedad de implementar un programa para el uso eficiente y el ahorro del agua. * Artículo 5to. Reuso obligatorio del agua.
Resolución 3957⁶⁹	2009	Control y manejo de los vertimientos realizados a la red de alcantarillado público en el Distrito Capital.	* Capítulo VI. Vertimientos No permitidos. * Capítulo VIII. Tratamiento previo de los vertimientos.
Decreto 2945⁷⁰	2010	Se reglamenta el ejercicio de las actividades de monitoreo, seguimiento y control a que se refiere el Decreto 028 de 2008, para el sector de agua potable y saneamiento básico y se dictan otras disposiciones	

Adicionalmente, se tiene presente para el desarrollo de este proyecto los siguientes documentos con relación al muestreo de aguas residuales:

Cuadro 3. Otros documentos para el desarrollo del proyecto.

Documento	Año	Contenido
Guía para el monitoreo de vertimientos. IDEAM.	2007	Guía para el monitoreo de vertimientos, aguas superficiales y subterráneas.
NTC-ISO 5667-10	1995	Gestión Ambiental. Calidad de Agua. Muestreo. Muestreo de Aguas Residuales

⁶⁷ COLOMBIA. CONGRESO DE COLOMBIA. Ley 99. (22, diciembre, 1993). Por la cual se crea el Ministerio del Medio Ambiente, se reordena el Sector Público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables, se organiza el Sistema Nacional Ambiental, SINA, y se dictan otras disposiciones. Bogotá D.C. 1993.

⁶⁸ COLOMBIA. CONGRESO DE COLOMBIA. Ley 373. (6, junio, 1997). Por la cual se establece el programa para el uso eficiente y ahorro del agua. Bogotá D.C. 1997.

⁶⁹ BOGOTÁ D.C. SECRETARÍA DISTRITAL DE AMBIENTE. Resolución 3957. (19, junio, 2009). Por la cual se establece la norma técnica, para el control y manejo de los vertimientos realizados a la red de alcantarillado público en el Distrito Capital. Bogotá D. C. 2009.

⁷⁰ COLOMBIA. PRESIDENTE DE LA REPÚBLICA DE COLOMBIA. Decreto 2945. (6, agosto, 2010). Por medio del cual se reglamenta el ejercicio de las actividades de monitoreo, seguimiento y control a que se refiere el Decreto 028 de 2008, para el sector de agua potable y saneamiento básico y se dictan otras disposiciones. Bogotá D.C. 2010.

1.6 PLANTA PILOTO

Una planta piloto constituye una réplica a pequeña escala de la planta industrial, se define como "una unidad que contempla todos los pasos importantes de un proceso que requieren investigación experimental"⁷¹. En estos procesos intervienen diferentes fenómenos de interés para la ingeniería química, tales como la termodinámica, la transferencia de masa y energía, las reacciones químicas, el control de procesos, entre otras.

El uso de plantas piloto tiene como propósitos principales, predecir el comportamiento de una planta a nivel industrial y estudiar el comportamiento de plantas industriales ya construidas, donde la planta piloto es una réplica y está expuesta a las condiciones de operación establecidas para la planta industrial.

El estudio de plantas piloto es fundamental en el desarrollo de nuevas tecnologías y criterios técnicos que permitan generar avances en alcance, control, seguridad, etc., de procesos, equipos y energías productivas⁷². La planta piloto permite experimentar de forma eficaz el comportamiento al escalar de:

- Condiciones de operación.
- Parámetros de diseño.
- Materiales de construcción.
- Operaciones unitarias.
- Impurezas.
- Corrosión.
- Procedimientos operativos.

Esto permite prever errores antes del arranque o puesta en marcha de una planta industrial.

1.6.1 Escalamiento. El escalamiento es el proceso mediante el cual se desarrollan las pautas y reglas necesarias que determinan las unidades de medida para llevar de un tamaño dado a otro tamaño mayor o menor en una operación o equipo⁷³.

Escalar un proceso o equipo es llevarlo de su escala de investigación (laboratorio) a escala industrial (producción). El paso fundamental en el escalamiento consiste en pasar los datos obtenidos a nivel laboratorio, a diferentes modelos que pueden ser:

- **Fenomenológico:** Este modelo no estudia interacciones moleculares y permite hacer predicciones en rangos o intervalos de operación no estudiados experimentalmente

⁷¹ DÍAZ, Mario. Experimentación en plantas piloto. En: revista ingeniería química. Vol., No XXVIII (Noviembre 1996); p. 135-140.

⁷² ANAYA, Alejandro y PEDROZA, Humberto. Scaling-up, the art of chemical engineering: Pilot plants, the step between the egg and the hen. En: Redalyc. Vol., 23 núm. 1 (2008); p. 31-39.

⁷³ Ibid; p. 33-34.

- **Empírico:** Este modelo se postula sin bases teóricas y se espera solamente un ajuste de los datos en un intervalo de experimentación.
- **De similitud:** Este modelo establece la relación entre los sistemas físicos y el tamaño de estos, este modelo es básico en el escalamiento de procesos físicos o químicos. permite realizar un análisis con respecto a analogías físicas de tipo térmico, geométrico, mecánico o químico.

El tipo de modelo se escoge dependiendo tanto del proceso en cuestión o de la geometría de los equipos involucrados.

2. DIAGNÓSTICO DE AGUAS RESIDUALES A NIVEL LABORATORIO

Con base en la información recopilada y las visitas técnicas realizadas al edificio CREAD (Centros regionales de educación a distancia) donde se ubica el laboratorio del grupo de investigaciones agroquímica de la universidad de Cartagena se realizó el diagnóstico de los vertimientos.

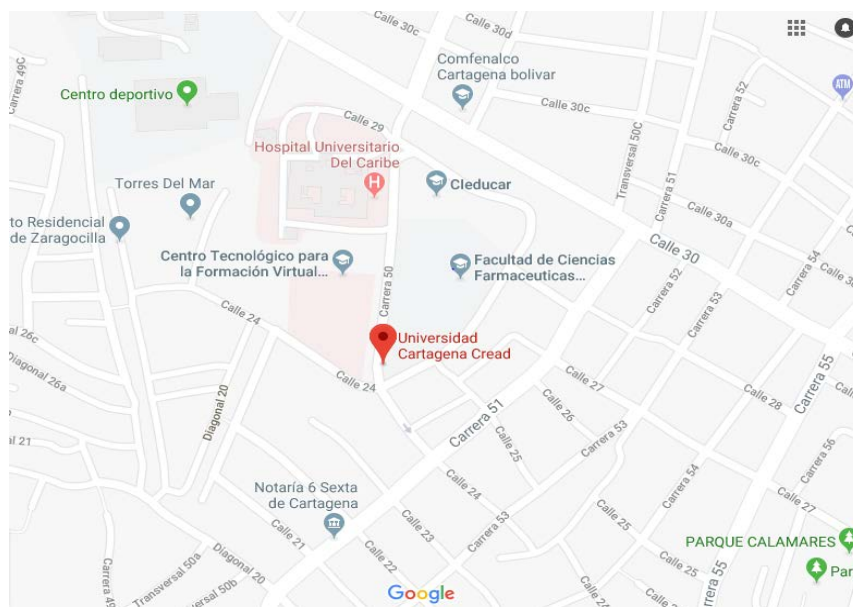
En el presente capítulo se desarrolla la caracterización cualitativa y cuantitativa del agua residual del laboratorio de investigaciones Agroquímicas de la universidad de Cartagena (GIA). Dentro del GIA existen estudios de pregrado y doctorado que se centran en la evaluación del impacto que genera el clorpirifós, enfocados en procesos de remediación y degradación, así como el estudio de sus componentes químicos y su toxicología. Este trabajo, parte de un proyecto investigativo denominado toxicocinética del clorpirifós y sus efectos en el camarón (*Litopenaeus vannamei*), que busca determinar el impacto de este pesticida y su toxicidad en la población de camarones.

Para el desarrollo del primer objetivo propuesto en el proyecto, se hizo el estudio del agua residual generada por el laboratorio, esta se caracteriza por el contenido de carga orgánica, sólidos disueltos y sedimentables. En cuanto a la concentración de clorpirifós y demás propiedades fisicoquímicas: pH, temperatura, oxígeno disuelto y conductividad se analizarán con respecto a la resolución 631 de 2015.

2.1 UBICACIÓN

En la **Imagen 4**, se muestra un mapa que abarca la zona en la que se encuentra el edificio CREAD donde se ubica el laboratorio de agroquímica, indicando las carreras, calles, barrios e instituciones cercanas al mismo.

Imagen 4. Ubicación geográfica del laboratorio de agroquímicas de la universidad de Cartagena



Como se observa en el mapa y teniendo en cuenta las visitas realizadas al edificio CREAD, se pudo evidenciar el centro de influencia que rodea al edificio, donde se destaca la presencia de Universidades, Clínicas, Hospitales, bancos y restaurantes, además, de un sector de uso residencial.

2.2 ESTADO ACTUAL DE LOS VERTIMIENTOS

2.2.1 Caracterización del agua residual. Para el proyecto se tomaron muestras provenientes de desechos generados en el laboratorio, de acuíferos en donde el grupo de investigación de agroquímica de la universidad de Cartagena (GIA) desarrolla investigaciones de biomarcadores en el camarón (*litopenaeus vannamei*) expuesto al pesticida clorpirifós, en esta investigación se analizan los efectos del contaminante en estos organismo y se busca determinar la dosis letal de clorpirifós en los camarones; por esta razón se presentan rangos en la concentración del plaguicida. Estos desechos son tratados previamente con el fin de eliminar materia orgánica, sólidos suspendidos y cloro presente en el agua; el agua residual pasa por filtros de carbón activado y posteriormente por un tanque de sedimentación, donde se retienen sólidos presentes en el agua, y disminuyen los sólidos sedimentables.

Principalmente el objetivo de esta caracterización es determinar el estado del agua residual generada por el laboratorio. La concentración inicial de clorpirifós se determinó mediante el uso de un espectrofotómetro UV-VIS por ser este un equipo de alta disponibilidad y que permite un análisis rápido, además de ser un método de cuantificación adecuado debido a las altas concentraciones de clorpirifós que presentan estos desechos⁷⁴, adicionalmente se realizó un análisis de Cromatografía de gases acoplado a Espectrometría de masas (GC-MS) para verificar la presencia de este pesticida en los vertimientos.

Para la caracterización del agua se tomaron diferentes muestras (8) en el mes de marzo del año 2018; se tomó una muestra representativa (M1) para determinar la presencia del contaminante en el agua residual mediante el análisis de cromatografía, con el fin de determinar el grado de contaminación de los residuos generados en el laboratorio. Los resultados obtenidos fueron los siguientes:

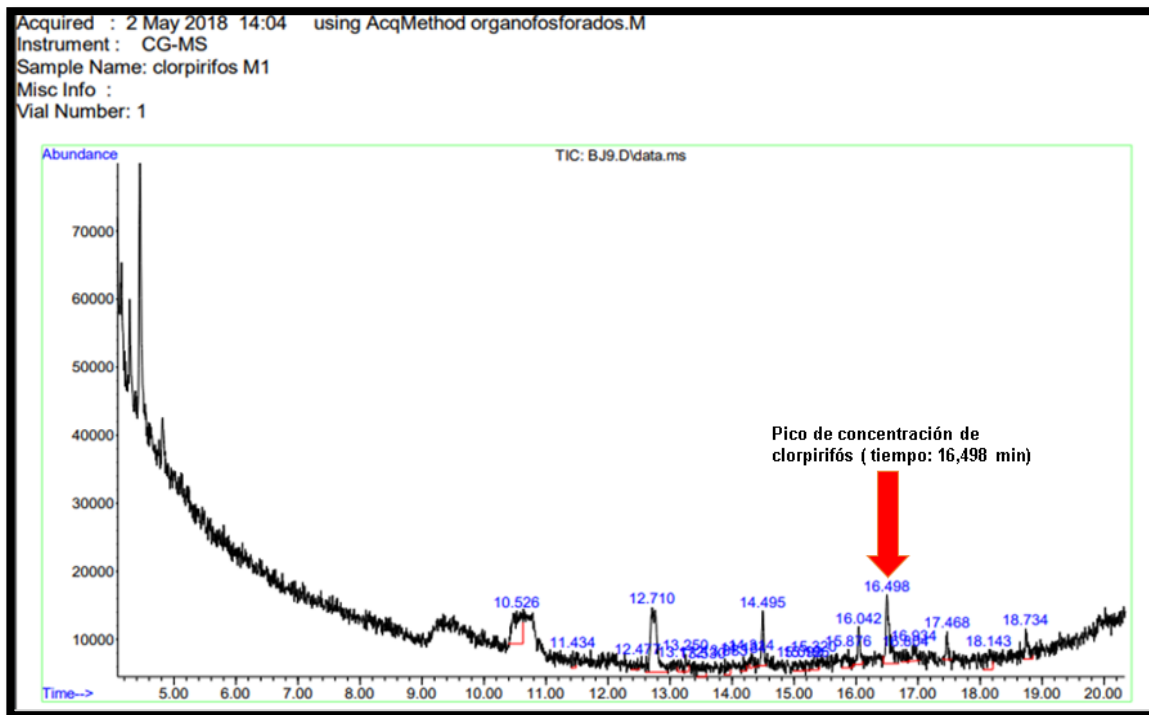
Tabla 2. Medición de las concentraciones del contaminante en el agua residual del laboratorio.

Muestra	Clorpirifós (ppm)	Muestra	Clorpirifós (ppm)
M1	17,376	M5	22,381
M2	14,706	M6	20,545
M3	15,992	M7	21,140
M4	18,428	M8	23,038

⁷⁴ HARSHIT, Dave; CHARMY, Kothari y NRUPESH, Pate. Organophosphorus pesticides determination by novel HPLC and spectrophotometric method. En: ScienceDirect. Vol. 230. (2017); Pg. 448-453.

En la **Imagen 5**, se muestra el análisis cromatográfico para la muestra marcada como **M1**, donde se evidencia que el tiempo de retención fue 16.498 minutos y el área de clorpirifós para dicha muestra fue 435978 Hertz los cuales se observan en el pico marcado en la imagen. El análisis se llevó a cabo utilizando un cromatógrafo de gases Agilent Technologies 7890A Network GC acoplado a un detector selectivo de masas (MSD) Agilent Technologies 5975 GC-MS, equipado con un inyector automático Agilent 4513A.

Imagen 5. Cromatograma agua residual



Fuente: Grupo investigaciones agroquímicas Universidad de Cartagena

A partir de estos análisis y teniendo en cuenta la resolución 631 de 2015 expedida por el ministerio de ambiente y desarrollo sostenible⁷⁵, que indica que la concentración de clorpirifós debe estar en un valor máximo de 0,1 ppm, se evidencia que los vertimientos sobrepasan el rango permitido por dicha resolución.

2.2.2 Muestreo en los Laboratorios de agroquímica en la universidad de Cartagena. En el año 2018 se realizaron las pruebas de caracterización para el agua residual del laboratorio del grupo de investigaciones agroquímica en la

⁷⁵ COLOMBIA. CONGRESO DE COLOMBIA. Resolución 631. (2015). Por la cual se Establece los parámetros y los valores límites máximos permitidos que deben cumplirse en vertimientos puntuales. Bogotá D.C 2015.

universidad de Cartagena y, para esto se tuvo en cuenta la guía para el monitoreo de vertimientos del IDEAM⁷⁶.

Según el IDEAM, el vertimiento a trabajar, se considera un vertimiento puntual, debido a que son realizados en un punto fijo, teniendo presente lo anterior, se realizó un muestreo manual para el análisis, siguiendo lo establecido en la guía de vertimientos del IDEAM.

2.2.3 Evaluación cualitativa del vertimiento. A continuación, se da la descripción cualitativa del vertimiento, observada durante su recolección.

El agua residual proveniente de este laboratorio presenta una coloración blanca (turbidez), es opaca, de consistencia ligera y, por tanto, el paso de luz a través de este residuo es escaso. El olor de este vertimiento es fuerte, penetrante y desagradable.

La **Imagen 6**, presenta una muestra del agua residual de este laboratorio.

Imagen 6. Agua contaminada con clorpirifós



Fuente: elaboración propia

2.2.4 Parámetros medidos del agua residual. Las características determinadas en el estado actual de los vertimientos del laboratorio incluyeron la medición de los siguientes parámetros: clorpirifós, pH, temperatura, oxígeno disuelto y conductividad; es necesario aclarar que los parámetros restantes que rigen la norma fueron suministrados por el GIA resultado de las investigaciones mencionadas anteriormente. Para la medición de los parámetros se tuvo en cuenta la guía para el monitoreo de los vertimientos del IDEAM⁷⁷ como se presenta a continuación:

⁷⁶ INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES. Guía para el monitoreo de vertimientos, aguas superficiales y subterráneas. IDEAM. Colombia, 2007.

⁷⁷ INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES. Guía para el monitoreo de vertimientos, aguas superficiales y subterráneas. IDEAM. Colombia, 2007.

- **pH:** la medida de pH se realizó con un multiparámetro (HANNA Edge HI 2020), por medio del método potenciométrico, este se fundamenta en el registro de la actividad de los iones de hidrogeno por el uso de un electrodo de vidrio y un electrodo de referencia⁷⁸.
- **Conductividad eléctrica:** se determinó por medio del método electrométrico en aguas utilizando un multiparámetro HANNA Edge HI 2020. La muestra se agitó homogéneamente y se introdujo la celda, garantizando que la ranura del sensor quedara completamente sumergida en el agua. Posteriormente se realizó la lectura y reporte de la conductividad en las unidades designadas ($\mu\text{S}/\text{cm}$)⁷⁹.
- **Oxígeno disuelto:** Se determinó por medio del método electrométrico utilizando un multiparámetro Hanna Edge HI 2020, este método se basa en la difusión del oxígeno molecular a través de una membrana que recubre una celda electrolítica. El resultado se obtiene directamente del equipo en mg/l.
- **Temperatura:** Se determinó utilizando un multiparámetro HANNA Edge HI 2020. Se introdujo el sensor de temperatura en el agua, se espero el tiempo necesario para la estabilización del equipo, posteriormente se realizó la lectura y reporte de la temperatura en las unidades designadas ($^{\circ}\text{C}$).
- **Clorpirifós:** Para el análisis de la concentración de clorpirifós se utilizó un espectrofotómetro UV-VIS (Thermo scientific evolution 201). Para determinar la cantidad de clorpirifós disueltos en el agua residual, Se determinó una curva de calibración (**ANEXO B**) teniendo en cuenta que la longitud de onda del clorpirifós utilizada para las pruebas de absorbancia fue de 289 nm, esta absorbancia es tomada del artículo “Organophosphorus pesticides determination by novel HPLC and spectrophotometric method”⁸⁰. Posteriormente se introduce la muestra en una celda y se mide la absorbancia en el espectrofotómetro; se realiza la lectura y reporte de la concentración de clorpirifós en ppm.

La medición de la temperatura de los vertimientos se realizó para observar su cumplimiento con respecto a la normatividad colombiana.

Es pertinente monitorear el pH del afluente y, con ello, observar si los métodos de oxidación avanzada alteran este parámetro del agua residual para verterlo cumpliendo con la resolución 631 del 2015. En los procesos de oxidación avanzada

⁷⁸ *Ibíd.* Pg.16

⁷⁹ CONDUCTIVIDAD ELECTRICA POR EL MÉTODO ELECTROMÉTRICO EN AGUAS. [Archivo PDF]. [20 julio de 2018]. Disponible en: <http://www.ideam.gov.co/documents/14691/38155/Conductividad+El%C3%A9ctrica.pdf/f25e2275-39b2-4381-8a35-97c23d7e8af4>.

⁸⁰ HARSHIT, Dave; CHARMY, Kothari y NRUPESH, Pate. Organophosphorus pesticides determination by novel HPLC and spectrophotometric method. En: ScienceDirect. Vol. 230. (2017); Pg. 448-453.

el pH influye en la generación de radicales hidroxilos, y por ello, en la eficiencia de la oxidación⁸¹.

2.3 CAUDAL DEL LABORATORIO

A continuación, se especifica el caudal promedio de vertimiento generado en el laboratorio del grupo de investigaciones agroquímica de la universidad de Cartagena.

Este laboratorio cuenta con un área total de 75 m². Para determinar el caudal del vertimiento, se llevaron a cabo mediciones de volumen generado durante el desarrollo de la investigación. Los valores recolectados se muestran en la tabla 3.

Tabla 3. medición volumen del laboratorio de agroquímica de la universidad de Cartagena.

Fecha	Volumen (Litros)
20/03/2018	5.2
20/03/2018	2.5
21/03/2018	3.1
21/03/2018	10
21/03/2018	5.6
22/03/2018	4.2
23/03/2018	8.3
24/03/2018	4.9

Como se observa en la tabla 3, el caudal máximo encontrado fue de 10 litros, mientras que el caudal mínimo fue de 2.5 litros. Sin embargo, para el establecer el caudal generado en las investigaciones relacionadas al contaminante clorpirifós por este laboratorio, se tomó el promedio de 5.475 litros para los vertimientos que contienen clorpirifós.

2.4 COMPARACIÓN DE MUESTRA CON MARCO LEGAL

En la **tabla 4**, se presentan los resultados obtenidos en la caracterización realizada en esta investigación (pH, temperatura, oxígeno disuelto, conductividad) y los parámetros suministrados por el GIA (turbiedad, nitratos, sulfatos, fosfatos, color) y se compara con los límites establecidos en la resolución 631 de 2015 para determinar su cumplimiento.

⁸¹ TUHKANEN, T. Advanced oxidation processes for water and wastewater treatment. En: Springer. (September 2015).

Tabla 4. Comparación de la caracterización con la Resolución.

Parámetro	Unidades	Valor obtenido	Resolución 631 de 2015	Cumplimiento de la norma
pH	Unidades de pH	6.95 -7.21	5,00-9,00	Si cumple
Temperatura	°C	28	<40	Si cumple
Dureza Total	mg CaCO ₃ /L	45.3 – 56.5	Análisis y reporte	-----
Alcalinidad Total	mg CaCO ₃ /L	36.0 – 39.0	Análisis y reporte	-----
Turbiedad	UNT	0.14 - 2.00	0,5	Si cumple
Cloruros	mg/L	13.0 - 37.7	Análisis y reporte	-----
Color Aparente	UPC	≤ 5	< 15	Si cumple
Oxígeno disuelto	mg/L	5.3 – 6.5	-----	Si cumple
Conductividad	µS/cm	181.8 - 259.4	-----	Si cumple
Hierro	mg/L	0.009 - 0.0111	Análisis y reporte	-----
Nitratos	mg/L	0.9 - 2.3	Análisis y reporte	-----
Nitritos	mg/L	≤ 0.02	Análisis y reporte	-----
Sulfatos	mg/L	9.2 - 19.6	Análisis y reporte	-----
Fosfatos	mg/L	0.028 - 0.034	Análisis y reporte	-----

Fuente: COLOMBIA. CONGRESO DE COLOMBIA. Resolución 631. (2015).

A partir del cuadro anterior, se observa que, según la resolución 631, los vertimientos del laboratorio cumplen con los límites establecidos.

La variación de la temperatura en el proceso de oxidación avanzada no modifica apreciablemente la velocidad de las reacciones llevadas a cabo en el proceso; en cuanto al pH, influye en la generación de radicales hidroxilos, y por ello, en la eficiencia de la oxidación.

Tabla 5. Comparación concentración de clorpirifós con la resolución.

Clorpirifós (ppm)	Norma Resolución 631/2015	Cumple
14.706 – 23.038	Límite máximo permitido 0.1mg/L	No cumple

En la **Tabla 5**, se hace referencia a la resolución 631 de 2015, la cual indica que el valor máximo permitido para clorpirifós en los vertimientos debe ser de 0,1mg/L, por lo tanto, al comparar los valores obtenidos con lo exigido en la resolución, se

evidencia un incumplimiento en la normatividad. Estos resultados son a tener en cuenta para el proceso a desarrollar. La evaluación de los métodos de oxidación avanzada para la remoción de clorpirifós en aguas residuales, surgen como una alternativa para los métodos convencionales que impiden la remoción de este contaminante teniendo en cuenta que se quiere dar cumplimiento a la normatividad.

3. DETERMINACIÓN DE LA EFICIENCIA DE LOS MÉTODOS DE OXIDACIÓN AVANZADA FENTON, FOTO-FENTON Y, UV / H₂O₂

En este capítulo se evaluaron los tres métodos de oxidación avanzada (Fenton, Foto-Fenton y, UV / H₂O₂) a nivel laboratorio, para ello se realizó una revisión bibliográfica en la cual se determinaron parámetros y variables influyentes en estos procesos, con el fin de encontrar las concentraciones de Fe²⁺ y H₂O₂, tiempo de exposición a la luz ultravioleta, pH y temperatura que proporcionaban el mejor rendimiento de estos tratamientos. De igual forma se evaluaron las condiciones de agitación, tiempos de reacción, constantes de velocidad, órdenes de reacción y tiempo de exposición UV en las que debe operar el foto-reactor utilizado para los tratamientos Foto-Fenton y UV- H₂O₂.

En este capítulo se presentará el desarrollo de ensayos preliminares para cada proceso y su metodología esta resumida en diagramas de proceso que evidencian las pequeñas diferencias metodológicas para cada tratamiento. La eficiencia se evaluó por la disminución de la concentración del plaguicida respecto al tiempo y para ello, se hicieron mediciones de la concentración de clorpirifós al inicio durante y al final de cada ensayo mediante la reducción de absorbancia medida en un espectrofotómetro UV-VIS en diferentes intervalos de tiempo. El desarrollo de este capítulo empieza por una descripción de los materiales utilizados durante la experimentación seguida de una recopilación bibliográfica para determinar variables y parámetros influyentes y finaliza con el desarrollo de los ensayos para cada tratamiento.

3.1 MATERIALES Y EQUIPOS

3.1.1 Peróxido de hidrógeno (H₂O₂). El H₂O₂ grado analítico utilizado tiene una concentración de 30 % p/v, completamente incoloro y en estado líquido. Este reactivo es utilizado en los tres tratamientos.

3.1.2 Sulfato ferroso heptahidratado (FeSO₄·7H₂O). El sulfato ferroso grado analítico utilizado en los procesos Fenton y Foto-Fenton se encuentra en forma de sal heptahidratado de color azul-verdoso.

3.1.3 Lorsban 4 EC. Lorsban 4 EC es un insecticida del grupo de los organofosforados cuyo componente principal es el clorpirifós, se encuentra líquido, es de color amarillo con un olor penetrante agudo peligroso para la salud, la cantidad de clorpirifós presentes en el insecticida es de 480000 ppm., en la **Imagen 5** pesticida que se utiliza en las investigaciones que se realizan en los laboratorios del grupo de investigaciones agroquímica. Este proyecto se desarrolló con los desechos resultantes de una de estas investigaciones.

Imagen 7. Lorsban 4EC



Fuente: elaboración propia.

3.1.4 Reactor foto-catalítico. El reactor empleado en las pruebas es un reactor tubular de acero inoxidable (**Imagen 8**) que puede ser utilizado tanto para procesos continuos como Batch, cuenta con válvulas de entrada y salida de $\frac{1}{4}$ de pulgada y no posee mecanismos de agitación, sus dimensiones son 50 cm de largo y 10,2 cm de diámetro con un volumen efectivo de 2.2 litros. La lámpara de luz ultravioleta se compone de un tubo de vidrio transparente que irradia más del 85% de su energía en el espectro UV – C , emitiendo una onda corta de 254 nm sus dimensiones son de 46 cm de largo y 2,6 cm de diámetro, está protegida por un tubo de vidrio que evita el contacto con el agua. La lámpara UV es marca Lumek, tiene una potencia de 15 W y una corriente nominal de 0,34A. Es importante evitar la exposición directa, puesto que la radiación emitida es perjudicial para la piel y los ojos.

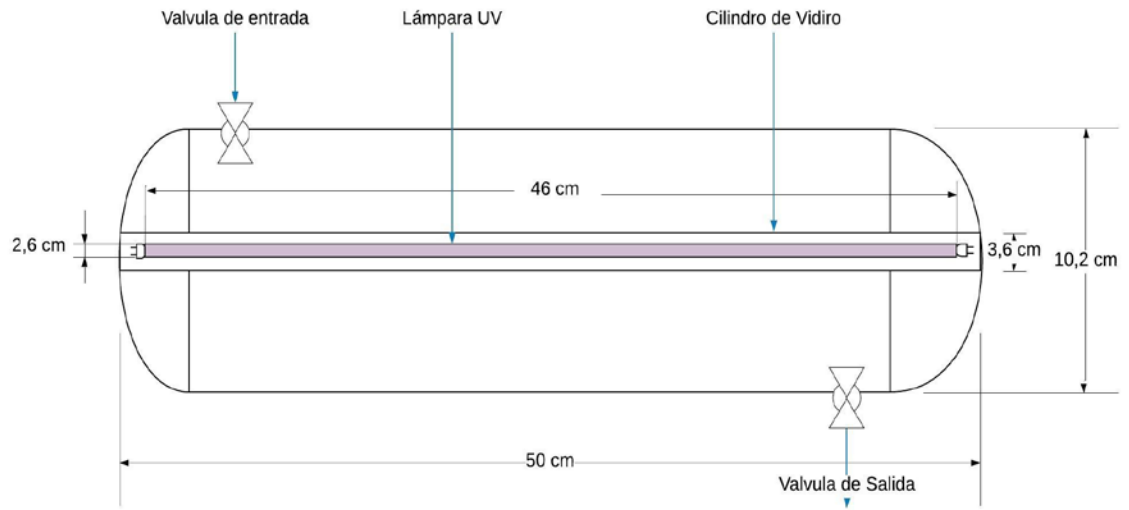
El funcionamiento de este reactor tipo Batch consta de un proceso de carga manual a través de la válvula de entrada, el fluido llena el espacio entre el tubo de vidrio y las paredes del reactor durante el tiempo de tratamiento simultáneamente se enciende la lámpara ultravioleta, una vez cumplido este tiempo se realiza la descarga a través de la válvula de salida.

Imagen 8. Reactor foto-catalítico



Fuente: elaboración propia.

Imagen 9. Esquema Reactor Foto-Catalítico



Fuente: elaboración propia

3.2 METODOLOGÍA

A partir de una revisión bibliográfica se plantearon los parámetros y condiciones para la evaluación de los métodos de oxidación avanzada Fenton, Foto-Fenton y UV / H₂O₂. En la **Tabla 6** se presenta la revisión analizada.

Tabla 6. Revisión bibliográfica asociada a parámetros influyentes

Proceso	Título	Artículo / Tesis Año / Revista	Parámetro	Valor	Contaminantes	% Degradación Contaminante
Fenton	Uso del reactivo de Fenton para la eliminación de Pesticidas de aguas residuales industriales	Artículo / 2001 / Polish Journal of Environmental Studies	pH	3.0 -3.5	fenitrotión	98 %
			[H ₂ O ₂]	5 g/L	Clorfenvinfos	97%
			[Fe ²⁺]	1.6 g/L	γ-HCH	92%
			Tiempo	120 min	α- HCH	90 %
					β-HCH	95 %
	Efectos de las condiciones de reacción en la eficiencia de oxidación en el proceso de Fenton	Artículo / 2000 / Water Research	pH	2.5-4.0	COD	45%
			[H ₂ O ₂]	5 g/L	BOD5	40 %
			Tiempo	60 min	NH ₃ -N	46 %
			Temperatura	25°C		
	Comparación de la activación con persulfato y la reacción de Fenton en Remediando un suelo contaminado con plaguicidas organofosforados	Artículo / 2017 / Elsevier B.V. and Science Press	pH	3.0	Clorpirifós	92 %
			Tiempo	60 min		
			Temperatura	30°C	4-bromo-2-clorofenol	97 %
			[H ₂ O ₂]	27,2 g/L		
			[Fe ²⁺]	5,44 g/L		
	Procesos de oxidación avanzados para la eliminación de pesticidas organofosforados en aguas residuales	Artículo / 2006 / M.I. Badawy et al. / Desalination	pH	3.0	Fenitrothion	54,1 %
			Tiempo	90 min	diazinon	12,9 %
			[H ₂ O ₂]	11,7 g/L		
			[Fe ²⁺]	1,17 g/L	profenofos	50,3 %
	Fenton y foto-Fenton solar procesos para el eliminación del insecticida clorpirifós en aguas residuales	Artículo / 2012 / Water SA	Tiempo	60 min	Clorpirifós	77 %
			Temperatura	30°		
[H ₂ O ₂]			0,84 g/L			
[Fe ²⁺]			0,00005 g/L			
Ph			3			

Continuación Tabla 6. Revisión bibliográfica asociada a parámetros influyentes

Foto-Fenton	Degradación Por Fotocatálisis Homogénea (Foto-Fenton) De Efluentes Líquidos Contaminados Con Residuos De Fenol	Tesis / 2017/ Universidad De Cartagena	[Fe ²⁺]	0,005 g/L	Fenol	74.2 %
			[H ₂ O ₂]	1,08 g/L		
			pH	2.8-3.1		
			Tiempo de exposición	180 min		
			temperatura	25 °C		
	UV Fenton y secuenciación del tratamiento en reactor discontinuo de clorpirifós, cimetretrina y chlorothalonil plaguicidas aguas residuales	Articulo / 2014/ International Biodeterioration & Biodegradation	pH	3.0	Clorpirifós	97.4 %
			Tiempo exposicion luz solar	480 h	cimetretrina	96.2 %
			[Fe ²⁺]	0.2 g/L		
			[H ₂ O ₂]	5 g/L	clorotalonil	97 %
	Procesos de oxidación avanzados para la eliminación de pesticidas organofosforados en aguas residuales	Articulo / 2006 / M.I. Badawy et al. / Desalination	Tiempo exposición UV	100 min	Fenitrothion	89,7 %
			Temperatura	25°C	diazinon	56, 7 %
			pH	3.0		
			[Fe ²⁺]	11,7 g/L	profenofos	86,9 %
			[H ₂ O ₂]	1,17 g/L		
	El Estado actual y perspectivas de la degradación de pesticidas por procesos avanzados de oxidación	Articulo / 2017 / Revista Cubana de Quimica	Tiempo de exposición UV	120 min	Vydate	95%
[Fe ²⁺]			0.0094 g/L	Couraze	80 %	
[H ₂ O ₂]			0,0072 g/L	Scala	82 %	

Continuación Tabla 6. Revisión bibliográfica asociada a parámetros influyentes.

UV-H ₂ O ₂	El Estado actual y perspectivas de la degradación de pesticidas por procesos avanzados de oxidación Procesos de oxidación avanzados para la eliminación de pesticidas organofosforados en aguas residuales	Artículo / 2017 / Revista Cubana de Química Artículo / 2005 / M.I. Badawy et al. / Desalination	pH	6	Endosulfan Atrazine Fenitrothion Diazinon	54 % 60 % 50,3 % 60 %
			Tiempo exposición UV	300 min		
			[H ₂ O ₂]	1 g /L		
			Tiempo exposición UV	60 min		
			Temperatura	25°C		
	Estudio y modelado de la degradación del compuesto organofosforado por fotólisis del peróxido de hidrógeno en medios acuosos mediante el uso de diseño de superficie de respuesta experimental	Artículo/ 2015 / Journal of Industrial and Engineering Chemistry	[H ₂ O ₂]	0.05 g/L	profenofos	59 %
			[H ₂ O ₂]	0.03 g/L	Malatión	76 %
			pH	6.0-7.5		
			Tiempo	60 min		
	Degradación del plaguicida clorpirifós en soluciones acuosas con UV / H ₂ O ₂ : optimización y efecto de los aniones interferentes	Artículo / 2014 / Journal of Advanced Oxidation Technologies .	Temperatura	25°C	Clorpirifós	57.4 %
			[H ₂ O ₂]	0,02 g/L		
			pH	7,0		
			Temperatura	30 °C		

Para la selección de parámetros se hizo una revisión bibliográfica en la que se identificaron los artículos que comprendían rendimientos, condiciones similares, concentraciones similares y a partir de ello se plantearon un grupo de parámetros que terminaron las condiciones de experimentación, durante el desarrollo experimental se hicieron ensayos preliminares para determinar cuál de los tres procesos presentaba mayor porcentaje de remoción del clorpirifós. Estos ensayos preliminares tuvieron un denominador común en cuanto a la caracterización de los clorpirifós para las que se utilizaron las siguientes técnicas:

3.2.1 Espectrofotometría. Para el análisis de la concentración de clorpirifós en las muestras se utilizó el espectrofotómetro referencia Evolution 201 marca Thermo Scientific; éste cuenta con un software que permite el control del instrumento desde la computadora llamado Thermo Scientific INSIGHT que permite personalizar por

completo los pasos de medición lógica⁸². Las pruebas fueron ejecutadas antes y después de los métodos de degradación (Fenton, Foto-Fenton y UV / H₂O₂).

Imagen 10. Espectrofotómetro Evolution 201 Thermo Scientific.

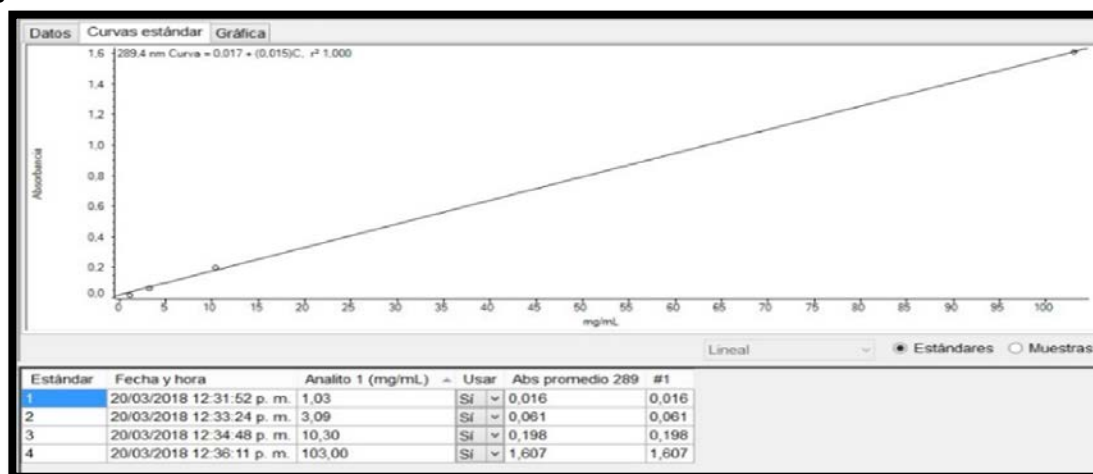


3.2.1.1 Curva de calibración. Para determinar la cantidad de clorpirifós disueltos en el agua residual (**ver numeral 2.1.2**), Se determinó una curva de calibración, para esto se utilizaron estándares suministrados por el grupo de investigación de agroquímica de la universidad de Cartagena, con una concentración de clorpirifós de 1, 3, 10 y 100 ppm (**Imagen 11**), teniendo en cuenta que la longitud de onda del clorpirifós utilizada para las pruebas de absorbancia fue de 289 nm, esta absorbancia es tomada del artículo “Organophosphorus pesticides determination by novel HPLC and spectrophotometric method”⁸³. Para comprobar esta longitud de onda, se hizo un barrido con el espectrofotómetro Evolution 201 mencionado en el numeral **3.1.5**; y se constató una longitud de onda cercana (289.4 nm). Por lo cual se decidió trabajar con $\lambda=289\text{nm}$, graficando los datos de absorbancia se obtuvo la **Ecuación 1**.

⁸² THERMO SCIENTIFIC. Espectrofotómetro evolution 201 disponible en: <<http://www.thermofishersci.in/lit/Thermo%20Scientific%20Evolution%20201.pdf>>.

⁸³ HARSHIT, Dave; CHARMY, Kothari y NRUPESH, Pate. Organophosphorus pesticides determination by novel HPLC and spectrophotometric method. En: ScienceDirect. Vol. 230. (2017); Pg. 448-453.

Imagen 11. Curva de calibración.



Fuente: Grupo De Investigaciones Agroquímicas de la Universidad de Cartagena

Ecuación 1. Curva de calibración

$$y = 0,017 + 0,015C$$
$$r^2 = 0.99$$

Donde:

y= absorbancia

C=concentración de clorpirifós (ppm)

3.2.1.2 Extracción líquido-líquido. Durante la medición en el espectrofotómetro se decidió utilizar un método de extracción líquido-líquido su metodología y reactivos están descritos en el procedimiento desarrollado por Jeannota, Sabikb, Sauvarda y Geninc⁸⁴. Una de las metodologías más comunes es la extracción líquido - líquido, en la cual se utilizaron inicialmente solventes de baja polaridad tales como el diclorometano, el hexano y el éter de petróleo para la extracción de plaguicidas organoclorados y organofosforados⁸⁵, con esta operación se busca concentrar el clorpirifós y separar el pesticida de la matriz acuosa utilizando como solvente diclorometano. Inicialmente se tomaba una muestra de 400 mL de agua contaminada con clorpirifós, esta se llevaba al separador liquido-liquido posteriormente se hacia el montaje **Imagen 12** en el que se evaporaba 100 mL de diclorometano a través del separador y posteriormente este se condensaba haciendo que las gotas de solvente atravesaran la muestra arrastrando únicamente el clorpirifós. Una vez evaporado la totalidad del solvente se hacia la separación por

⁸⁴ JEANNOTA Roger, SABIKB Hassan, SAUVARDA Emmanuel, GENINC Eric. Application of liquid chromatography with mass spectrometry combined with photodiode array detection and tandem mass spectrometry for monitoring pesticides in surface waters. En: Journal of Chromatography. Mayo, 2000. Vol 879. p.53.

⁸⁵ GUERRERO Jairo Arturo, VELANDIA Nancy Yohanna. Comparación de dos metodologías para la determinación de residuos de plaguicidas en agua potable. En: Revista Colombiana de Química. Junio, 2014. Vol 43.p.18.

densidad y la muestra era concentrada en un concentrador de Kuderna-Danish hasta llegar al volumen requerido. Una vez realizada la extracción se procedía con la lectura en el espectrofotómetro teniendo como blanco el solvente utilizado.

Imagen 12. Montaje extracción líquido-líquido



Fuente: elaboración propia

3.2.2 Tratamiento Fenton

3.2.2.1 Temperatura. El efecto de la temperatura sobre la degradación de clorpirifós en tratamientos Fenton fue descrito por Youssef Samet, Emna Hmani y Ridha Abdelhédia⁸⁶ obteniendo resultados significativos en un rango de 25 a 35 °C además de esto se sabe que al sobrepasar los 40°C ocurre una descomposición acelerada del peróxido de hidrogeno en oxígeno y agua⁸⁷, por lo que se determinó desarrollar la experimentación a la temperatura ambiente del laboratorio 27 °C.

3.2.2.2 pH. Las reacciones Fenton son fuertemente dependientes del valor de pH este influye en la generación de radicales hidroxilos y por tanto en la eficacia de la oxidación. Los experimentos llevados a cabo por Youssef Samet, Emna Hmani y Ridha Abdelhédia⁸⁸, en un pH dentro del intervalo de 2.5-4.0. Determinaron que el

⁸⁶ YOUSSEF Samet, EMNA, Hmani y RIDHA Abdelhédia. Fenton and solar photo-Fenton processes for the removal of chlorpyrifos insecticide in wastewater. En: Water SA. Julio, 2012.Vol 38.p.539-540.

⁸⁷ TORRADES, F; NUÑEZ, L; GARCÍA-HORTAL, J. A y PERAI, J. Fenton and Photo-Fenton oxidation of a model mixture of dyes - overall kinetic analysis. En: Coloration Technology. Vol.124 (2008); p. 370-374.

⁸⁸ YOUSSEF Samet, EMNA, Hmani y RIDHA Abdelhédia. Fenton and solar photo-Fenton processes for the removal of chlorpyrifos insecticide in wastewater. En: Water SA. Julio, 2012.Vol 38.p.539-540.

pH óptimo era aproximadamente 3, se observó que la degradación de clorpirifós disminuyó a valores de pH superiores a 3.5, porque el hierro precipitó como hidróxido. Además, era conocido que el potencial de oxidación del radical hidroxilo disminuía al aumentar el pH⁸⁹. Otra razón para la degradación ineficiente a pH > 3 es la disociación y auto-descomposición de H₂O₂⁹⁰. Para valores de pH por debajo de 2.5, la reacción del peróxido de hidrógeno con Fe²⁺ se ve seriamente afectada, causando una reducción en la producción de radicales hidroxilos, debido a la captación de radicales hidroxilo por los iones H⁺. Se evidencia entonces según la revisión bibliográfica que valor de pH efectivo para la degradación por tratamientos Fenton es 3.

3.2.2.3 Concentraciones H₂O₂ y Fe²⁺. Las concentraciones de sulfato de hierro y peróxido de hidrogeno descritas por Aznate, Cerro y Benitez⁹¹, concluye que la cantidad que presenta mejor desempeño es de 5 mg de Fe²⁺ y 1080 mg de H₂O₂ por cada litro de agua contaminada, teniendo en cuenta que no se encontraron relación específicamente para el tratamiento de clorpirifós, se propusieron estas cantidades por resultados obtenidos con pesticidas organofosforados y tratamiento de materia orgánica. Cuando la concentración de Fe²⁺ aumentó, el efecto catalítico aumentó en consecuencia. Sin embargo, vale la pena señalar que, en el proceso Fenton, las cantidades de iones Fe²⁺ deben ser lo más bajas posible por razones económicas y ambientales; altas cantidades de iones Fe²⁺ pueden producir una mayor cantidad de lodo Fe³⁺. La eliminación / tratamiento de los lodos que contienen Fe³⁺ al final del tratamiento de aguas residuales es costoso y requiere una gran cantidad de productos químicos y mano de obra

3.2.2.4 Tiempo. A partir de tiempos promedio en los que se alcanzaron los mejores resultados en investigaciones similares encontradas en la revisión bibliográfica se determinaron los tiempos de reacción mínimo de 60 min para el tratamiento Fenton.

3.2.2.5 Metodología para tratamiento Fenton. Inicialmente se tomaron muestras de un tratamiento previo que se desarrolló en acuíferos del laboratorio del GIA que estudia los efectos nocivos del clorpirifós en camarones en un beaker de 600 mL, posteriormente se mantuvo la muestra en agitación con agitador magnético durante el tiempo del tratamiento, luego de esto se llevó la solución a pH 3.0 adicionando ácido clorhídrico (0.2N) midiendo este valor en un pH-metro HANNA Edge multiparámetro, posteriormente se adicionaron los reactivos Fenton (H₂O₂ y Fe²⁺) , para evitar que el clorpirifós se dispersara en el aire se selló el beaker con papel parafilm, y se dejó agitando durante 45 minutos. Terminado el tiempo de reacción se neutralizó la solución con NaOH (0.2N) hasta llegar a un pH de 7 logrando así la

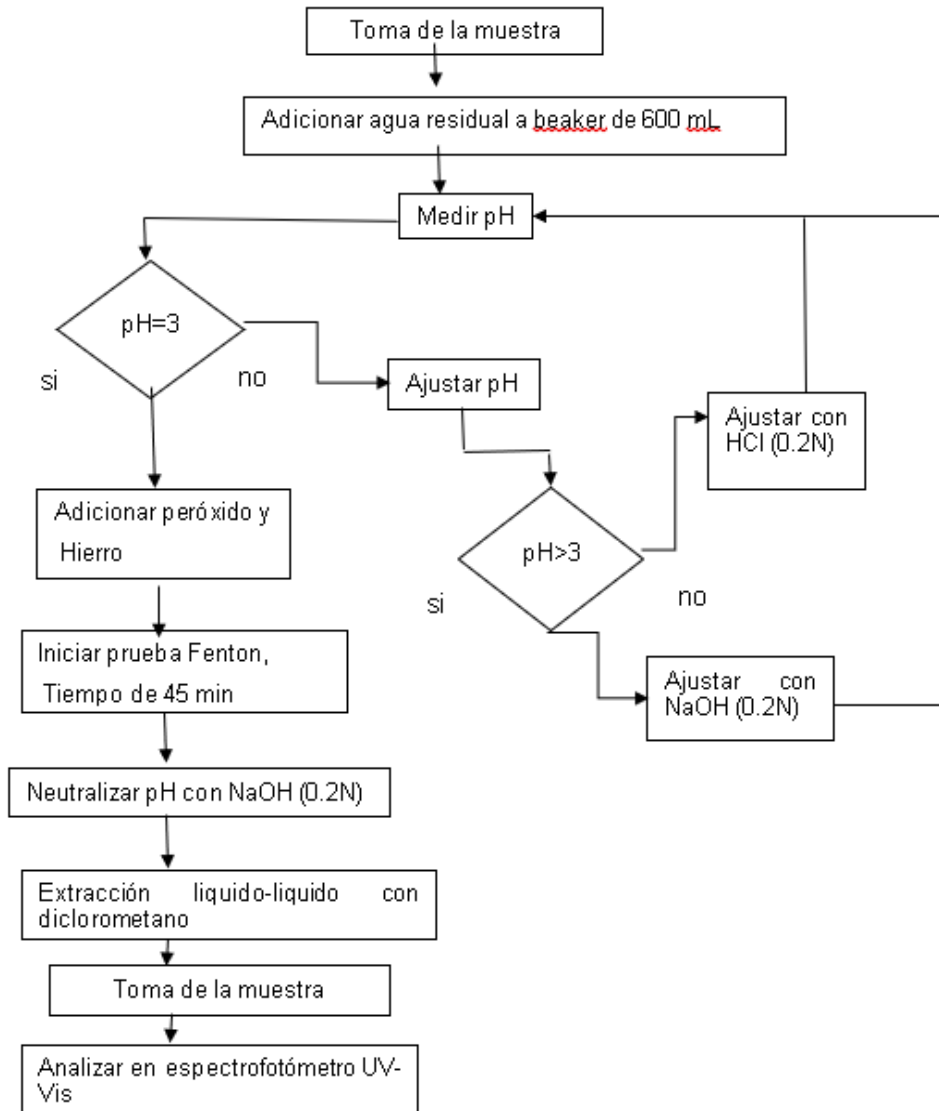
⁸⁹ LUCAS, MS and PERES, JA. Decolorization of the azo dye reactive black 5 by Fenton and photo-Fenton oxidation. En: Dyes Pigm. Vol. 71. No 3 (2006); p. 236–244.

⁹⁰ BADAUWY, MI; GHALY, MY and GAD-ALLAH, TA. Advanced oxidation processes for the removal of organophosphorus pesticides from wastewater. Desalination. Vol. 194. No. (1–3). (2006); p. 166–175.

⁹¹ AZNATE Luis Alfredo, CERRO Onix Jose y BENITEZ Angel. Degradación Por Fotocatálisis Homogénea (Foto-Fenton) De Efluentes Líquidos Contaminados Con Residuos De Fenol. Trabajo de grado Ingeniería Química. Cartagena, Bolívar. Universidad de Cartagena. 2013. p.46.

precipitación del hierro⁹². Después de ajustar el pH se extrajo el clorpirifós del agua por medio de extracción líquido-líquido con diclorometano tal como se describe en la **(sección 3.2.1.2)** separando el clorpirifós de la matriz acuosa para tomar la muestra final y medir la concentración final del clorpirifós en el espectrofotómetro.

Diagrama 1. Procedimiento Pruebas Preliminares Fenton.



⁹² M.I, Badawya; MONTASER, Y. Ghalyb y TAREK, A. Gad-Allaha. Advanced oxidation processes for the removal of organophosphorus pesticides from wastewater. En: ScienceDirect. Vol. 194. No. 1-3 (10 de junio 2006); p.166-175.

3.2.3 Tratamiento Foto-Fenton.

3.2.3.1 Temperatura. La temperatura de operación para el tratamiento Foto-Fenton está en el rango de 25°C a 50°C. Según la revisión bibliográfica^{93,94} en estas investigaciones los experimentos se realizaron a temperatura ambiente dependiendo del lugar donde se realizó el experimento, por lo que se determinó manejar la temperatura ambiente del laboratorio 27 °C.

3.2.3.2 pH. Para el tratamiento Foto-Fenton su rango óptimo de operación de pH es de 2.8 a 3.1. Ya que pH superiores a este rango producen precipitación del hierro presente en la reacción y menores a 2.7 hacen que el peróxido reaccione con radicales hidroxilos⁹⁵, además de esto la velocidad de las reacciones tienden a ser máximas en un pH cercano a 3.0⁹⁶ por lo cual se determina este valor de pH ácido como parámetro inicial.

3.2.3.3 Concentración de H₂O₂ y Fe⁺². Las concentraciones de reactivos Fenton influyen en la eficacia del proceso hay que tener en cuenta que los iones Fe⁺² principalmente afectan la cinética de la reacción en tanto que el H₂O₂ en la eficacia. Aun no se ha encontrado una relación de concentraciones universal que determine un proceso Fenton ideal, por lo cual ningún proceso es igual y depende de su naturaleza, composición del agua contaminada y grado de degradación que se quiere alcanzar. La concentración de sulfato de hierro y peróxido de hidrogeno que presentan mejor desempeño para el tratamiento Foto-Fenton es de 5 mg de Fe⁺² y 1080 mg de H₂O₂ por cada litro de agua contaminada⁹⁷.

⁹³ M.I. Badawya, MONTASER Y. Ghalyb, TAREK Gad-Allaha. Advanced oxidation processes for the removal of organophosphorus pesticides from wastewater. En: Desalination. Septiembre, 2005. vol. 194. p. 167-168

⁹⁴ AFFAM Augustine, CHAUDHURI Malay, RAHMAN Shamsul y MUDA Khalida. UV Fenton and sequencing batch reactor treatment of chlorpyrifos, cypermethrin and chlorothalonil pesticide wastewater. En : International Biodeterioration & Biodegradation. Junio, 2014. vol 93. p. 197-198.

⁹⁵ GARCÍA MONTAÑO, Julia. Combination of Advanced Oxidation Processes and Biological Treatments for Commercial Reactive Azo Dyes Removal. Barcelona. 2007. Tesis Doctoral (Doctor en química). Universidad Autónoma de Barcelona. Facultad de ciencias. Departamento de química.

⁹⁶ YOUSSEF Samet, EMNA, Hmani y RIDHA Abdelhédia. Fenton and solar photo-Fenton processes for the removal of chlorpyrifos insecticide in wastewater. En: Water SA. Julio, 2012. Vol 38. p. 539-540.
TORRADES, F; NÚÑEZ, L; GARCÍA-HORTAL, J. A y PERAI, J. Fenton and Photo-Fenton oxidation of a model mixture of dyes - overall kinetic analysis. En: Coloration Technology. Vol. 124 (2008); p. 370-374.

⁹⁷ AZNATE Luis Alfredo, CERRO Onix Jose y BENITEZ Angel. Degradación Por Fotocatálisis Homogénea (Foto-Fenton) De Efluentes Líquidos Contaminados Con Residuos De Fenol. Trabajo de grado Ingeniería Química. Cartagena, Bolívar. Universidad de Cartagena. 2013. p. 46.

3.2.3.4 Tiempo. A partir de tiempos promedio en los que se alcanzaron los mejores resultados en investigaciones similares^{98,99,100}, encontradas en la bibliografía se determinaron los tiempos de reacción mínimos de 180 min para el tratamiento Foto-Fenton aun cuando en una de las investigaciones se alcanza hasta el 95% de eliminación del contaminante con tan solo 120 minutos, lo que se quiere es determinar si un incremento en esta variable es significativo en la eficiencia del tratamiento.

3.2.3.5 Metodología para tratamiento Foto-Fenton. Se realizó la toma de muestras de un tratamiento previo que estudia el efecto del clorpirifós sobre la población de camarones en un balón aforado de 1L, posteriormente se agitó la muestra durante 5 minutos para homogenizarla, a continuación, se llevó la solución a pH 3.0 adicionando ácido clorhídrico (0.2N) midiendo este valor en un pH-metro HANNA Edge multiparámetro. En seguida se adicionaron las cantidades de reactivos Fenton (H_2O_2 y Fe^{+2}). A continuación, se llenó el fotorreactor con la muestra y se cerraron las válvulas de entrada y salida se agito una vez más y se repitió la agitación manual cada 10 minutos durante el tiempo estimado de 180 minutos. Terminado el tiempo de reacción se neutralizo la solución con NaOH (0.2N) hasta llegar a un pH de 7 logrando así la precipitación del hierro¹⁰¹. Una vez ajustado el pH se extrajo el clorpirifós del agua por medio de diclorometano (extracción líquido-líquido) separando el clorpirifós de la matriz acuosa para tomar la muestra final y medir la concentración final del clorpirifós en el espectrofotómetro.

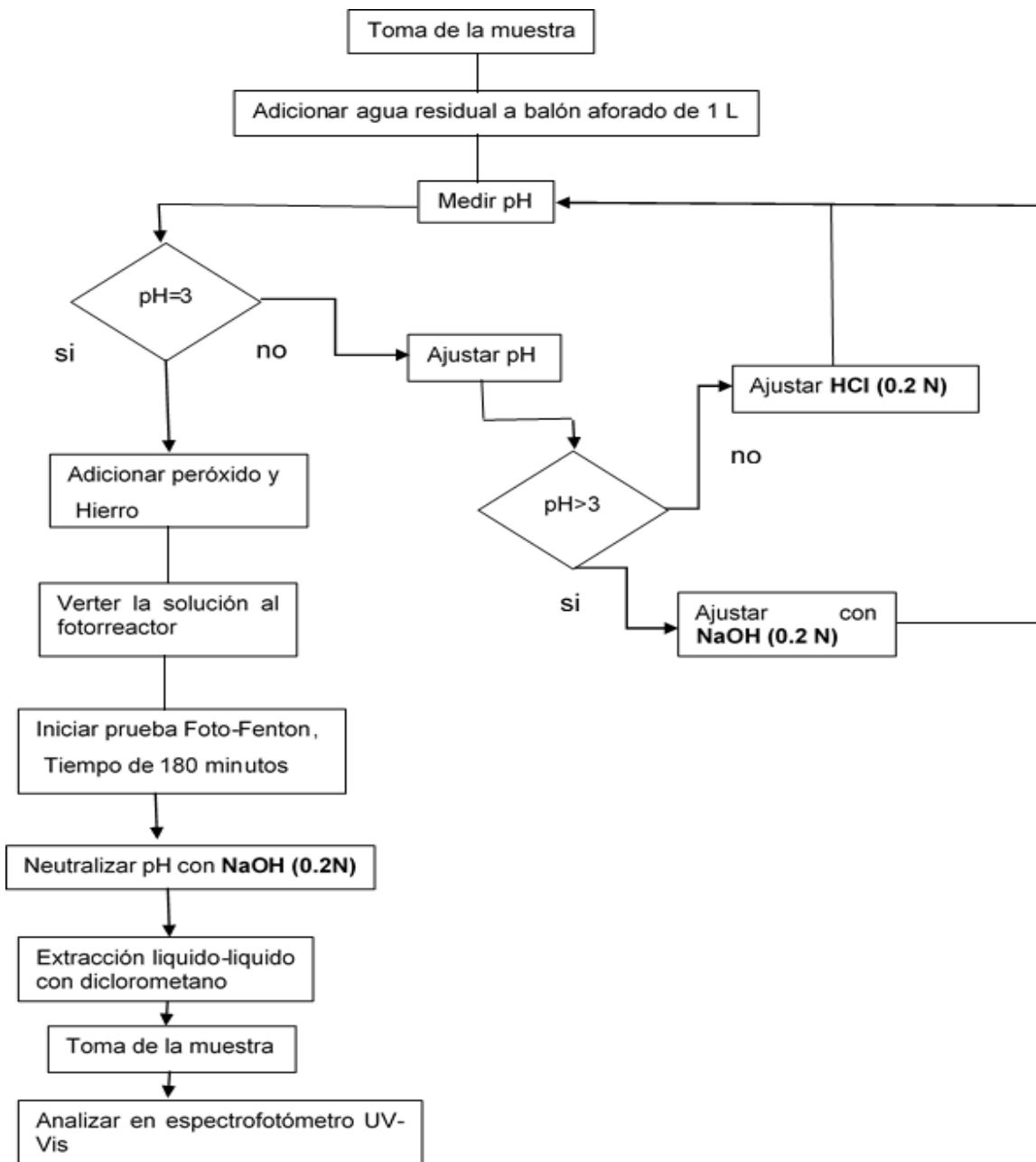
⁹⁸ AZNATE Luis Alfredo, CERRO Onix Jose y BENITEZ Angel. Degradación Por Fotocatálisis Homogénea (Foto-Fenton) De Efluentes Líquidos Contaminados Con Residuos De Fenol. Trabajo de grado Ingeniería Química. Cartagena, Bolívar. Universidad de Cartagena. 2013. p.56.

⁹⁹ AFFAM Augustine, CHAUDHURI Malay, RAHMAN Shamsul y MUDA Khalida. UV Fenton and sequencing batch reactor treatment of chlorpyrifos, cypermethrin and chlorothalonil pesticide wastewater. En : International Biodeterioration & Biodegradation. Junio, 2014. vol 93. p. 197-198

¹⁰⁰ CRUZ-GONZÁLEZ Germán, JULCOUR Carine y JÁUREGUI-HAZAI Ulises. El Estado actual y perspectivas de la degradación de pesticidas por procesos avanzados de oxidación. En: Revista Cubana de química. Diciembre, 2017. vol.29. p.500-501.

¹⁰¹ M.I, Badawya; MONTASER, Y. Ghalyb y TAREK, A. Gad-Allaha. Advanced oxidation processes for the removal of organophosphorus pesticides from wastewater. En: ScienceDirect. Vol. 194. No. 1-3 (10 de junio 2006); Pg.166-175.

Diagrama 2. Procedimiento Pruebas Preliminares Foto-Fenton.



3.2.4 Tratamiento H₂O₂-UV.

3.2.4.1 Temperatura. La revisión bibliográfica en las investigaciones consultadas sugiere una temperatura ambiente para tratamiento H₂O₂-UV^{102,103,104}, entre 25°C a 30°C por lo que se determinó trabajar a temperatura ambiente del laboratorio 27°C.

3.2.4.2 pH. En el tratamiento H₂O₂-UV el pH de la solución puede influir en la velocidad de degradación del clorpirifós como lo describen Gadelha, Pereira, Tome de Oliveira, Keukeleire, Duarte y Ferreira¹⁰⁵ quienes determinaron un incremento en la degradación de clorpirifós en pH neutro lo que atribuyen a la formación del anión de peróxido HO₂⁻ que posee un coeficiente de absorción mayor al peróxido de hidrógeno. Para el tratamiento H₂O₂-UV la relación de pH en la que presenta mejores resultados experimentales es un pH neutro entre 6.0 y 7.5¹⁰⁶. Por lo cual para este tratamiento no se realiza cambios en las muestras de desechos ya que un pH ácido genera que los radicales hidroxilos reaccionen, pero al no estar presente el hierro la reacción Fenton no se desarrollaría.

3.2.4.3 Concentración de peróxido de hidrogeno. Investigaciones similares Gadelha, Pereira, Tome de Oliveira, Keukeleire, Duarte y Ferreira¹⁰⁷, determinaron que un exceso en la concentración de peróxido de hidrogeno puede influir negativamente en la eficiencia del tratamiento para esa investigación llegaron a un máximo de 2000 ppm observando una disminución en el rendimiento por la formación de hidroperóxido HO₂⁻. El uso de peróxido de hidrogeno combinado con radiación ultravioleta para que las condiciones de este método sean iguales a la de los otros dos tratamientos y teniendo en cuenta las relaciones de peróxido encontradas en la revisión bibliográfica sección **3.2.2.3** se determinó la concentración inicial en 1080 ppm de H₂O₂.

3.2.4.4 Tiempo. A partir de tiempos promedio en los que se alcanzaron los mejores resultados en investigaciones similares encontradas tiempos de exposición a la luz ultravioleta de 180 min para el tratamiento H₂O₂-UV.

¹⁰² M.I. Badawya, MONTASER Y. Ghalyb, TAREK Gad-Allaha. Advanced oxidation processes for the removal of organophosphorus pesticides from wastewater. En: Desalination. Septiembre, 2005. vol. 194. p. 167-168

¹⁰³ CHENNA Malika, MESSAOUDI Karima, DROUCHE Nadjib y LOUNICI Hakim. Study and modeling of the organophosphorus compound degradation by photolysis of hydrogen peroxide in aqueous media by using experimental response surface design. En: Journal of Industrial and Engineering Chemistry. Octubre, 2015. vol. 33. p. 3.

¹⁰⁴ GADELHA André, PEREIRA Jefferson, TOME Juliene, DE KEUKELEIRE Denis, DUARTE Máira y FERREIRA Ronaldo. Degradation of the Pesticide Chlorpyrifos in Aqueous Solutions with UV/H₂O₂: Optimization and Effect of Interfering Anions. En: Journal of Advanced Oxidation Technologies. Enero, 2014. Vol. 14. p. 134-135.

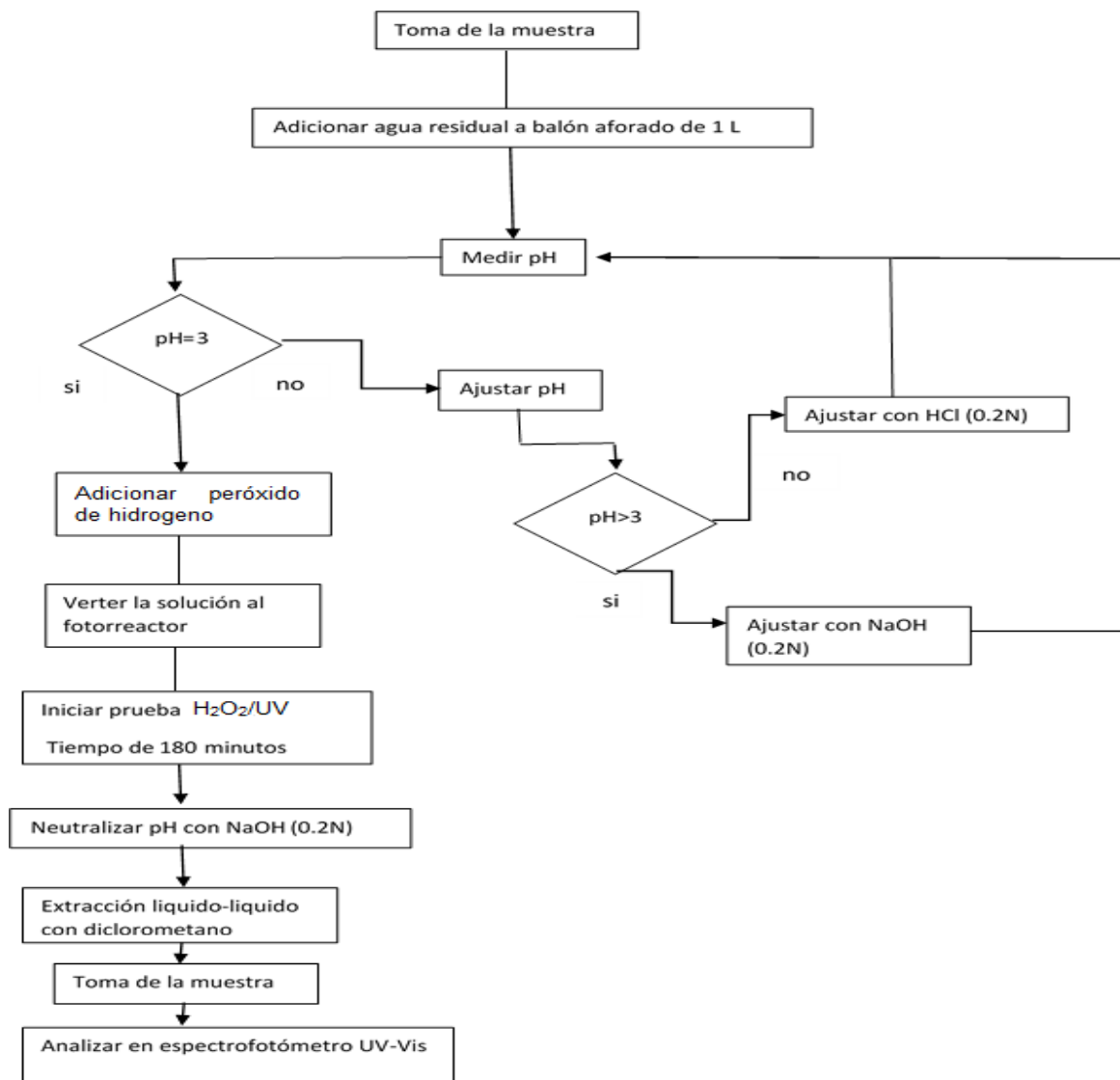
¹⁰⁵ *Ibíd*, p. 135.

¹⁰⁶ M.I. Badawya, MONTASER Y. Ghalyb, TAREK Gad-Allaha. Advanced oxidation processes for the removal of organophosphorus pesticides from wastewater. En: Desalination. Septiembre, 2005. vol. 194. p. 167-168

¹⁰⁷ *Ibíd*, p. 135.

3.2.4.5 Metodología para tratamiento H₂O₂-UV. Se realizó la toma de muestras de un tratamiento previo que investiga el efecto del clorpirifós en la población de camarones en un balón aforado de 1L, posteriormente se agitó la muestra durante 5 minutos para homogenizarla, a continuación. Posteriormente se adicionó el peróxido de hidrogeno. A continuación, se llenó el fotorreactor con la muestra y se cerraron las válvulas de entrada y salida, se agito una vez más y se repitió la agitación manual cada 10 minutos durante el tiempo estimado de 180 minutos. Terminado el tiempo de reacción se neutralizo la solución con NaOH (0.2N) hasta llegar a un pH de 7 logrando así la precipitación del hierro. Una vez ajustado el pH se extrajo el clorpirifós del agua por medio de diclorometano (extracción liquido-liquido) separando el clorpirifós de la matriz acuosa para tomar la muestra final y medir la concentración final del clorpirifós en el espectrofotómetro.

Diagrama 3. Procedimiento Pruebas Preliminares H₂O₂-UV.



3.3 ENSAYOS PRELIMINARES

Con el fin de determinar cuál de los tres procesos de oxidación avanzada es más eficiente en cuanto a la remoción de clorpirifós, se realizó una serie de ensayos preliminares.

Tabla 7. Condiciones de experimentación para cada método de oxidación avanzada

Tratamiento	pH	Tiempo	Temperatura	Ensayo 1		Ensayo 2		Ensayo 3	
				H ₂ O ₂	Fe ⁺²	H ₂ O ₂	Fe ⁺²	H ₂ O ₂	Fe ⁺²
Fenton	3.0	45 min	27°C	540 ppm	2.5 ppm	1080 ppm	5 ppm	2160 ppm	10 ppm
Foto-Fenton	3.0	180 min	27°C	540 ppm	2.5 ppm	1080 ppm	5 ppm	2160 ppm	10 ppm
UV/H ₂ O ₂	-	180 min	27°C	540 ppm	-	1080 ppm	-	2160 ppm	-

Fuente: elaboración propia.

Para cada método se establecieron las condiciones de experimentación registrados en la **Tabla 7** con base en la bibliografía recopilada en la **sección 3.2**. Una vez se determine el método más efectivo se procede a evaluar un diseño de experimentos. Las concentraciones de reactivos como se mencionó anteriormente fueron determinadas de acuerdo a investigaciones que presentaban métodos, condiciones y contaminantes similares^{108,109,110}. Se realizaron tres ensayos por cada método para evaluar si el aumento de las concentraciones tanto de peróxido como de ion ferroso aumentarían la eficiencia de cada tratamiento, para ello se propuso aumentar y disminuir las cantidades de las concentraciones de los reactivos progresivamente manteniendo la relación 1:1.

3.3.1. Medición del pH. La medida de pH se realizó con un pH-metro HANNA Edge multiparámetro (**Ver Anexo D**) equipado con electrodo específico, calibrado con dos disoluciones patrón de pH 4 y 7 respectivamente.

¹⁰⁸ AZNATE Luis Alfredo, CERRO Onix Jose y BENITEZ Angel. Degradación Por Fotocatálisis Homogénea (Foto-Fenton) De Efluentes Líquidos Contaminados Con Residuos De Fenol. Trabajo de grado Ingeniería Química. Cartagena, Bolívar. Universidad de Cartagena. 2013. p.46.

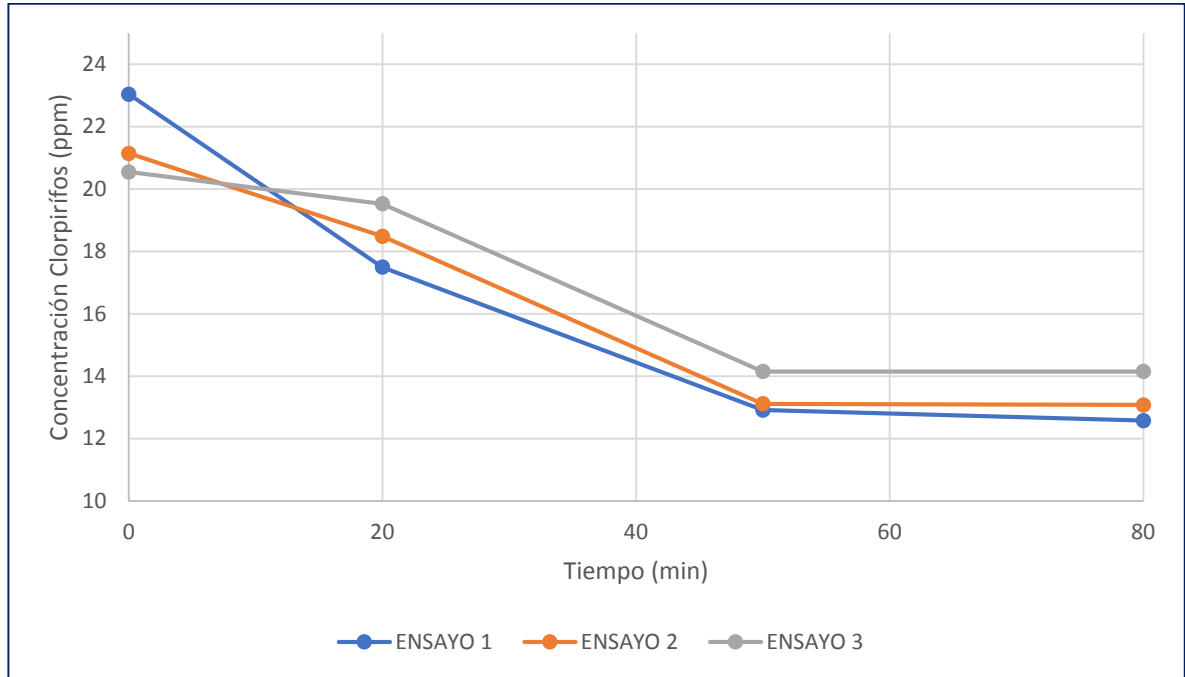
¹⁰⁹ GADELHA André, PEREIRA Jefferson, TOME Juliene, DE KEUKELEIRE Denis, DUARTE Maíra y FERREIRA Ronaldo. Degradation of the Pesticide Chlorpyrifos in Aqueous Solutions with UV/H₂O₂: Optimization and Effect of Interfering Anions. En: Journal of Advanced Oxidation Technologies. Enero, 2014. Vol. 14. p.134-135.

¹¹⁰ CRUZ-GONZÁLEZ Germán, JULCOUR Carine y JÁUREGUI-HAZAI Ulises. El Estado actual y perspectivas de la degradación de pesticidas por procesos avanzados de oxidación. En: Revista Cubana de química. Diciembre, 2017. vol.29. p.500-501.

3.3.2 Resultados de los tratamientos preliminares

3.3.2.1 Ensayos del tratamiento Fenton

Gráfica 1. Disminución de la concentración de Clorpirifós tratamiento Fenton.



En la **Gráfica 1** se observa una disminución de la concentración de clorpirifós durante el tratamiento Fenton. La tendencia en los tres ensayos es similar, es en el intervalo de tiempo (20-50) min que se observa el mayor cambio en el porcentaje de reducción del plaguicida, resultados que concuerdan con el estudio realizado por Kang y YubHwagan¹¹¹, en el que se estimó un tiempo de remoción máximo de 60 min.

En contraste con el estudio anteriormente mencionado, se logró obtener un porcentaje de reducción similar (45% aproximadamente) utilizando una menor cantidad de peróxido de hidrógeno, asegurando así un uso eficiente de este reactivo. Dicho comportamiento también se evidenció en el estudio realizado por Barbusiński y Filipek¹¹², quienes concluyeron que un aumento en las dosis de los reactivos no significa una mejoría en los resultados, este fenómeno podría explicarse debido a que en ausencia de sustratos orgánicos los iones ferrosos atacan el radical hidroxilo dominante disminuyendo así su efectividad.

En cuanto a los porcentajes de remoción para los ensayos 1, 2 y 3 son 31.12%, 38.11% y 45.50% respectivamente. Resultados similares, bajo las mismas

¹¹¹ KANG Yun Whan y YUB HWANG Kyung. Effects Of Reaction Conditions On The Oxidation Efficiency In The Fenton Process. En: sciencedirect. Julio, 2000.vol.34.p.4.

¹¹² BARBUSIŃSKI K. y FILIPEK K. Use of Fenton's Reagent for Removal of Pesticides from Industrial Wastewater. En: Polish Journal of Environmental Studies. Febrero, 2001. Vol. 10, No. 4.p.209-210.

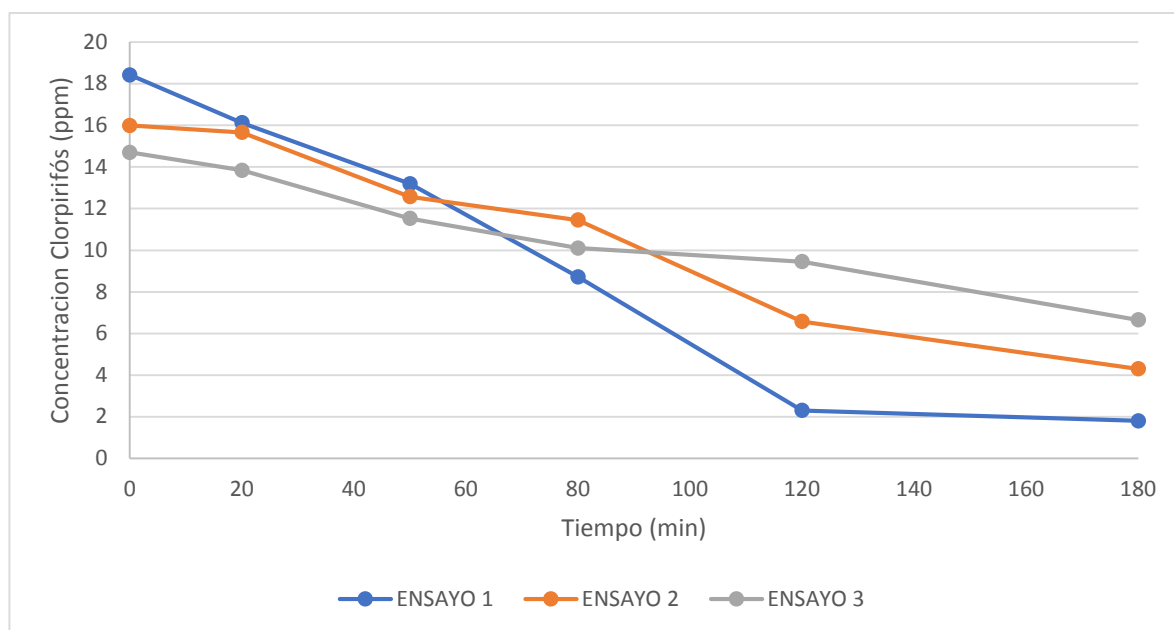
condiciones han sido reportados por Montaser, Ghalyb, Tarek y Gad-Allaha¹¹³, además de Zhu, Wang, Gao, Fan, Zhou y Fang¹¹⁴; quienes lograron una remoción máxima para plaguicidas organofosforados, tratados con proceso Fenton del 54 % y 52%.

El tratamiento Fenton presenta una tasa de degradación de clorpirifós considerable que se evidencia significativamente en el Ensayo 1, ya que en este se observa una disminución de concentración de 23,038 ppm hasta 12,578 ppm lo cual contrasta con su aplicación sencilla y bajo costo comparado con los métodos que necesitan de irradiación UV pero para efectos prácticos como el cumplimiento de normas legales, que establecen un mínimo de 0.1 ppm como límite de concentración de clorpirifós este porcentaje no es suficiente para dar cumplimiento a estos parámetros.

También se puede concluir de la Grafica 1. Que el aumento en las concentraciones del reactivo no significa un aumento en la eficiencia lo cual concuerda con lo reportado Barbusiński y Filipek¹¹⁵.

3.3.2.2 Ensayos del Tratamiento Foto-Fenton

Gráfica 2. Disminución de la concentración de Clorpirifós tratamiento Foto-Fenton.



¹¹³BADAWYA, MONTASER Ghalyb y GAD-ALLAHA Tarek A. Advanced oxidation processes for the removal of organophosphorus pesticides from wastewater. En: Sciencedirect. Junio, 2006.vol.194.p.170-171.

¹¹⁴ZHU Changyin, ZHU Fengxiao, WANG Fuwang, GAO Juan, FAN Guangping, ZHOU Dongmei y FANG Guodong. Comparison of Persulfate Activation and Fenton Reaction in Remediating an Organophosphorus Pesticides-Polluted Soil. En: Sciencedirect. Junio, 2017.vol.27.p.468-469.

¹¹⁵BARBUSIŃSKI K. y FILIPEK K. Use of Fenton's Reagent for Removal of Pesticides from Industrial Wastewater. En: Polish Journal of Environmental Studies. Febrero, 2001. Vol. 10, No. 4.p.209-210.

En la **Gráfica 2** se observa una disminución aún más acentuada respecto al método Fenton en cuanto a concentración de clorpirifós, se evidencia desde el inicio del tratamiento que su efecto es casi inmediato debido a la catálisis producida por el hierro, en conjunto con la fotólisis de iones complejos Fe^{+3} y radicales hidroxilo. Estudios similares realizados por Montaser, Ghalyb, Tarek y Gad-Allaha¹¹⁶ demostraron que en contraste con tratamientos Fenton cuando la reacción era irradiada en presencia de peróxido de hidrógeno, la luz ultravioleta reduce la especie Fe^{+3} , produciendo a su vez nuevos radicales OH.

Durante el tratamiento Foto-Fenton el experimento que presenta el mayor porcentaje de remoción es el **Ensayo 1**, dando a entender que las mejores condiciones para efectuar este proceso son: pH 3, $\text{Fe}^{+2} = 2.5$ (ppm), $\text{H}_2\text{O}_2 = 540$ (ppm), $T = 27^\circ\text{C}$, tiempo de exposición UV 180 min y agitación en intervalos de 10 min. El máximo porcentaje de degradación alcanzado en esta etapa de la investigación es del **90,25%** llegando a un mínimo de concentración de **1,796 ppm**, valor que es soportado por antecedentes bibliográficos, como el expuesto por Gonzales, Carine y Jáuregui-Haza¹¹⁷, quienes bajo condiciones similares obtuvieron un máximo de eliminación del contaminante del 95%, con un tiempo de tratamiento de 120 minutos con tratamiento Foto-Fenton.

Una vez terminado el tiempo de experimentación para el **Ensayo 1** (180 minutos) se observó que el pesticida se seguía degradando, por lo que se puede proyectar la disminución de la concentración del plaguicida aumentando la variable tiempo y manteniendo las mismas condiciones de temperatura, pH, agitación y exposición a luz ultravioleta.

Para los **Ensayos 2 y 3** se observa que un aumento en las cantidades de reactivo Fenton no redundan en un aumento de la eficiencia del tratamiento, a pesar de la energía suministrada por la luz ultravioleta. Es por esta razón que para estos experimentos se obtienen porcentajes de remoción menores al Ensayo 1 de clorpirifós del **73,12% y el 54,75%** respectivamente. En la consulta bibliográfica realizada se observó que las investigaciones están orientadas a determinar en qué relación $\text{H}_2\text{O}_2/\text{Fe}^{+2}$ se obtiene una mayor reducción del contaminante Elmolla y Chaudhuri¹¹⁸, sin embargo, no se reporta por qué bajo la misma relación molar, pero alterando las cantidades de los reactivos no se obtienen resultados similares en los experimentos.

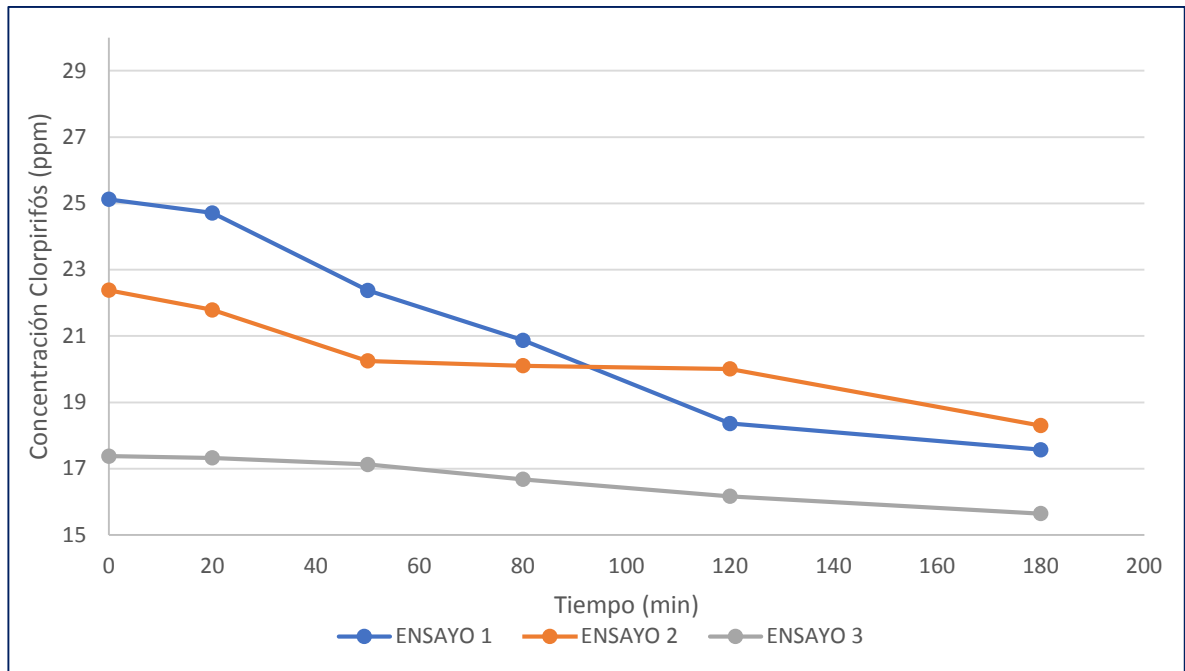
¹¹⁶ BADAUYA, MONTASER Ghalyb y GAD-ALLAHA Tarek A. Advanced oxidation processes for the removal of organophosphorus pesticides from wastewater. En: Sciencedirect. Junio, 2006.vol.194.p.169-170.

¹¹⁷ CRUZ-GONZÁLEZ Germán, JULCOUR Carine y JÁUREGUI-HAZAI Ulises. El Estado actual y perspectivas de la degradación de pesticidas por procesos avanzados de oxidación. En: Revista Cubana de química. Diciembre, 2017.vol.29.p.500.

¹¹⁸ ELMOLLA Emad S. y CHAUDHURI Malay. Comparison of different advanced oxidation processes for treatment of antibiotic aqueous solution. En: Desalination. Marzo, 2010.vol.256.p.45-46.

3.3.2.3 Ensayos del Tratamiento UV/H₂O₂

Gráfica 3. Disminución de la concentración de Clorpirifós tratamiento UV/H₂O₂.



En la **Gráfica 3** se observa que no hubo una alta reducción en la concentración de clorpirifós durante el tratamiento UV-H₂O₂. El **Ensayo 1** es el mejor de los tres experimentos con un **30,007%** de remoción de contaminantes alcanzando las 17,567 ppm, lo anterior se debe a que este proceso se realizó con la concentración más baja de peróxido de hidrogeno H₂O₂ = 540 (ppm), como lo menciona Gonzales, Carine y Jáuregui-Haza¹¹⁹ un exceso de peróxido produce reacciones competitivas que generan un efecto inhibitorio para la degradación.

Respecto al **Ensayo 2** que se desarrolló con la concentración sugerida por la revisión bibliográfica H₂O₂ = 1080 (ppm) se evidencia una tasa de remoción del **18,24%**, en el Ensayo 3 se obtuvo un máximo nivel de remoción del **9,973%** llegando a un mínimo de concentración de clorpirifós de 15,643 ppm que es equivalente al porcentaje de remoción que produce la Fotodegradación en ausencia de reactivos, para este último caso la única fuente de degradación se debe a la energía entregada por la lámpara UV.

Realizando la comparación de los tres métodos, se demuestra que la presencia del catalizador es decir el ion Fe⁺² en el tratamiento es fundamental para acelerar la producción de radicales hidroxilo, lo que permite la degradación del compuesto organofosforado clorpirifós, lo anterior permite establecer que el método UV-

¹¹⁹ CRUZ-GONZÁLEZ Germán, JULCOUR Carine y JÁUREGUI-HAZAI Ulises. El Estado actual y perspectivas de la degradación de pesticidas por procesos avanzados de oxidación. En: Revista Cubana de química. Diciembre, 2017.vol.29.p.502.

peróxido de hidrógeno en el menos conveniente para llevar a cabo este tratamiento a escala piloto.

Para evaluar los métodos en cada prueba, se determinó la eficiencia (% de disminución) teniendo en cuenta la concentración inicial y final de clorpirifós, las mediciones de concentración se hicieron por triplicado. En la **Ecuación 2.**, se muestra la disminución y remoción de clorpirifós en el agua obteniendo los siguientes resultados.

Ecuación 2. Cálculo de Eficiencia

$$\eta = \left(1 - \frac{[\text{clorpirifós}]_{\text{final}}}{[\text{clorpirifós}]_{\text{inicial}}} \right) * 100\%$$

Tabla 8. Eficiencia de las Pruebas Preliminares.

Método	ensayo	Fe ⁺² (ppm)	H ₂ O ₂ (ppm)	Clorpirifós	Eficiencia
				(ppm)	
				Inicial - final	
Fenton	1	2.5	540	23,038– 12,578	45,40%
	2	5	1080	21,140– 13,083	38,11%
	3	10	2160	20,545– 14,151	31,12%
Foto-Fenton	1	2.5	540	18,428 – 1,796	90,25%
	2	5	1080	15,992– 4,2976	73,12%
	3	10	2160	14,706 – 6,653	54,75%
UV/H ₂ O ₂	1	2.5	540	25,123– 17,567	30,007%
	2	5	1080	22,381– 18,298	18,41%
	3	10	2160	17,376– 15,643	9,973%

Desv.Estandar (σ) = 0,290

El cambio en la eficiencia del proceso depende de las cantidades de H₂O₂ y Fe⁺² utilizado, a concentraciones altas del reactivo Fenton se tienen elevados niveles de iones hierro reaccionando con los radicales hidroxilos¹²⁰, evitando así la oxidación de clorpirifós. Cuando el peróxido de hidrógeno se encuentra en exceso y en

¹²⁰ M.I, Badawya; MONTASER, Y. Ghalyb y TAREK, A. Gad-Allaha. Advanced oxidation processes for the removal of organophosphorus pesticides from wastewater. En: ScienceDirect. Vol. 194. No. 1-3 (10 de junio 2006); Pg.166-175.

presencia de radiación UV hace que pocos radicales hidroxilos actúen sobre los compuestos químicos puesto que se producirá peróxido de hidroxilo (compuesto poco oxidante) y agua¹²¹;

El método más eficiente de los tres evaluados es el tratamiento Foto-Fenton, lo cual concuerda con resultados evaluados en la revisión bibliográfica al inicio de este capítulo llegando a un máximo porcentaje de degradación de **90,25 %** a una concentración de **1,796 ppm**. A pesar de los altos niveles de degradación que se alcanzaron en los ensayos preliminares, ninguno de los tres métodos evaluados alcanzo el limite exigido en la resolución 631 de 2015 es decir un 0.1 ppm de concentración de clorpirifós.

¹²¹CRUZ GONZÁLEZ, German; JULCOURL, Carine y JÁUREGUI- HAZAL. El Estado actual y perspectivas de la degradación de pesticidas por procesos avanzados de oxidación. En: Revista cubana de química. Diciembre, 2017.Vol. 29. No. 501.

4. DISEÑO EXPERIMENTAL

De acuerdo con los ensayos preliminares desarrollados en el capítulo anterior, se pudo determinar que el método con el que se obtuvo un mayor porcentaje de remoción de clorpirifós es el tratamiento Foto-Fenton. Las concentraciones de Fe^{+2} y H_2O_2 que presentaron una mejor eficiencia fueron 2.5 ppm y 540 ppm respectivamente; El diseño factorial intenta establecer básicamente como la interacción entre dos factores, los cuales son la concentración de Fe^{+2} y H_2O_2 , influyen significativamente en la eficiencia en cuanto a degradación del clorpirifós¹²², con el fin de obtener conclusiones objetivas y validas sobre el proceso.

Se realizó un diseño factorial (2^2) con una réplica, dando como resultado un total de 8 experimentos. En la **Tabla 9**, se especifican las variables independientes, los parámetros que intervienen y la variable dependiente del diseño a realizar, para la concentración del clorpirifós se tomó la muestra M6 (**numeral 2.2.1**):

Tabla 9. Variables del proceso Foto-Fenton

Tipo de Variable	Nombre	Valor	Unidades
Parámetros que intervienen	Tiempo	3	Horas
	pH	2.8 - 3.1	
	Temperatura	27	°C
	Radiación UV	289	Nm
Independiente	Concentración de Fe^{+2}	2.5 – 5	Ppm
	Concentración de H_2O_2	540 - 1080	Ppm
Dependiente	Concentración de clorpirifós	20,545	Ppm

Fuente: elaboración propia.

Con los ensayos preliminares se establecieron dos niveles para cada uno de los factores del diseño experimental, el primer factor corresponde a la concentración de Fe^{+2} el cual se va a trabajar con unos valores de 5 ppm y 2.5 ppm, así mismo el segundo factor corresponde a la concentración de H_2O_2 en la cual se emplean los valores de 1080 ppm y 540 ppm, puesto que abarca todos los datos que presentaron resultados eficientes en la depuración de agua residual Aplicando la oxidación avanzada. La degradación del contaminante se favorece, por lo general, con valores bajos de catalizador (Fe^{+2}) y oxidante. En el caso de que el oxidante (H_2O_2) sea suministrado en dosis muy altas, este se puede transformar en agua y oxígeno

¹²²TUHKANEN, T. Advanced oxidation processes for water and wastewater treatment. En: Springer. (September 2015).

debido a la acción de la radiación UV. De esta forma, se disminuiría la cantidad de radicales libres hidroxilos, responsables de la oxidación fotoquímica¹²³.

En el diseño de experimentos, los niveles están categorizados en posiciones de menor a mayor número, siendo la concentración de Fe⁺² de 2.5ppm y la concentración de H₂O₂ de 540ppm el nivel bajo, así como, la concentración de Fe⁺² de 5ppm y la concentración de H₂O₂ de 1080 ppm, como se indica en la **Tabla 10**.

Tabla 10. Distribución de los niveles de los factores del diseño de experimentos.

Factor	Bajo	Alto
Fe ⁺² (ppm)	2,5	5
H ₂ O ₂ (ppm)	540	1080

Fuente: elaboración propia.

Una vez establecidos los niveles a utilizar por cada factor, con sus respectiva replica, se realiza el análisis, con el fin de obtener cada una de las combinaciones posibles de los niveles para este diseño de experimentos, este se detalla en la **Tabla 11**.

Tabla 11. combinaciones posibles de los niveles del diseño de experimentos.

Experimento	Fe ⁺² (ppm)	H ₂ O ₂ (ppm)
1	2,5	540
2	5	540
3	2,5	1080
4	5	1080
5	2,5	540
6	5	540
7	2,5	1080
8	5	1080

Fuente: elaboración propia.

La metodología utilizada para la realización de los experimentos es la descrita en la **sección 3.2.3.5**. Así como los materiales y equipos.

¹²³ Ibid.,p. 2.

4.1 RESULTADOS DEL DISEÑO EXPERIMENTAL

Con los porcentajes de degradación de clorpirifós obtenidos en cada uno de los experimentos (**Tabla 12**), se decide realizar el análisis de varianza del diseño experimental, así como el análisis de las gráficas de: efectos principales, superficie respuesta y de contorno con el fin de conocer el efecto de las variables del diseño experimental en el modelo realizado.

Tabla 12. Porcentajes de remoción de clorpirifós obtenidos en el diseño experimental.

Análisis	% Degradación de Clorpirifós
E1	88,2204
E2	84,5700
E3	76,9500
E4	79,9400
E5	88,2283
E6	83,1400
E7	77,4700
E8	80,9200

4.1.1 Análisis de varianza del diseño experimental.

Tabla 13. Análisis de varianza para el porcentaje de degradación de clorpirifós en el diseño experimental.

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	3	133,707	44,569	108,85	0,000
Lineal	2	104,908	52,454	128,10	0,000
Fe ⁺²	1	0,661	0,661	1,61	0,273
H ₂ O ₂	1	104,247	104,247	254,59	0,000
Interacciones de 2 términos	1	28,799	28,799	70,33	0,001
Fe⁺²*H₂O₂	1	28,799	28,799	70,33	0,001
Error	4	1,638	0,409		
Total	7	135,345			

Fuente. Minitab 18 Statistical software

En la **Tabla 13**, se observa el efecto de las variables escogidas para el diseño experimental (Fe^{+2} y H_2O_2), determinando que la concentración de peróxido de hidrogeno y la interacción peróxido de hidrogeno-hierro, presentan efectos significativos en el tratamiento, a diferencia de la concentración de Fe^{+2} , el valor de p (valor de significancia) para esta interacción es mayor al nivel de significancia ($p < \alpha$, siendo $\alpha = 0,05$), concluyendo así que estos 2 efectos (H_2O_2 , $\text{Fe}^{+2}/\text{H}_2\text{O}_2$) son estadísticamente significativos e influyen en el porcentaje de degradación de clorpirifós.

La ecuación con el mejor ajuste encontrado según los parámetros establecidos en el diseño, para el porcentaje de degradación de clorpirifós es:

Ecuación 3. Porcentaje de degradación de clorpirifós.

$\% \text{ Degradación clorpirifós} = 111,20 - 2,614 \text{ Fe}^{+2} - 10,335 \text{ H}_2\text{O}_2 + 0,922 \text{ Fe}^{+2} * \text{H}_2\text{O}_2$

El valor de R^2 (precisión del modelo) fue de 0,9879; cuanto más cerca se sitúa de uno su valor, mayor será el ajuste del modelo.

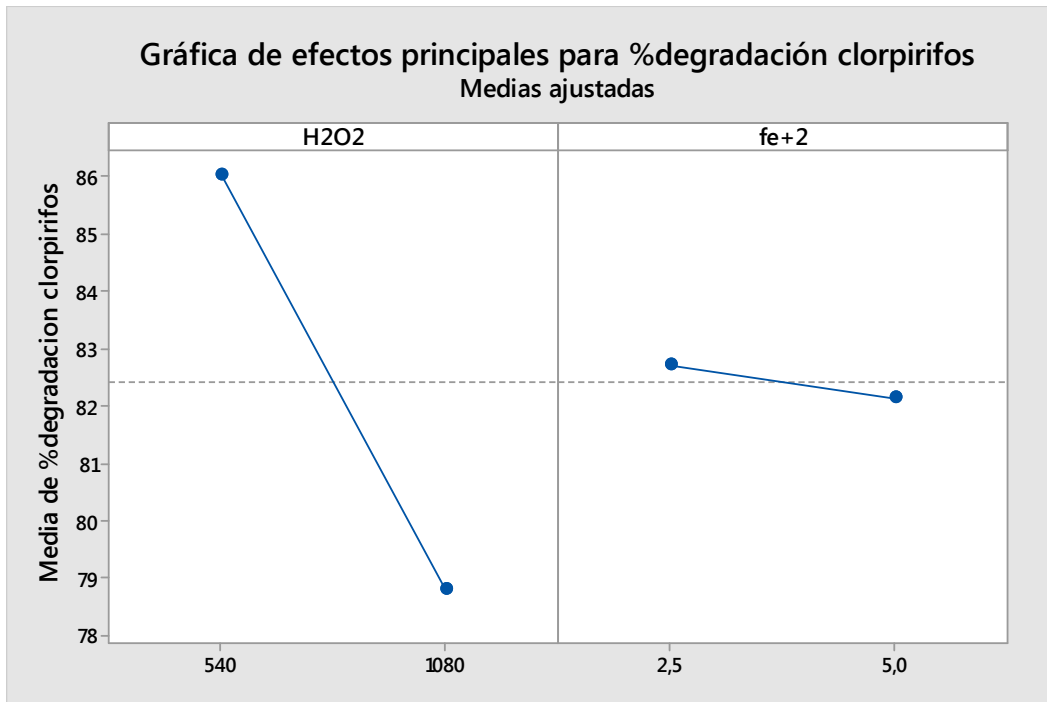
Además de esto el valor p del modelo es menor que el nivel de significancia ($\alpha = 0,05$), lo cual indica que el modelo analizado se ajusta a los datos obtenidos.

La variación observada en la respuesta debida a los factores permite evidenciar que a partir del análisis de varianza realizado las variables evaluadas tienen influencia sobre el tratamiento de las aguas residuales del laboratorio, sin embargo, la relación entre la dosis de ambos reactivos debe mantener una relación estequiometría para evitar que la generación de radicales hidroxilos se vea afectada negativamente¹²⁴.

4.1.2 Análisis de la gráfica de efectos principales para el porcentaje de degradación de clorpirifós. En la gráfica 4 se observa el efecto que tienen los factores escogidos (Concentración Fe^{+2} y Concentración de H_2O_2) y sus niveles con respecto al porcentaje de degradación. El factor que más influencia tiene en la degradación de clorpirifós es la concentración de H_2O_2 ya que el nivel bajo de este factor (540 ppm) genera un aumento en el porcentaje de degradación. La concentración de Fe^{+2} no afecta significativamente el porcentaje de degradación ya que en los 2 niveles escogidos (2.5 ppm y 5ppm) no se logra ver un aumento significativo en el porcentaje de remoción.

¹²⁴ HUANG, Yao-Hui and HUNG, Ta-Chen. Degradation of phenol using low concentration of ferric ions by the Photo-Fenton process. En: Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers. Vol. 41 No. 6 (November 2010); Pg. 699-704.

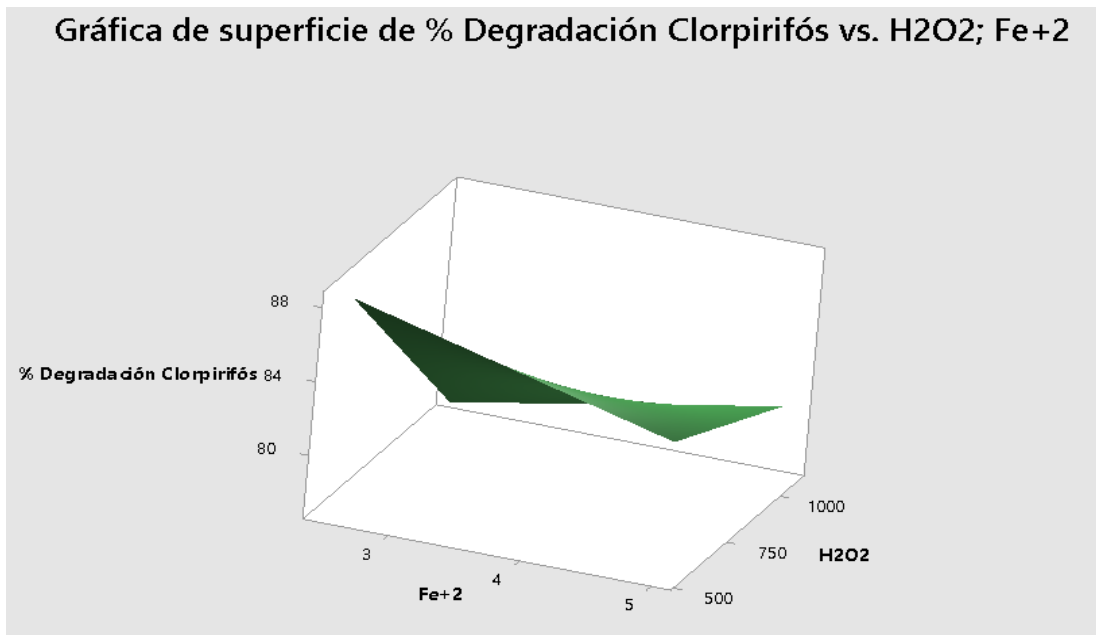
Gráfica 4.Efectos para el porcentaje de degradación de clorpirifós.



Minitab 18 Statistical software

4.1.3 Análisis de las gráficas de superficie respuesta y de contorno para la degradación de clorpirifós.

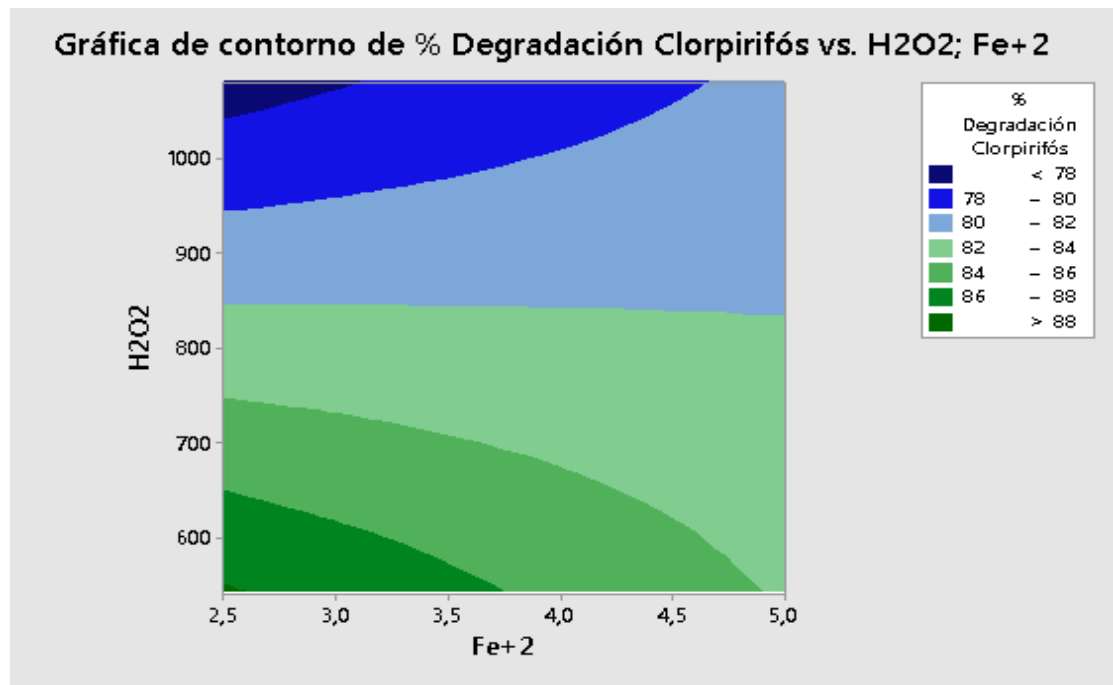
Gráfica 5.Superficie respuesta.



Las gráficas de superficie y de contorno (Graficas 5 y 6) muestran cómo influyen los factores (Concentración de Fe^{+2} y la concentración de H_2O_2) con respecto a la variable respuesta (% degradación). Por ejemplo, si la concentración de Fe^{+2} es el nivel bajo y la concentración de H_2O_2 es el nivel alto (Fe^{+2} : 5 ppm y H_2O_2 : 1080 ppm) el porcentaje de degradación llega a un valor de 76,95% siendo la declinación más notoria en la gráfica, por cual se debe evitar esta interacción ya que afecta a la degradación del clorpirifós presente en el agua, el peróxido de hidrogeno en exceso puede reaccionar produciendo agua y oxígeno, reduciendo así la cantidad de radicales hidroxilos que son los responsables de la reacción¹²⁵. Por el contrario, con interacciones con los niveles más bajos de cada factor (Fe^{+2} : 2,5 ppm y H_2O_2 : 540 ppm) el porcentaje de degradación aumenta.

A mayores dosis de catalizador (Fe^{+2}) se favorece la velocidad de reacción, aunque un aumento excesivo puede frenar la oxidación foto catalítica. Este comportamiento ha sido reportado en trabajos previos (Degradation of phenol using low concentration of ferric ions by the photo-Fenton process)¹²⁶.

Gráfica 6. Contorno de % degradación Vs Concentración de H_2O_2 y Concentración de FeSO_4 .



Fuente. Minitab 18 Statistical software

¹²⁵ TUHKANEN, T. Advanced oxidation processes for water and wastewater treatment. En: Springer. (September 2015).

¹²⁶ HUANG, Yao-Hui and HUNG, Ta-Chen. Degradation of phenol using low concentration of ferric ions by the Photo-Fenton process. En: Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers. Vol. 41 No. 6 (November 2010); Pg. 699-704.

El diseño experimental efectuado para el método Foto-Fenton permitió evaluar los dos factores que se establecieron al principio de este capítulo, dando como resultado que la concentración de H_2O_2 tiene un efecto significativo en la degradación de clorpirifós, así como la interacción del H_2O_2 con el Fe^{+2} ya que el análisis estadístico ANOVA muestra que el valor p (valor de significancia) es menor a 0,05; por otro lado, la concentración de Fe^{+2} no afecta significativamente el porcentaje de degradación en comparación con el otro factor como se evidencia en el gráfico de efectos principales, aunque un aumento en la concentración del catalizador (Fe^{+2}) puede tener efectos negativos, esto puede ser por el agotamiento del peróxido de hidrogeno, generador de los radicales hidroxilos presentes en la mezcla reaccionante. Además, con las gráficas de superficie y de contorno queda en evidencia que la mejor interacción entre estos 2 factores es: **(Fe^{+2} : 2,5 ppm y H_2O_2 : 540 ppm).**

Aunque el objetivo del proyecto es evaluar cuál de los 3 métodos de oxidación avanzada es mejor en cuanto a degradación de clorpirifós en agua residual, con el porcentaje de remoción alcanzado (**88,22%**), no es suficiente para lograr cumplir con los parámetros fijados en la resolución 631 de 2015 de ingredientes activos de plaguicidas de las categorías toxicológicas II, por lo tanto, se planteó un nuevo experimento (con su réplica) en donde se va a evaluar el tiempo con el objetivo de aumentar el porcentaje de remoción.

4.2 ANÁLISIS DE LA VARIABLE TIEMPO

Para la experimentación, se tuvieron en cuenta las concentraciones de los reactivos y la variable respuesta fue el porcentaje de degradación de clorpirifós. El tiempo en el cual transcurre el experimento juega un papel importante¹²⁷, este se tuvo en cuenta en el proceso como se observa en los ensayos 2 y 3 del tratamiento Foto-Fenton (**numeral 3.3.2.2**), pero se fijó como una variable dependiente para el desarrollo del diseño experimental.

De la experimentación se hicieron los siguientes cambios de condiciones:

- El sistema Fenton como se ha comentado anteriormente, depende del pH del medio de reacción. La velocidad de las reacciones tiende a ser máxima en un pH de 2.7.¹²⁸
- Se operó a la temperatura del laboratorio, aproximadamente 27°C
- El tiempo máximo estimado fue de 5 horas para el tratamiento completo.

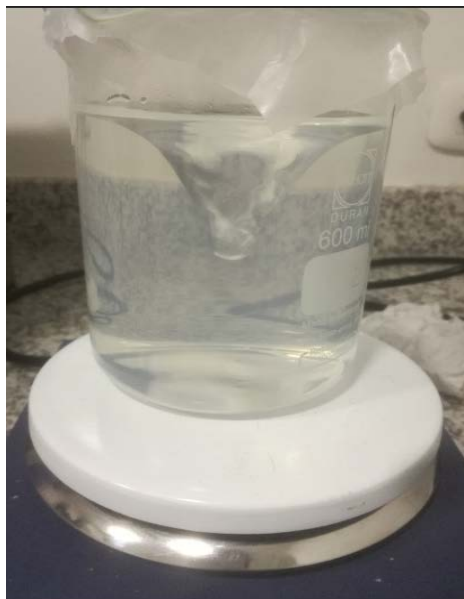
Se determinó la concentración inicial y final de clorpirifós en las muestras por medio de un espectrofotómetro UV, el cual tiene un límite de detección por encima de

¹²⁷ CHIOMA AFFAM, Augustine; CHAUDHURI, Malay and MUDA, Khalida. UV Fenton and sequencing batch reactor treatment of chlorpyrifos, cypermethrin and chlorothalonil pesticide wastewater. En: ScienceDirect. Vol. 93. (September 2014); Pg. 195-201.

¹²⁸ PIGNATELLO, Joseph J; OLIVEROS, Esther and MACKAY Allison. Advanced Oxidation Processes for organic Contaminant destruction based on the Fenton reaction and related chemistry. En: Environmental Science and Technology. Vol. 36. No. 1(2006); Pg. 1-84.

0,1ppm¹²⁹. Los reactivos (FeSO₄, H₂O₂) se adicionaron después de ajustar el pH como se muestra en la **Imagen 13**, debido a que el catalizador (Fe⁺²) presenta un mejor rendimiento en medio ácido.

Imagen 13. Adición del reactivo Fenton.



Fuente: elaboración propia

La metodología utilizada para la realización de los experimentos es la descrita la **sección 3.2.2.5**, Así como los materiales y equipos, teniendo presente que el tiempo de reacción en este caso es de **5 horas**.

4.2.1 Resultados del análisis de la variable tiempo. Los resultados obtenidos se resumen en la tabla 14 donde se evidencia la disminución en la concentración en las pruebas uno (M1) y dos (M2) llegando a valores mínimos de 0,659 y 0,673 ppm respectivamente.

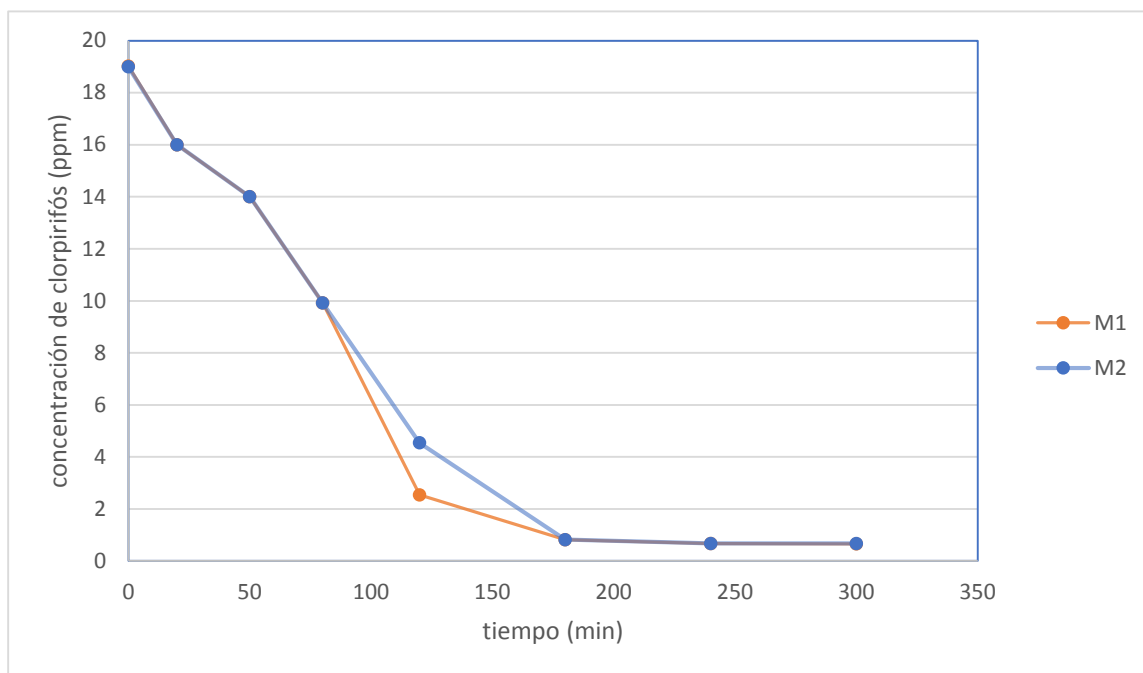
Tabla 14. Porcentajes de degradación de clorpirifós en agua residual, experimentación.

Método	Prueba	Fe ⁺² (ppm)	H ₂ O ₂ (ppm)	Clorpirifós	%degradación de clorpirifós
				(ppm) Inicial-final	
Foto- Fenton	M1	2.5	540	19,023 -0,659	96,53%
	M2	2.5	540	18,998 – 0,673	96,45%

¹²⁹ THERMO SCIENTIFIC. Espectrofotómetro evolution 201 disponible en: <<http://www.thermofishersci.in/lit/Thermo%20Scientific%20Evolution%20201.pdf>>.

La gráfica 7, muestra el comportamiento de la concentración de clorpirifós con respecto al tiempo. El tiempo de reacción fue de 5 horas (300 minutos), aunque se puede visualizar que después de la cuarta hora (240 minutos) la reacción no avanza significativamente debido al consumo del hierro.

Gráfica 7. Disminución de la concentración de clorpirifós Prueba M1



En la gráfica anterior, Se observa que el tiempo es una variable determinante, altas concentraciones del contaminante reducen la capacidad del peróxido de hidrogeno de absorber la radiación¹³⁰, por lo tanto, a mayor tiempo de irradiación hay un aumento en la eficiencia del proceso, puesto que el porcentaje de remoción es directamente proporcional a este¹³¹, además de ello se evidencia que a partir de la tercera hora la pendiente que representa la disminución de clorpirifós es prácticamente una línea recta que no presenta cambios significativos. Este comportamiento se evidencia en el artículo *“UV Fenton and sequencing batch reactor treatment of chlorpyrifos, cypermethrin and chlorothalonil pesticide*

¹³⁰ OLIVEIRA GADELHA, André; RIBEIRO PEREIRA, Jefferson; TOME DE OLIVEIRA, Juliene; KEUKELEIRE, Denis; SALDANHA, Maíra. Degradation of the Pesticide Chlorpyrifos in Aqueous Solutions with UV/H₂O₂: Optimization and Effect of Interfering Anions. En: Journal of advanced oxidation technologies. Vol. 17. No 1 (January 2014); Pg.133-137.

¹³¹ CHIOMA AFFAM, Augustine; CHAUDHURI, Malay and MUDA, Khalida. UV Fenton and sequencing batch reactor treatment of chlorpyrifos, cypermethrin and chlorothalonil pesticide wastewater. En: ScienceDirect. Vol. 93. (September 2014); Pg. 195-201.

*wastewater*¹³², en el cual, la concentración del plaguicida clorpirifós se mantiene constante a través del tiempo a concentraciones menores a 1 ppm.

Para dar veracidad a esto se realizó un análisis de HPLC con espectroscopia de masa para evaluar el comportamiento de la **prueba M1** a través del tiempo y validar los datos obtenidos por medio de la espectrofotometría UV (**VER ANEXO C**), con el fin aumentar el porcentaje de degradación obtenido en las pruebas desarrolladas en el diseño experimental.

A pesar de la disminución que logra la oxidación avanzada, los valores de clorpirifós siguen estando por encima del límite máximo permitido por la Resolución 631 de 2015, por lo tanto, es pertinente evaluar un tratamiento posterior para lograr la disposición del vertimiento y cumplir con la normatividad, o realizar una disposición adecuada del residuo.

¹³² CHIOMA AFFAM, Augustine; CHAUDHURI, Malay and MUDA, Khalida. UV Fenton and sequencing batch reactor treatment of chlorpyrifos, cypermethrin and chlorothalonil pesticide wastewater. En: ScienceDirect. Vol. 93. (September 2014); p. 195-201.

5. REQUERIMIENTOS TÉCNICOS

Para el desarrollo del tercer objetivo propuesto en este proyecto, se presentan requerimientos técnicos para realizar el tratamiento de oxidación avanzada Foto-Fenton a escala piloto en el laboratorio de investigaciones agroquímicas de la universidad de Cartagena. Se han especificado entre otros el procedimiento para realizar el tratamiento, equipos involucrados, etapas del proceso y criterios técnicos que permiten sentar las bases para el desarrollo de una planta piloto que sea lo más eficiente dejando a criterio de la universidad su posible ejecución.

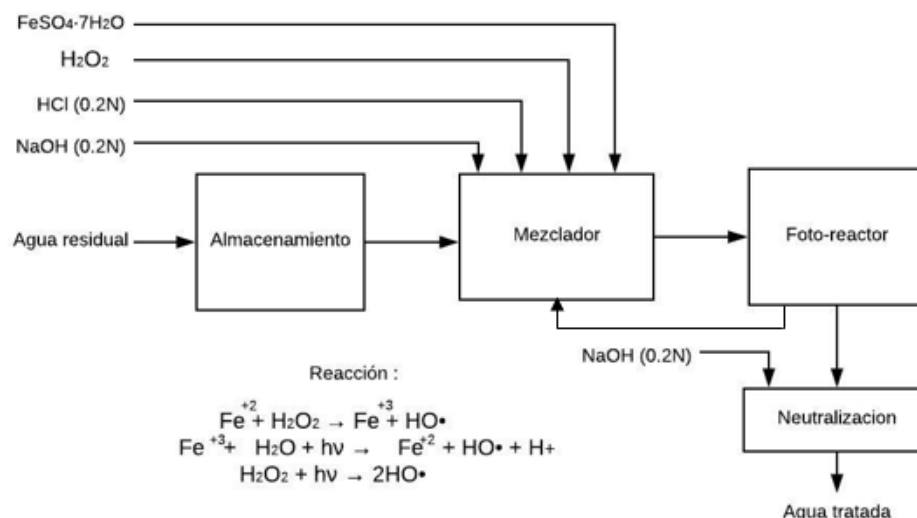
A partir de los resultados encontrados a nivel laboratorio, y por lo investigado en la literatura, se plantearon etapas para un proceso escala piloto con condiciones que permitan la degradación de este plaguicida en el agua residual producida por el GIA, definiendo equipos, materias primas y recomendaciones referenciadas en las observaciones del proceso experimental.

5.1 TRATAMIENTO FOTO-FENTON PARA AGUA CONTAMINADA CON CLORPIRIFÓS

5.1.1 Etapas del proceso. El proceso de oxidación avanzada Foto-Fenton para el tratamiento de agua contaminada con clorpirifós comprende una serie de etapas en donde se ajustan condiciones de operación para que la eliminación del plaguicida sea eficaz. Inicialmente es necesario hacer la recolección de los vertimientos generados por el GIA en un tanque de almacenamiento, posteriormente se pasa a una etapa de ajuste de pH ácido para que la reacción Fenton se realice; este procedimiento puede realizarse en un tanque de mezclado junto con la adición de los reactivos, después de alcanzar la concentración de reactivos deseada se procede a la etapa principal del proceso en el Fotorreactor y finalmente se realiza una neutralización del efluente.

A continuación, en la **Figura 1**. Se muestra las etapas principales del proceso en la implementación del proceso Foto-Fenton para la degradación de clorpirifós a escala piloto en el laboratorio de investigaciones agroquímicas de la universidad de Cartagena.

Figura 1. Diagrama de bloques para tratamiento Foto-Fenton para agua contaminada con clorpirifós.



Fuente: elaboración propia

La secuencia que debe seguir el proceso de tratamiento de agua residual contaminada con clorpirifós es la siguiente:

- Se realiza la recolección de agua contaminada con clorpirifós en el tanque de almacenamiento. Estos vertimientos son provenientes de acuíferos donde se realizan investigaciones del impacto de este pesticida.
- Posteriormente desde el tanque de almacenamiento se distribuirá el agua contaminada con clorpirifós con una bomba centrífuga hacia un tanque donde se realiza el ajuste de pH que debe estar en un rango ácido entre 2.7 a 3.1 para esto se realiza un ajuste agregando la cantidad necesaria de ácido clorhídrico 0.2 N o de hidróxido de sodio 0.2 N manteniendo la mezcla agitada para garantizar la homogenización.
- Después de tener el agua contaminada con el pH ajustado para el tratamiento de oxidación avanzada esta se continúa mezclando con los reactivos Fenton que deben estar en una concentración de 2.5 ppm de Fe^{+2} y 540 ppm de H_2O_2 por cada litro de agua contaminada en todo el vertimiento, puesto que con estas concentraciones se obtuvieron los mejores resultados para el tratamiento durante el tiempo de 5 h.
- Después de tener el agua residual con la concentración deseada en el tanque de mezcla, con ayuda de una bomba centrífuga, se hace circular la mezcla de agua contaminada con reactivos por medio de una bomba centrífuga a través

del Foto-reactor, hasta que regrese al tanque de mezcla. Este proceso de recirculación busca que las partículas reaccionen con los radicales hidroxilos y favorezcan el tratamiento. Cuando el agua retorne al tanque de mezcla, se enciende la lampara de luz ultravioleta.

- Transcurrido el tiempo necesario de irradiación por último se desocupa por completo el Foto-reactor y el agua tratada pasa a un proceso de neutralización con NaOH, para su posterior disposición final.

5.1.2 Caudal de diseño. El diseño de proceso de las unidades de tratamiento debe basarse en el caudal máximo semanal producido¹³³. Para determinar el caudal del vertimiento, se llevaron a cabo mediciones de volumen generado durante el desarrollo de esta investigación en la que se determinó un caudal máximo de 10 litros, mientras que el caudal mínimo fue de 2.5 litros llegando a un promedio de 5.48 Litros por día (Sección 2.3). Con base en lo anterior se proyecta una producción de 40 litros semanales de vertimientos contaminados con clorpirifós en el laboratorio del GIA, se proponen ciclos de tratamiento de 4 días al mes, uno cada semana.

5.2 EQUIPOS Y MATERIALES

El tratamiento de oxidación avanzada Foto-Fenton no requiere de gran cantidad de materias primas, los reactivos Fenton Fe^{+2} y H_2O_2 son productos químicos de fácil manejo y alta disposición en el mercado, el ácido clorhídrico utilizado en el ajuste de pH es preparado a 0.2 N.

5.2.1 Tanque de almacenamiento. Para este tratamiento se seleccionó un tanque cilíndrico vertical de fondo plano¹³⁴ ya que se manejan un volumen inferior a los $4m^3$, teniendo en cuenta que estará a presión atmosférica y su geometría permite el almacenamiento de grandes volúmenes, para su construcción se requiere un material resistente a la corrosión como acero inoxidable 304.

Este tanque servirá para almacenamiento y homogenización del agua a tratar por lo que solo se tiene en cuenta el volumen de agua contaminada generado en el GIA 40 litros semanales, las dimensiones mínimas requeridas se determinaron bajo la relación altura/diámetro¹³⁵:

$$V_{\text{tanque}} = V_{\text{entrada}} * \text{Factor de Seguridad}$$

$$V_{\text{tanque}} = 40 L * (1.20)$$

$$V_{\text{tanque}} = 48 L$$

¹³³ Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio de Colombia. Reglamento del Sector Agua y Saneamiento Básico – RAS.2017.

¹³⁴ PETERS, Max S.; TIMMERHAUS, Klaus D.; WEST, Ronald E. Plant Design and Economics for Chemical Engineers. McGraw-Hill. 5ta edición, 2003. p. 971.

¹³⁵ ROMERO ROJAS. Jairo. Alberto. Tratamiento de Aguas Residuales Teoría y Principios de Diseño. Escuela Colombiana de Ingeniería. 1999. p. 1232

$$V \text{ tanque} = 0.048 \text{ m}^3$$

A continuación, se calcula el diámetro del tanque:

$$\begin{aligned} \text{Relacion} &= \frac{h}{D} = 1.5 \\ V \text{ tanque} &= \frac{\pi}{4} * D^2 * h \\ V \text{ tanque} &= \frac{\pi}{4} * D^2 * 1.5h \\ 0.048 \text{ m}^3 &= \frac{1.5\pi}{4} * D^3 \\ \sqrt[3]{\frac{4 * 0.048 \text{ m}^3}{1.5 \pi}} &= D = 0.344 \text{ m} \end{aligned}$$

Finalmente se despeja la altura de la relación con el diámetro calculado:

$$\begin{aligned} \frac{h}{D} &= 1.5 \\ \frac{h}{0.344 \text{ m}} &= 1.5 \\ h &= 1.5 * 0.344 \text{ m} \\ h &= 0.516 \text{ m} \end{aligned}$$

5.2.2 Tanque Mezclador. Al igual que la unidad anterior, este proceso de mezcla entre el agua contaminada con clorpirifós, ácido Clorhídrico y reactivos Fenton es necesario utilizar un tanque cilíndrico de acero inoxidable 304 debido a la naturaleza corrosiva de estos reactivos. Para realizar el proceso de mezcla se necesita un implemento de agitación, los agitadores industriales pueden ser hélices, paletas o turbinas, para este caso se eligió un agitador de turbina, ya que este permite un manejo de viscosidades hasta los 500mPa¹³⁶. Después de tener el agua contaminada con el pH 3.0 ajustado para el tratamiento de oxidación avanzada esta se continua mezclado con los reactivos Fenton que deben estar en una concentración de 2.5 ppm de Fe⁺² y 540 ppm de H₂O₂ por cada litro de agua contaminada. El cálculo de las dimensiones de este tanque se hace al igual que el tanque de almacenamiento de la unidad anterior exceptuando que a este se

¹³⁶ Ibid.,p.1334

incorporan los reactivos mencionados y el volumen tratado es de 10 litros por semana.

$$V \text{ tanque} = V \text{ entrada} * \text{Factor de Seguridad}$$

$$V \text{ tanque} = 10 \text{ L} * (1.20)$$

$$V \text{ tanque} = 12 \text{ L}$$

$$V \text{ tanque} = 0.012 \text{ m}^3$$

A continuación, se calcula el diámetro del tanque:

$$\text{Relacion} = \frac{h}{D} = 1.5$$

$$V \text{ tanque} = \frac{\pi}{4} * D^2 * h$$

$$V \text{ tanque} = \frac{\pi}{4} * D^2 * 1.5h$$

$$0.012 \text{ m}^3 = \frac{1.5\pi}{4} * D^3$$

$$\sqrt[3]{\frac{4 * 0.012 \text{ m}^3}{1.5 \pi}} = D = 0.217 \text{ m}$$

Finalmente se despeja la altura de la relación con el diámetro calculado:

$$\frac{h}{D} = 1.5$$

$$\frac{h}{0.217 \text{ m}} = 1.5$$

$$h = 1.5 * 0.344 \text{ m}$$

$$h = 0.325 \text{ m}$$

5.2.3 Reactor. Las reacciones por lotes se llevan a cabo en tanques para pequeñas tasas de producción diaria o cuando los tiempos de reacción son largos¹³⁷. Debido a que el estudio contemplaba la evaluación de tres diferentes métodos, de la revisión bibliográfica se toman datos cinéticos para realizar los cálculos pertinentes de acuerdo a constantes de velocidad de reacción y ordenes de reacción establecidos en el artículo de Sulaiman Gafar¹³⁸. Estos experimentos de

¹³⁷ AMADOR Jorge Andrés, CHAVARRO Karen Juieth. Revisión De Heurísticas Y Conceptos Para El Diseño De Equipos Utilizados En Procesos De Refinación Del Petróleo. Trabajo de grado Ingeniería química. Universidad De San Buenaventura. Cartagena de Indias. 2014.p.73.

¹³⁸ MUHAMAD, Sulaiman Gafar. Kinetic studies of catalytic photodegradation of chlorpyrifos insecticide in various natural waters. En: Arabian journal of chemistry. Vol. 3. No. 2(April 2010); p. 127-133.

Fotodegradación se llevaron a cabo a temperatura ambiente (30°C) en un fotoreactor cilíndrico de 35 ml de celda, 20 ml de solución (5 mg / L de clorpirifos disuelto en una pequeña cantidad de metanol completando el volumen con muestras de agua) la celda fotoquímica luego se irradió inmediatamente con una lámpara UV de 100-Hg (230 V, 50 Hz) de 6 watts.

El porcentaje de Fotodegradación catalítica del clorpirifós se estudió en cuatro condiciones experimentales: (1) bajo iluminación UV con la presencia de un catalizador, (2) bajo luz solar, (3) bajo iluminación UV-vis y (4) bajo TiO₂ con protección de la luz; ya que esta investigación se desarrolló con condiciones de luz ultravioleta y en presencia de un catalizador la investigación menciona presenta condiciones similares a las desarrolladas en el laboratorio del GIA. En la **Tabla 16** se presentan los resultados de las constantes cinéticas obtenidas en diferentes tipos de agua.

Tabla 15. Constantes de velocidad de reacción de Fotodegradación de reacción directa y catalítica de clorpirifós en diversos tipos de agua.

Types of water	Systems						
	Sun/w.c.*	Vis/w.c	UV/w.c	Dark/TiO ₂	Sun/TiO ₂	Vis/TiO ₂	UV/TiO ₂
Lake water k (R^2)	0.00033 (0.81)	0.000190 (0.939)	0.000771 (0.890)	0.00334 (0.948)	0.00653 (0.882)	0.00597 (0.957)	0.0117 (0.960)
Ground water k (R^2)	0.00028 (0.861)	0.000184 (0.948)	0.00078 (0.894)	0.00362 (0.979)	0.00713 (0.9220)	0.00586 (0.892)	0.0112 (0.84)
River water k (R^2)	0.00031 (0.869)	0.000192 (0.972)	0.000791 (0.864)	0.00343 (0.954)	0.00692 (0.941)	0.00522 (0.902)	0.0097 (0.904)
Drinking water k (R^2)	0.00031 (0.874)	0.000182 (0.910)	0.000810 (0.883)	0.00301 (0.981)	0.00644 (0.939)	0.00519 (0.830)	<u>0.0095 (0.921)</u>
Distilled water k (R^2)	0.00032 (0.9591)	0.00025 (0.8161)	0.000814 (0.9269)	0.00369 (0.9771)	0.00721 (0.994)	0.00601 (0.9454)	0.0139 (0.9592)

* Without catalyst.

Fuente: Kinetic studies of catalytic photodegradation of chlorpyrifos insecticide in various natural waters. Del autor: Muhamad Sulaiman Gafar.

En el recuadro se puede observar los resultados en agua potable contaminada con el plaguicida, irradiada bajo iluminación UV con la presencia de un catalizador (TiO₂). La constante y orden de reacción se establecieron mediante el modelo cinético Langmuir–Hinshewood, actualmente este modelo ha descrito con éxito sistemas fotocatalíticos y en general es reconocido como una ecuación cinética esencial en la fotocatalisis heterogénea¹³⁹, además de ello esta investigación se encuentran condiciones similares de pH = 3.0 , temperatura 30°C, Tiempo: 6 horas, plaguicida clorpirifós y equipos ya que se realizó en un reactor cilíndrico que contenía clorpirifós en una concentración de 5 ppm.

¹³⁹ ZHAOA Hong, XUB Suohong, ZHONGB Junbo, BAOA Xinhe. Kinetic study on the photo-catalytic degradation of pyridine in TiO₂ suspension systems. En: Sciencedirect. Julio, 2004. Vol. 93.p.858

5.2.3.1 Balance de moles. Inicialmente se va a realizar el balance de materia en el reactor con base en la ecuación del balance de materia descrita en la **Ecuación 4**. En la que salida y entrada hacen referencia a los componentes que ingresan y salen del reactor, la generación hace referencia a las sustancias producidas por la reacción y el consumo indica la cantidad de componentes consumidos durante la operación del reactor, la acumulación se refiere a la cantidad de componentes que se acumulan dentro del sistema.

Para el desarrollo de esta etapa se presenta un balance de moles con reacción entonces,

Ecuación 4. Balance de materia

$$\text{Entrada} + \text{Generación} - \text{Salida} = \text{Acumulación}$$

Un reactor por lotes no tiene flujo de entrada de reactivos ni flujo de salida de productos mientras la reacción se está efectuando¹⁴⁰ este cambio se expresa en la **Ecuación 5**.

Generación = Acumulación

Ecuación 5. Balance de materia reactor por lotes.

$$\frac{1}{V} \frac{dN_{\text{clorpirifos}}}{dt} = r_{\text{clorpirifos}}$$

Al ser una mezcla perfectamente homogénea, no presenta variación de rapidez de reacción en el volumen del reactor entonces,

Ecuación 6. Balance de materia reactor por lotes mezcla homogénea.

$$\frac{dC_{\text{clorpirifos}}}{dt} = r_{\text{clorpirifos}}$$

5.2.3.2 Ley de velocidad primer orden. Por la documentación bibliográfica consultada se obtuvo la constante y orden de reacción que refiere a las potencias a las que las concentraciones se elevan en la ley de velocidad cinética. Según bibliografía consultada cinética de primer orden $k = 0.0095 \text{ min}^{-1}$ y esta relación se expresa en la **Ecuación 7**.

Ecuación 7. Ley de velocidad de primer orden para clorpirifós.

$$-r_{\text{clorpirifos}} = (0.0095 \text{ min}^{-1}) C_{\text{clorpirifos}}$$

¹⁴⁰ FOGLER, H. Scott. Elementos de ingeniería de las reacciones químicas. cuarta edición. Mexico.: PEARSON EDUCACIÓN, 2008.1120 paginas. p. 8

Ecuación de diseño

Ya que en los reactores Batch el volumen no es una función predeterminada del tiempo, el tiempo requerido para alcanzar la conversión deseada **Ecuación 8** es:

Ecuación 8. Ecuación de diseño.

$$t = C_{clorporifos(0)} \int \frac{dX}{-r_{clorpirifos}V}$$

Se obtiene:

5.2.3.3 Tiempo de reacción. Con el máximo de conversión alcanzada durante la experimentación 96% y la constante de velocidad sugerida bibliográficamente $k = 0.0095 \text{ min}^{-1}$, entonces se obtiene el tiempo total de reacción en la **Ecuación 9**,

Ecuación 9. Tiempo total de reacción

$$t_R = \frac{1}{k} \ln \frac{1}{1-X}$$
$$t_R = \frac{1}{k} \ln \frac{1}{1-0.96} = \frac{3.22}{k}$$
$$t_R = \frac{3.22}{0.0095 \text{ min}^{-1}} = 338.83 \text{ min} = 5.64 \text{ h}$$

Se obtiene un tiempo total de reacción de 5.64 horas lo cual concuerda con los resultados experimentales de nuestra investigación en los que el mayor porcentaje de degradación (**96,53 %**) se obtuvo en un tiempo total de 5 horas. Además de este tiempo de reacción existen otras operaciones que completan el ciclo total del proceso Batch y se detallan a continuación.

Tiempo de ciclo Total

El tiempo de ciclo total en un reactor por lotes es considerablemente mayor al tiempo de reacción t_r , ya que se tiene en cuenta el tiempo necesario para llenar y vaciar el reactor con ayuda de bombas centrifugas autocebantes que tienen un caudal aproximado de 5 L/min estos tiempos no superan los 3 minutos, además del tiempo que requiere la limpieza entre lotes. En la **Tabla 17** se describen tiempos de ciclo que representan el tratamiento de oxidación avanzada para clorpirifós por lotes. Este tiempo t es el necesario para reducir la concentración del reactivo en in reactor por lotes, desde un valor inicial hasta un valor dado¹⁴¹

¹⁴¹ FOGLER, H. Scott. Op.cit., Pg. 131.

Tabla 16. Tiempos de ciclo del tratamiento Foto-Fenton.

ACTIVIDAD	TIEMPO (min)
Tiempo de carga	3
Tiempo de reacción	338.83
Tiempo de descarga	3
Neutralización del efluente	3
Tiempo total 347.83 min = 5.8 horas	

Fuente: elaboración propia.

Es de gran importancia tener una idea de la magnitud de los tiempos de reacción por lotes para alcanzar la conversión del 96.53 %. El tiempo total es de 5.8 horas; una vez se cumple el tiempo total del ciclo del tratamiento Foto-Fenton el laboratorio se encargará tanto de su neutralización como disposición final del efluente resultante.

5.2.3.4 Dimensiones del Foto-reactor. El dimensionamiento del reactor parte de un diseño cilíndrico del equipo, la capacidad total del reactor se calcula de acuerdo a la **Ecuación 10** en la cual se relaciona la capacidad total de producción con un factor de servicio. Además de esto el diseño debe permitir la flexibilidad de operar a una capacidad media-alta (80% como factor de seguridad) sin que se interfiera en la eficiencia del método¹⁴².

Ecuación 10. Volumen total del reactor

$$V_{Reactor} = \frac{V_{Rxn}}{\text{Factor de servicio}}$$

$$V_{Reactor} = \frac{10 L}{0.8}$$

$$V_{Reactor} = 12.5 L = 0.0125 m^3$$

Sabiendo el volumen del reactor se determina la altura y diámetro del equipo con base en las relaciones estándar para reactores **Ecuación 11**¹⁴³

¹⁴² MCCABE, Warren L; SMITH, Julian y HARRIOTT, Peter. Operaciones Unitarias en ingeniería química. Séptima edición. USA.: Mc Graw Hill. 2007. p.262.

¹⁴³ Ibid.,p.264

Ecuación 11. Relación estándar para reactores

$$\frac{H}{D_T} = 1$$
$$V_{\text{Reactor}} = \pi * \frac{D_T^2}{4} * H$$

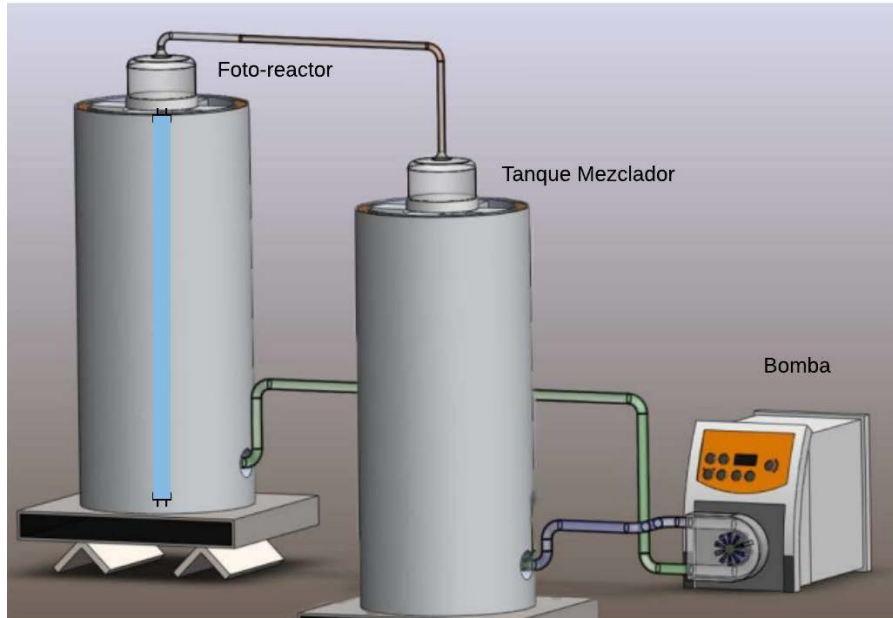
En donde D_T es el diámetro del reactor y H la altura. Relacionado la **Ecuación 11**,

$$\frac{H}{D_T} = 1$$
$$0.0125 \text{ m}^3 = \pi * \frac{H^2}{4} * H$$

$$H = \sqrt[3]{\frac{4 * 0.0125 \text{ m}^3}{\pi}}$$
$$H = D_T \cong 0.5396 \text{ m} = 53.96 \text{ cm}$$

La altura y el diámetro son similares para mejorar la estabilidad del reactor y evitar volcamientos en la **Figura 2** se observa un dibujo esquemático del fotorreactor.

Figura 2. Dibujo esquemático del foto-reactor y sistema de recirculación.

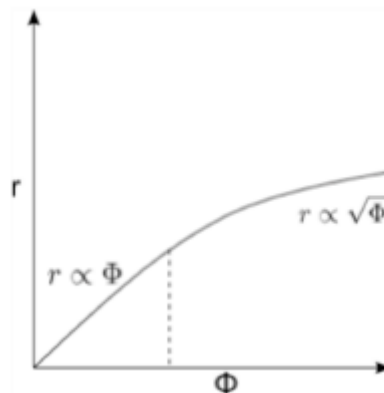


Fuente: Schulman, Iliana; Throop Dominique. Photocatalytic Oxidation for the Removal of Chlorpyrifos from Aqueous Solution. Diciembre 21 del 2013.

Debido a que el tratamiento Foto-Fenton requiere que el agua a tratar este en un rango de pH ácido (2.7 - 3.1) además de la naturaleza corrosiva del peróxido de hidrogeno se sugiere que los equipos involucrados se construyan con materiales resistentes como acero inoxidable o plástico resistente a la corrosión, esto principalmente para los tanques de mezcla y almacenamiento. En el caso del foto-reactor la pared interior debe ser de una superficie reflectante para aumentar la incidencia de la luz ultravioleta por lo que se sugiere su construcción en acero inoxidable. Lo que se menciona aquí es una aproximación a lo que debe ser la selección definitiva que se haría cuando se plantee un diseño de detalle.

Intensidad de luz ultravioleta. A medida que aumenta la intensidad de la irradiación UV, aumenta la velocidad de reacción para la degradación de los contaminantes (**Imagen 14**). Se recomienda el uso de una lampara de luz ultravioleta de 30 W de intensidad lumínica para el tratamiento el agua residual, porque desarrollar el dimensionamiento de la lampara no sería económicamente viable.

Imagen 14. Velocidad de reacción vs Irradiación



Fuente: Schulman, Iliana; Throop Dominique. Photocatalytic Oxidation for the Removal of Chlorpyrifos from Aqueous Solution. Disponible en: <https://web.wpi.edu/Pubs/E-project/Available/E-project-011314-135820/unrestricted/PhotocatalyticOxidationfortheRemovalofChlorpyrifosfromAqueousSolution2.pdf>

Para evitar que la eficiencia del tratamiento Foto-Fenton se vea afectada por impurezas del entorno es recomendable hacer pasar agua limpia por los sistemas de dosificación, tanques, tuberías y foto-reactor de forma periódica, especialmente en este último equipo ya que el sulfato de hierro que esta disuelto al ser neutralizado hace que el hierro presente se precipite y este se puede sedimentar en las paredes del foto-reactor.

5.3 PROCEDIMIENTO OPERATIVOS

La operación de la planta piloto para el sistema de tratamiento de agua residual debe ser de fácil entendimiento para los encargados y operarios, debe seguirse la secuencia del proceso. Se recomienda la automatización del proceso para el buen funcionamiento del tratamiento.

5.4 PROBLEMAS AMBIENTALES

La preservación del medio ambiente es fundamental en la implementación de cualquier proceso. A pesar de que el tratamiento de aguas residuales es un proceso a favor de ello, se debe tener en cuenta que los materiales utilizados en la construcción no tengan ningún impacto negativo en el ambiente, se debe hacer una correcta disposición de los residuos generados en el tratamiento y se debe evaluar el gasto energético del proceso.

5.5 DISPOSICIÓN DEL AGUA RESIDUAL TRATADA

Inicialmente se determina la concentración del contaminante presente en el agua, para ello, se lleva una muestra del agua tratada al laboratorio, donde se realiza una extracción líquido-líquido (**Numeral 3.2.1.2**) para concentrar la muestra y medir la concentración del clorpirifós mediante un espectrofotómetro UV (**Numeral 3.2**), para verificar que la concentración del agua tratada cumpla con los parámetros establecidos en la resolución 631 del año 2015, de lo contrario se recomienda aplicar un método de tratamiento adicional como la hidrólisis para eliminar residuos del plaguicida que pudieran estar presentes en la muestra después del tratamiento de oxidación avanzada.

6. CONCLUSIONES

- El diagnóstico realizado al agua residual procedente de los laboratorios del Grupo de Investigaciones Agroquímicas (GIA) de la Universidad de Cartagena, mostró que los valores de clorpirifós están en un rango entre 14.706 ppm y 23.038 ppm, estos valores superan los límites permitidos establecidos en la resolución 631 de 2015, la cual presenta un valor máximo permitido para este contaminante de 0,1 ppm, de lo anterior se concluye que es pertinente implementar un método de tratamiento de aguas para reducir la concentración de este plaguicida.
- En cuanto al análisis comparativo de los tres métodos de Oxidación Avanzada abordados en este estudio, se concluye que el tratamiento Foto-Fenton presenta una tasa de degradación de clorpirifós mayor que Fenton y Uv-Peróxido de Hidrógeno, con porcentajes de 96.53%, 45,40% y 30,01% respectivamente lo que concuerda con resultados obtenidos por otros autores^{144,145,146} lo anterior se debe a la combinación de la catálisis producida por el hierro y la fotólisis de la luz ultravioleta.
- En el desarrollo de los métodos de oxidación avanzada Fenton y Foto-Fenton, se evidenció que la presencia del catalizador Fe^{+2} en el tratamiento es fundamental para acelerar la producción de radicales hidroxilos, lo que permite la degradación del plaguicida organofosforado clorpirifós.
- Finalmente se especifican que los requerimientos técnicos para llevar a cabo la implementación de la planta piloto son un tiempo de 5.8 h, en un reactor de 12.5 Litros a una concentración de Fe^{+2} de 2.5 ppm y H_2O_2 de 540 ppm, $T = 27^\circ C$, $pH = 3$, además se debe disponer de un mecanismo que facilite la agitación en el interior del reactor.
- A pesar de los altos porcentajes de remoción de clorpirifós encontrados en el tratamiento de las aguas residuales, se evidenció que los resultados no cumplen con la normatividad, puesto que son aguas residuales con carga contaminante demasiado alta (clorpirifós > 15ppm).

¹⁴⁴ CRUZ-GONZÁLEZ Germán, JULCOUR Carine y JÁUREGUI-HAZAI Ulises. El Estado actual y perspectivas de la degradación de pesticidas por procesos avanzados de oxidación. En: Revista Cubana de química. Diciembre, 2017.vol.29

¹⁴⁵ YOUSSEF Samet, EMNA, Hmani y RIDHA Abdelhédia. Fenton and solar photo-Fenton processes for the removal of chlorpyrifos insecticide in wastewater. En: Water SA. Julio, 2012.Vol 38.p.539-540.

LUCAS, MS and PERES, JA. Decolorization of the azo dye reactive black 5 by Fenton and photo-Fenton oxidation. En: Dyes Pigm. Vol. 71. No 3

¹⁴⁶ M. I. Badawy, M. Y. Ghaly, and T. A. Gad-Allah. Advanced oxidation processes for the removal of organophosphorus pesticides from wastewater, Desalination. Vol. 194. No. 1–3(2006)

7. RECOMENDACIONES

- Se recomienda ampliar el rango de evaluación de los procesos de oxidación avanzada a concentraciones más bajas de 2,5 ppm de Fe^{+2} y 540 ppm de H_2O_2 , a partir de los mejores valores obtenidos en la remoción de clorpirifós.
- Se recomienda el estudio de un método post-tratamiento para lograr que los valores de la concentración de clorpirifós se ajusten a los parámetros establecidos en la resolución 631 del 2015.
- Identificar rigurosamente los productos de degradación del clorpirifós en el proceso Foto-Fenton mediante la selección de las condiciones de operación en cromatografía iónica (fase móvil, tipo columna, longitud de onda, etc.). El objetivo es establecer un mecanismo de degradación y proponer un modelo matemático susceptible a ser optimizado.
- El estudio cinético de la reacción es importante para evaluar los parámetros que influyen en el tiempo de reacción y degradación de materia orgánica.
- El método Foto-Fenton como solución al tratamiento de aguas residuales es de gran importancia por lo que se recomienda el estudio y aplicación industrial del método.
- Se recomienda estudiar el comportamiento de la luz solar como una fuente de energía no artificial en el método Foto-Fenton.
- Dentro de los factores que se tomaron como constantes en la investigación está la temperatura, se pueden realizar experimentos del método variando este parámetro para determinar la degradación de clorpirifós en agua residual.
- La difícil detección y cuantificación de metabolitos de plaguicidas no ha permitido establecer el efecto ambiental de muchas de estas sustancias, por lo tanto, se recomienda el estudio de métodos que permitan la degradación total de estos compuestos organofosforados hasta CO_2 , H_2O y minerales, asegura una reducción del 100 % de los efectos tóxicos de un plaguicida en el ambiente.

BIBLIOGRAFÍA

AINHOA, Clemente; CHICA, Edwin y PEÑUELA, Gustavo. Aplicación del proceso Fenton en el tratamiento de aguas residuales de origen petroquímico. En: Ingeniería y competitividad. Vol., 16. No 2 (junio de 2014); Pg. 211-223.

ALIANZA POR EL AGUA. Manual de depuración de aguas residuales urbanas. [Archivo PDF]. [16 julio de 2018]. Disponible en: <http://www.alianzaporelagua.org/saneamiento/publicaciones/11-monografico-3-manual-de-depuracion-de-aguas>.

AUGSTEN, Eva. Effects of the Parameters Temperature, Iron Concentration and Irradiation on the Reaction Rate of the Photo-Fenton Process using Alachlor as a Model Compound. Bingen- Alemania. 2004. Tesis (en protección del medio ambiente). Universidad de ciencias aplicadas bingen. Facultad de medio ambiente.

BADAWY, MI; GHALY, MY and GAD-ALLAH, TA. Advanced oxidation processes for the removal of organophosphorus pesticides from wastewater. Desalination. Vol. 194. No. (1-3). (2006); Pg. 166-175.

BAUTISTA CARMONA, Patricia. Tratamiento de aguas residuales de la industria cosmética mediante el proceso Fenton y con el sistema Fe/Al₂O₃/ H₂O₂. Madrid. 2008. Tesis Doctoral (Doctor en ciencias químicas). Universidad Autónoma de Madrid. Facultad de ciencias. Departamento de ingeniería química.

BONDIA, José. Eliminación de contaminantes emergentes mediante humedales artificiales como sistema alternativo o complementario a un tratamiento de aguas convencional. Valencia. Tesis Master (Ingeniería hidráulica y medio ambiente). Universidad Politécnica de Valencia. Facultad de ingeniería hidráulica y medio ambiente

BOTELHO, Diego; CLETO, Eduardo; Rodríguez, Tatiana. Tratamiento de efluentes industriales de naturaleza recalcitrante usando ozono, peróxido de hidrogeno y radiación ultravioleta. En: Rev. Fac. Ing. Univ. Antioquia. No 46 (Diciembre 2008); Pg. 24-38.

CARDENAS CASTAÑEDA, Diana Constanza. Optimización de la planta de tratamiento de aguas residuales industriales para su reuso en el proceso productivo de una industria de jabones. Bogotá D.C. 2008. Trabajo de grado (ingeniero ambiental y sanitario). Universidad de la Salle. Facultad de ingeniería ambiental y sanitaria. Pg. 30

CARRIAZO, Jose; SAAVEDRA, Martha y VELA, Cindy. Catalizadores homogéneos y Heterogéneos de Fe³⁺, Co²⁺ y Cu²⁺ para la degradación de metalparation en medio acuoso diluido. En: Tecnológicas. Vol. 19. No. 37 (julio-diciembre 2016); Pg. 13-28.

CASERO RODRIGUEZ, David. Gestión de aguas residuales y reutilización. Escuela de organización industrial. 2015-2016. [Archivo PDF]. [16 julio de 2018]. Pg. 52.

CHIOMA AFFAM, Augustine; CHAUDHURI, Malay and MUDA, Khalida. UV Fenton and sequencing batch reactor treatment of chlorpyrifos, cypermethrin and chlorothalonil pesticide wastewater. En: ScienceDirect. Vol. 93. (September 2014); Pg. 195-201.

COLCIENCIAS. Grupo de investigaciones agroquímicas. [En línea]. [16 julio de 2018]. Disponible en: <http://scienti.colciencias.gov.co:8085/gruplac/jsp/visualiza/visualizagr.jsp?nro=000000004204>.

CONDUCTIVIDAD ELECTRICA POR EL MÉTODO ELECTROMÉTRICO EN AGUAS. [Archivo PDF]. [20 julio de 2018]. Disponible en: <http://www.ideam.gov.co/documents/14691/38155/Conductividad+El%C3%A9ctrica.pdf/f25e2275-39b2-4381-8a35-97c23d7e8af4>.

CRUZ GONZÁLEZ, German; JULCOURL, Carine y JÁUREGUI- HAZAL. El Estado actual y perspectivas de la degradación de pesticidas por procesos avanzados de oxidación. En: Revista cubana de química. Vol. 29. No. 3(septiembre-diciembre 2017).

DOMÉNECH, Xavier, JARDIM, Wilson F. y LITTER, Marta I. Procesos avanzados de oxidación para la eliminación de contaminantes. Pg. 7.

ECHA (European CHemical Agency), <https://echa.europa.eu/substance-information/-/substanceinfo/100.018.969>. [En línea]

ERASO GUERRERO, Edwin Giovanny y QUENGUAN CUARAN, Franklin. Determinación de plaguicidas organofosforados y carbamatos en agua para el consumo humano del departamento de Nariño mediante cromatografía líquida de alta eficiencia. San Juan de Pasto. 2015. Trabajo de grado (Químico). Universidad de Nariño. Facultad de ciencias exactas y naturales. Departamento de química.

FERNANDEZ, Antonio; GARCIA, Pedro; GARCIA, Roberto; SAENZ, Juana; VALDIÑO, Miriam; VILLAR, Susana. Tratamientos avanzados de aguas residuales industriales. [Archivo PDF]. [16 julio de 2018]. Pg.10-11.

FERNÁNDEZ, Daniel; MANCIPE, Liliana y FERNÁNDEZ, Diana. Intoxicación por Organofosforados. En: Rev.fac.Medic. Vol. 18. No. 1 (junio de 2010); Pg.84-92.

FOGLER, H. Scott. Elementos de ingeniería de las reacciones químicas. cuarta edición. Mexico.: PEARSON EDUCACIÓN, 2008.1120 paginas. Pg. 8.

FORERO, Jorge Enrique; ORTIZ, Olga y RIOS, Fabián. Aplicación del proceso de oxidación avanzada como tratamiento de fenol en aguas residuales industriales de refinería. En: Ciencia, tecnología y futuro. Vol.,3. No 1(diciembre 2005); Pg.97-19.

GARCIA GOMEZ, C; GORTARES-MONOYOQUI, P y DROGUI, P. Contaminantes emergentes: efectos y tratamientos de remoción. En: Revista química viva. No 2 (agosto 2011); Pg. 96-104.

GARCIA HERRERA, Juan Camilo. Procesos Fenton y Foto-Fenton para el tratamiento de aguas residuales de laboratorio microbiológico empleando Fe_2O_3 soportado en nanotubos de carbono. Bogotá D.C. 2014. Trabajo de grado (Microbiólogo Industrial). Pontificia Universidad Javeriana. Facultad de ciencias. Departamento de microbiología.

GARCÍA MONTAÑO, Julia. Combination of Advanced Oxidation Processes and Biological Treatments for Commercial Reactive Azo Dyes Removal. Barcelona. 2007. Tesis Doctoral (Doctor en química). Universidad Autónoma de Barcelona. Facultad de ciencias. Departamento de química.

HARSHIT, Dave; CHARMY, Kothari y NRUPESH, Pate. Organophosphorus pesticides determination by novel HPLC and spectrophotometric method. En: ScienceDirect. Vol. 230. (2017); Pg. 448-453.

HUANG, Yao-Hui and HUNG, Ta-Chen. Degradation of phenol using low concentration of ferric ions by the Photo-Fenton process. En: Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers. Vol. 41 No. 6 (November 2010); Pg. 699-704.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Documentación. Presentación de tesis, trabajos de grado y otros trabajos de investigación. NTC 1486. Sexta actualización. Bogotá: ICONTEC, 2008.

_____ Especifica los elementos y su orden en las referencias bibliográficas de las fuentes consultadas para la elaboración de documentos. NTC 5613. Última versión. Bogotá: ICONTEC 2008.

_____ Referencias documentales para fuentes de información electrónica: artículos y libros electrónicos en línea o en otro soporte. NTC 4490. Última versión. Bogotá: ICONTEC 1998.

INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES. Guía para el monitoreo de vertimientos, aguas superficiales y subterráneas. IDEAM. Colombia, 2007.

LITTER, Marta Irene. Tecnologías avanzadas de oxidación: Tecnologías solares. [En línea]. [16 julio de 2018]. Disponible en: https://www.psa.es/05_Capitulo_05. [En línea]

LOPEZ, Cristina. Procesos físico-químicos de oxidaciones avanzadas (H_2O_2/UV ; $Fe^{+2}/H_2O_2/UV$; $TiO_2/H_2O_2/UV$) y la mejora con un sistema de coagulación-floculación previo, en el tratamiento de aguas residuales para la eliminación de colorantes. Granada. 2016. Tesis Doctoral. Universidad de Granada. Facultad de ingenierías. Departamento de ingeniería civil

LUCAS, MS and PERES, JA. Decolorization of the azo dye reactive black 5 by Fenton and photo-Fenton oxidation. En: *Dyes Pigm.* Vol. 71. No 3 (2006); Pg. 236–244.

M.I, Badawya; MONTASER, Y. Ghalyb y TAREK, A. Gad-Allaha. Advanced oxidation processes for the removal of organophosphorus pesticides from wastewater. En: *ScienceDirect.* Vol. 194. No. 1-3 (10 de junio 2006); Pg.166-175.

MARTINEZ, A.G; RODRÍGUEZ-BERNAL, O.F; CHIQUITO-COYOTL, O; ESCAROLA ROSAS, M; HERNÁNDEZ LARA, J.M; HERNÁNDEZ, Elvira; MÉNDEZ, G.A; MAGAÑA, J.C; MARTÍNEZ-CASTILLO, J. Alternativas actuales de manejo de lixiviados. En: *Avances en química.* Vol. 9 No 1(abril de 2014); Pg. 37-47.

MCCABE, Warren L; SMITH, Julian y HARRIOTT, Peter. Operaciones Unitarias en ingeniería química. Séptima edición. USA.: Mc Graw Hill. 2007.1140 pg.

MENDONÇA, Sergio Rolim. Sistemas de lagunas de estabilización. Cómo utilizar aguas residuales tratadas en sistemas de riego. Bogotá: Editorial McGraw-Hill. 2000. Pg. 1-2.

MINDESARROLLO. Reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico RAS-2000. Tratamiento de aguas. [En línea]. [16 julio de 2018]. Disponible en: <http://minvivienda.gov.co>Documents>.

MORENO LOPEZ, Anabel. Aplicación de radiocatalisis en degradación de muestras orgánicas complejas. San Felipe del Progreso-México. 2014. Trabajo de grado (Ingeniero químico). Tecnológico de estudios superiores de san Felipe del progreso. Facultad de ingeniería química.

MUHAMAD, Sulaiman Gafar. Kinetic studies of catalytic photodegradation of chlorpyrifos insecticide in various natural waters. En: *Arabian journal of chemistry.* Vol. 3. No. 2(April 2010); Pg. 127-133.

OLIVEIRA GADELHA, André; RIBEIRO PEREIRA, Jefferson; TOME DE OLIVEIRA, Juliene; KEUKELEIRE, Denis; SALDANHA, Maíra. Degradation of the Pesticide Chlorpyrifos in Aqueous Solutions with UV/H₂O₂: Optimization and Effect of Interfering Anions.En: *Journal of advanced oxidation technologies.*Vol. 17. No 1(January 2014); Pg.133-137.

ORELLANA, Jorge. Ingeniería sanitaria. Conducción de líquidos residuales.2005. [En línea]. [17 de julio 2018]. Disponible en: https://www.frro.utn.edu.ar/repositorio/catedras/civil/ing_sanitaria/Ingenieria_Sanitaria_A4_Capitulo_09_Conduccion_de_Liquidos.

PERRY H, Robert. Manual del Ingeniero Químico, Cuarta edición. México: McGraw-Hill. Cap.25-74.

Pignatello J. J., Oliveros E., Mackay A. (2006). Advanced Oxidation Processes for organic Contaminant destruction based on the Fenton reaction and related chemistry. En: *Environmental Science and Technology.* Vol.35. Pg. 1-84. .

PIGNATELLO, Joseph J; OLIVEROS, Esther and MACKAY Allison. Advanced Oxidation Processes for organic Contaminant destruction based on the Fenton reaction and related chemistry. En: Environmental Science and Technology. Vol. 36. No. 1(2006); Pg. 1-84.

RAMIREZ MOREÑA, Alejandro. Degradación de resorcinol por Foto-Fenton (UV/Fe+2/H₂O₂). Pereira. 2010. Trabajo de grado (tecnólogo químico). Universidad tecnológica de Pereira. Facultad de tecnologías. Departamento de tecnología química.

THERMO SCIENTIFIC. Espectrofotómetro evolution 201 disponible en: <<http://www.thermofishersci.in/lit/Thermo%20Scientific%20Evolution%20201.pdf> >. [En línea]

TORRADES, F; NÚÑEZ, L; GARCÍA-HORTAL, J. A y PERAI, J. Fenton and Photo-Fenton oxidation of a model mixture of dyes - overall kinetic analysis. En: Coloration Technology. Vol.124 (2008); Pg. 370-374.

TUHKANEN, T. Advanced oxidation processes for water and wastewater treatment. En: Springer. (September 2015).

UNIVERSIDAD DE CARTAGENA. Investigaciones Agroquímicas. [En línea]. [16 julio de 2018]. Disponible en: <http://investigaciones.unicartagena.edu.co/index.php/grupos-de-facultades/ciencias-exactas-y-naturales/investigaciones-agroquimicas/presentacion-gia>. [En línea]

VASQUEZ NUÑEZ, Geinny del Carmen. Panorama del tratamiento de aguas residuales con tecnología anaerobia en la costa atlántica colombiana. Bogotá. 2013. Universidad Nacional de Colombia. [En línea]. [16 julio de 2018]. Disponible en: <http://bdigital.unal.edu.co/49437/1/panorama%20del%20tratamiento%20de%20aguas%20residuales%20con%20tecnologia%20anaerobia%20en%20la%20costa%20atlantica%20colombiana.pdf>

VILLALOBOS SALGADO, Yudis. Estudio del impacto ambiental de efluentes líquidos en las embarcaciones marítimas tipo fragata de la armada nacional. Cartagena de indias. 2011.Trabajo de grado (ingeniero mecánico). Universidad tecnológica de bolívar. Facultad de ingeniería mecánica y mecatrónica.

ANEXOS

ANEXO A
CALCULO DE LAS CANTIDADES DE LOS REACTIVOS

Los cálculos para las cantidades de reactivo utilizadas aparecen a continuación:

Peróxido de hidrogeno

$$V1 * C1 = V2 * C2$$

$$\% \frac{p}{v} = 30 = \frac{30g}{100mL} = \frac{30000mg}{0,1L} = 300000ppm$$

$$1080ppm * 1000mL = 300000ppm * V2$$

$$V2 = \frac{1000mL * 1080ppm}{300000ppm} = 3,6mL$$

Sulfato de Hierro heptahidratado (FeSO₄ * 7H₂O)

Peso molecular

$$FeSO_4 = 151,9mg$$

$$7H_2O = 126mg$$

$$FeSO_4 = \frac{FeSO_4 + 7H_2O}{FeSO_4} = \frac{126 + 151,9}{151,9} = 1,83mg$$

NaOH 0.2 N

$$NaOH \longrightarrow 99\% \text{ p/p}$$

$$0.2 \text{ N} = 0.2 \text{ M} \text{ porque tiene 1 eq}$$

$$M = \frac{\text{moles}}{L}$$

$$0.2M = \frac{99g}{\frac{40g/mol}{0.25L}} = 2,02 g$$

Se pesan 2.02 gramos de NaOH y se disuelven en 200 ml de agua, se afora con agua el balón de 250 ml.

HCl

HCl → 37% p/p

ρ: 1,180 g/ml

$$\frac{1,180gsln}{mL} * \frac{37gHCl}{100gsln} * \frac{1mol HCl}{36,7gHCl} = \frac{0,012mol}{mL} * \frac{1000mL}{L} = \frac{11,96mol}{L}$$

0,2N=0,2M porque tiene 1eq

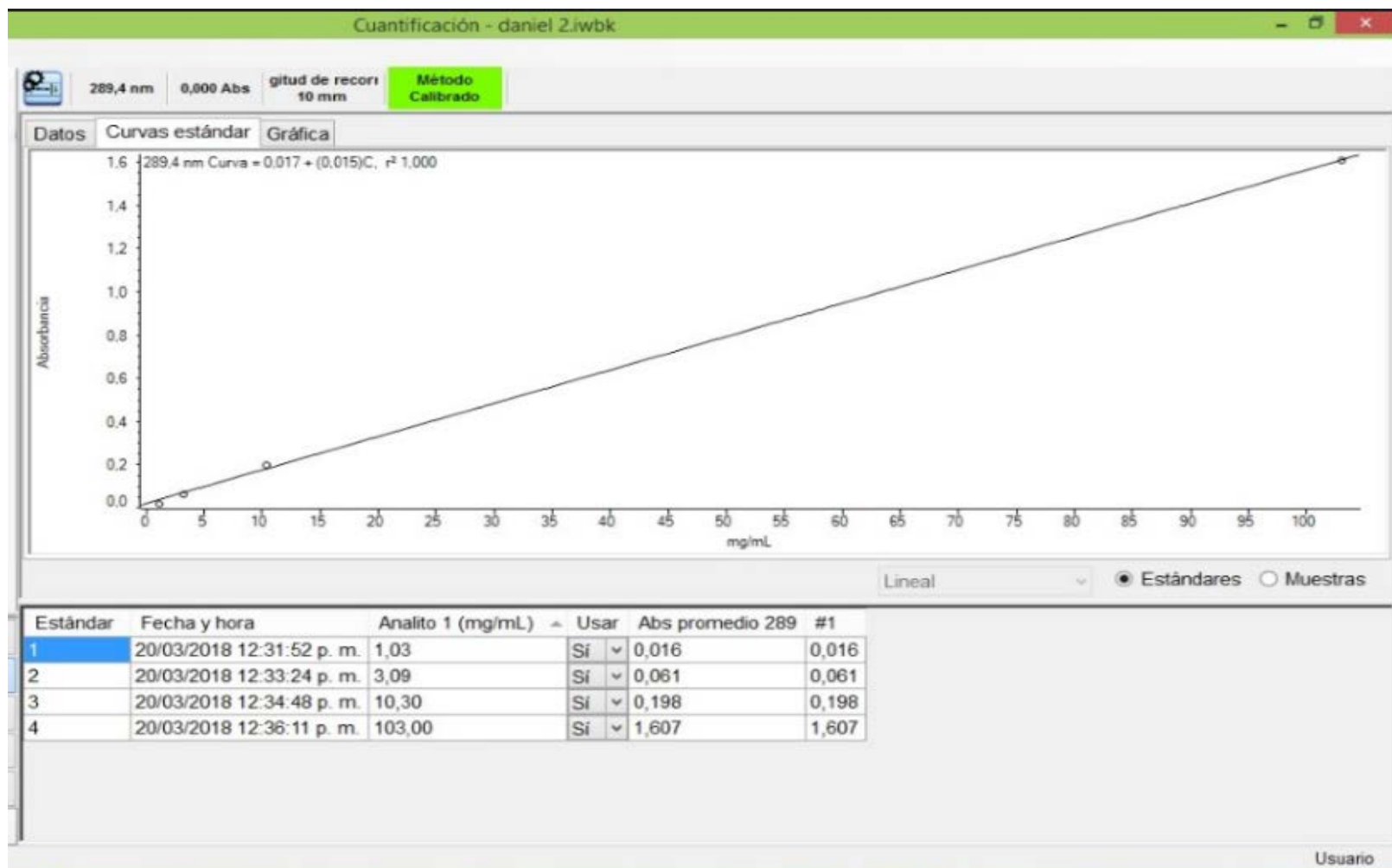
$$250mL * \frac{1L}{1000mL} * \frac{0,2mol HCl}{L} = 0,05mol HCl$$

$$0,05molHCl * \frac{1L}{12mol HCl} * \frac{1000mL}{1L} = 4,16mL de HCl$$

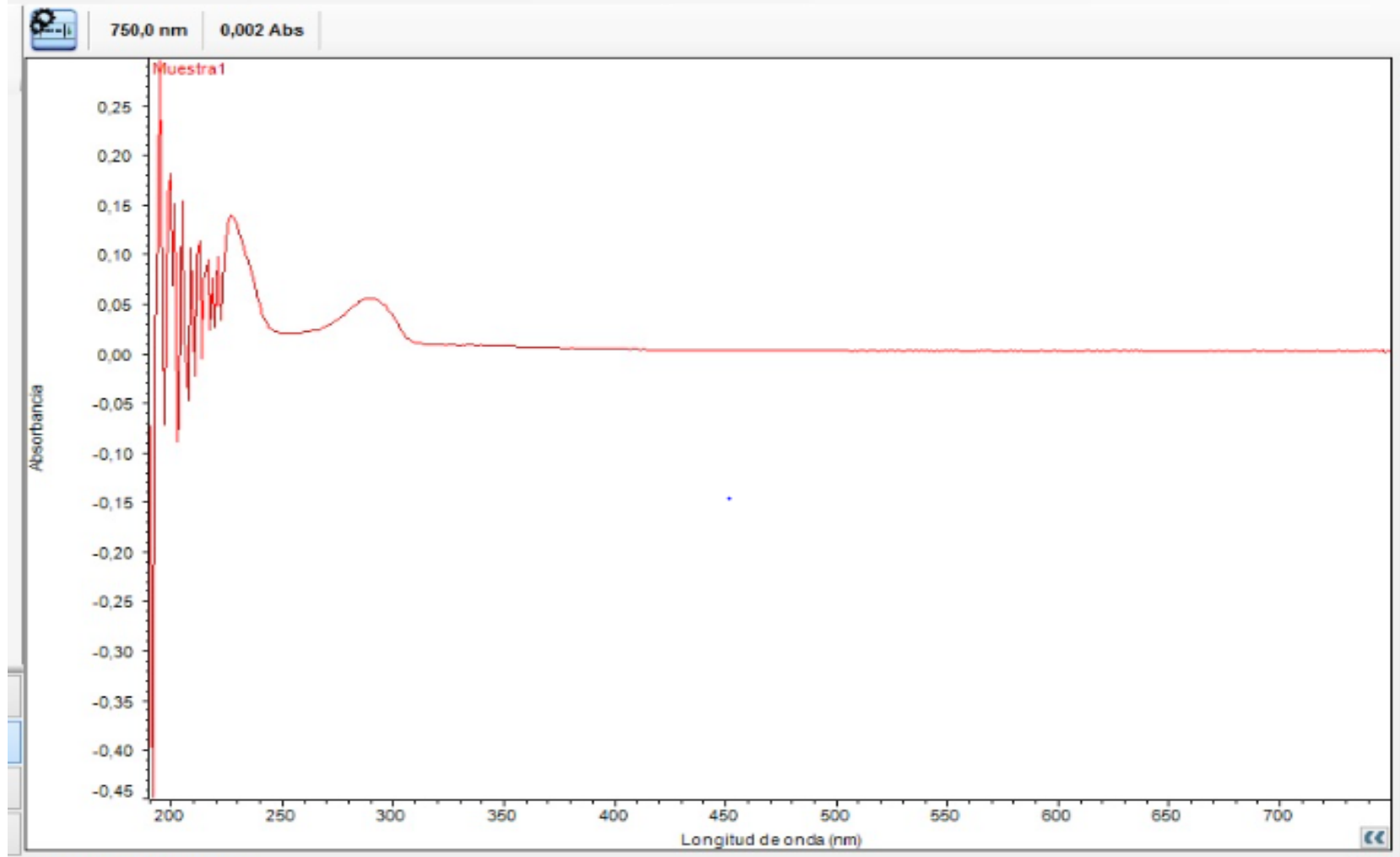
En un balón aforado se agregan 200 mL de agua y se añade lentamente los 4,16 mL de HCl y se completa el aforo a 250mL con agua.

ANEXO B

CURVA DE CALIBRACION Y PICO CLORPIRIFÓS LONGITUD DE ONDA 289nm ESPECTOFOTOMETRO



Barrido



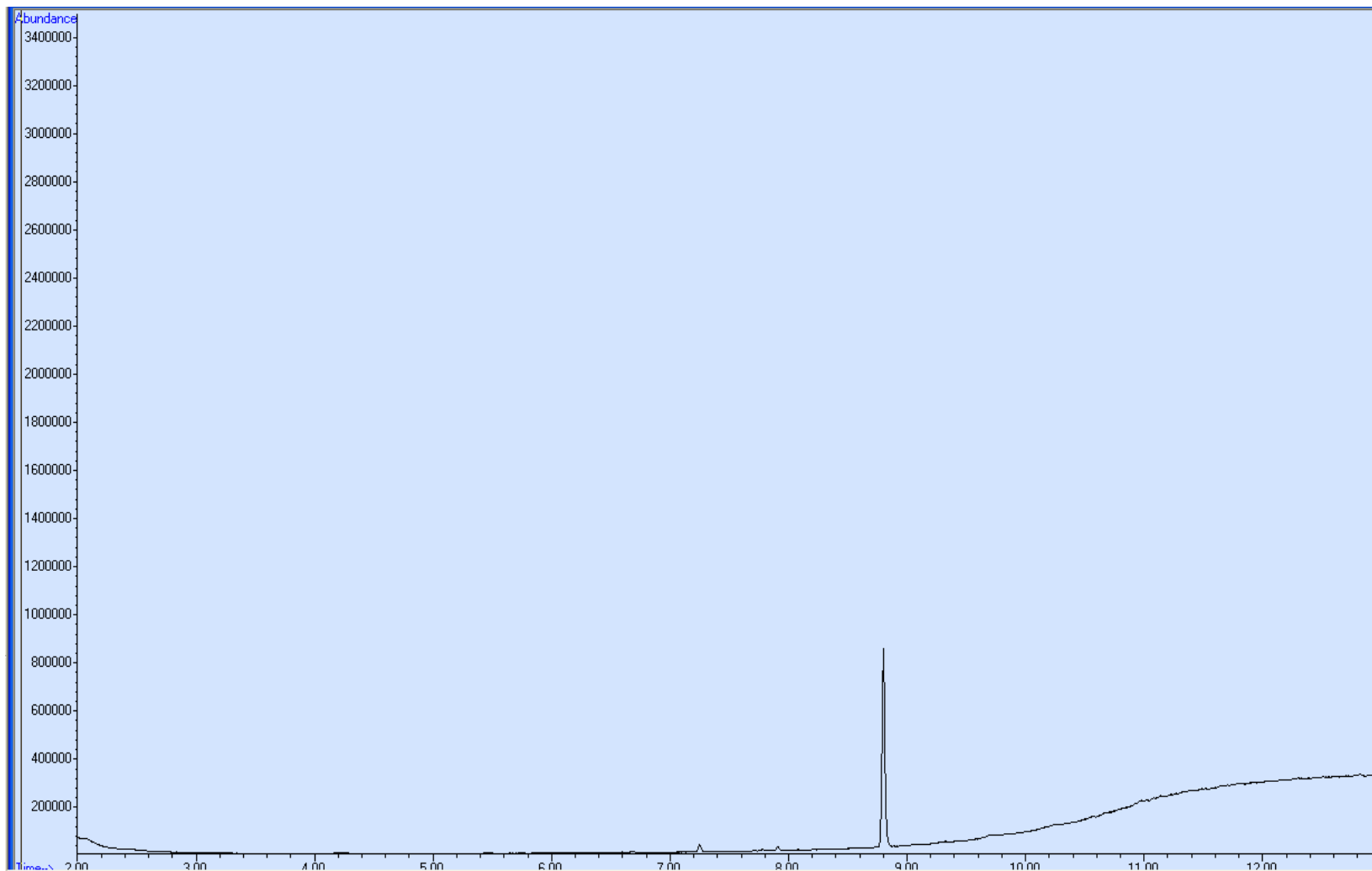
ANEXO C

DATOS CROMATOGRÁFICOS

El análisis de Cromatografía de gases acoplado a Espectrometría de masas (GC-MS) se llevó a cabo utilizando un cromatógrafo de gases Agilent Technologies 7890A Network GC (Palo Alto, California, EE. UU.) Acoplado a un detector selectivo de masas (MSD) Agilent Technologies 5975 GC-MS, equipado con un inyector automático Agilent 4513A. La columna utilizada fue una columna capilar HP-5MS (30m x0.25 mm id) recubierta con 5% difenil-95% polidimetilsiloxano (0,5 μm de espesor de fase) (J & W Scientific, EE. UU.), El gas portador era helio (grado de calidad 5,0 a 99,99%) a 87 kPa (1,17 ml / min); el modo de inyección fue Split (1:10), el volumen de muestra inyectado fue de 1 μL . Los espectros de masas se obtuvieron mediante ionización por impacto de electrones (EI, 70 eV). Las temperaturas de la cámara de ionización y la línea de transferencia fueron de 230 °C y 300 °C, respectivamente, y el rango de masa de adquisición fue de 50-500 m/z.

La rampa de temperatura usada en el cromatógrafo de gases fue: Temperatura inicial del horno=120 °C, velocidad de calentamiento 15°C/minutos, temperatura final =300 °C.

Muestra 1 (M1) concentración inicial.



RESULTS - Microsoft Excel

Archivo Inicio Insertar Diseño de página Fórmulas Datos Revisar Vista

Calibri 11 Ajustar texto General \$ % 000 00 00 Formato condicional Dar formato como tabla Estilos de celda Insertar Eliminar Formato Celdas Autosuma Rellenar Ordenar y filtrar Buscar y seleccionar

Portapapeles Fuente Alineación Número

A1 [contents]

1 [contents]

2 count=2

3 Name= C:\msdchem\1\DATA\wilson2017\muestra BJ4.D

4 1= INT TIC: muestra BJ4.D\data.ms

5 2= PBM Apex

6 [INT TIC: muestra BJ4.D\data.ms]

7 Time= Thu May 03 16:06:07 2018

Header=	Peak	R.T.	First	Max	Last	PK TY	Height	Area	Pct Max	Pct Total
9 1=	1	7.252	1183	1213	1228	BB	28775	586693	2.11	1.379
10 2=	2	8.803	1440	1571	1588	BV	806214	14191909	51.12	33.359
11 3=	3	12.823	1588	2499	2510	PV	12052	27764439	100	65.262

12 [PBM Apex]

13 Time= Thu May 03 16:23:17 2018

Header=	PK	RT	Area Pct	Library/ID	Ref	CAS	Qual
15 1=	1	8.802	100	Chlorpyrifos	205166	002921-88-2	99

16

17

18

19

20

21

22

23

24

25

26

27

28

29

30

31

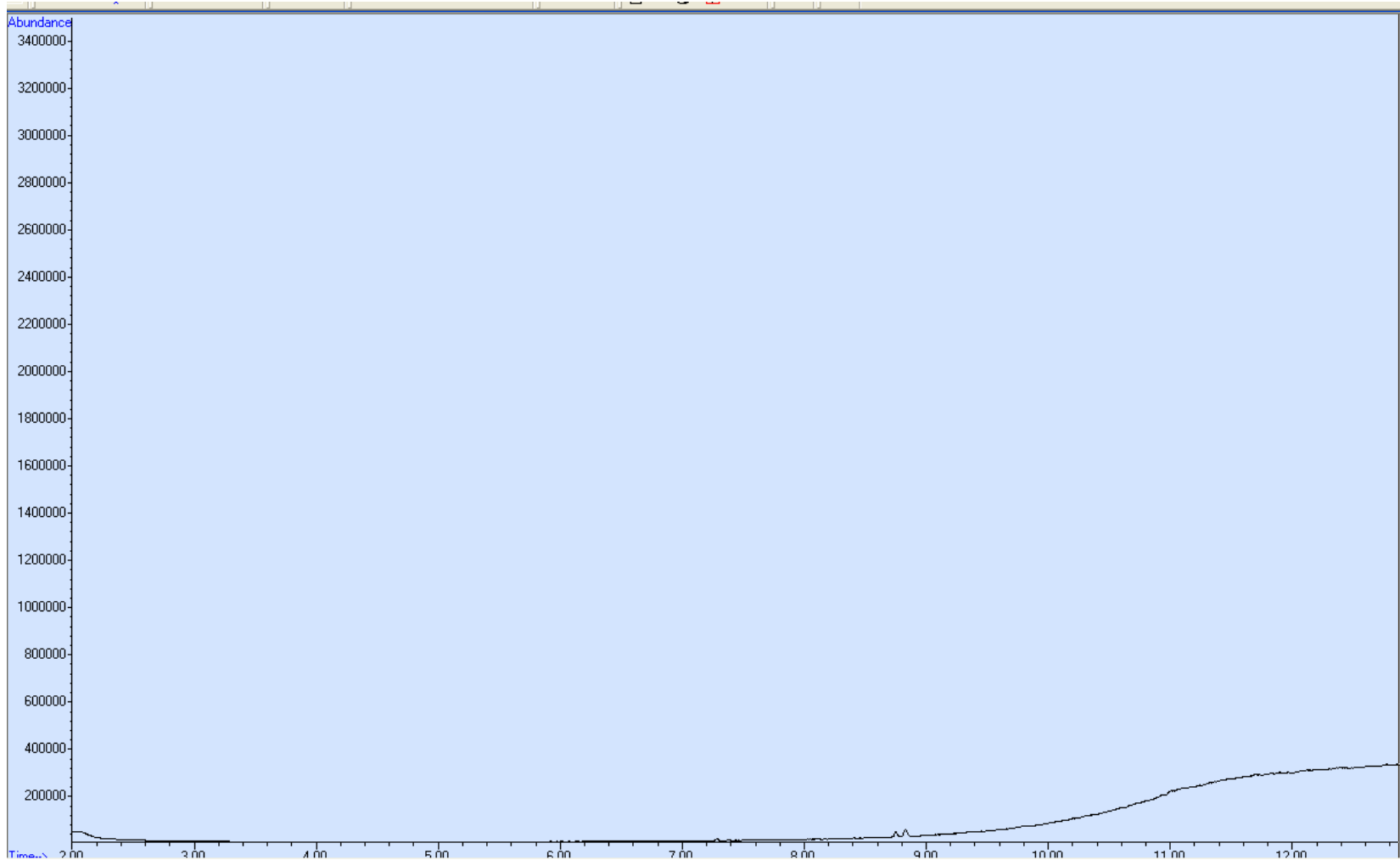
32

RESULTS Bloq Mayús

start Enhanced Data Analy... gcms /Enhanced - PE... liner.pdf - Adobe Rea... Multi-Notepad Vie... resultados BJ - Micros... muestra BJ4.D Microsoft Excel - RES... 100% 5:02 PM

Buscar y seleccionar
 Busca y selecciona un texto, un formato o un tipo de información específico dentro del documento.
 También puede reemplazar la información con nuevo texto o formato.

MUESTRA 1 (M1) CONCENTRACIONAL FINAL



BJ8-Muestra 5 - Microsoft Excel

Archivo Inicio Insertar Diseño de página Fórmulas Datos Revisar Vista

Portapapeles Fuente Alineación Número Formato condicional Estilos Celdas Autosuma Rellenar Borrar Ordenar y filtrar Buscar y seleccionar Modificar

A1 [contents]

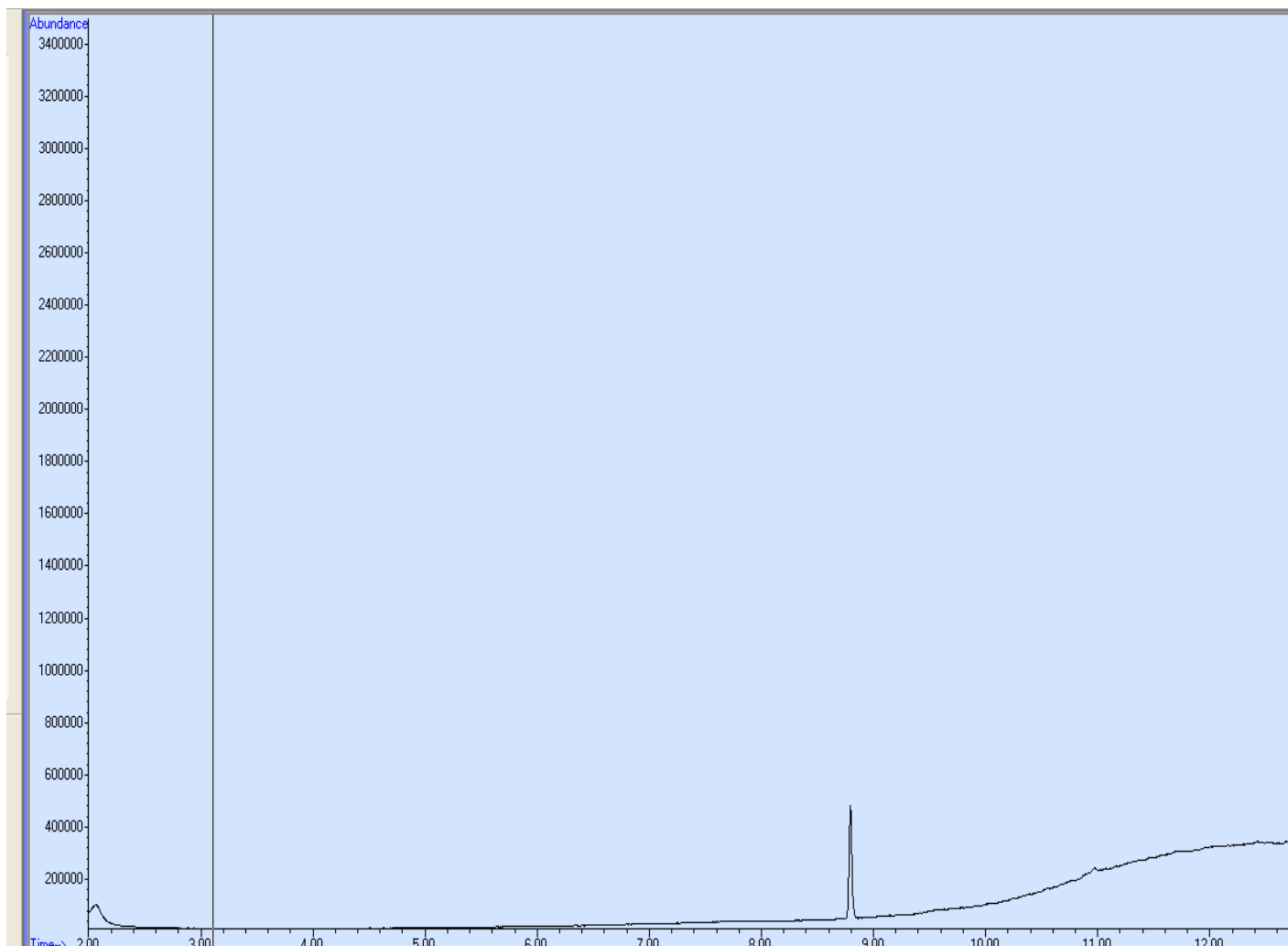
1	[contents]																
2	count=2																
3	Name=	C:\MSDCHEM\1\DATA\WILSON2017\muestra BJ8.D															
4	1=	INT TIC: muestra BJ8.D\data.ms															
5	2=	PBM Apex minus start of peak															
6	[INT TIC: muestra BJ8.D\data.ms]																
7	Time=	Thu May 03 17:15:15 2018															
8	Header=	Peak	R.T.	First	Max	Last	PK TY	Height	Area	Pct Max	Pct Total						
9	1=	1	8.753	1448	1560	1568	BV 5	21187	208962	39.39	28.257						
10	2=	2	8.832	1568	1578	1590	VV 3	29361	530553	100	71.743						
11	[PBM Apex minus start of peak]																
12	Time=	Thu May 03 17:15:15 2018															
13	Header=	PK	RT	Area Pct	Library/ID	Ref	CAS	Qual									
14																	
15																	
16																	
17																	
18																	
19																	
20																	
21																	
22																	
23																	
24																	
25																	
26																	
27																	
28																	
29																	
30																	
31																	
32																	

BJ8-Muestra 5

Listo Bloq Mayús

start Enhanced Data A... gcms /Enhanced -... liner.pdf - Adobe ... Multi-Notepad... resultados BJ - Mi... muestra BJ8.D My Computer Microsoft Excel - ... 100% 5:16 PM

BJ1- ESTANDAR A 10 PPM



BJ1- Standard 10ppm - Microsoft Excel

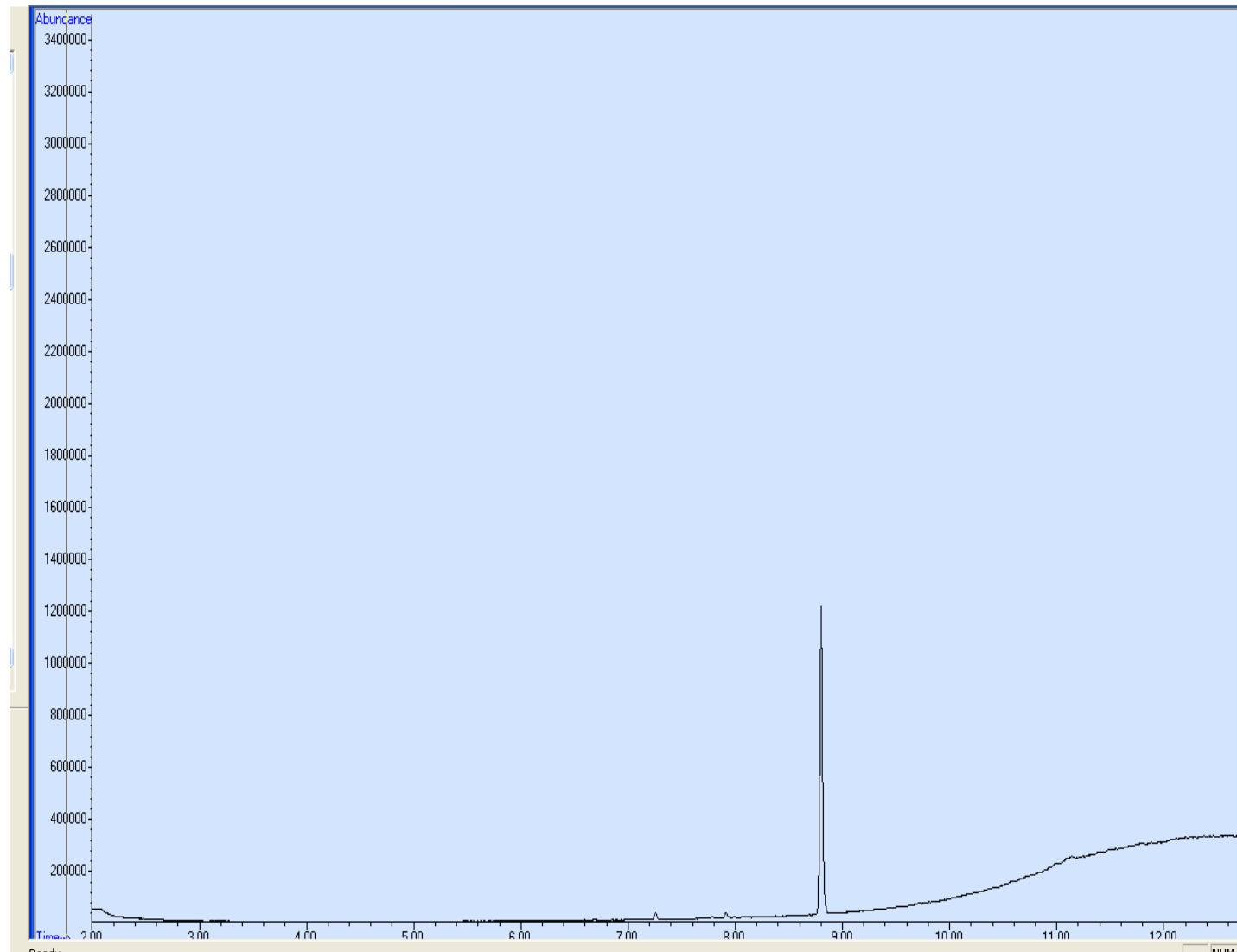
Archivo Inicio Insertar Diseño de página Fórmulas Datos Revisar Vista

Cortar Copiar Copiar formato Portapapeles Fuente Alineación Ajustar texto Combinar y centrar General Número Formato condicional Dar formato como tabla Estilos

A1 [contents]

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	[contents]										
2	count=2										
3	Name=	C:\msdchem\1\DATA\wilson2017\muestra BJ1.D									
4	1=	INT TIC: muestra BJ1.D\data.ms									
5	2=	PBM Apex									
6	[INT TIC: muestra BJ1.D\data.ms]										
7	Time=	Thu May 03 15:14:24 2018									
8	Header=	Peak	R.T.	First	Max	Last	PK TY	Height	Area	Pct Max	Pct Total
9	1=	1	8.796	1493	1570	1593	BV	419501	7626161	100	61.827
10	2=	2	12.424	1593	2406	2421	PV	22377	4134011	54.21	33.515
11	3=	3	12.535	2421	2432	2444	VV	11985	574493	7.53	4.658
12	[PBM Apex]										
13	Time=	Thu May 03 16:21:21 2018									
14	Header=	PK	RT	Area Pct	Library/ID	Ref	CAS	Qual			
15	1=	1	8.7933	100	Chlorpyrifos	205166	002921-88-2	99			
16											
17											

BJ2- ESTANDAR A 25 PPM



BJ2-Standard 25 ppm - Microsoft Excel

Archivo Inicio Insertar Diseño de página Fórmulas Datos Revisar Vista

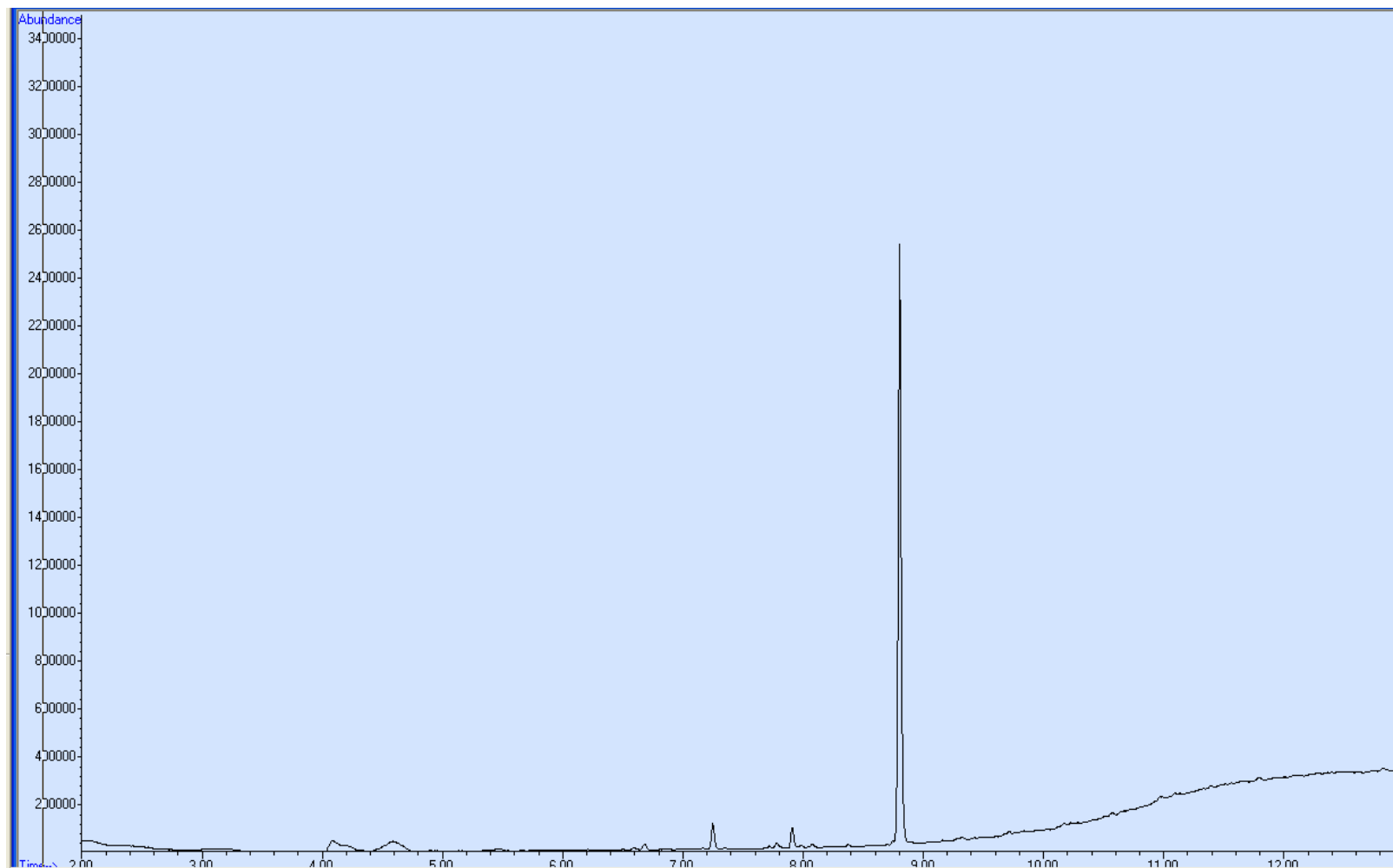
Calibri 11 A A Ajustar texto General

Cortar Copiar Copiar formato Pegar Fuente Alineación Número Estilos

A1 [contents]

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
1	[contents]												
2	count=2												
3	Name=	C:\msdchem\1\DATA\wilson2017\muestra BJ2.D											
4	1=	INT TIC: muestra BJ2.D\data.ms											
5	2=	PBM Apex											
6	[INT TIC: muestra BJ2.D\data.ms]												
7	Time=	Thu May 03 15:31:38 2018											
8	Header=	Peak	R.T.	First	Max	Last	PK TY	Height	Area	Pct Max	Pct Total		
9	1=	1	8.804	1476	1571	1590	BB	1157619	21134413	57.45	36.489		
10	2=	2	12.838	1613	2502	2527	BBA	10810	36786193	100	63.511		
11	[PBM Apex]												
12	Time=	Thu May 03 16:21:48 2018											
13	Header=	PK	RT	Area Pct	Library/ID	Ref	CAS	Qual					
14	1=	1	8.8019	100	Chlorpyrifos	205166	002921-88-2	99					
15													
16													
17													
18													

BJ-3 ESTANDAR A 50 PPM



BJ3-Standard 50ppm - Microsoft Excel

Archivo Inicio Insertar Diseño de página Fórmulas Datos Revisar Vista

Cortar Copiar Copiar formato Portapapeles Fuente Alineación Número Estilos

Calibri 11 Ajustar texto General \$ % 000 00 00

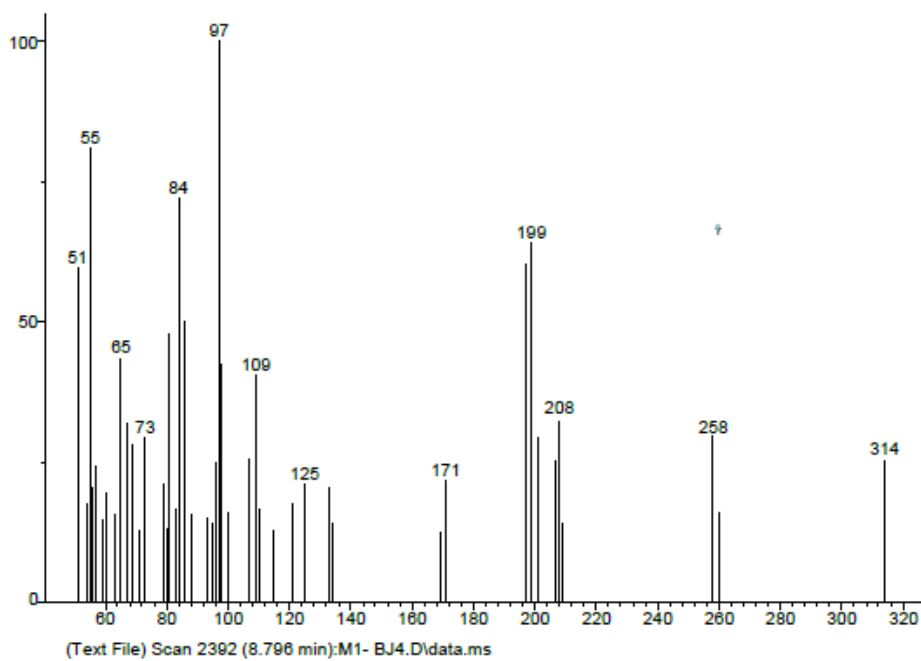
Formato condicional Dar formato como tabla Estilo celd

A1 [contents]

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1	[contents]											
2	count=2											
3	Name=	C:\msdchem\1\DATA\wilson2017\muestra BJ3.D										
4	1=	INT TIC: muestra BJ3.D\data.ms										
5	2=	PBM Apex										
6	[INT TIC: muestra BJ3.D\data.ms]											
7	Time=	Thu May 03 15:48:51 2018										
8	Header=	Peak	R.T.	First	Max	Last	PK TY	Height	Area	Pct Max	Pct Total	
9	1=	1	4.091	447	484	549	BV 5	42895	3803682	8.53	3.547	
10	2=	2	4.589	549	599	644	VB 6	40858	4143866	9.3	3.864	
11	3=	3	7.252	1161	1213	1227	BV	105284	2040549	4.58	1.903	
12	4=	4	7.912	1354	1366	1391	PV 2	82474	1573945	3.53	1.468	
13	5=	5	8.805	1491	1572	1606	BV	2474934	44579540	100	41.57	
14	6=	6	9.322	1606	1691	1703	PV	12088	453905	1.02	0.423	
15	7=	7	11.797	1703	2262	2274	PV	62228	29552646	66.29	27.557	
16	8=	8	12.829	2274	2500	2522	VV	20674	21091902	47.31	19.668	
17	[PBM Apex]											
18	Time=	Thu May 03 16:22:38 2018										
19	Header=	PK	RT	Area Pct	Library/ID	Ref	CAS	Qual				
20	1=	1	7.2499	4.2455	2-[2-Thienyl]	114269	027302-83-6	38				
21	2=	2	8.8062	95.7545	Chlorpyrifos	205166	002921-88-2	99				
22												
23												
24												
25												

ESPECTRO DE MASAS BJ-4 MUESTRA 1

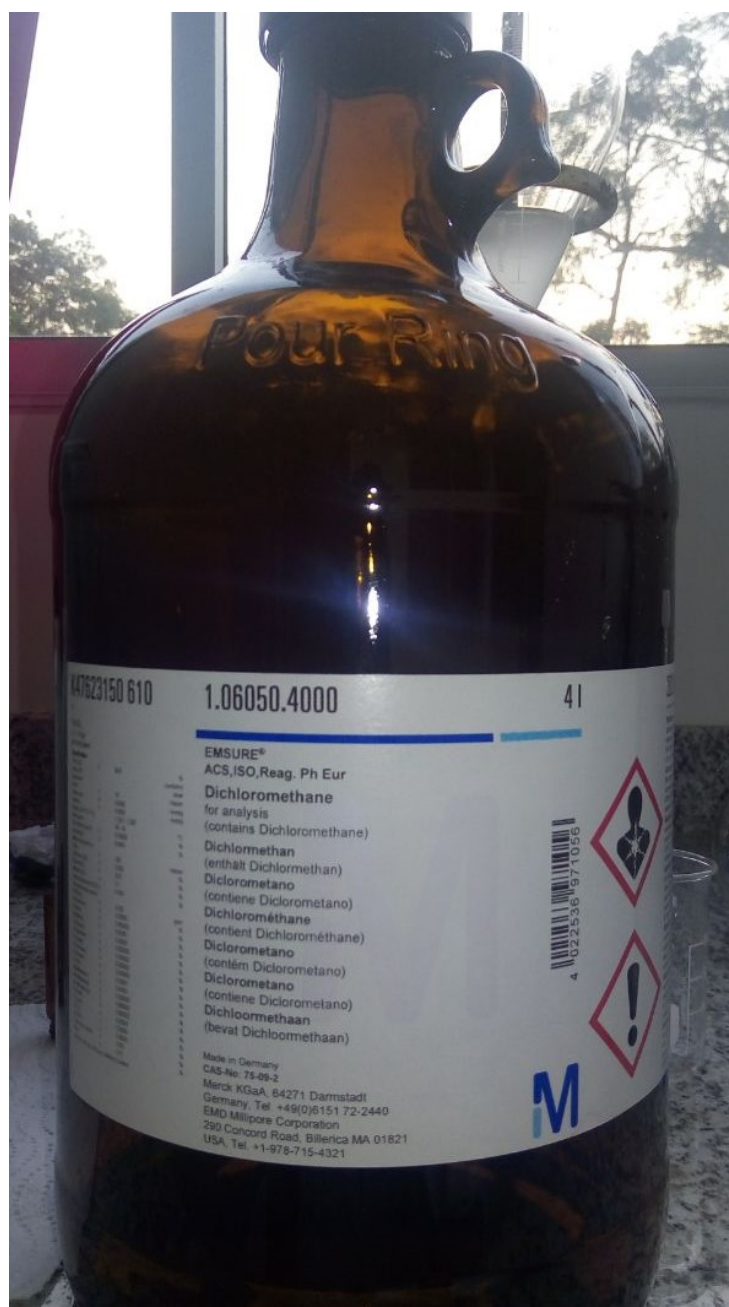
Espectro de masas del pico correspondiente al tR= 8.796 minutos de la Muestra 1, correspondiente al clorpirifós



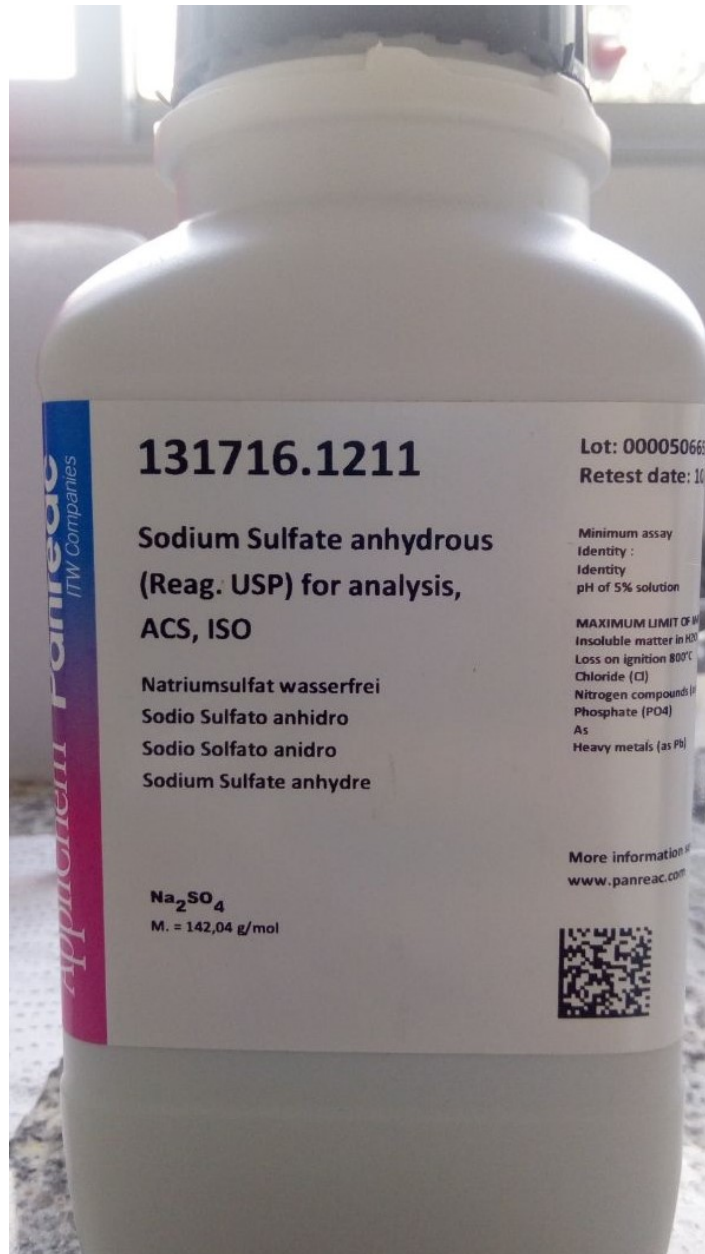
ANEXO D

OTROS EQUIPOS Y REACTIVOS UTILIZADOS EN LA EXPERIMENTACION

Diclorometano



Sulfato de sodio anhidro: se utilizo para eliminar las trazas de agua que pudieran quedar en el solvente para los análisis en el espectrofotómetro UV-VIS.



pH- metro utilizado



ANEXO E DATOS DE SEGURIDAD



HOJA DE DATOS DE SEGURIDAD

Nombre del Producto: **ACIDO CLORHÍDRICO**
 Fecha de Revisión: Febrero 2016. Revisión N°5



ONU:
UN:1789



NFPA



HMIS

SECCION 1 : IDENTIFICACION DEL PRODUCTO Y DE LA COMPAÑÍA

PRODUCTO

Nombre Químico: ACIDO CLORHÍDRICO - HCL
 Número CAS: 7647-01-0
 Sinónimos: Cloruro de Hidrogeno en solución, Ácido Muriático, Acido Hidroclórico

COMPAÑÍA: GTM

Teléfonos de Emergencia

México : +52 55 5831 7905– SETIQ 01 800 00 214 00
 Guatemala: +502 6628 5858
 El Salvador: +503 2251 7700
 Honduras: +504 2564 5454
 Nicaragua: +505 2269 0361 – Toxicología MINSA: +505 22897395
 Costa Rica: +506 2537 0010 – Emergencias 9-1-1. Centro Intoxicaciones +506 2223-1028
 Panamá: +507 512 6182 – Emergencias 9-1-1
 Colombia: +018000 916012 Cisproquim / (571) 2 88 60 12 (Bogotá)
 Perú: +511 614 65 00
 Ecuador: +593 2382 6250 – Emergencias (ECU) 9-1-1
 Argentina +54 115 031 1774
 Brasil: +55 21 3591-1868

SECCION 2 : COMPOSICION / INFORMACION SOBRE LOS INGREDIENTES

ACIDO CLORHIDRICO CAS : 7647-01-0 30 - 33%

SECCION 3 : IDENTIFICACION DE PELIGROS

Clasificación ONU: Clase 8 Corrosivo
Clasificación NFPA: Salud: 3 Inflamabilidad: 0 Reactividad: 1
Clasificación HMIS: Salud: 3 Inflamabilidad: 0 Físico: 1

EFFECTOS ADVERSOS POTENCIALES PARA LA SALUD:

Inhalación:	La inhalación de los vapores puede producir tos, asfixia, inflamación de la nariz, garganta y tracto respiratorio superior y en casos severos, edema pulmonar, fallo circulatorio y muerte.
Ingestión:	La ingestión de ácido clorhídrico puede causar dolor inmediato y quemaduras en la boca, garganta, esófago y tracto gastrointestinal. Puede causar náuseas, vómitos y diarrea. La ingestión puede ser fatal.
Contacto con los ojos:	Los vapores son irritantes y pueden causar daño ocular. El contacto puede causar severas quemaduras y daño ocular permanente.
Contacto con la piel:	Corrosivo. Puede causar enrojecimiento, dolor y quemaduras severas de la piel. Las soluciones concentradas causan úlceras profundas y decoloración de la piel.
Efectos sobre exposición aguda:	¡Veneno! ¡Peligro! Corrosivo. El aerosol y el líquido causan severas quemaduras al tejido corporal. Puede ser fatal si se ingiere o inhala.
Efectos sobre exposición crónica:	La exposición por largo tiempo a los vapores concentrados puede causar erosión dental. Las exposiciones por largo tiempo ocurren raramente debido a las propiedades corrosivas del ácido.
Condiciones agravadas con la exposición:	Las personas con desórdenes cutáneos ya existentes o enfermedad ocular, pueden ser más susceptibles a los efectos de esta sustancia.
Peligros Especiales:	¡Veneno! ¡Peligro! Corrosivo.

SECCION 4 : MEDIDAS DE PRIMEROS AUXILIOS

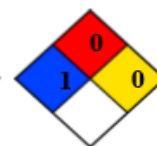
Inhalación:	Trasladar a la víctima al aire libre. Si la respiración es difícil, suministrar oxígeno.
Contacto Dérmico:	Lave la piel inmediatamente con abundante agua y jabón por lo menos durante 15 minutos mientras se retira la ropa y zapatos contaminados. Busque atención médica inmediata.
Contacto Ocular:	Lave bien los ojos inmediatamente al menos durante 15 minutos, elevando los párpados superior e inferior ocasionalmente para garantizar la remoción del químico. Busque atención médica inmediata.

HOJA DE DATOS DE SEGURIDAD

Nombre del Producto: **SULFATO DE HIERRO (II) HEPTAHIDRATADO**
Fecha de Revisión: Agosto 2014. Revisión N°3



ONU:
UN:9125



NFPA

SECCION 1 : IDENTIFICACION DEL PRODUCTO Y DE LA COMPAÑÍA

PRODUCTO

Nombre Químico: SULFATO DE HIERRO (II) HEPTAHIDRATADO - FeSO4-7H2O
Número CAS: 7782-63-0
Sinónimos: Sulfato ferroso heptahidratado, Sal del ácido sulfúrico de hierro (II) heptahidratada, Vitriolo verde, Caparrosa, Vitriolo de hierro, Sal ferruginosa.

COMPAÑÍA: GTM

SECCION 2 : COMPOSICION / INFORMACION SOBRE LOS INGREDIENTES

SULFATO DE HIERRO (II) HEPTAHIDRATADO	CAS: 7782-63-0	100%
---------------------------------------	----------------	------

SECCION 3 : IDENTIFICACION DE PELIGROS

Clasificación ONU: Clase 9 Misceláneo
Clasificación NFPA: Salud:1 Inflamabilidad: 0 Reactividad: 0

EFFECTOS ADVERSOS POTENCIALES PARA LA SALUD:

Inhalación: Causa irritación a las vías respiratorias, nariz y garganta. Los síntomas pueden incluir tos y dificultad para respirar.

Ingestión: Baja toxicidad en pequeñas cantidades, sin embargo, pueden ser tóxicas para los niños. En dosis altas puede causar náuseas, vómitos y diarrea. La coloración rosada de la orina es un fuerte indicador de la intoxicación por hierro. El daño al hígado, coma y muerte por envenenamiento de hierro han sido registrados. Puede causar daños irreversibles en el hígado, bazo y sistema linfático.

Contacto con la piel: Causa irritación a la piel. Los síntomas incluyen enrojecimiento, picazón y dolor.

Contacto con los ojos: Causa irritación, enrojecimiento y dolor.

La exposición crónica: Se han registrado estados de coma y muerte por daños en el hígado por envenenamiento con sulfato de hierro en concentraciones crónicas. El envenenamiento severo o crónico por sulfato ferroso puede dañar los vasos sanguíneos. Grandes dosis causan raquitismo en los niños. La exposición crónica puede causar efectos en el hígado. La exposición prolongada de los ojos puede causar decoloración.

HOJA DE DATOS DE SEGURIDAD HIDROXIDO DE SODIO



Fecha Revisión: 21/03/2005

SECCIÓN 1: PRODUCTO QUÍMICO E IDENTIFICACIÓN DE LA EMPRESA

Nombre del Producto: HIDROXIDO DE SODIO

Sinónimos: Soda cáustica (anhídra), Soda cáustica en escamas, Cáustico blanco, Lejía, Hidrato de sodio.

Fórmula: NaOH

Número interno:

Número UN: 1823 Sólido

Clase UN: 8

Compañía que desarrolló la Hoja de Seguridad: Esta hoja de datos de seguridad es el producto de la recopilación de información de diferentes bases de datos desarrolladas por entidades internacionales relacionadas con el tema. La alimentación de la información fue realizada por el Consejo Colombiano de Seguridad, Carrera 20 No. 39 - 62. Teléfono (571) 2886355. Fax: (571) 2884367. Bogotá, D.C. - Colombia.

Teléfonos de Emergencia:

SECCIÓN 2: COMPOSICIÓN E INFORMACIÓN SOBRE INGREDIENTES

Componente	CAS	COMPONENTES		
		TWA	STEL	%
Hidróxido de sodio	1310-73-2	N.R. (ACGIH 2004)	C 2 mg/m3 (ACGIH 2004)	99-100

Uso: Neutralización de ácidos, refinación del petróleo, producción de papel, celulosa, textiles, plásticos, explosivos, removedor de pinturas, limpiador de metales, electroplateado, limpiadores comerciales y domésticos, pelado de frutas y verduras en la industria de alimentos.

SECCIÓN 3: IDENTIFICACIÓN DE PELIGROS

VISIÓN GENERAL SOBRE LAS EMERGENCIAS:

Peligro. Corrosivo. Higroscópico. Reacciona con agua ácidos y otros materiales. Causa quemaduras a piel y ojos. Puede ocasionar irritación severa de tracto respiratorio y digestivo con posibles quemaduras. En casos crónicos puede producir cáncer en el esófago y dermatitis por contacto prolongado con la piel.

EFFECTOS ADVERSOS POTENCIALES PARA LA SALUD:

Inhalación: Irritante severo. Los efectos por la inhalación del polvo o neblina varían desde una irritación moderada hasta serios daños del tracto respiratorio superior, dependiendo de la severidad de la exposición. Los síntomas pueden ser estornudos, dolor de garganta o goteo de la nariz. Puede ocurrir neumonía severa.

Ingestión: Corrosivo!. La ingestión puede causar quemaduras severas de la boca, garganta y estómago. Pueden ocurrir severas lesiones tisulares y muerte. Los síntomas pueden ser sangrado, vómitos, diarrea, caída de la presión sanguínea. Los daños pueden aparecer algunos días después de la exposición.

Piel: Corrosivo! El contacto con la piel puede causar irritación o severas quemaduras y cicatrización en las exposiciones mayores.

Ojos: Produce irritación con dolor, enrojecimiento y lagrimeo constante. En casos severos quemaduras de la córnea e incluso ceguera.

Efectos crónicos: Contacto prolongado produce dermatitis, fisuras e inflamación de la piel. Puede causar cáncer al esófago.



HOJA DE DATOS DE SEGURIDAD PEROXIDO DE HIDROGENO 30%

<p>1. Identificación de la sustancia/preparado y de la sociedad o empresa</p> <p>Identificación de la sustancia o del preparado</p> <p>1.1 Denominación: Peróxido de Hidrógeno 30%</p> <p>1.2 Uso de la sustancia o preparado: Para usos de laboratorio, análisis, investigación y química fina.</p> <p>1.3 Identificación de la sociedad o empresa: CONTROL TÉCNICO Y REPRESENTACIONES, S.A. DE C.V. Av. Lincoln No. 3410 Pte. Col. Mitas Norte www.ctr.com.mx Tels. (81) 8158 0600, 8158 0628, 8158 0633 e-mail : ctrscientifico@infosel.net.mx Apdo. Postal 044-C Monterrey N.L. C.P. 64320, México</p>
<p>2. Identificación de los peligros</p> <p>2.1 Nocivo por ingestión. Riesgo de lesiones oculares graves.</p>
<p>3. Composición/Información de los componentes</p> <p>3.1 Solución acuosa</p> <p>3.2 Hidrógeno Peróxido 30% p/v (100 vol.) Fórmula: H₂O₂ M.=34,01</p>
<p>4. Primeros auxilios</p> <p>4.1 Indicaciones generales: En caso de pérdida del conocimiento nunca dar a beber ni provocar el vómito.</p> <p>4.2 Inhalación: Trasladar a la persona al aire libre. En caso de que persista el malestar, pedir atención médica.</p> <p>4.3 Contacto con la piel: Lavar abundantemente con agua. Quitarse las ropas contaminadas. En caso de irritación, pedir atención médica.</p> <p>4.4 Ojos: Lavar con agua abundante (mínimo durante 15 minutos), manteniendo los párpados abiertos. Pedir atención médica.</p> <p>4.5 Ingestión: Beber agua abundante. Evitar el vómito (existe riesgo de perforación). Pedir inmediatamente atención médica. No neutralizar.</p>

ficha de datos de seguridad

conforme al Reglamento (CE) no 1907/2006 (REACH) modificado por 2015/830/UE



Diclorometano ROTISOLV® ≥99,8 %, UV/IR-Grade

número de artículo: 4433
Versión: 1.0 es

fecha de emisión: 08.04.2016

SECCIÓN 1: Identificación de la sustancia o la mezcla y de la sociedad o la empresa

1.1 Identificador del producto

Identificación de la sustancia	Diclorometano
Número de artículo	4433
Número de registro (REACH)	01-2119480404-41-xxxx
No de índice	602-004-00-3
Número CE	200-838-9
Número CAS	75-09-2

1.2 Usos pertinentes identificados de la sustancia o de la mezcla y usos desaconsejados

Usos identificados: producto químico de laboratorio

1.3 Datos del proveedor de la ficha de datos de seguridad

Carl Roth GmbH + Co KG
Schoemperlenstr. 3-5
D-76185 Karlsruhe
Alemania

Teléfono: +49 (0) 721 - 56 06 0
Fax: +49 (0) 721 - 56 06 149
e-mail: sicherheit@carlroth.de
Sitio web: www.carlroth.de

Persona competente responsable de la ficha de datos de seguridad : Department Health, Safety and Environment

e-mail (persona competente) : sicherheit@carlroth.de

1.4 Teléfono de emergencia

Servicios de información para casos de emergencia : Poison Centre Munich: +49/(0)89 19240

SECCIÓN 2: Identificación de los peligros

2.1 Clasificación de la sustancia o de la mezcla

Clasificación según el Reglamento (CE) no 1272/2008 (CLP)

Clasificación según SGA			
Sección	Clase de peligro	Clase y categoría de peligro	Indicación de peligro
2.2	corrosión o irritación cutáneas	(Skin Irrit. 2)	H315
2.3	lesiones oculares graves o irritación ocular	(Eye Irrit. 2)	H319
2.6	carcinogenicidad	(Carc. 2)	H351
3.02	toxicidad específica en determinados órganos - exposición única (irritación de las vías respiratorias)	(STOT SE 3)	H335
3.03	toxicidad específica en determinados órganos - exposición única (efectos narcóticos, somnolencia)	(STOT SE 3)	H336

ficha de datos de seguridad

conforme al Reglamento (CE) no 1907/2006 (REACH) modificado por 2015/830/AE



Diclorometano ROTISOLV® ≥99,8 %, UV/IR-Grade

número de artículo: 4433

Clasificación según SGA			
Sección	Clase de peligro	Clase y categoría de peligro	Indicación de peligro
3.9	toxicidad específica en determinados órganos (exposiciones repetidas)	(STOT RE 2)	H373

Observaciones

Véase el texto completo de las frases H y EUH en la SECCIÓN 16.

Los principales efectos adversos fisicoquímicos, para la salud humana y para el medio ambiente

Efectos narcóticos.

2.2 Elementos de la etiqueta

Etiquetado según el Reglamento (CE) no 1272/2008 (CLP)

Palabra de advertencia

Atención

Pictogramas



Indicaciones de peligro

H315	Provoca irritación cutánea.
H319	Provoca irritación ocular grave.
H335	Puede irritar las vías respiratorias.
H336	Puede provocar somnolencia o vértigo.
H351	Se sospecha que provoca cáncer.
H373	Puede provocar daños en los órganos tras exposiciones prolongadas o repetidas.

Consejos de prudencia

Consejos de prudencia - prevención

P260	No respirar la niebla/los vapores/el aerosol.
P280	Llevar guantes/gafas/máscara de protección.

Consejos de prudencia - respuesta

P305+P351+P338	EN CASO DE CONTACTO CON LOS OJOS: aclarar cuidadosamente con agua durante varios minutos. Quitar las lentes de contacto, si lleva y resulta fácil. Seguir aclarando.
P308+P313	EN CASO DE exposición manifiesta o presunta: consultar a un médico.

Reservado exclusivamente a usuarios profesionales

HOJA DE DATOS DE SEGURIDAD

Nombre del Producto: **SULFATO DE SODIO ANHIDRO**
Fecha de Revisión: Agosto 2014. Revisión N°3



NFPA

SECCION 1 : IDENTIFICACION DEL PRODUCTO Y DE LA COMPAÑÍA

PRODUCTO

Nombre Químico: SULFATO DE SODIO ANHIDRO - Na₂SO₄
Número CAS: 7757-82-6
Sinónimos: Salt Cake

COMPAÑÍA: GTM

Teléfonos de Emergencia

México : +55 5831 7905 – SETIQ 01 800 00 214 00
Guatemala: +502 6628 5858
El Salvador: +503 2251 7700
Honduras: +504 2540 2520
Nicaragua: +505 2269 0361 – Toxicología MINSA: +505 22897395
Costa Rica: +506 2537 0010 – Emergencias 9-1-1. Centro Intoxicaciones +506 2223-1028
Panamá: +507 512 6182 – Emergencias 9-1-1
Colombia: +018000 916012 Cisproquim / (571) 2 88 60 12 (Bogotá)
Perú: +511 614 65 00
Ecuador: +593 2382 6250 – Emergencias (ECU) 9-1-1
Argentina +54 115 031 1774

SECCION 2 : COMPOSICION / INFORMACION SOBRE LOS INGREDIENTES

SULFATO DE SODIO ANHIDRO **CAS: 7757-82-6** **99.5%**

SECCION 3 : IDENTIFICACION DE PELIGROS

Clasificación ONU: No regulado

Clasificación NFPA: Salud: 1 Inflamabilidad: 0 Reactividad: 0

EFFECTOS ADVERSOS POTENCIALES PARA LA SALUD:

Inhalación:	Puede irritar la nariz, la garganta y los pulmones, si se exceden los niveles PEL o TLV.
Ingestión:	Este producto no se considera tóxico pero no debe ingerirse. Si se ingiere puede irritar la boca, esófago y estómago. Beber soluciones de sulfato de sodio puede causar diarrea.
Contacto con los ojos:	Puede causar irritación.
Contacto con la piel:	Puede causar irritación si la exposición es prolongada.

SECCION 4: MEDIDAS DE PRIMEROS AUXILIOS

Contacto Ocular:	Enjuague los ojos con abundante agua, remueva cualquier lente de contacto y continúe enjuagando durante varios minutos. Buscar atención medica si se presenta o persiste la irritación.
Contacto Dérmico:	Lave las áreas afectadas con abundante agua y jabón durante varios minutos. Busque atención médica si persiste la irritación.
Inhalación:	Retirarse del área y situarse en el aire fresco. Buscar atención médica si se desarrolla irritación respiratoria o si se dificulta la respiración.
Ingestión:	Si se ingieren grandes cantidades de este material, busque atención médica de inmediato, no inducir al vómito a menos que sea indicado por el médico. Nunca suministre nada por la boca a una persona inconsciente.

SECCION 5: MEDIDAS PARA EXTINCION DE INCENDIOS

Fuego:	Material no inflamable. Utilice un material compatible para las condiciones de fuego en los alrededores (CO ₂).
Equipo especial En el combate de incendios:	Ninguno
Procedimiento y precauciones En el combate de incendios:	Ninguno
Resultados de la Combustión:	El sulfato de sodio anhidro no es inflamable, combustible o explosivo. No presenta un riesgo inusual cuando se involucra en fuego.