

**REMOCIÓN DEL CONTAMINANTE EMERGENTE DIPIRONA MEDIANTE
OXIDACIÓN AVANZADA EN AGUAS RESIDUALES HOSPITALARIAS DE SAN
ANTONIO DE PADUA, LA PLATA, HUILA.**



Uniautónoma
DEL CAUCA

Autores

**Valentina Escobar Tovar
Karol Daniela Fernández Vargas**

**Corporación Universitaria Autónoma del Cauca
Facultad de Ingeniería
Programa de Ingeniería Ambiental y Sanitaria
Popayán, Cauca
202**

**REMOCIÓN DEL CONTAMINANTE EMERGENTE DIPIRONA MEDIANTE
OXIDACIÓN AVANZADA EN AGUAS RESIDUALES HOSPITALARIAS DE SAN
ANTONIO DE PADUA, LA PLATA, HUILA.**



Uniautónoma
DEL CAUCA

Autores

VALENTINA ESCOBAR TOVAR
KAROL DANIELA FERNÁNDEZ VARGAS

Trabajo de Grado para optar al título de Ingeniero Ambiental y Sanitario

Director

Arnol Arias Hoyos

Corporación Universitaria Autónoma del Cauca
Facultad de Ingeniería
Programa de Ingeniería Ambiental y Sanitaria
Popayán, Cauca
2022

NOTA DE APROBACIÓN

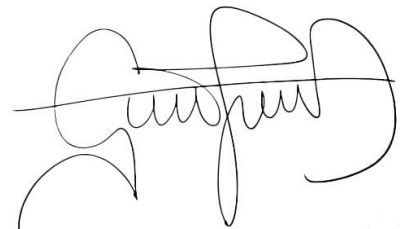
El director y los jurados del trabajo de grado, modalidad Investigación: “**REMOCIÓN DEL CONTAMINANTE EMERGENTE DIPIRONA MEDIANTE OXIDACIÓN AVANZADA EN AGUAS RESIDUALES HOSPITALARIAS DE SAN ANTONIO DE PADUA, LA PLATA, HUILA**”, realizado por: **Valentina Escobar Tovar y Karol Daniela Fernández Vargas**, una vez revisado el informe final y aprobado la sustentación, autorizan para que se realicen los trámites concernientes para optar el título profesional de **Ingeniera Ambiental y Sanitaria**.



Director: Arnol Arias Hoyos



Jurado 1. Cesar Fernández



Jurado 2. Edwin Sierra

DEDICATORIA

“La paciencia y perseverancia tienen un efecto mágico ante las dificultades y los obstáculos”-John Quincy Adams

Le dedicamos este trabajo principalmente a Dios, quien nos ha dado la fuerza para superar todas las dificultades. A nuestra familia quienes con su paciencia, amor, perseverancia, esfuerzo y valentía nos permitieron lograr una de nuestras grandes metas, por acompañarnos durante todo este camino y estar a nuestro lado en todo momento con sus continuas oraciones y palabras que nos hicieron unas mejores personas.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, queremos agradecer a Dios por permitirnos disfrutar de esta etapa académica, por guiarnos en el camino y la toma de decisiones, así como, poner en él personas idóneas que nos apoyaran.

A nuestras familias, por acompañarnos, por su amor y apoyo, ser nuestro sostén en los momentos más difíciles, en especial mención a nuestros padres, en ellos siempre encontramos un abrazo reconfortante y aliento.

De igual forma agradecemos a nuestros tutores el biólogo Arnol Arias y el ph.D. Cristian Miranda, por el apoyo y el acompañamiento brindado durante el proyecto.

A la Corporación Universitaria Autónoma del Cauca y la Universidad del Cauca por permitirnos realizar la tesis en las instalaciones de este prestigioso centro.

Al hospital San Antonio de Padua en La Plata, Huila por brindarnos la información necesaria, así como permitirnos recolectar las muestras necesarias para la realización de esta tesis.

Muchas gracias a todos.

ÍNDICE

RESUMEN	10
ABSTRACT	11
INTRODUCCIÓN	12
CAPÍTULO I: PROBLEMA	14
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	14
1.2 JUSTIFICACIÓN	15
1.3 OBJETIVOS	16
1.3.1 Objetivo general	16
1.3.2 Objetivos específico	16
CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO O REFERENCIAS CONCEPTUALES	17
2.1 ANTECEDENTES	17
2.2 ÁREA DE ESTUDIO	19
2.3 MARCO REFERENCIAL	23
2.4 MARCO NORMATIVO	26
CAPÍTULO III: METODOLOGÍA	28
3.1. FASE I: Diseño de un sistema de tratamiento no convencional que permita la remoción de dipirona.	28
3.1.1 Recolección de información	28
3.1.2 Recolección de las muestras	28
3.1.3 Caracterización del agua residual hospitalaria obtenida en la PTAR.	29
3.1.4 Diseño y construcción del prototipo de oxidación avanzada	30
3.2 FASE II. Determinación de los porcentajes de remoción del contaminante emergente dipirona en los sistemas de tratamiento de oxidación avanzada.	31
3.2.1 Determinación de Dipirona en muestra de agua por UHPLC/DAD	31
3.2.2 Diseño experimental del tratamiento oxidación avanzada tipo Foto-Fenton	32
3.2.3 Análisis de resultados	36
3.3 FASE III. Estimar la viabilidad del proceso de tratamiento de remoción de contaminantes emergentes desde un punto de vista ambiental y económico.	37
3.3.1 Factibilidad	37
CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y ANÁLISIS	38
4.1 FASE I: Diseño de un sistema de tratamiento no convencional que permita la remoción de dipirona.	38
4.1.1 Recolección de información pertinente	38

4.1.2 Recolección de muestras	39
4.1.3 Caracterización de las aguas residuales del Hospital San Antonio de Padua	40
4.1.4 Diseño del prototipo	42
4.2 FASE II. Determinar los porcentajes de remoción del contaminante emergente dipirona en los sistemas de tratamiento de oxidación avanzada.	44
4.2.1 Determinación de dipirona en muestra de agua por UHPLC/DAD	44
4.2.1.1 Curva de calibración	44
4.2.1.2 Concentración de dipirona	47
4.2.2 Diseño experimental del tratamiento oxidación avanzada tipo Foto-Fenton	48
4.2.3 Análisis de varianza del diseño experimental	50
4.2.4 Análisis del estudio cromatográficos	53
4.3 FASE III. Estimar la viabilidad del proceso de tratamiento de remoción de contaminantes emergentes desde un punto de vista ambiental y económico.	56
4.3.1 Factibilidad	56
CAPÍTULO V: CONCLUSIONES	58
CAPÍTULO VI: RECOMENDACIONES	60
ANEXOS	66

ÍNDICE DE TABLA

TABLA 1	Coordenadas geográficas	20
TABLA 2	Principales tecnologías de procesos de oxidación avanzada	25
TABLA 3	Marco normativo Colombiano vigente	27
TABLA 4	Equipos usados por el laboratorio de la Universidad Autónoma del Cauca	29
TABLA 5	Equipos usados por el laboratorio de la Universidad del Cauca	30
TABLA 6	Lista de materiales para el reactor	31
TABLA 7	Criterios de diseño experimental	34
TABLA 8	Resultados de los parámetros fisicoquímicos	37
TABLA 9	Fármacos y medicamentos de mayor utilidad en HSAP	39
TABLA 10	Resultados de los parámetros fisicoquímicos antes de la PTAR	41
TABLA 11	Resultados de los parámetros fisicoquímicos después de la PTAR	42
TABLA 12	Dimensiones del prototipo	42
TABLA 13	parámetros estadísticos calculados	45
TABLA 14	Proceso foto-fenton en agua destilada	49
TABLA 15	Proceso foto-fenton en agua residual hospitalaria	50
TABLA16	Análisis estadístico anova de los datos experimentales – agua destilada	51
TABLA 17	Comparación para H ₂ O ₂	52
TABLA 18	Comparación para el tiempo de exposición	52
TABLA 19	Análisis estadístico Anova de los datos experimentales – agua residual hospitalaria	52
TABLA 20	Comparación para H ₂ O ₂	53
TABLA 21	Comparación para tiempo de exposición	53
TABLA 22	Resumen del proceso foto-fenton	5
4		
TABLA 23	Principales técnicas y estudios para remoción de medicamentos	56

LISTA DE FIGURAS

Fig. 1. Ubicación del Hospital Departamental San Antonio de Padua	19
Fig. 2. Hospital Departamental San Antonio de Padua	19
Fig. 3. Hidrografía del Huila	20
Fig. 4. Vertimiento de las aguas residuales del Hospital San Antonio de Padua.	21
Fig. 5. Estructura química y biotransformación de la dipirona. dip: dipirona, maa: 4-metilaminoantipirina, aa: 4-aminoantipirina, faa: 4-formilaminoantipirina, aaa: 4-acetilaminoantipirina.	24
Fig. 6. Puntos de monitoreo.	29
Fig. 7. Muestra de agua destilada inyectada con dipirona	35
Fig. 8. Medición del pH	35
Fig. 9. Proceso foto-fenton	36
Fig. 10. Plano de la planta de tratamiento de aguas residuales del Hospital San Antonio de Padua.	38
Fig. 11. Recolección de muestra después de la PTAR	40
Fig. 12. Recolección de muestra antes de la PTAR	40
Fig. 13. Diseño del reactor para el proceso Foto-Fenton	43
Fig. 14. Prototipo del reactor.	43
Fig. 15. Prototipo del reactor	44
Fig. 16. Lámpara esterilizadora sumergible UV	44
Fig. 17. Curva de calibración dipirona	45
Fig. 18. Degradación de la dipirona en el ambiente. Verde: Día 1-Morado; Día 12-Verde	46
Fig. 19. Excipientes del medicamento dipirona. Concentraciones de calibración 1, 5, 10, 15 y 20 µg/mL respectivamente, preparadas en balones de 10 mL y aforando con agua desionizada.	47
Fig. 20. Cromatografía de Dipirona en agua residual hospitalaria. A) Antes de la PTAR. B) Después de la PTAR	48
Fig. 21. Resultados del proceso foto-fenton. A) Agua destilada B) Agua residual hospitalaria.	55

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1. Ecuación redox	25
Ecuación 2. Ecuación redox	25
Ecuación 3. Ecuación redox	25
Ecuación 4. Volumen de la lámpara	31
Ecuación 5. Volumen del reactor	30
Ecuación 6. Eficiencia de remoción	37
Ecuación 7. Ecuación de la recta	47
Ecuación 8. Ecuación de dilución	49
Ecuación 9. Ecuación de la recta	51

RESUMEN

El objetivo del presente estudio es evaluar la eficiencia de remoción del contaminante emergente dipirona mediante el tratamiento de oxidación avanzada en aguas residuales hospitalarias de San Antonio de Padua, La Plata, Huila, considerando que es de gran importancia ya que en algunos casos se han detectado compuestos persistentes en el agua sin sufrir ninguna alteración, incluso después de aplicar tratamientos terciarios.

Para la evaluación de la eficiencia de Foto-fenton se obtuvieron muestras de agua residual en el Hospital San Antonio de Padua, las cuáles se caracterizaron de manera fisicoquímica y biológica, para conocer las condiciones iniciales. Los parámetros analizados fueron turbidez, pH, DBO, DQO, oxígeno disuelto y el analito dipirona. El método fenton se aplicó en 8 muestras de 1L cada una de agua residual, se planteó un diseño factorial de dos niveles con el objetivo de optimizar las concentraciones de los reactivos utilizando cantidades mínimas para obtener la mayor reducción y/o biodegradabilidad del agua contaminada, para la selección de estas variables, donde se evaluaron la concentración de H_2O_2 al 50% (100 y 200 mg/L) y el tiempo de reacción de 60 y 120 minutos, utilizando el sulfato ferroso como catalizador a una concentración de 5 mg/L, para el método Foto-fenton se utilizó una lámpara esterilizadora sumergible de luz en el espectro ultravioleta, con una potencia de 13W como fuente de energía para la fotólisis del contaminante, los ensayos catalíticos fueron realizados en un reactor operados a temperatura ambiente y ajustando el pH con ácido sulfúrico al 95%. Las concentraciones de dipirona en las muestras se determinaron por el método de Cromatógrafo Líquido de Ultra Alta Resolución (UHPLC/DAD), equipado con bomba binaria, desgasificador online, horno de columna y detector de arreglo de diodos (DAD 190-800 nm).

Se determinó la presencia de dipirona en la PTAR del hospital San Antonio de Padua, sin detección por parte del equipo UHPLC, lo que podría indicar la ausencia de dipirona o se encuentra por debajo del límite de detección. Además, se obtuvo para el caso de las muestras de agua residual hospitalaria enriquecidas con dipirona de solución inyectable mayor eficiencia en los H_2O_2 100 mg/L a 120 min y 200 mg/L a 60 min, siendo este último el que presenta mayor eficiencia con 95,86% de remoción. Es necesario tener en cuenta razones económicas y operativas a gran escala, puesto que en ambos casos los porcentajes de remoción están por encima del 95%, resulta con mayor viabilidad como complemento de la PTAR el uso de 100 mg/L de H_2O_2 .

Palabra claves: Aguas residuales hospitalarias, oxidación avanzada, Foto-Fenton, contaminantes emergentes, fármacos, Dipirona

ABSTRACT

The objective of this study is to evaluate the removal efficiency of the emerging pollutant dipyrone by advanced oxidation treatment in hospital wastewater from San Antonio de Padua, La Plata, Huila, considering that it is of great importance since in some cases persistent compounds have been detected in the water without suffering any alteration, even after applying tertiary treatments.

For the evaluation of the efficiency of Photo-Fenton, wastewater samples were obtained from the San Antonio de Padua Hospital, which were characterized in a physicochemical and biological way, to know the initial conditions. The parameters analyzed were turbidity, pH, BOD, COD, dissolved oxygen and the analyte dipyrone. The fenton method was applied in 8 samples of 1L each of wastewater, a two-level factorial design was used with the objective of optimizing the concentrations of the reagents using minimum quantities to obtain the greatest reduction and/or biodegradability of the contaminated water, for the selection of these variables, where the concentration of H₂O₂ at 50% (100 and 200 mg/L) and the reaction time of 60 and 120 minutes were evaluated, For the photo-Fenton method, a submersible sterilizing lamp with ultraviolet spectrum light, with a power of 13W, was used as an energy source for the photolysis of the pollutant. The catalytic tests were carried out in a reactor operated at room temperature and adjusting the pH with 95% sulfuric acid. Dipyrone concentrations in the samples were determined by Ultra High Performance Liquid Chromatography (UHPLC/DAD) method, equipped with a binary pump, online degasser, column oven and diode array detector (DAD 190-800 nm).

The presence of dipyrone was determined in the WWTP of the San Antonio de Padua hospital, without detection by the UHPLC equipment, which could indicate the absence of dipyrone or it is below the detection limit. In addition, for the case of hospital wastewater samples fortified with dipyrone injectable solution, greater efficiency was obtained for H₂O₂ 100 mg/L at 120 min and 200 mg/L at 60 min, the latter being the one with the highest efficiency with 95.86% removal. It is necessary to take into account economic and operational reasons on a large scale, since in both cases the removal percentages are above 95%, the use of 100 mg/L of H₂O₂ is more viable as a complement to the WWTP.

Keyword: Hospital wastewater, advanced oxidation, Photo-Fenton, emerging contaminants, drugs, Dipyrone.

INTRODUCCIÓN

El tratamiento de las aguas residuales hospitalarias es fundamental para disminuir impactos ambientales, restar problemáticas que puedan afectar la salud pública ya que son considerados peligrosos debido al riesgo biológico y químico que los constituyen [16]. La contaminación por contaminantes emergentes (C.E) es cada vez más grave por la cantidad, diversidad y toxicidad, dentro de estos contaminantes de interés se destacan los antibióticos, analgésicos, antiinflamatorios, psiquiátricos, esteroides, hormonas, filtros solares, perfumes, sulfonatos, edulcorantes, pesticidas, herbicidas, drogas de abuso, entre otros [65].

La contaminación por C.E en los ecosistemas acuáticos naturales debido al vertimiento de aguas residuales de origen hospitalario, es uno de los temas de mayor atención ambiental, desde los años 70 que se realizaron los primeros estudios sobre este tema y está el momento existe un conocimiento limitado sobre los efectos al ecosistema y la salud humana a largo plazo, aunque estudios han mostrado que los subproductos pueden ser altamente tóxicos, la mayoría bioacumulables generando trastornos ecológicos [66]. Además, dichos contaminantes que no son nuevos pero que aún no se tiene un amplio conocimiento que permita determinarlos, eliminarlos o regularlos, dado que la mayoría no se encuentran contemplados dentro de un listado de contaminantes prioritarios a nivel nacional [7].

Los hospitales en el desarrollo de sus actividades diarias pueden producir grandes cantidades de agua de vertimientos la cual debe necesariamente retornar al ecosistemas, esta se caracteriza por tener una biodegradabilidad baja haciéndose necesario utilizar tratamientos fisicoquímicos o biológicos, desde hace varios años se ha creado técnicas de cuantificación y desarrollado nuevos métodos de tratamientos con mejor eficiencia para la remoción de estos contaminantes emergentes (C.E), clasificándose actualmente en fisicoquímicos, biológicos y avanzados. Algunos de estos métodos son la ultrafiltración, oxidación avanzada, adsorción, tratamientos biológicos, tratamiento con membranas, tratamientos combinados, nanofiltración con membranas y empleo de adsorbentes.

En consecuencia, los procesos de oxidación avanzada contribuyen una buena alternativa, ya que, son aprovechados para el tratamiento de aguas residuales domésticas, industriales o contaminantes emergentes como: fármacos, aditivos, cosmética, los plastificantes, etc [26], que no han podido ser removidos con los tratamientos convencionales, además, estos procesos tienen como ventajas la transformación química de los contaminantes, sin la generación de lodos; la mejora de las características organolépticas del agua tratada; la posibilidad de tratar contaminantes que se encuentran en muy baja concentración; Entre la variedad de los tratamientos de Oxidación Avanzada se pueden incluir: la ozonización (O_3), la ozonización en

combinación de (O_3/H_2O_2), la irradiación ultravioleta (UV), la irradiación (UV/ O_3), la irradiación (UV/ H_2O_2), los procesos Fenton (Fe^{2+}/H_2O_2), el foto-Fenton, la oxidación electroquímica, la fotocatalisis, etc [68].

Por consiguiente, el proceso foto-Fenton que se da en presencia de luz ultravioleta (UV/ H_2O_2/Fe^{+2}), ha demostrado ser una buena alternativa para degradar gran variedad de contaminantes, además este proceso combinado, tiene la característica de acelerar la formación de radicales $OH\cdot$ los cuales son los capaces de transformar los compuestos orgánicos presentes en el agua residual en productos más biodegradables [16]; Actualmente, para esta tecnología se buscan nuevos estudios que se enfoquen en estudiar a detalle la cinética de la reacción, con respecto a la concentración de radicales hidroxilos, además de los valores óptimos para los diferentes parámetros que afectan el proceso de oxidación como: pH, temperatura, diseño del reactor, naturaleza y concentración del contaminante y agentes oxidantes que puedan mejorar la reacción [26].

A causa de lo antes mencionado, el presente estudio pretende ampliar el conocimiento respecto al tratamiento de CE, en específico del analgésico dipirona; además, tiene como objetivo evaluar la eficiencia de remoción del contaminante emergente dipirona mediante el tratamiento de oxidación avanzada en aguas residuales hospitalarias de San Antonio de Padua, La Plata, Huila. Por esta razón junto con teoría relacionada con los procesos avanzados de oxidación, se inició con el desarrollo de la caracterización del agua residual de los vertimientos generados por el hospital. Posteriormente se diseñó y construyó el prototipo para desarrollar la metodología propuesta para la experimentación, y finalmente se analizaron los resultados obtenidos al implementar los procesos de oxidación a escala piloto.

CAPÍTULO I: PROBLEMA

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Los contaminantes emergentes (CE) son compuestos químicos de diferente origen y composición química, producto de las actividades que se realizan a diario, actualmente se conoce muy poco de los efectos negativos que estos pueden provocar en los seres humanos, en ecosistemas receptores o las alteraciones en el ambiente, estos han estado presentes en el medio, sin embargo, no habían generado preocupación para la comunidad científica, sus efectos aún están siendo evaluados[1].

Los fármacos y medicamentos se consideran una de las fuentes más importantes de contaminación de aguas residuales hospitalarias, puesto que entre un 30 % y 90 % de la dosis ingerida de estos es expulsada en las secreciones de los pacientes, además, se tiene que estos pueden producir resistencia microbiana, de la misma forma pueden ser bioacumulables y persistentes en el ambiente [1][3]. Existen estudios que demuestran que las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales convencionales (PTAR) y las Plantas Potabilizadoras (PTAP) no están siendo eficientes para remover una gran cantidad de contaminantes emergentes [3].

Los contaminantes emergentes, pueden ser potencialmente dañinas tanto para el medio ambiente como en el ser humanos a pesar de que sus concentraciones son bajas, por lo que es necesario continuar con las investigaciones que permitan conocer el los efectos e impacto que provocan a largo y a mediano plazo, estas sustancias que aún no tiene una regulación ante las entidades competentes, además, estas no están incluidas en las redes de monitoreo ambientales de rutina y muchas plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) no están construidas o adaptadas para hacer frente a estos contaminantes [54].

El departamento del Huila no es ajeno a esta problemática y en especial en el municipio de La Plata no se ha realizado un estudio de CE provenientes de las aguas residuales de la planta de tratamiento del hospital Departamental San Antonio de Padua. Este centro de salud de segundo nivel está ubicado en la zona urbana de La Plata, Huila, el cual atiende las poblaciones de la zona occidente del Huila, los municipios de La Plata, La Argentina, Nátaga, Paicol, y Tesalia, para un total de 99.760 habitantes y la zona oriente Caucaño, los municipios de Inzá y Páez (Belalcázar) con alrededor de 70.000 habitantes [2]. Ofreciendo servicio de

hospitalización con un total de ingresos para el año 2020 de 8575 usuarios aproximadamente, sala de cirugía, sala de partos, urgencias, servicios ambulatorios que incluye consultas, laboratorios, imágenes y terapias [2]. Teniendo en cuenta los servicios prestados por la entidad se encuentran entre los fármacos y medicamentos de mayor uso en el hospital la dipirona, tramadol, dexametasona, metoclopramida, midazolam, diclofenaco, entre otros [2].

En la PTAR con la que cuenta el hospital San Antonio de Padua, no se cuenta con evidencia que avale que esta es eficiente a la hora de remover los CE generados por los residuos de estos fármacos o medicamentos o presentes en las excretas de los pacientes. Es igualmente necesario tener en cuenta que el vertimiento llega al río La Plata lo que conlleva a una posible contaminación de los ecosistemas o actividades que se realicen aguas abajo como la pesca, la agricultura, la ganadería, entre otras, lo que podría afectar directamente a la fauna biótica del ecosistema e indirectamente a la población humana.

1.2 JUSTIFICACIÓN

Dentro del contenido de las aguas residuales hospitalarias se encuentran diversas sustancias químicas como compuestos farmacéuticos, disolventes y desinfectantes usados en diagnósticos médicos, limpieza y en investigación, que pueden considerarse contaminantes emergentes (CE). Generalmente estas aguas son vertidas a la red de alcantarillado sin tratamiento previo, son pocos los hospitales que cuentan con una planta de tratamiento para sus aguas residuales y aun así estos tratamientos convencionales, no son eficaces a la hora de eliminar estos contaminantes [1][52]. Debido a ello, es necesaria la implementación de otras tecnologías como los procesos de oxidación avanzada, que demuestren ser efectivas en la degradación y/o la transformación de estas sustancias [15].

Con el presente estudio se pretende ampliar el conocimiento respecto al tratamiento de CE, en específico del analgésico dipirona en aguas residuales hospitalarias, mediante la determinación de los porcentajes de remoción del medicamento en estudio en las aguas residuales del hospital San Antonio de Padua.

En el campo de estudio se aportará mediante el diseño del tratamiento alternativo, oxidación avanzada a escala piloto, que contribuya al estudio de soluciones para la problemática ambiental que representan los CE.

La investigación es oportuna ya que el contaminante emergente, en este caso la dipirona es usado con mayor frecuencia en el hospital San Antonio de Padua de igual forma [2], se conoce que los fármacos son difícilmente removidos por las PTAR convencionales [52], generando contaminación en la fuente hídrica y suelos, daños en los ecosistemas y la salud humana [1]. Además, el proyecto es importante para la región ya que proporcionará la información pertinente para su implementación en el Hospital San Antonio de Padua, evitando el deterioro de la fuente hídrica.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo general

Evaluar la eficiencia de remoción del contaminante emergente dipirona mediante el tratamiento de oxidación avanzada en aguas residuales hospitalarias de San Antonio de Padua, La Plata, Huila.

1.3.2 Objetivos específico

- Diseñar un sistema de tratamiento no convencional que permita la remoción de dipirona.
- Determinar los porcentajes de remoción del contaminante emergente dipirona en los sistemas de tratamiento de oxidación avanzada.
- Estimar la viabilidad del proceso de tratamiento de remoción de contaminantes emergentes desde un punto de vista ambiental y económico.

CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO O REFERENCIAS CONCEPTUALES

2.1 ANTECEDENTES

Los autores Marlon David Agama Rodríguez y Bryan Enrique Carrera Martínez de la Universidad Salesiana sede Quito, se realiza el tratamiento de aguas residuales de la industria láctea mediante oxidación avanzada, se obtuvo mayor eficiencia con un 98,6% en la disminución de DQO, aplicando dosificaciones de FeSO_4 entre 78 y 88 mg/L, bajo una concentración constante de H_2O_2 de 200 mg/L, el ensayo se realizó de la siguiente manera: tratamiento anaerobio, tratamiento biológico y finalmente aplica PAO's, siendo esta última la de mayor eficiencia de remoción [24].

En el siguiente estudio "Aplicación del método Foto-fenton para el tratamiento de aguas residuales en la industria láctea", en la quesera "Airón" ubicada en el cantón Chambo-Ecuador, se analiza la eficiencia de Foto-fenton con luz artificial en diferentes potencias para el tratamiento de aguas residuales láctea. El método fenton se aplicó en 12 tratamientos de 1000 mL de agua residual con variaciones en la concentración de Fe^{2+} (100 –400) mg/L y H_2O_2 (4500 - 6000) mg/L, a una potencia de 40 watts y un tiempo de contacto de 60 minutos, logrando la reducción de hasta el 90% de coliformes fecales [27].

El objetivo del estudio "Combinación de procesos de oxidación avanzada y procesos anaerobios para tratamiento de aguas residuales hospitalarias" se evaluó el desempeño de un reactor anaerobio horizontal de lecho fijo (RAHLF) tratando aguas residuales hospitalarias previamente ozonizadas. La eliminación de materia orgánica medida a partir de la DQO en el tratamiento combinado fue $93 \pm 4 \%$ y la UV254 fue $74 \pm 6 \%$. El aumento de la biodegradabilidad medida con el valor de la relación DQO/ DBO_5 luego de la aplicación del ozono fue 51%. Se tiene que la combinación de estos dos procesos es una alternativa viable para la degradación de materia orgánica de naturaleza recalcitrante en estos afluentes [13].

La investigación realizada en el río San Pedro en el tramo Tambillo - Cumbayá como área de estudio, establece un valor de 116,68 $\mu\text{g/L}$ de carbamazepina existente y persistente en el último punto de estudio debido a la presencia de vertimientos de aguas residuales hospitalarias, el análisis realizado con cromatografía líquida de alta eficiencia HPLC, no demostró una concentración real para el diclofenaco puesto que posiblemente presenta valores inferiores a 0,1 $\mu\text{g/L}$, se realiza tratamiento con tecnología, resultando eficaz para la

biodegradación del 84,14% de carbamazepina, bajo concentración de 100 mg/L del nanocomposito y acción fotocatalítica por la luz solar, así mismo el diclofenaco presenta una biodegradabilidad de 99,94%, en concentración de 3 mg/L del nanocomposito en las mismas condiciones [12]

En la Universidad de Cartagena se ejecutó el trabajo “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”, donde se tienen en cuenta los vertimientos del laboratorio del grupo de investigación de agroquímica de esta misma universidad, para evaluar la efectividad de los procesos fenton, foto-fenton y UV/H₂O₂, de forma experimental se determinan concentraciones de 2.5 ppm y 540 ppm de Fe⁺² y H₂O₂, respectivamente como las más óptimas para la realización del proceso foto-fenton, llegando a una eficiencia del 96.53 % de disminución del clorpirifós [16].

En la Universidad Federal do Paraná, en Brasil se evaluaron los posibles efectos tóxicos de la dipirona en el medio ambiente acuático, los peces “Rhamdia quelen” fueron expuestos a tres concentraciones de dipirona, 0,5, 5 y 50 µg/L, en el agua durante 15 días, y se evaluó biomarcadores hematológicos, bioquímicos, genéticos y morfológicos. Se evidenció daño en el ADN a la concentración más baja de dipirona y daño renal significativo, de igual forma, los recuentos de hematocrito, glóbulos rojos y trombocitos se redujeron en los tres grupos expuestos en relación con el grupo de control. Esto sugiere que la exposición constante de los organismos acuáticos a la dipirona tiene efectos potencialmente tóxicos [34].

Así mismo, se encuentra el artículo “Análisis comparativo de la degradación de dipirona utilizando el proceso de foto-fenton con radiación UV-C y luz solar”, se busca degradar la dipirona mediante degradación solar, así como la degradación Foto fenton. Mediante Cromatografía Líquida de Alta Eficiencia (CLAE), se realiza la cuantificación de la dipirona antes y después del proceso de oxidación avanzada (POA). Para la realización de los ensayos se usaron alícuotas de 50mL de la solución, las variables para tener en cuenta en este caso son la adición de H₂O₂, adición de FeSO₄, 7H₂O y tiempo. De esta forma se evidencio que el proceso de oxidación avanzada que usa radiación ultravioleta fue más eficaz en comparación con el uso de radiación solar, con 100 % de degradación en la mayoría de los casos [35].

2.2 ÁREA DE ESTUDIO

2.2.1 Localización Hospital San Antonio de Padua

El Hospital Departamental San Antonio de Padua se encuentra ubicado en el suroccidente del Huila, en la cabecera del municipio de La Plata, carrera 2E #11-17 Avenida Libertadores Salida Neiva, conforme figura 1 y 2.

En la actualidad el hospital cuenta con 21 camas de urgencias, 42 camas de hospitalización, 12 consultorios para consulta externa, 3 quirófanos, 1 sala de laboratorios, así como 1 farmacia, que brinda atención a las poblaciones de la zona occidente del Huila, los municipios de La Plata, La Argentina, Nátaga, Paicol, y Tesalia, para un total de 99.760 habitantes, y la zona oriente Caucano, a los municipios de Inzá y Páez (Belalcázar) con 70.000 habitantes. Asimismo, ofrece servicio de hospitalización con un total de ingresos de 8575 usuarios aproximadamente, sala de cirugía, sala de partos, urgencias, servicios ambulatorios que incluye consultas, laboratorios, imágenes, y terapias [2].

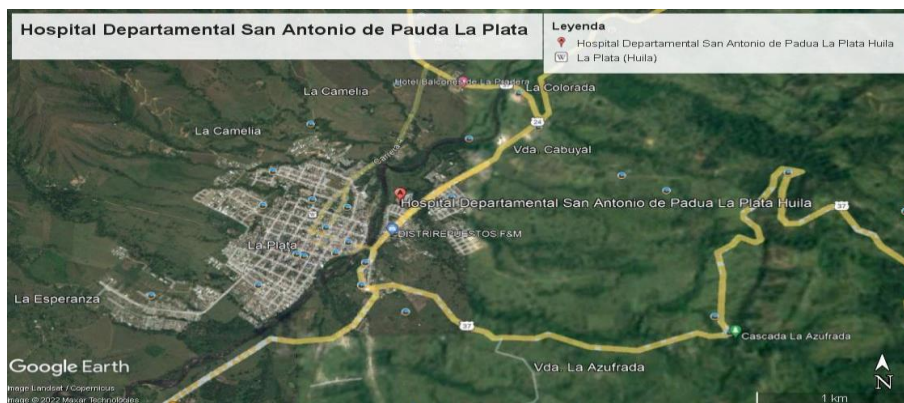


Fig. 1. Ubicación del Hospital Departamental San Antonio de Padua

Fuente: Google Earth



Fig. 2. Hospital Departamental San Antonio de Padua

Fuente: [53]

2.2.2 Localización del Río La Plata-Huila

Este trabajo se realizó con las aguas residuales provenientes de la PTAR del hospital San Antonio de Padua, que una vez finalizado el proceso de tratamiento éste vierte sus aguas en el Río La Plata, ubicado al occidente de Colombia, en el centro del departamento del Huila. En la figura 3, se observa el afluente del río Páez, nace a 4.000 msnm en la Laguna del Buey, en el páramo de Santo Domingo en el departamento del Cauca. Desde su nacimiento hasta el municipio su recorrido es el sentido suroriente, después es aproximadamente occidente - oriente hasta su desembocadura, continua en sentido nororiente hasta la desembocadura del Río Negro o de Narvárez, vuelve a ser occidente - oriente hasta el Río Magdalena. En la microcuenca del río La Plata, se sitúan las quebradas Avispero, Pericos, los Muertos, Aguacatal, el Salado, Guadualejo, Monte grande, la Colorada, Cabuyal y Cucha yaco [29].

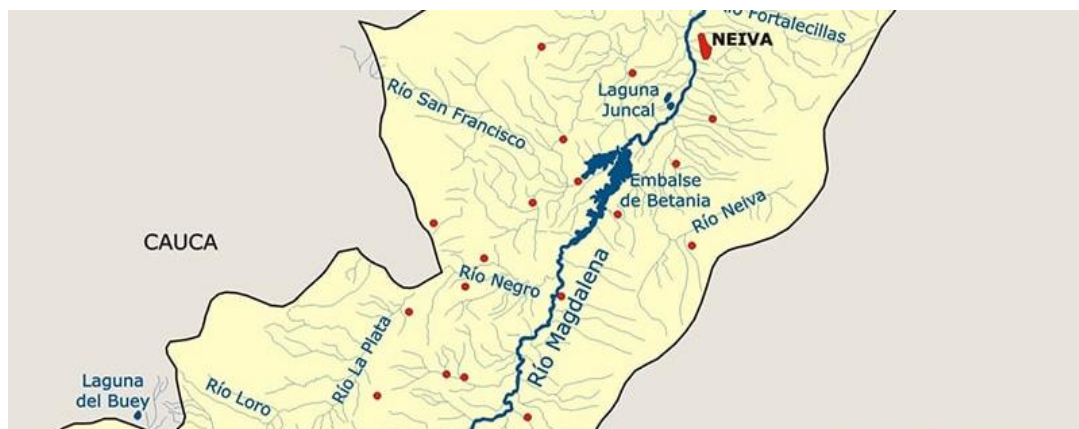


Fig. 3. Hidrografía del Huila

Fuente: Sociedad Geográfica de Colombia

2.2.3 Puntos de monitoreo

En la Tabla 1, se pueden observar las coordenadas de los puntos de monitoreo en la entrada y la salida figura 4 de la PTAR del Hospital San Antonio de Padua.

TABLA 1
COORDENADAS GEOGRÁFICAS

Punto	Coordenadas
Zona de entrada a la PTAR	N: 2° 23' 36.438" W: 75° 53' 10.147"
Zona de salida	N: 2°23'35" W: 75°53'9"



Fig. 4. Vertimiento de las aguas residuales del Hospital San Antonio de Padua.

Fuente: [31]

2.2.4 Aspecto físico biótico

Por las estribaciones de la cordillera central, al suroccidente del Huila, el municipio de La Plata presenta altitudes superiores a los 1500 m.s.n.m, en zona de vida bosque húmedo premontano o zona cafetera, se encuentra situado en las coordenadas 2°23'00" de Latitud Norte y 75° 56'00" de Longitud Oeste. La precipitación aumenta en función de la altura, por debajo de valores de 1500 m.m. hacia los cursos de las corrientes y 2200 m.m. a los 2750 m.s.n.m. Por encima de esta altura no se dispone de información pluviométrica [30].

Clima y temperatura: El municipio de La Plata cuenta con un clima cálido muy seco, a su vez, cuenta con otros pisos térmicos como son clima cálido 4.1 km², clima templado 301.83 km², clima frío 584.68 km² y clima de páramo 380.39 km². Presentando una temperatura promedio de 23.5°C [29].

Hidrografía: La microcuenca del Río La Plata, cuenca hidrográfica del río Páez. Nace en la laguna del Buey en el páramo de Santo Domingo en el Cauca, a una altura de 4.000 msnm. Formado por la confluencia de tres corrientes importantes, el río Aguacatal, el río Loro y la quebrada de Moscopan. Desde su nacimiento hasta la desembocadura de este río presenta un recorrido aproximado suroriente después es aproximadamente occidente - oriente. El cauce activo tiene un ancho entre 50 y 65 metros a la altura del casco urbano de La Plata [29].

El río la Plata cuenta con un caudal aguas arriba de 26346,2 L/s, aguas abajo de 26746,4 L/s, durante su recorrido recibe el vertimiento de las aguas residuales domésticas del sector Remolino Bajo, las Américas, Baho, Matadero y las del Hospital San Antonio de Padua; El informe de cumplimiento ambiental (ICA) del río La Plata, notifica condiciones óptimas, a excepción del no cumplimiento de los valores de coliformes fecales y de turbiedad, afectando la calidad de la fuente receptora [31].

2.2.5 Aspectos socioeconómicos

El municipio de La Plata cuenta con 95 veredas y 7 centros poblados los cuales son el Belén, Monserrate, San Andrés, San Vicente, Villalosada, Gallego y Leticia, que están dentro del área de acción directa, y 17 veredas dentro de la zona de litigio [32].

Según estimaciones del DANE del año 2017, esta zona rural del municipio cuenta con 64.938 habitantes, de los cuales el 54,1% son hombres y el 45,8% son mujeres.

El municipio de La Plata centra su producción en el sector primario, principalmente en actividades agrícolas y pecuarias. Uno de los sectores de mayor relevancia es el cafetero, en 2010 se destinaron 7.830 hectáreas a la producción de este grano. Además, presenta altas producciones de maíz, frijol, plátano y yuca. El municipio pretende diversificar la oferta de productos agrícolas, con otros productos, como los frutales [29].

En el sector ganadero, se observa una alta capacidad de producción según las cifras del Anuario Estadístico Agropecuario, con aproximadamente 17.426 cabezas de ganado, entre 2008 y 2010 [29].

2.2.6 Aspectos ambientales

El municipio de La Plata pretende restablecer la cobertura boscosa en diferentes zonas afectadas por la deforestación, así como, impedir el reasentamiento de poblaciones humanas en zonas de reserva con el fin de proteger los ecosistemas y a su vez ejercer un monitoreo permanente que evite la ampliación de la frontera agrícola [30].

Esto debido a que el municipio presenta un alto grado de vulnerabilidad ambiental. Las áreas cercanas a las riberas del río La Plata son susceptibles a inundaciones, así mismo, las zonas montañosas presentan un alto grado de erosión por lo cual se presentan deslizamientos de tierra. El municipio no es ajeno a la crisis climática que ha afectado en gran medida el

territorio, así como, la deforestación causada por quemas. Las zonas con mayor amenaza son el barrio Guamito, la isla, la libertad III etapa y derrumbes en Centro poblado Monserrate, centro poblado de Belén, la guinea, el Perico y San Rafael [29].

2.3 MARCO REFERENCIAL

Los CE son llamados de esta forma ya que, en los últimos años han generado gran preocupación en la comunidad científica y las entidades reguladora, estos son de diferente origen y naturaleza química, los criterios de calidad ambiental aún no se han especificado, tampoco su toxicidad, ni su persistencia o como estos son capaces de alterar el metabolismo de diferentes especies, así como su impacto ecológico. Su presencia en el ambiente llega a ser significativa en términos de concentración, se encuentran en aguas residuales tanto de tipo doméstico como industrial, así como en las residuales de plantas de tratamiento, efluentes hospitalarios, actividades agrícolas y ganaderas [7][8].

Los CE comprenden una amplia gama de compuestos químicos, productos farmacéuticos, productos de cuidado personal, agentes tensoactivos, plastificantes y aditivos industriales, para el presente proyecto es mayor interés el estudio de contaminantes emergentes de origen farmacéutico, puesto que estos se encuentran con mayor presencia en aguas residuales hospitalarias, su principal vía es a través de la excreción humana, la eliminación de los productos no utilizados. Entre los fármacos de mayor consumo mundial y automedicación se encuentran los analgésicos [25].

Las PTAR actuales están diseñadas para la remoción de materia orgánica y ciertos tipos de contaminantes, especialmente los que se especifican en las normas oficiales [3], su proceso inicia con la separación física de sólidos, seguida de una etapa secundaria, donde se realiza la degradación bacteriana de la materia orgánica, posteriormente se hace un manejo de biosólidos, desinfección para obtener un producto final [5]. Sin embargo, no son eficientes en la eliminación de CEs, ya que estos compuestos salen del tratamiento sin verse afectados, contaminando el recurso hídrico o suelos, lo cual implica la aplicación de tratamientos posteriores o alternativos [6].

La dipirona (metamizol) con nombre IUPAC sistemático es [(2-fenil-1,5-dimetil-3-oxo-2,3-dihidro-1H-pirazol-4-yl)metilamino]metanosulfonatosódico, es un analgésico, antipirético y espasmolítico que pertenece a la familia de las pirazolonas, el principio activo metamizol

puede presentarse en forma de metamizol sódico o metamizol magnésico (Anexo B).

El metamizol es un profármaco que se transforma al metabolito 4-metilaminoantipirina (4-MMA), con su adsorción en el hígado se convierte en un segundo metabolito activo, el 4-aminoantipirina (4-AA). Posteriormente se transforma en dos metabolitos inactivos 4-formil aminoantipirina (4-FAA) y 4-acetilaminoantipirina (4-AAA) como se puede observar en la figura 5 [22].

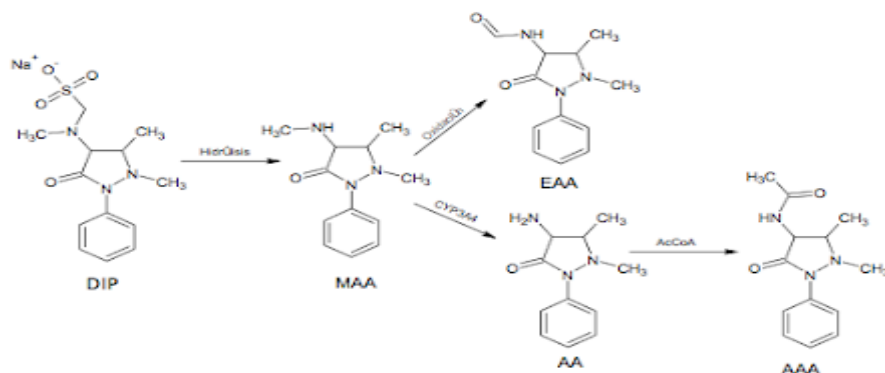


Fig. 5. Estructura química y biotransformación de la dipirona. Dip: dipirona, MAA: 4-metilaminoantipirina, AA: 4-aminoantipirina, FAA: 4-formilaminoantipirina, AAA: 4-acetilaminoantipirina.

Fuente: [23]

Aunque se sabe poco sobre su comportamiento y persistencia en el medio ambiente de estos metabolitos no biodegradables, ya se han detectado en los efluentes y en las aguas superficiales en concentraciones elevadas [63]. Por esta razón, en las últimas décadas la necesidad de nuevas tecnologías para efluentes con alta toxicidad, una alta estabilidad química o una baja biodegradabilidad; la oxidación avanzada se ha consolidado como una alternativa eficiente en la destrucción de sustancias tóxicas, incluyendo las orgánicas, inorgánicas, metales o patógenos [21].

Las tecnologías de oxidación avanzada son más comunes como tratamientos terciarios, en especial en las plantas depuradoras de ciertas industrias. Esta tecnología se ha utilizado en la remediación para sustancias gaseosas, suelos contaminados y aguas subterráneas o superficiales [26]; Esta alternativa al ser combinada con radiación ultravioleta (UV) se obtiene una eficiencia significativa [11], produciendo cambios en la estructura química de los contaminantes, consiguiendo de esta forma, degradar materia orgánica y ciertos compuestos que los microorganismos por sí solos no pueden degradar.

El continuo desarrollo de tecnologías de oxidación avanzada permite su aplicación en

diferentes sectores puede estar en presencia de agentes oxidantes como el ozono, el peróxido de hidrógeno, la radiación ultravioleta o las sales férrico/ferrosas, entre otras [26]. En la TABLA 2, se encuentran la gran variedad de tecnologías disponibles más comunes, las cuales son: la combinación UV y peróxido (UV/H₂O₂), el reactivo Fenton (Fe²⁺/H₂O₂) y dos de sus variantes como el foto-Fenton y el hierro cero-valente (FeO), que es una combinación de las anteriores, o la fotocatalisis (UV/TiO₂), entre estas se pueden incluir las tecnologías con barreras permeables reactivas de Fe metálico y la oxidación con K₂FeO₄ (Fe₃) [26].

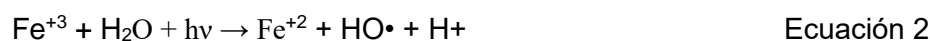
TABLA 2
PRINCIPALES TECNOLOGÍAS DE PROCESOS DE OXIDACIÓN AVANZADA.

Tecnología de oxidación avanzada	Proceso
Ozonificación/Peróxido de hidrógeno	Oxidación en agua sub/supercrítica, Fotólisis ultravioleta-vacío (UV-V)
Procesos Fenton	Ultravioleta/peróxido de hidrógeno
Oxidación electroquímica	Ultravioleta/ozono

[26]

El proceso Foto-Fenton es un tratamiento homogéneo fotocatalítico basado en la producción de radicales hidroxilos a partir del peróxido de hidrógeno (Anexo C), que actúa como catalizador homogéneo a pH ácido y condiciones ambientales. El radical (OH•) tiene un alto potencial de oxidación estándar, reacciona con solutos orgánicos e inorgánicos y exhibe altas velocidades de reacción. La formación de las especies hidroxilo, en donde los radicales libres atacan el compuesto orgánico, hasta convertirla en dióxido de carbono y agua o al menos en compuestos menos peligrosos [64].

El mecanismo de reacción se ha realizado mediante el reactivo de Fenton (H₂O₂+ Fe²⁺) que en presencia de los iones de Fe²⁺ (Anexo D), se oxidan y forman iones de Fe³⁺ generando radicales hidroxilos, posteriormente se da la fotólisis de los complejos de Fe³⁺ por acción de la luz ultravioleta, lo que permite mayor eficiencia en la degradación formando así los iones Fe²⁺ foto reducidos y los radicales HO•. El Fe²⁺ foto reducido proporciona en presencia de peróxido de hidrógeno (H₂O₂) radicales hidroxilos (HO•) [16].



Una de las propiedades que se deben tener en cuenta en el proceso foto-fenton es el pH, este debe estar en un rango de entre 2,8 y 3,1 ya que el pH elevado produce precipitación del hierro presente en la reacción, menores a este rango hacen que el peróxido reacciona con radicales hidroxilos, se tiene, además, que las reacciones tienden a ser máximas en un pH cercano a 3,1. De la misma manera, se tiene en cuenta la temperatura de operación que debe estar entre los 25 °C a 50 ° [16].

Es necesario tener en cuenta las concentraciones de los reactivos en el proceso, los iones Fe^{+2} principalmente afectan la cinética de la reacción en tanto que el H_2O_2 en la eficacia [16]. Aún no se ha encontrado una relación de concentraciones universal que determine un proceso Fenton ideal, por esto ningún proceso es igual, depende de su naturaleza, de la composición del agua contaminada y grado de degradación que se pretende alcanzar[17].

2.4 MARCO NORMATIVO

Referente a la administración de vertimientos en Colombia, el Sistema Nacional Ambiental (SINA), robustece el marco normativo ambiental con el Decreto 1595 de 1984, estableciendo normas para administrar la calidad de vertimientos puntuales a cuerpos de agua y alcantarillados [63]; sin embargo, esta normativa ambiental no contempla estos contaminantes emergentes.

En la resolución 631 del 2015 se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público.

En su artículo 14, se establecen parámetros fisicoquímicos a monitorear y sus valores máximos permisibles en los vertimientos puntuales de aguas residuales no domésticas - ARnD de actividades asociadas con servicios y otras actividades. Entre las cuales se encuentran actividades de atención a la salud humana - atención médica con o sin internación, hemodiálisis y diálisis peritoneal. Aquí se pueden encontrar parámetros generales, compuestos de fósforo y nitrógeno, iones, metales y metaloides, entre otros parámetros para análisis y reporte, sin embargo, no establece parámetros máximos permisibles para CE [9].

Según una investigación realizada por la universidad Cooperativa de Colombia Sede Neiva, en los países latinoamericanos se encuentran vacíos en la normatividad referente a la

generación en la fuente, transporte, comercialización y posconsumo de productos farmacéuticos. Colombia y Brasil son de los pocos países de la región que desarrollan acciones de vigilancia de la calidad del agua para consumo humano, pero su normatividad no incluye el control de productos farmacéuticos en el agua de consumo. En la TABLA 3, referencia la normatividad colombiana pertinente para este estudio.

TABLA 3
MARCO NORMATIVO COLOMBIANO VIGENTE

Ley / decreto / resolución	Contenido
Resolución 0631 de 2015	Establecen los parámetros y los valores máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales [9].
Resolución 01164 de 2002	La cual adopta el Manual de Procedimientos para la Gestión Integral de los residuos hospitalarios y similares [10].
Decreto 2676 del 2000	Reglamenta la gestión integral de los residuos hospitalarios y similares [14].
Resolución 0371 de 2009	Establecen los elementos que deben ser considerados en los Planes de Gestión de Devolución de Productos Posconsumo de Fármacos o Medicamentos Vencidos [15].
Decreto 2811 de 1974	Código Nacional de Recursos naturales Renovables y de Protección del medio Ambiente.
Ley 9 de 1979	Código Nacional Sanitario
Decreto 1594 de 1984	Uso del agua y vertimientos
Ley 373 de 1997	Uso eficiente y Ahorro del agua
Resolución 0330 del 2017	Por la cual se adopta el Reglamento Técnico para el Sector Agua Potable y Saneamiento Básico – RAS

CAPÍTULO III: METODOLOGÍA

3.1. FASE I: Diseño de un sistema de tratamiento no convencional que permita la remoción de dipirona.

3.1.1 Recolección de información

Se resuelve llevar a cabo el proyecto en colaboración con el Hospital San Antonio de Padua en La Plata, Huila, quien suministra la información pertinente respecto a la PTAR con la que cuenta el establecimiento. En este sentido se cuenta con información de vertimientos, así como posibles tratamientos complementarios a la PTAR. Esto con el objetivo de conocer cuáles son los tratamientos que se están llevando a cabo en el momento y cómo estos pueden afectar la degradación de la dipirona.

3.1.2 Recolección de las muestras

Se tomaron muestras simples procedentes del agua residual hospitalaria en frascos estériles de 5L, tanto en la entrada a la planta de tratamiento del hospital de San Antonio de Padua, como en la salida de esta figura 6, esto teniendo en cuenta el instructivo para la toma de muestras de aguas residuales del IDEAM [62].

Se realizaron 2 muestreos en épocas diferentes con el objetivo de replicar el procedimiento y corroborar los resultados obtenidos. Las muestras se refrigeraron a una temperatura de 4.0 ± 1.0 °C y fueron transportadas al laboratorio de la Corporación Universitaria Autónoma del Cauca con el fin de realizar la caracterización de algunos parámetros fisicoquímicos (DQO, DBO, turbidez, pH, conductividad, oxígeno disuelto, TDS) y ejecutar el proceso de oxidación avanzada.

Se realizó un muestreo manual simple en diferentes días y horarios, tomando únicamente la cantidad necesaria para realizar el análisis de los parámetros ya mencionados anteriormente, utilizando un recipiente graduado, soga, guantes, y tapabocas figura 6.

El recipiente utilizado en el almacenamiento de la muestra fue una botella de plástico de 5L. Para el traslado de las muestras se utilizaron sustitutos de hielo para su preservación.



Fig. 6. Puntos de monitoreo.

3.1.3 Caracterización del agua residual hospitalaria obtenida en la PTAR.

La caracterización de las aguas residuales hospitalarias se realizó con el fin de conocer la calidad de estas, así como determinar si la PTAR está cumpliendo con los parámetros establecidos en la resolución 0631 de 2015. En la TABLA 4, se observan los equipos usados para los análisis fisicoquímicos de las dos muestras colectadas y se analizaron en el laboratorio de la Universidad Autónoma del Cauca, en la TABLA 5, se analiza la determinación de la presencia de dipirona en el laboratorio del Grupo de Investigación Catálisis de la Universidad del Cauca.

TABLA 4
EQUIPOS USADOS POR EL LABORATORIO DE LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL CAUCA

Parámetro	Equipo	Método
DQO	Espectrofotómetro UV/VIS II Macherey Nagel	Fotométrico

pH	pH-metro Hach	Potenciométrico
Oxígeno disuelto	Multímetro portátil HQ40D	Potenciométrico
Turbidez	Turbidímetro Hach 2100Q	Fotométrico
DBO ₅	Incubadora oxitop	Respirométrico
Conductividad	Sonda multiparamétrica- Hanna	Potenciométrico
TDS	Sonda milimétrica- Hanna	Potenciométrico

TABLA 5
EQUIPOS USADOS POR EL LABORATORIO DE LA UNIVERSIDAD DEL CAUCA

Parámetro	Equipo	Método
Dipirona	Cromatógrafo Líquido de Ultra Alta Resolución (UHPLC/DAD) DIONEX Ultimate 3000 - Thermo Scientific.	Cromatográfico

3.1.4 Diseño y construcción del prototipo de oxidación avanzada

Las dimensiones del reactor se determinaron teniendo en cuenta el desarrollo llevado a cabo por Rincón Bermúdez [48], en el cual realiza un prototipo para el reactor de oxidación avanzada para 2L de agua residual y una lámpara de 25W, cuidando que la mayor parte de la muestra este irradiada.

Tomando como base principal las dimensiones de la lámpara UV (Anexo A), la cual cuenta con una altura de 24 cm y un volumen de 75,4 cm³ (ecuación 4), está adopta un tubo de vidrio de cuarzo a prueba de explosiones para una alta transmisión de rayos ultravioleta. Posee una potencia de 13W y un voltaje que oscila entre los 110 y 120. Se determina realizar los ensayos con volúmenes de 1L neto, que, además, garantiza las mismas condiciones de irradiación.

El funcionamiento de este reactor consta de un proceso de carga de forma manual, el fluido llena el espacio entre la lámpara de luz UV y las paredes del reactor, una vez se cumplen los tiempos de experimentación se realiza la descarga a través de la válvula de salida.

En este caso un diámetro de 3" con una altura de 24cm obteniendo un volumen de 1094,49 cm³ (ecuación 2). En su parte externa el prototipo se compone de un tubo de PVC, cuenta con una válvula de salida de 1 cm de diámetro.

$$\begin{aligned} &\text{Lámpara diámetro: 2 cm, Altura: 24 cm} \\ &\text{Volumen: } \pi \cdot (r)^2 \cdot h \\ &\text{Volumen: } \pi \cdot (1\text{cm})^2 \cdot 24\text{cm} = 75,4\text{cm}^3 \end{aligned} \quad (\text{Ecuación 4})$$

$$\begin{aligned} &\text{Cilindro diámetro: 3" - 7,62cm} \\ &\text{Volumen: } \pi \cdot (r)^2 \cdot h \\ &\text{Volumen: } \pi \cdot (3,81\text{cm})^2 \cdot 24\text{cm} = 1094,49\text{cm}^3 \end{aligned} \quad (\text{Ecuación 5})$$

Válvula: Diámetro: 1cm
Ubicado a una altura: 4cm

En la TABLA 6, se encuentran registrados los materiales, dimensiones y cantidades utilizadas para la construcción del prototipo.

TABLA 6
LISTA DE MATERIALES PARA EL REACTOR

No	Nombre	Descripción	Cantidad
1	Tubo de PVC	Diámetro: 3" Altura: 24cm Volumen: 194,49cm ³	1
2	Tapas de PVC	Diámetro: 3"	2
3	Lámpara UV	Diámetro: 2cm Altura: 24cm Volumen: 75,4cm ³	1
4	Válvula	Diámetro: 1cm	1
5	Empaques	Diámetro: 1cm	2
6	Tapón roscado	Diámetro: 2cm	1

3.2 FASE II. Determinación de los porcentajes de remoción del contaminante emergente dipirona en los sistemas de tratamiento de oxidación avanzada.

3.2.1 Determinación de Dipirona en muestra de agua por UHPLC/DAD

La técnica cromatográfica empleada para separar componentes utiliza una variedad de interacciones físicas y químicas entre el analito y la columna cromatográfica; de tal forma que el analito disuelto en la fase móvil; acetonitrilo (ACN): Grado HPLC, metanol (MeOH): Grado HPLC. Se pasa por la fase estacionaria a través de una columna apolar que interactúa con compuestos orgánicos, en este caso en fase reversa bombeando la fase móvil líquida con alta presión, permitiendo la separación de la muestra. La muestra se introduce a la corriente de la fase móvil y aquí es donde se efectúan interacciones fisicoquímicas con la fase estacionaria mientras la atraviesa. El tiempo que tarda en efectuar interacciones se conoce como tiempo de retención (TR), único. El cual depende de la naturaleza del analito, de la fase estacionaria y de la composición de la fase móvil [45].

La preparación de las muestras para su análisis consistió en la ruptura de la ampollita de solución inyectable de 500mg de dipirona del laboratorio ECAR, almacenada en un vial ámbar con tapa de 10mL. De esta se preparó una solución madre de 500µg/mL del analito, aforado a 10mL con agua desionizada, con el objetivo de evitar que el analito sature la columna.

Se prepararon cinco diluciones a concentraciones 1, 5, 10, 15 y 20µg/mL a partir de la solución madre, preparadas en balones de 10mL y aforando con agua desionizada. De cada solución preparada, se tomaron 1mL llevados a viales de inyección de cromatografía con tapa y sello septum. En el cromatógrafo Líquido de Ultra Alta Resolución (UHPLC/DAD) DIONEX Ultimate 3000 - Thermo Scientific. Está equipado con bomba binaria, degasificador online, horno de columna y detector de arreglo de diodos (DAD 190-800 nm). Columna Hypersil GOLD C18 100 mm x 2.1 mm I.D., tamaño de partícula 1.9 µm - Thermo Scientific.

Se empleó 1.0mL de agua desionizada como blanco de curva sustraído automáticamente sobre los cromatogramas. Cada estándar fue inyectado por triplicado.

Para las muestras de agua residual de hospital San Antonio de Padua, se analizó la presencia de picos cromatográficos en tiempos de retención diferentes a los observados en el estándar, esto puede deberse a la presencia de diferentes excipientes en el medicamento, las muestras

se corrieron para su observación durante 30 min. Se determina que el tiempo óptimo de corrida era de 5 min, ya que en este periodo se evidencia el pico más alto en el cromatograma, además, se requiere de un tiempo adicional de 5 min para la equilibración de la curva cromatográfica.

Debido a la turbiedad parcial observada en las muestras de agua, las muestras requirieron de doble filtración por membrana 0,22 μ m de Nylon.

3.2.2 Diseño experimental del tratamiento oxidación avanzada tipo Foto-Fenton

Se debe tener en cuenta que aún no se ha encontrado una relación de concentraciones universal que determine un proceso Fenton ideal, por esto ningún proceso es igual y depende de su naturaleza, composición del agua contaminada y grado de degradación que se quiere alcanzar [16].

Se determinan las dosis óptimas para la degradación de contaminantes emergentes teniendo en cuenta la revisión bibliográfica, presentando concentraciones de 5mg/L FeSO_4 y 100 mg/L H_2O_2 , se encuentra de esta manera una relación $\text{FeSO}_4/\text{H}_2\text{O}_2$ de 1:20, para este caso con un tiempo de exposición de 1 hora [42].

De igual forma, se tiene en cuenta el estudio realizado por el autor José Blanco Jurado, donde plantea diferentes relaciones de concentración para los reactivos, dentro del contexto de la industria textil, demostrando una baja eficiencia de degradación en relación $\text{FeSO}_4/\text{H}_2\text{O}_2$ para una relación de 1:18,75 y la mayor eficiencia 1:56,25 para un tiempo de exposición de 2 horas [41].

Con el fin de diseñar el prototipo para un sistema de tratamiento no convencional que permita la remoción de dipirona en el agua residual del hospital San Antonio de Padua, se utilizó un diseño en bloque cuantitativo para estudiar el efecto de varios factores combinados, analizando cada variable por triplicado.

En la TABLA 7, se especifica las concentraciones de la dipirona (0.5 g/L), el peróxido de hidrógeno (H_2O_2) a (100 - 200 mg/L) como variables principales y el tiempo como variable secundaria de (60 - 120 min) y el sulfato de hierro (FeSO_4) a (5 mg/L).

TABLA 7
CRITERIOS DEL DISEÑO EXPERIMENTAL

	T (min)	Reactivos	FeSO ₄ a (5 mg/L)			
			Dipirona inicial (5 mg/L)			
			H ₂ O ₂ (100 mg/L)		H ₂ O ₂ (200 mg/L)	
			Dipirona final (mg/L)	% Remoción	Dipirona final (mg/L)	% Remoción
Agua destilada	60					
	120					
Agua residual Hospitalaria	60					
	120					
			Dipirona final (mg/L)		% Remoción	
Blanco						

Debido a la baja concentración del analito en estudio dentro de la muestra, fue necesario enriquecer las aguas con dipirona inyectable, con el fin identificar y cuantificar el compuesto y así analizar la eficiencia del proceso foto-fenton.

El volumen de dipirona ha sido fijado en todos los ensayos en 0,2mL con una concentración comercial de 0,5g/mL, siendo coherente con el límite de detección del equipo de medición [52]; Los ensayos se realizaron a temperatura ambiente teniendo en cuenta lo establecido en la TABLA 7, tanto para las muestras de agua destilada como para las muestras de aguas residuales hospitalarias.

Los ensayos preliminares se realizaron con agua destilada, para estandarizar la metodología, además de familiarizarse con el laboratorio, los equipos y comprobar la eficiencia del tratamiento oxidativo.

Los ensayos experimentales se realizaron con el agua residual hospitalaria para comprobar el efecto de las diferentes variables en la degradación de contaminantes, se utilizaron las mismas concentraciones de los ensayos preliminares. Los ensayos realizados se mencionan en la TABLA 7.

Todos los experimentos realizados se analizaron por triplicado para verificar la validez de los resultados obtenidos.

Para realizar la fase experimental, para cada ensayo se presentan las siguientes etapas:

Etapa 1: Añadir un litro de agua a un beaker y medir 2mL del contaminante dipirona con la pipeta y homogeneizar, se evidencia en la figura 7.

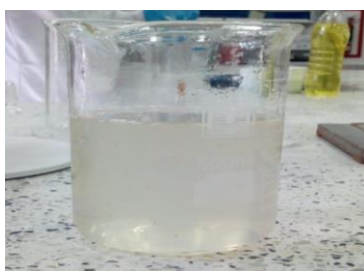


Fig. 7. Muestra de agua destilada inyectada con dipirona

Etapa 2: Se ajustó el pH a la disolución con ácido sulfúrico al 95-97%, adicionando 6 gotas al agua destilada, de igual forma al agua residual hospitalaria para obtener los pH de 2,00 - 3,00 en cada muestra, se agitó durante 2 minutos, registrando el pH antes y después del procedimiento como se muestra en la figura 8.



Fig. 8. Medición del pH

Etapa 3: Pesar el sulfato de hierro de acuerdo con lo establecido en la TABLA 7, en la balanza analítica y homogeneizar con un poco de disolución. Añadir al beaker y homogeneizar durante 2 minutos.

Etapa 4: Medir la cantidad propuesta de peróxido de hidrógeno establecida en la TABLA 7, utilizando una pipeta de 1mL. se añade al beaker que contiene la disolución

Etapa 5: Se agrega la disolución al prototipo, se enciende la lámpara y se tapa, para iniciar el proceso durante una hora como se muestra en la figura 9.

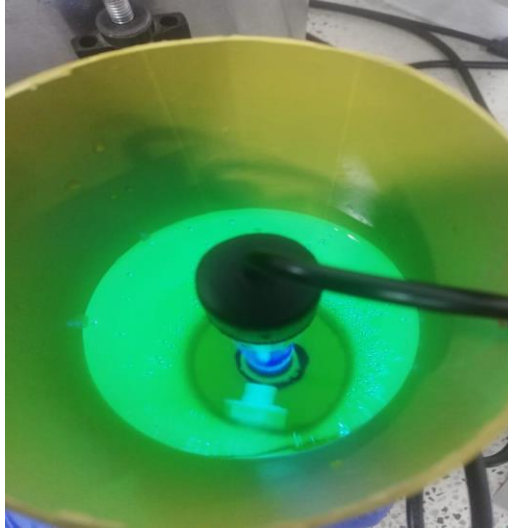


Fig. 9. Proceso foto-fenton

3.2.3 Análisis de resultados

Para determinar la eficiencia de remoción de la carga contaminante del sistema de tratamiento se aplicó la EC. 3.

$$\%E = \frac{S_0 - S}{S_0} * 100 \quad \text{Ecuación 6}$$

En dónde;

E: Eficiencia (%)

S₀: Concentración de dipirona antes de ser tratado (mg/L)

S: Concentración del dipirona después del tratamiento (mg/L)

Se elaboró un análisis de varianza (ANOVA) de los datos experimentales, con un nivel de significancia definido ($p > 0,05$), el cual proporciona información sobre el grado de compatibilidad de los datos obtenidos con la hipótesis nula, este valor comprueba la importancia estadística de cada uno de los factores [56][57].

Continuando con el análisis en Excel de los cromatogramas que presentaron mayor eficiencia para las dos muestras estudiadas.

Para el análisis de los parámetros fisicoquímicos, obtenidos en cada muestra de agua residual antes y después de la PTAR. En la TABLA 8, se realizó un cuadro comparativo teniendo en cuenta los límites permisibles de acuerdo con la resolución 0631 de 2015.

TABLA 8
RESULTADOS DE LOS PARÁMETROS FÍSICOQUÍMICOS

Parámetro	Unidad	Agua residual		Valores Permisibles	Cumplimiento
		Resultados I	Resultados II		
DBO	mg O ₂ /L				
Conductividad	μS/cm				
TDS	mg/L				
DQO	mg O ₂ /L				
OD	%				
	mg/L				
pH	unidades de pH				
Turbidez	NTU				

3.3 FASE III. Estimar la viabilidad del proceso de tratamiento de remoción de contaminantes emergentes desde un punto de vista ambiental y económico.

3.3.1 Factibilidad

Se evaluó los tratamientos de procesos de oxidación avanzada, mediante un esquema de ventajas y desventajas teniendo en cuenta las condiciones económicas y ambientales para cada sistema, además de un seguimiento bibliográfico, estudiando la naturaleza del contaminante, su porcentaje de degradación y la técnica utilizada.

CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y ANÁLISIS

Una vez definida la metodología experimental a seguir, se inicia con el diseño y construcción del sistema de tratamiento, siguiendo con el trabajo en el laboratorio. Para facilitar una valoración completa y coherente se normalizaron los datos y, posteriormente, se graficaron.

4.1 FASE I: Diseño de un sistema de tratamiento no convencional que permita la remoción de dipirona.

4.1.1 Recolección de información pertinente

La PTAR cuenta con una planta de tratamiento de aguas residuales, que consta de las siguientes unidades: cámara de patógenos, del área de urgencias; zona de cribado, cámaras de sedimentación de lodos y grasas; zona de tanques de sedimentación, cámara de filtración; y tubería de conducción al río, como se muestra en la figura 10.

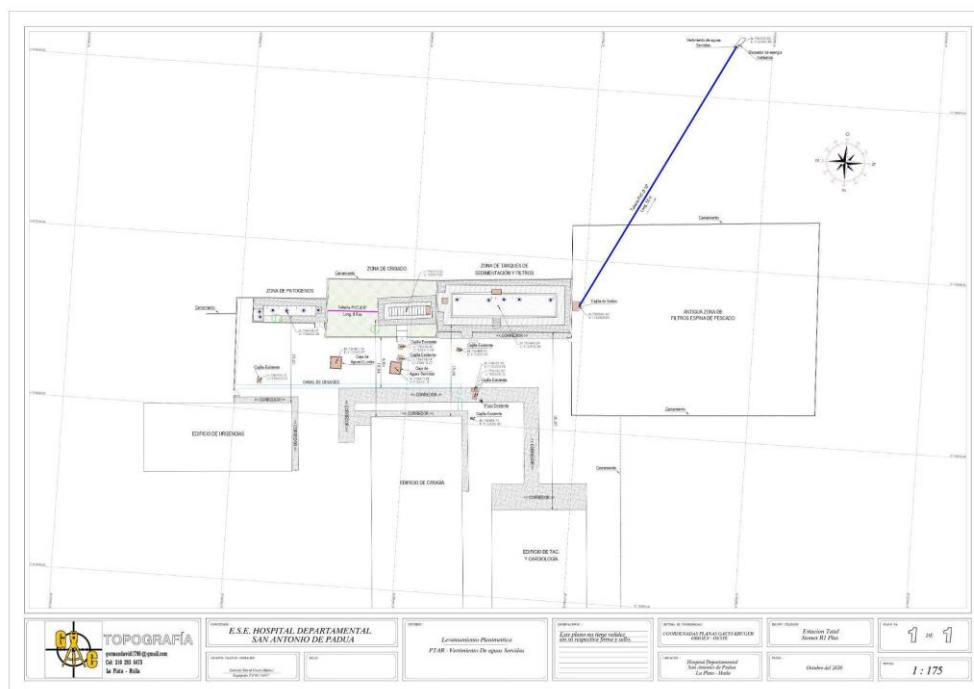


Fig. 10. Plano de la planta de tratamiento de aguas residuales del Hospital San Antonio de Padua.

En la TABLA 9, se identifican los fármacos y medicamentos de mayor utilidad en el hospital San Antonio de Padua (HSAP).

TABLE 9
FÁRMACOS Y MEDICAMENTOS DE MAYOR UTILIDAD EN HSAP

Descripción	Presentación
Cloruro de sodio	Bolsa
Lactato de Ringer	Bolsa
Dexametasona	Ampolla

Dipirona	Ampolla
Tramadol	Ampolla
Metoclopramida	Ampolla
Midazolam	Ampolla
Citrato de fentanilo	Ampolla
Salbutamol	Inhalador
Cefalotomía	Polvo estéril para reconstruir
Enoxaparina	Ampolla
Diclofenaco	Ampolla
Ampicilina + Sulbactam	Polvo estéril para reconstruir

4.1.2 Recolección de muestras

Teniendo definido como serán tomadas las muestras y revisando detalladamente el presupuesto, el personal con que se cuenta y su disponibilidad, la capacitación del personal, espacio y el transporte, se inicia con el proceso:

Para la caracterización del agua residual proveniente del hospital se tomó como referencia la entrada y salida de la PTAR que se encuentra ubicado al costado derecho de las instalaciones, esta recibe las descargas provenientes de todas las áreas del hospital figura 11.

Se tiene fácil acceso a la primera cámara antes de la PTAR, puesto que esta se encuentra dentro de las instalaciones del hospital San Antonio de Padua, sin embargo, se presenta dificultad para la toma de la muestra debido a la altura de esta, fue necesario el uso de una vara de madera de aproximadamente 2 metros de largo.



Fig. 11. Recolección de muestra antes de la PTAR

La zona de recolección después de la PTAR se encuentra con mayor dificultad de acceso debido a que está rodeada de vegetación y a orillas del río La Plata, sin embargo, el vertimiento se encuentra a una altura óptima para la toma de muestra, fue necesario tener cuidado con el musgo presente para no contaminar la muestra figura 12.



Fig. 12. Recolección de muestra después de la PTAR

4.1.3 Caracterización de las aguas residuales del Hospital San Antonio de Padua.

Se realizó la toma de muestras de forma puntual en dos ocasiones, la primera durante el mes de mayo en horas de la mañana para conocer las condiciones y características del agua residual procedente del hospital, de esta se tomaron valores de DQO, oxígeno disuelto, pH y turbidez, de acuerdo con la disponibilidad de equipos que había en este momento. La segunda muestra se toma en el mes de agosto de igual forma, en horas de la mañana, esta es empleada además para la experimentación, aquí se adicionan otros parámetros con DBO, TDS y conductividad.

En la TABLA 10, Se observan los valores obtenidos para los parámetros de DBO, conductividad, TDS, DQO, OD, pH y turbidez, previos al tratamiento generado en la PTAR. Se analizan de acuerdo con el cumplimiento de la resolución 0631 de 2015, con la cual se determina que las aguas residuales que no cumple con los valores máximos permisibles que deben cumplir las actividades de atención a la salud humana - atención médica con y sin internación, esto puede deberse a las altas concentraciones de tanto de compuestos orgánicos como inorgánicos que se encuentran en el afluente.

Por tal razón, es necesario la implementación de la PTAR, en la TABLA 11, se muestran los valores obtenidos posteriormente al tratamiento de esta. Se evidencia una disminución considerable, en especial en los parámetros de DBO (50mg O₂/L) y turbidez (53,3 - 33NTU), además, se encuentra cumplimiento para la DBO y el pH de acuerdo con la resolución mencionada anteriormente. Sin embargo, genera preocupación que aún con los tratamientos convencionales la DQO no se encuentra dentro de los valores límites permisibles. Los altos valores en este parámetro pueden ocasionar desoxigenación del agua y generación de olores indeseables, es necesario tener en cuenta que la composición de las aguas residuales hospitalarias, dependen de factores como la cantidad de pacientes y las enfermedades tratadas, estos vertimientos puede incluir además de contaminantes emergentes, microorganismos patógenos, productos químicos tóxicos y elementos radiactivos, estos suelen tener una baja biodegradabilidad y por tanto son difícilmente removidos por tratamientos convencionales [43] [44].

TABLA 10
RESULTADOS DE LOS PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS ANTES DE LA PTAR

Parámetro	Unidad	Antes de la PTAR		Valores Permisibles	Cumplimiento
		Resultados I	Resultados II		
DBO	mg O ₂ /L	-	150	<150.0	NO CUMPLE
Conductividad	μS/cm	-	876	-	-
TDS	mg/L	-	438	-	-
DQO	mg O ₂ /L	941	652	200.0	NO CUMPLE
OD	%	57,7	97,1	-	-

	mg/L	5,14	6,92		-
pH	unidades de pH	9,59	8,65	6.0 - 9.0	NO CUMPLE
Turbidez	NTU	92,1	58,93	-	-

TABLA 11
RESULTADOS DE LOS PARÁMETROS FÍSICOQUÍMICOS DESPUÉS DE LA PTAR

Parámetro	Unidad	Después de la PTAR		Valores permisibles	Cumplimiento
		Resultados I	Resultados II		
DBO	mg O ₂ /L	-	50	<150.0	CUMPLE
Conductividad	μS/cm	-	784	-	-
TDS	mg/L	-	392	-	-
DQO	mg O ₂ /L	747	383	<200.0	NO CUMPLE
OD	%	23,3	12,4	-	-
	mg/L	2,51	1,25	-	-
pH	unidades de pH	8,47	7,96	6.0 - 9.0	CUMPLE
Turbidez	NTU	38,8	25,93	-	-

4.1.4 Diseño del prototipo

En la TABLA 12, se consolidaron las dimensiones del prototipo adecuadas para someterlo a las condiciones experimentales para la ejecución de los ensayos. Así mismo, la figura 13 muestra el plano del prototipo con sus respectivas dimensiones, esto de acuerdo con lo planteado en la metodología, las figuras 14 y 15 evidencian el prototipo una vez fabricado, de la misma forma se puede observar la lámpara UV usada para este proyecto en la figura 16.

TABLA 12
DIMENSIONES DEL PROTOTIPO

DESCRIPCIÓN	DIMENSIONES	
	Diámetro	2 cm

Lampara UV	Altura	24 cm
	Volumen	75,4 cm ³
Tubo PVC	Diámetro	7,62 cm
	Altura	7,62cm
	Volumen:	1094,49 cm ³

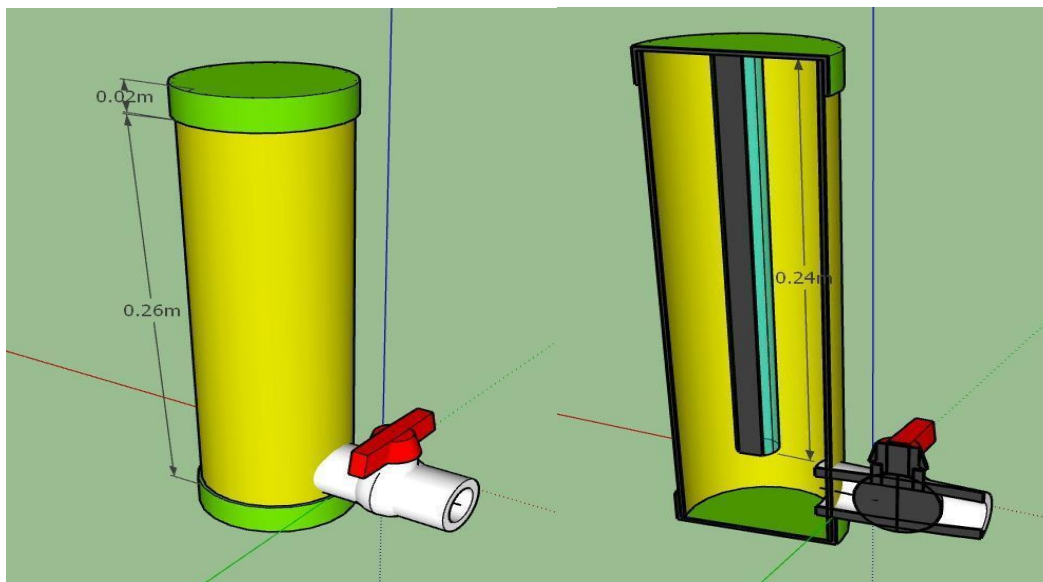


Fig. 13. Diseño del reactor para el proceso Fenton

Prototipo del reactor

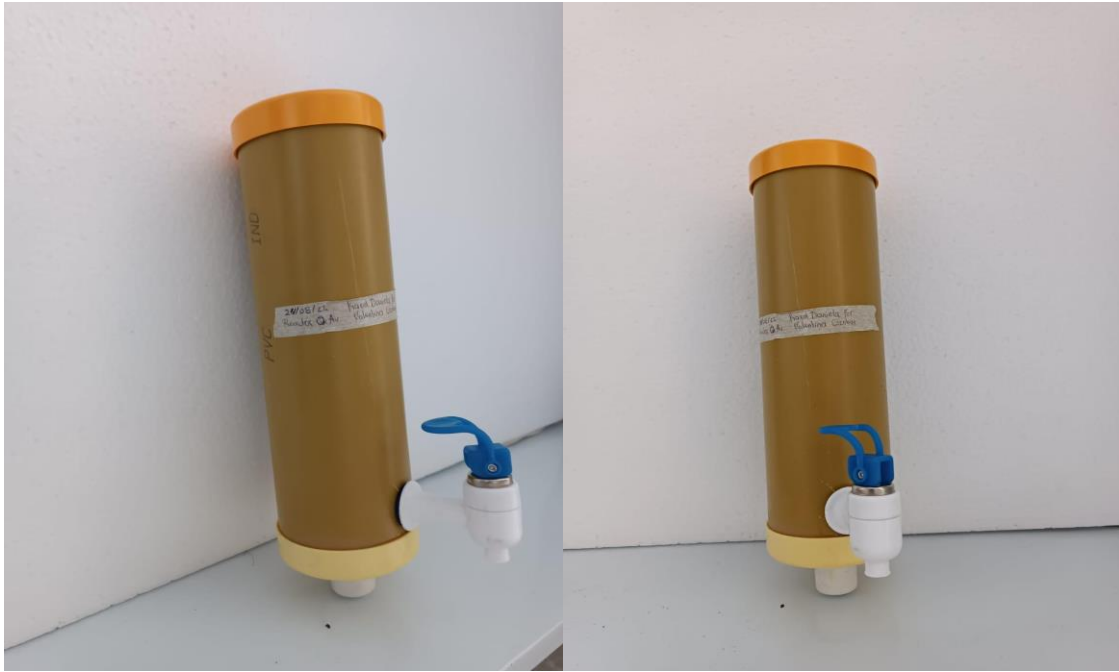


Fig. 14. Prototipo del reactor.

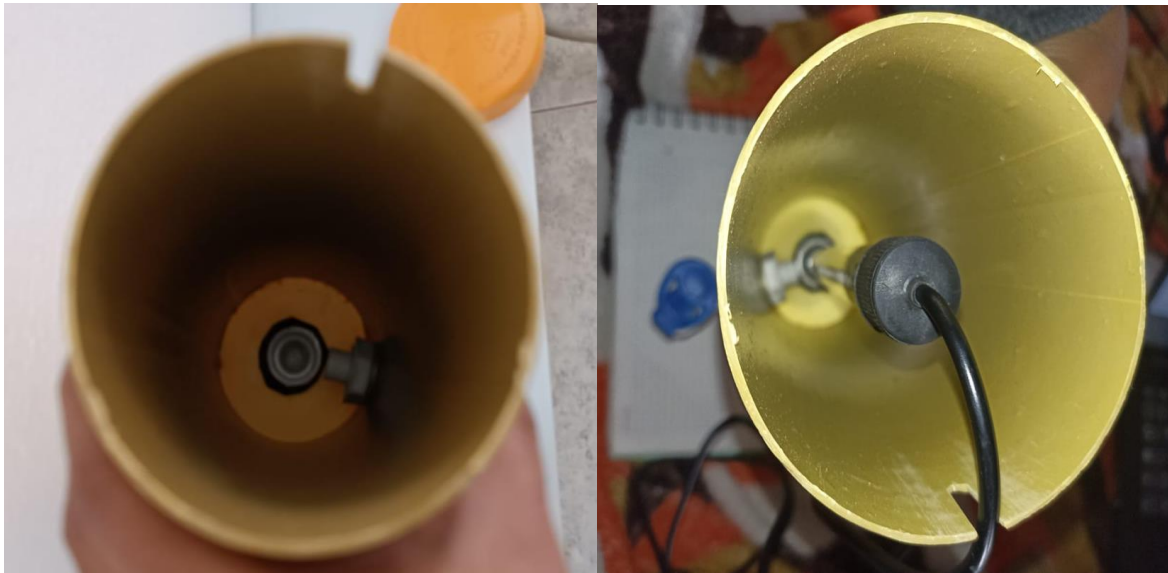


Fig. 15. Prototipo del reactor



Fig. 16. Lámpara esterilizadora sumergible UV

4.2 FASE II. Determinar los porcentajes de remoción del contaminante emergente dipirona en los sistemas de tratamiento de oxidación avanzada.

4.2.1 Determinación de dipirona en muestra de agua por UHPLC/DAD

4.2.1.1 Curva de calibración

La TABLA 13, presenta los resultados de la curva de calibración figura 17 por cromatografía líquida de alta eficiencia con detector de arreglo de diodos (UHPLC-DAD) para la detección y cuantificación de dipirona. Las características de desempeño evaluadas permitieron comprobar que existe una adecuada selectividad, una linealidad entre 1 y 20 µg/mL, con una linealidad R^2 0.99882 expresada como RSD menor a 2%, un porcentaje de recuperación del 99,9% y unos límites de detección y cuantificación de 0,187 y 0,623 µg/mL, respectivamente, con el objetivo de hallar el método de análisis propuesto es un método preciso, exacto, proporcional, lineal y sensible, por cuanto satisface los requerimientos del procedimiento de validación de métodos analíticos [49].

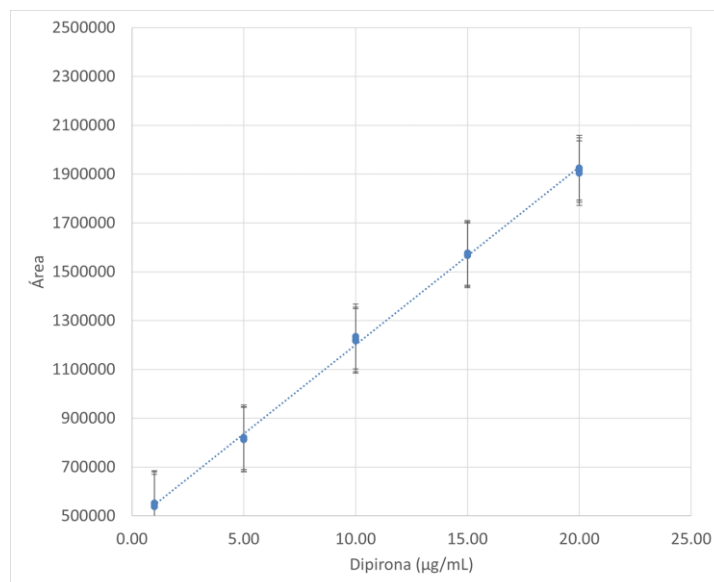


Fig. 17. Curva de calibración dipirona

La ecuación 7, de regresión lineal fue determinada por el método de ajuste de mínimos cuadrados. Los parámetros estadísticos calculados, se resumen a continuación.

TABLA 13

PARÁMETROS ESTADÍSTICOS CALCULADOS

Parámetro	Valor	Desviación
Área	-	9738.12613
Pendiente	72812.49711	640.99921
Intercepto	472431.19613	4535.56956
R ²	0.99882	-
LOD (µg/mL) (b+3Sb)	0.187	-
LOQ (µg/mL) (b+3Sb)	0.623	-

Ecuación de la recta, aproximado a 2 cifras decimales.

$$(y \pm 9738,13) = (72812,50 \pm 641,00) x + (472431,20 \pm 4535,57) \quad \text{Ecuación 7}$$

Donde;

x: Concentración de dipirona µg/mL

y: Repuestos del equipo. (área)

Teniendo en cuenta el tiempo de degradación en el ambiente de los contaminantes emergentes, para el caso de la dipirona en solución inyectable, se analizó su degradación pasados 12 días de almacenamiento, esto con el fin de reconocer la degradación del fármaco en el tiempo, teniendo en cuenta la revisión bibliográfica donde se analiza el comportamiento en el tiempo de la dipirona en relación con otros medicamentos, durante 1, 3, 7 y 15 días a temperatura ambiente [49].

En la figura 18 se muestra que el analito dipirona presenta un tiempo de retención aproximado de 1.7 minutos, se evidencian otros picos cromatográficos posibles a excipientes propios del Metamizol, medicamento comercial dipirona. Entre el día 1 y 12 de conservación de la dipirona se observa como su área disminuye de manera considerable al igual que el resto de los picos cromatográficos, lo cual es propio de fenómenos de estabilidad de los fármacos. La estabilidad del fármaco una vez es destapado o puncionado, va a depender de factores químicos como lo son las reacciones de oxidación, reducción, hidrólisis, racemización, descarboxilación y polimerización; físicos como fotólisis y aglomeración y microbiológicos como la alteración de la esterilidad. Además, es necesario tener en cuenta que algunas presentaciones de los medicamentos no permiten sellarlo de forma adecuada, la interacción con el medio facilita la degradación y contaminación de este [51].

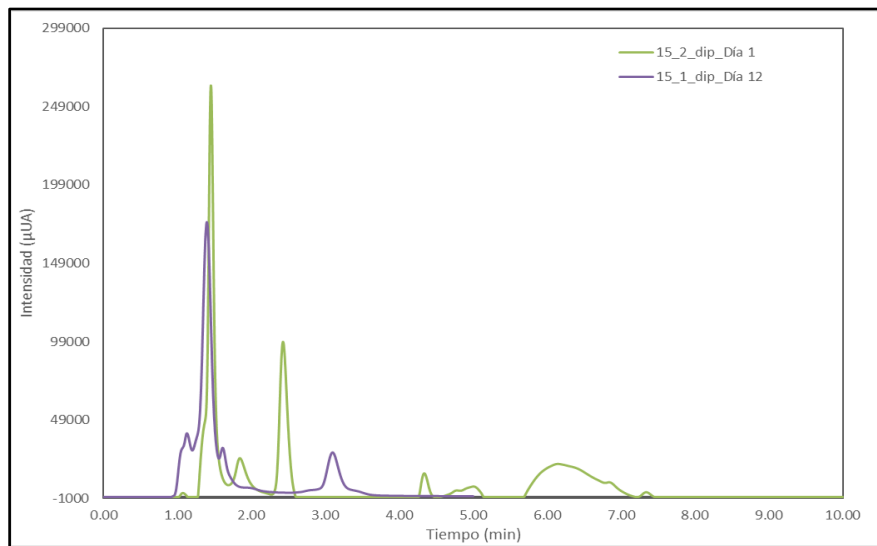


Fig. 18. Degradación de la dipirona en el ambiente. Verde: Día 1-Morado; Día 12-Verde

Además, la figura 18 evidencia que en el análisis de la solución inyectable de dipirona se encuentran algunos excipientes, los cuales no mostraron un comportamiento lineal a lo largo del periodo de estudio. Es así como se tiene que dentro de la composición de esta presentación de dipirona se pueden evidenciar algunos aditivos como lo son el metabisulfito de sodio y agua para inyectables, la cual es agua de calidad extra alta, sin contaminación significativa. obtenida por: destilación, ósmosis inversa o ultrafiltración Sin conservantes antimicrobianos, a pirógena, transparente, incolora e insípida[46].

Cabe mencionar que el método cromatográfico permite detectar y cuantificar sólo una de la sustancia y no las relacionadas con el fármaco, las cuales no fue posible identificar al no contar con los patrones correspondientes, esto representa una limitación en el estudio [50].

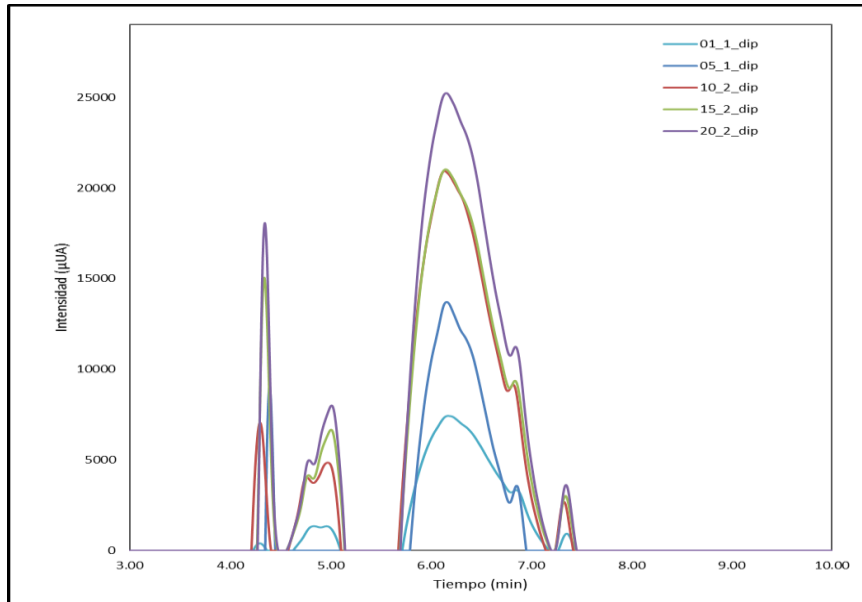
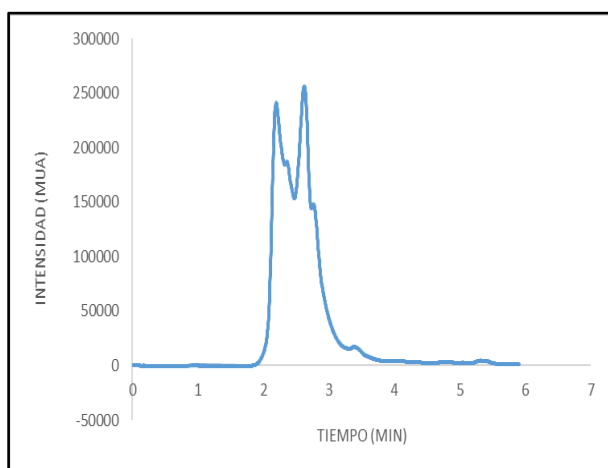


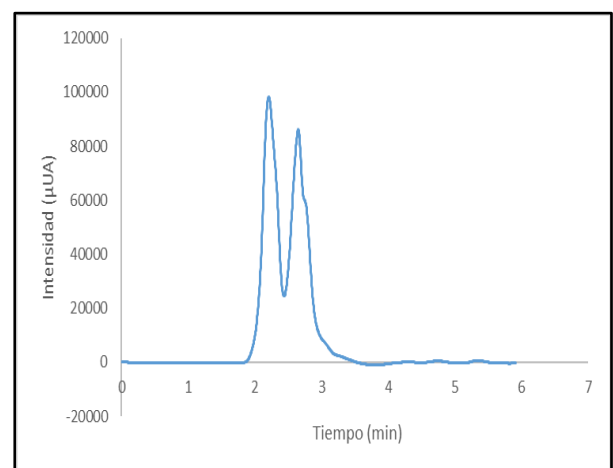
Fig. 19. Excipientes del medicamento dipirona. Concentraciones de calibración 1, 5, 10, 15 y 20µg/mL respectivamente, preparadas en balones de 10mL y aforando con agua desionizada.

4.2.1.2 Concentración de dipirona

En la figura 20 se puede observar los cromatogramas resultado del análisis de dipirona antes y después de la PTAR del hospital San Antonio de Padua y no se observa el pico cromatográfico para un tiempo de 1,5 min en las mismas condiciones, lo que podría indicar una baja o nula concentración de la dipirona en la matriz problema o que está por debajo del límite de detección.



A



B

Fig. 20. Cromatografía de Dipirona en agua residual hospitalaria. A) Antes de la PTAR. B) Después de la PTAR

4.2.2 Diseño experimental del tratamiento oxidación avanzada tipo Foto-Fenton:

Al encontrarse el H_2O_2 en fase líquida se procede a calcular la concentración necesaria de acuerdo con lo propuesto con la metodología, ecuación 8. Solución a partir del peróxido de hidrógeno al 50%

$$50\% = \frac{50g H_2O_2}{100g sln}$$

$$\frac{50g}{100g sln} \times \frac{1000mg}{1g} \times \frac{1,18g sln}{1mL} \times \frac{1000mL}{1L} = 590000 mg/L$$

$$C_1V_1 = C_2V_2 \quad (\text{Ecuación 8})$$

$$(1000ml)(100mg) = 590000mg V_2$$

$$\frac{(1000 ml)(100 mg)}{590000mg} = V_2$$

$$V_2 = 0,1694 mL$$

Con los porcentajes de degradación del analito dipirona obtenidos en cada uno de los ensayos, se decide realizar el análisis de varianza del diseño experimental, con el fin de conocer el efecto de las variables en el modelo realizado.

La eficiencia del método Foto-fenton, se analiza de acuerdo con el porcentaje de remoción del contaminante. En la TABLA 14, se observa los 8 tratamientos propuestos, analizados por triplicado en agua destilada, se obtuvo un rango de remoción entre el 91.77% al 99.76% en diferentes condiciones para agua destilada 100 mg/L de H_2O_2 , expuesto durante 60 minutos con luz UV.

En la TABLA 15, se muestra los resultados con el agua residual hospitalaria se utilizó 200 mg/L de H_2O_2 , expuestos durante 60 minutos, sin embargo, la potencia óptima de la radiación UV para el tratamiento debe ser superior ya que la eficiencia de remoción aumenta de manera continua con el aumento de la potencia lumínica y el tiempo de contacto con la luz, para que se logre la remoción completa [27].

Para determinar la eficiencia de remoción de la carga contaminante del sistema de tratamiento se aplicó la ecuación 6.

TABLA 14
PROCESO FOTO-FENTON EN AGUA DESTILADA

Observación	[H₂O₂] mg/L	Tiempo (min)	Dipirona %
1	100	60	99.77
2	100	60	99.74
3	100	60	99.78
4	100	120	94.18
5	100	120	94.21
6	100	120	93.97
7	200	60	98.94
8	200	60	98.82
9	200	60	98.88
10	200	120	98.77
11	200	120	98.68
12	200	120	98.66

TABLA 15
PROCESO FOTO-FENTON EN AGUA RESIDUAL HOSPITAL

Observación	[H₂O₂] mg/L	Tiempo (min)	[Dipirona] %
1	100	60	93.80
2	100	60	93.97
3	100	60	94.03
4	100	120	96.62
5	100	120	96.75

6	100	120	96.52
7	200	60	95.80
8	200	60	95.86
9	200	60	96.00
10	200	120	94.35
11	200	120	94.51
12	200	120	94.26

Concentración de dopaje de dipirona:

$$\frac{0.5g}{1000mL} * \frac{1 \times 10^6 \mu g}{1g} = 500 \frac{\mu g}{mL}$$

Ecuación 9

4.2.3 Análisis de varianza del diseño experimental

Se pretende determinar si existe o no una diferencia significativa en cuanto a la remoción de la dipirona en los procesos realizados respecto al tiempo de exposición a luz UV y la concentración de H₂O₂, se aplica entonces la prueba ANOVA, este parte de suposiciones cuya validez se busca comprobar o rechazar mediante una prueba de significancia estadística que cuantifica en qué medida la variabilidad de la muestra llega a afectar los resultados del estudio [67]

H₀: No hay diferencia significativa en la eficiencia de remoción de dipirona con los tratamientos evaluados

H₁: Al menos uno de los tratamientos evaluados presenta diferencias significativas en la eficiencia de remoción de dipirona.

Se realizó el análisis de varianza de los datos experimentales, empleando para ello la técnica (ANOVA), como se puede observar en la TABLA 16. De acuerdo con el nivel de significancia definido ($p > 0,05$).

Se observa tanto en la TABLA 16 (agua destilada) como la TABLA 19 (aguas residuales hospitalarias), que la interacción entre las variables empleadas para la degradación del analito dipirona, con relación al peróxido de hidrógeno, no representan una variación significativa, desde el punto de vista estadístico sobre la variable respuesta (porcentaje de remoción), puesto que el valor de p es inferior al 5%, por tal razón se acepta la hipótesis H_0 , ya que no se evidencia una diferencia significativa en la remoción de dipirona.

A pesar de que según la significancia estadística se presentan mejores resultados al emplear 200mg/L, es necesario tener en cuenta la significancia práctica, donde por razones económicas y operativas a gran escala resulta con mayor viabilidad el uso de 100mg/L, teniendo en cuenta, además, que los porcentajes de remoción en ambos casos son similares, superiores al 95%.

Se evidencia una diferencia significativa tanto para el caso de la TABLA 18 para aguas destilada como la TABLA 21 para aguas residuales hospitalarias, entre los tiempos de ensayo, estableciendo mayor eficiencia en los procesos realizados en 60 minutos de contacto, teniendo en cuenta que la diferencia presentada es positiva.

TABLA 16
ANÁLISIS ESTADÍSTICO ANOVA DE LOS DATOS EXPERIMENTALES- AGUA
DESTILADA

	Suma de cuadrado	Grados de libertad	Cuadrado medio	F	P
H ₂ O ₂	10.3	1	10.27	4.11	0.073
Tiempo	25.4	1	25.40	10.18	0.011
Residuales	22.5	9	2.50		

[58]

TABLA 17
COMPARACIÓN PARA H₂O₂

Comparación	95% Intervalo de confianza

Soluciones (mg/L)	Soluciones (mg/L)	Diferencia significativa	SE	df	t	Pturkey	Coche's d	Baja	Superior
100 + 5	200 + 5	-1.85	0.912	9.00	-2.03	0.073	-1.17	-2.62	0.277

Nota: Las comparaciones se basan en medias marginales estimadas. Reactivos [H₂O₂] 100 mg/L, [FeSO₄]: 5 mg/L. [H₂O₂] 200 mg/L, [FeSO₄]: 5 mg/L. [59]

TABLA 18
COMPARACIÓN PARA EL TIEMPO DE EXPOSICIÓN

Comparación								95% Intervalo de confianza	
Tiempo (min)	Tiempo (min)	Diferencia significativa	SE	df	t	Pturkey	Coche's d	Baja	Suprior
60	120	2.91	0.912	9.00	3.19	0.011	1.84	0.208	3.48

Nota: Las comparaciones se basan en medias marginales estimadas. [59]

TABLA 19
ANÁLISIS ESTADÍSTICO ANOVA DE LOS DATOS EXPERIMENTALES- AGUA RESIDUAL HOSPITALARIA

	suma de cuadrados	Grados de libertad	cuadrado medio	F	P
Soluciones	1.0373	1	1.0373	0.6968	0.452
Tiempo	0.0673	1	0.0673	0.0452	0.836
Residuales	13.3985	9	1.4887		

[58]

TABLA 20
COMPARACIÓN PARA H₂O₂

Comparación								95% intervalo de confianza	
Soluciones	Soluciones	Diferencia significativa	SE	df	t	Pturkey	Coche's d	Baja	Superior
100 + 5	200 + 5	-0.588	0.704	9.00	-0.35	0.425	-0.482	-1.81	0.849

Nota: Las comparaciones se basan en medias marginales estimadas. Reactivos [H₂O₂] 100mg/L, [FeSO₄]: 5 mg/L. [H₂O₂] 200mg/L, [FeSO₄]: 5 mg/L. [59].

TABLA 21
COMPARACIÓN PARA EL TIEMPO DE EXPOSICIÓN

Comparison								95% Intervalo de confianza	
Tiempo (min)	Tiempo (min)	Diferencia significativa	SE	df	t	Pturkey	Coche's d	Baja	Superior
60	120	0.150	0.704	9.00	0.213	0.836	0.123	-1.18	1.43

Nota: Las comparaciones se basan en medias marginales estimadas. [59].

4.2.4 Análisis del estudio cromatográficos

En la Tabla 22, se observa el resumen del proceso para el agua residual hospitalaria, donde se puede analizar que en algunos casos los porcentajes de remoción de dipirona después de los 120 minutos de exposición a luz UV es menor, sin embargo, los porcentajes de remoción son similares, por lo cual obedece a las áreas de detección dadas por el equipo como se puede verificar en el (ANEXO E), es necesario tener en cuenta que los análisis se realizaron por triplicado.

TABLA 22
RESUMEN DEL PROCESO FOTO-FENTON

	T (min)	Reactivos	FeSO ₄ a (5 mg/L)			
			Dipirona inicial (5 mg/L)			
			H ₂ O ₂ (100 mg/L)		H ₂ O ₂ (200 mg/L)	
			Dipirona final (mg/L)	% Remoción	Dipirona final (mg/L)	% Remoción
Agua destilada	60		0,001191	99,76	0,005596	98,88
	120		0,029395	94,12	0,006488	98,70
Agua residual Hospital aria	60		0,030335	93,93	0,02056	96,63
	120		0,016871	95,89	0,028144	94,37
			Dipirona final (mg/L)		% Remoción	
Blanco			0,041139		91,77	

Comparando con investigaciones en diversos tipos de aguas residuales, las condiciones óptimas para el tratamiento de aguas residuales lácteas son Fe²⁺: 331,50mg/L, H₂O₂: 5537,00mg/L, pH: 3,00, potencia lumínica 20watts, tiempo de contacto: 72 horas, para obtener una remoción del 98.6% [27], en otro caso los efluentes de la industria petroquímica se evidenciaron reportes de porcentajes, entre un 90 y 97% de remoción, las condiciones

fueron temperatura sobre 70°C, pH 2.8, H₂O₂ 50mg/L y Fe²⁺ 50mg/L, el tiempo de reacción mayor a 70 min.

En la figura 20-A se evidencian los resultados del proceso foto-fenton en agua destilada, se evidencia de esta manera, una remoción de la dipirona con mayor eficiencia en periodos de 1 hora, con concentraciones de 5mg/L de FeSO₄ y 100mg/L de H₂O₂, mostrando una remoción casi en totalidad (97,11%) para el tratamiento 1. Las muestras de agua destilada poseen una baja presencia de otros contaminantes o compuestos orgánicos que puedan disminuir la eficiencia de oxidación de la dipirona, es posible deducir que existe una menor presencia de procesos inhibidores o reacciones que compiten con el proceso de oxidación avanzada.

En la figura 21-B se presentan los resultados del proceso foto-fenton en las aguas residuales hospitalarias de San Antonio de Padua inyectadas con dipirona, aquí se evidencia menor porcentaje de remoción en comparación con los datos observados en el agua destilada, con una mayor eficiencia en el tratamiento para 60 minutos, con concentraciones de 5mg/L de FeSO₄ y 200mg/L de H₂O₂, removiendo alrededor de 96.63%. Esto puede deberse a la presencia de diferentes compuestos presentes en las aguas residuales que pueden estar afectando la remoción efectiva de la dipirona, ya que estas tienen una alta carga de microorganismos patógenos, farmacéuticos parcialmente elementos metabólicos, radiactivos y otras sustancias tóxicas y químicas [47].

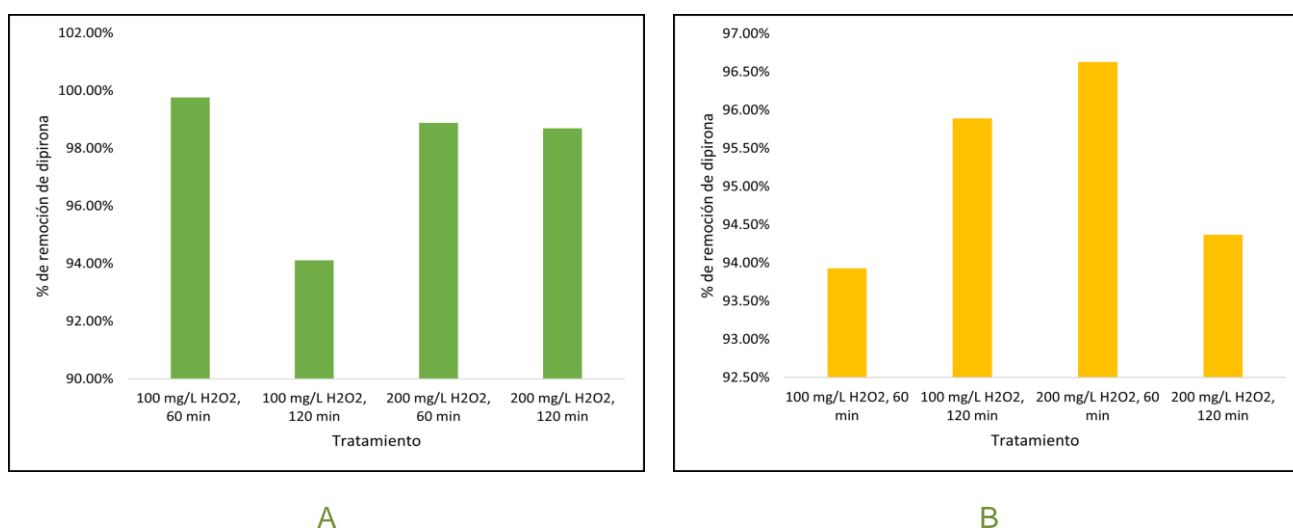


Fig. 21. Resultados del proceso foto-fenton. A) Agua destilada B) Agua residual hospitalaria.

Para los casos anteriormente mencionados se evidencia que es suficiente la exposición a la luz UV a una hora para lograr una alta remoción del componente en estudio, dipirona, en este

mismo sentido se encontró 100mg/L de H₂O₂ es una dosis óptima para llevar a cabo el proceso, es necesario tener en cuenta que las concentraciones de FeSO₄ fueron constantes, es posible así estimar que las concentraciones de 200mg/L de H₂O₂ fueron elevadas y afectaron de forma negativa el proceso, esto según la literatura, la velocidad de la reacción puede verse negativamente afectada, debido a la posible y esperada auto descomposición del H₂O₂ en oxígeno y agua, por recombinación con HO•[36].

4.3 FASE III. Estimar la viabilidad del proceso de tratamiento de remoción de contaminantes emergentes desde un punto de vista ambiental y económico.

4.3.1 Factibilidad

Considerando los objetivos del proyecto, en la TABLA 22, se describen las ventajas y desventajas de las técnicas más eficaces para tratamientos de contaminantes emergentes hospitalarios considerando aspectos ambientales y técnicos, además ejemplos de algunos estudios que se han realizado para la remoción de diferentes analitos.

TABLA 22
PRINCIPALES TÉCNICAS Y ESTUDIOS PARA REMOCIÓN DE MEDICAMENTOS

Técnica	Referentes bibliográficos	
Oxidación Foto-Fenton [39].	Fármaco: paracetamol. Tiempo de exposición 90 min a una temperatura de: 50°C concentración de H ₂ O ₂ =189ppm remoción del 97.5%. [38]	
	Ventajas	Desventajas
	Los reactivos utilizados son abundantes, comercialmente asequibles y de fácil manejo	Requiere de un ajuste de pH antes y después del tratamiento, así como de un tratamiento posterior para eliminar el hierro residual en el efluente
	Gran aplicabilidad. Se ha empleado con éxito en la degradación de contaminantes presentes en efluentes petroquímicos	El hierro y H ₂ O ₂ residual pueden contaminar el medio receptor.
	Referentes bibliográficos	
Biorreactor de	Fármaco: cloroquina. biorreactor de membrana de flujo continuo que contenía células de E. Coli melanizadas con una remoción del 98.2%	
	Ventajas	Desventajas
	Elevada calidad y altos niveles de desinfección del agua tratada	Elevado costo de implantación y explotación
	La filtración por membrana garantiza una calidad de agua tratada independientemente de la	Las altas concentraciones de fango pueden influir de forma negativa en el rendimiento de la

Membrana [39].	decantabilidad del fango. Las membranas retienen los sólidos en suspensión y sustancias coloidales, lo que permite su reutilización para diversos usos	membrana
	Referentes bibliográficos	
Filtro de Carbón Activado Biológico Avanzado [39].	Fármaco: azitromicina Combinación de un filtro de carbón activado biológico y la unidad de ultrafiltración. La remoción promedio calculada a lo largo del período experimental fue de 51%.	
	Ventajas	Desventajas
	Son lavados con menor frecuencia y se puede tener mejor estratificación	Requiere más área para instalación
	Puede proveer una barrera adicional previniendo la penetración microbial	Requiere un costo de inversión inicial más alto
	Referentes bibliográficos	
Sistema Biológico Con Un Proceso Sonoquímico [39].	Fármaco: Azitromicina A un tratamiento biológico convencional se le introducen ondas de sonido de 16 kHz en un medio acuoso. Luego el agua biotratada resultante se sometió al proceso Sonoquímico indujo una degradación considerable de 74,92%. Posteriormente, se le agrega Fe^{+2} (5 ppm) y luz UVC (4 W) lo que aumentó hasta un 87,36 % la eliminación de Azitromicina en las aguas residuales hospitalarias.	
	Ventajas	Desventajas
	Mayor tasa de absorción	Alto costo de instalación y complejidad de operación
	La irradiación ultrasónica genera especies químicas activas, que no requieren productos químicos adicionales, sin la producción de productos nocivos	Un solo transductor ultrasónico no es efectivo para operaciones a gran escala
	Referentes bibliográficos	
Ozonación Continua [39].	Fármacos: mezcla de ocho antibióticos (Ampicilina, Azitromicina, Eritromicina, Claritromicina, Ofloxacina, Sulfametoxazol, Trimetoprima y Tetraciclina) Técnica de ozonización operada en modo continuo a diferentes tiempos de retención hidráulica y una dosis de ozono específica de 0,125 gO ₃ /gDOC. Ampicilina, Azitromicina, Claritromicina, Eritromicina y Trimetoprima se degradaron hasta 84, 73, 98, 70 y 96%, respectivamente.	
	Ventajas	Desventajas
	El proceso de ozonización eleva la concentración de oxígeno disuelto (OD) del efluente	El proceso de ozonización no es económico para las aguas residuales con altas concentraciones de (SS), (DBO), o carbono orgánico total. Alto costo de instalación y complejidad de operación

	Después del proceso de ozonización, los microorganismos no crecen nuevamente, a excepción de aquellos que están protegidos por las partículas en la corriente de agua residual	El ozono es irritante y posiblemente tóxico, así que los gases deben ser destruidos
	Referentes bibliográficos	
Lodos Activados [39].	En un agua residual de una planta tratadora en Suiza se encontraron compuestos como diclofenaco, naproxeno y Carbamazepina, con una eficiencia de remoción de un 69, 45 y 7% respectivamente	
	Ventajas	Desventajas
	Alto grado de flexibilidad para tratamiento de diversos tipos de aguas residuales	Altos costos de diseño, construcción, operación y mantenimiento
	Puede tolerar cargas orgánicas altas, comparados con otros procesos de tratamiento biológico	Los lodos de exceso contienen metales y compuestos orgánicos recalcitrantes
	Referentes bibliográficos	
Coagulación [39].	Se obtuvo una alta eficiencia de eliminación del fármaco interferón del 96.4% se utilizó FeCl ₃ convencional (4 mg Fe (III)/L) y un coagulante natural aislado de semilla de frijol (37,5 µL/L) en las plantas de tratamientos de aguas residuales.	
	Ventajas	Desventajas
	Simplicidad y rentabilidad	Requiere uso de productos químicos
	Separa muchos tipos de partículas del agua	Se requiere personal calificado para el diseño, construcción de cámaras y dosificación de productos químicos

Entre los tratamientos más viables desde el punto de vista económico se encuentran los humedales artificiales, a pesar de esto la eficiencia a la hora de reducir contaminantes emergentes es bastante baja y los tiempos de exposición al tratamiento son más largos en comparación con los procesos de oxidación avanzada, los cuales son de mayor costo económico. Sin embargo, dentro de estos, el proceso foto-fenton es el más rentable a gran escala, se recomienda para reducción de costos el uso de luz solar, además, los residuos que se pueden generar durante el proceso tienen un impacto ambiental mínimo [54].

CAPÍTULO V: CONCLUSIONES

A partir del desarrollo del presente trabajo se obtuvieron las siguientes conclusiones que responden a los objetivos planteados:

- ❖ Se logró diseñar y construir un reactor a escala laboratorio eficaz para el tratamiento del contaminante emergente dipirona en el agua residual hospitalaria, utilizando una lámpara UV con una potencia de 13W y 24 cm de alto y un voltaje que oscila entre los 110 y 120, en su parte externa, el prototipo se compone de un tubo de PVC y una válvula de salida de 1 cm de diámetro.
- ❖ El diagnóstico del analito dipirona realizado al agua residual procedente del Hospital San Antonio de Padua, determinó que no se aprecia el pico cromatográfico para un tiempo de 1,5 min, concluyendo que no se encuentra o está por debajo de los límites de detección de la técnica cromatográfica utilizada.
- ❖ En cuanto a la caracterización del agua residual después de la PTAR, se determinó una disminución considerable respecto a la concentración de entrada, en especial en los parámetros de DBO (150mg O₂/L- 50mg O₂/L) y turbidez (58,93NTU-25,93NTU), además se encuentra cumplimiento para el pH (8,65 - 7,96). Sin embargo, la DQO (941mg O₂/L- 747mg O₂/L) no se encuentra dentro de los valores máximos permisibles.
- ❖ Se especifican que los requerimientos técnicos para llevar a cabo la implementación efectiva y eficiente para el proceso de oxidación avanzada foto-fenton para el analito dipirona en 1L de muestra son una relación de FeSO₄:H₂O₂ de 1:20 y 1:40, irradiados durante 60 min a 13W y un pH: 2-3.
- ❖ En el desarrollo del método de oxidación avanzada se evidenció una alta efectividad de degradación para las dos muestras analizadas, el 99,76% para el agua destilada con 100mg/L de H₂O₂, expuesto durante 60 minutos con luz UV. A su vez para el caso del agua residual hospitalaria el porcentaje de remoción es de 96,63% de efectividad haciendo uso de 200mg/L de H₂O₂, expuestos durante 60 minutos. Es necesario tener en cuenta la significancia práctica, donde resulta más viable el uso de 100mg/L de H₂O₂.
- ❖ Este tipo de tratamientos a pesar de tener un costo elevado en comparación con otros propuestos en anteriores trabajos presenta mejor eficiencia de remoción, tanto para diferentes tipos de contaminantes emergentes, incluyendo la dipirona como para reducción de DQO.

- ❖ Además, los resultados obtenidos en el presente estudio generan información respecto a la calidad y las condiciones de las aguas residuales del hospital San Antonio de Padua, así como, el uso de un tratamiento alternativo que permite la degradación de contaminantes emergentes de origen farmacéutico, como lo es la dipirona, con el objetivo de reducir el impacto ambiental de estos en el medio.

CAPÍTULO VI: RECOMENDACIONES

- ❖ Caracterizar y determinar la concentración de contaminantes emergentes en el Río la Plata como complemento de esta investigación.
- ❖ Se recomienda ampliar el rango de evaluación de los procesos de oxidación avanzada, a partir de los valores óptimos obtenidos en este estudio.
- ❖ El estudio cinético de la reacción es importante para evaluar los parámetros que influyen en el tiempo de reacción y remoción.
- ❖ 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 y el hierro, se pueden realizar ensayos del método variando estos parámetros para determinar la remoción.
- ❖ La difícil detección y cuantificación de analitos farmacéuticos no se 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.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] J. A. Jaimes Urbina and J. A. Vera Solano, “Los contaminantes emergentes de las aguas residuales de la industria farmacéutica y su tratamiento por medio de la ozonización,” *Inf. Técnico*, vol. 84, no. 2, pp. 249–263, 2020, doi: 10.23850/22565035.2305.
- [2] H. S. A. de Padua, “Informe de gestión 2020,” La Plata, Huila, 2020.
- [3] N. Y. Delgado Espinosa, “Diagnóstico y remoción de contaminantes emergentes en aguas superficiales y cloacales,” *La Plata, Argentina*, pp. 1–127, 2019.
- [4] E. A. Serna-Galvis *et al.*, “Degradation of seventeen contaminants of emerging concern in municipal wastewater effluents by sonochemical advanced oxidation processes,” *Water Res.*, vol. 154, pp. 349–360, 2019, doi: 10.1016/j.watres.2019.01.045.g
- [5] C. S. Catarina, “Tratamiento de aguas residuales,” 2019.
- [6] Y. Zhou *et al.*, “Which type of pollutants need to be controlled with priority in wastewater treatment plants: Traditional or emerging pollutants,” vol. 131, no. April 2019, doi: 10.1016/j.envint.2019.104982.
- [7] S. Aguilar, “Caracterización de aguas residuales hospitalarias,” *Din. Ambient.*, vol. 2, núm. 2, pp. 37–42, 2018, [En línea]. Disponible en: <https://revistas.unilibre.edu.co>.
- [8] C. Peña *et al.*, “Emerging pollutants in the urban water cycle in Latin America: A review of the current literature,” *J. Environ. Manage.*, vol. 237, no. December 2018, pp. 408–423, 2019, doi: 10.1016/j.jenvman.2019.02.100.
- [9] Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, “Resolución 0631 del 17 de marzo de 2015.” p. 62, 2015.
- [10] M. Ambiente and V. Y. D. Territorial, Ministerio de la protección social de ambiente, vivienda y desarrollo sostenible: Resolución 2115. 2007, p. 23.
- [11] H. Cuesta Berrio, “Procesos avanzados de oxidación aplicados al tratamiento de las aguas residuales de la Industria Petroquímica: Fenton y Foto - Fenton”, *Univ. Nac. Abierta y a Distancia*, p. 31, 2019.
- [12] A. Pacheco Arcos, “Determinación de contaminantes emergentes carbamazepina y diclofenaco en el Río San Pedro y análisis de tratamiento con nanotecnología Pacheco,” 2021.
- [13] C. E. M. Ortiz y T. R. Chaparro, “Combinación de procesos de oxidación avanzada y procesos anaerobios para tratamiento de aguas residuales hospitalarias”, *Afinidad*, vol. 71, núm. 565, pp. 63–67, 2014.
- [14] Ministerio del Medio Ambiente, “Decreto 2676”, vol. 2676, núm. diciembre 22, 1998, [En línea]. Disponible en: <https://www.minambiente.gov.co/>.
- [15] Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial, “Resolución 371 del 26 de febrero de 2009”, *Minist. Ambient. Vivienda y Desarro. Territ.*, núm. 0371, p. 9, 2009, [En línea]. Disponible en: <http://www.minambiente.gov.co/>.

- [16] B. Victor y D. Torres, "Evaluación de los procesos de oxidación avanzada: Fenton, uv/H₂O₂. Y foto-fenton para la degradación de clorpirifos en aguas residuales a nivel laboratorio en la Universidad de Cartagena", *J. Chem. Inf. Model.*, vol. 53, núm. 9, 2018.
- [17] V. H. Cortez González, "Eliminación de contaminantes emergentes de aguas residuales hospitalarias mediante procesos de oxidación avanzada", *Univ. ESTATAL Amaz. Dep. CIENCIAS LA VIDA*, núm. 465, pp. 106–111, 2018.
- [18] J. Clemente, "aplicación de procesos de oxidación avanzada (fotocatálisis solar) para tratamiento y reutilización de efluentes vtexiles." 2016.
- [19] P. Malacatus, E. Chamorro, and G. Orellana, "Análisis de eficiencia de remoción de contaminantes de los sistemas de tratamiento de aguas residuales en extracción de aceite de palma," *Fig., EMPA Investig. y Desarrollo.*, vol. 1, no. 2, pp. 61–68, 2016, doi: 10.29166/revFig,. v1i2.888.
- [20] "Qué es un PSP y cómo utilizarlo", *QuestionPro Latinoamérica*, jun. 2019. [En línea]. Disponible en: <https://www.questionpro.com/>. Acceso: septiembre 2021.
- [21] K. G. Pavithra, V. Jaikumar, P. S. Kumar, P. Sundarrajan, "Removal of emerging pollutants from aquatic systems using electrochemical treatment and adsorption: Comparison and analysis", *Environ. Technol. Innov.*, vol. 23, p. 101754, 2021, doi: 10.1016/j.eti.2021.101754.
- [22] A. Habekost, "The Analgesic Metamizole (Dipyrone) and Its Related Products Antipyrine, 4-Aminoantipyrine and 4-Methylaminoantipyrine. Part 1: Mass Spectrometric and Electrochemical Detection," *World J. Chem. Educ.*, vol. 6, no. 3, pp. 134–144, 2018, doi: 10.12691/wjce-6-3-6.
- [23] T. P. Buitrago-González, C. A. Calderón-Ospina, y A. Vallejos-Narváez, "Dipyrone: Benefits underestimated or oversized risks? Review of the literature.", *Rev. colomb. ciencias quím. farm*, vol. 43, núm. 1, pp. 173–195, 2014, [En línea]. Disponible en: <http://www.scielo.org.co/>.
- [24] M. D. A. Rodríguez and E. E. C. Martínez, "tratamiento de aguas residuales procedentes de la industria láctea por métodos de oxidación avanzada heterogéneos de fenton, ozonización y foto-fenton a escalas de laboratorio," 2021.
- [25] C. Tejada, Q. Edgar, and P. Margaret, "Contaminantes emergentes en aguas: metabolitos de fármacos. Una revisión," 2014.
- [26] M. A. López Ramírez *et al.*, "Oxidación avanzada como tratamiento alternativo para las aguas residuales. Una revisión," *Enfoque UTE*, vol. 12, no. 4, pp. 76–87, 2021, doi: 10.29019/enfoqueute.769.
- [27] C. A. Medina-Serrano and E. N. Segovia-Obando, "Aplicación del método Foto-fenton para el tratamiento de aguas residuales en la industria láctea," *Dominio de las ciencias*, vol. 6, pp. 785–801, 2020, doi: <http://dx.doi.org/10.23857/dc.v6i3.1316>.
- [28] A. G. Murcia, "Caracterización del vertimiento de agua residual hospitalaria de la E.S.E Hospital Departamental San Antonio de Padua del Municipio de La Plata - Huila," 2021.

- [29] Alcaldía de la Plata - Secretaría de Desarrollo, “Análisis de situación de salud con el modelo de determinantes sociales de salud municipio de La Plata Huila 2017,” 2017.
- [30] H. Alcaldía de La Plata, “Plan Básico De Ordenamiento Territorial, La Plata, Huila,” 2003.
- [31] R. G. Carrera, “Caracterización la plata 2021.pdf,” La Plata, 2022.
- [32] H. Alcaldía de La Plata, “Plan básico de ordenamiento territorial La Plata, Huila - componente rural,” 2014.
- [33] Vidal Vademecun, “vademecun,” *DIPIRONA ECAR Solución inyectable 500 mg/ml*, 2019. <https://www.vademecum.es/>.
- [34] J. H. Pamplona *et al.*, “Subchronic effects of dipyrone on the fish species *Rhamdia quelen*,” *Ecotoxicol. Environ. Saf.*, vol. 74, no. 3, pp. 342–349, 2010, doi: 10.1016/j.ecoenv.2010.09.010.
- [35] D. C. Napoleão, D. Ribeiro, J. M. R. Díaz, M. Benachour, and L. R. Bravo, “Comparative Analysis Using Dipirona Degradation Process With Photo-Fenton Uv-C Light and Solar Radiation,” *Cent. Azúcar*, vol. 42, no. 1, pp. 34–41, 2015.
- [36] S. S. Bes Monge, D. A. M.. Silva, and D. C. Bengoa, *Manual técnico sobre procesos de oxidación avanzada aplicados al tratamiento de aguas residuales industriales*, no. 978-84-09-08637–5. 2016.
- [37] J. R. Bondía, “Eliminación de contaminantes emergentes mediante Humedales Artificiales como sistema alternativo o complementario a un tratamiento de aguas convencional,” 2006.
- [38] B. Giménez, “Estudio de la degradación foto-Fenton del analgésico Paracetamol en agua para condiciones de pH natural”, *Univ. Nac. Cuyo, Mendoza, Argentina*, vol. 47, núm. 4, pp. 124–134, 2018, doi: 10.31857/s013116462104007x.
- [39] J. M. Zamora-Vélez y L. S. Lenin Steven Vera-Sal Vera-Saltos, “Técnicas aplicadas a la remoción de fármacos, usados en el tratamiento del covid- 19”, *Polo del Conoc.*, vol. 6, núm. 8, pp. 15–36, 2021, doi: 10.23857/pc.v6i8.2923.
- [40] L. P. R. J. F. Herrera, “Determinación de la remoción de nitrógeno y fósforo que tiene la macrófita superficial lenteja de agua en el agua captada del río Bogotá que abastece el lago principal del condominio campestre lagos del peñón”, *Univ. Cundinamarca*, p. 466, 2017.
- [41] José Blanco Jurado, “Degradación de un efluente textil real mediante procesos Fenton y Foto-Fenton,” 2009.
- [42] E. Cuervo Lumbaque, R. M. Cardoso, A. de Araújo Gomes, S. Malato, J. A. Sánchez Pérez, and C. Sirtori, “Removal of pharmaceuticals in hospital wastewater by solar photo-Fenton with Fe³⁺-EDDS using a pilot raceway pond reactor: Transformation products and in silico toxicity assessment,” *Microchem. J.*, vol. 164, no. November 2020, 2021, doi: 10.1016/j.microc.2021.106014.
- [43] C. P. Diana Marcela, R. M. Juan Pablo, and R. O. Mauricio Andrés, “Planificación climática del recurso hídrico de la cuenca del río cauca mediante inteligencia artificial,” *Planif.*

climática del Recur. hídrico la cuenca del río cauca Median. Intel. Artif., no. January, 2020, doi: 10.15332/dt.inv.2020.01674.

[44] I. Q. Peñate, U. Javier, J. Haza, A. Wilhelm, and H. Delmas, "Contaminación de las aguas con productos farmacéuticos. Estrategias para enfrentar la problemática," vol. 40, no. 3, pp. 173–180, 2009.

[45] T. Guadalupe, "Validación de un método por Cromatografía Líquida de alta resolución (HPLC) para cuantificar Cefotaxima en orina humana.," *BENEMÉRITA Univ. AUTÓNOMA PUEBLA*, 2014.

[46] D. D. M. C. Barbado, "Formulario Nacional de Medicamentos," *DIPIRONA (METAMIZOL SÓDICO)*, 2012. <http://fnmedicamentos.sld.cu/index.php?P=FullRecord&ID=301>.

[47] S. N. Córdova Morales and M. V. Escudero Vilema, "Evaluación De Patógenos De Aguas Residuales De 2 Unidades Hospitalarias De La Coordinación Zonal 3 -Salud," 2018.}

[48] C. P. Rincón Bermudez, "Estudio de ciclo de vida de la implementación de un reactor de oxidación avanzada para tratamiento de agua residual textil," 2020.

[49] A. Salmerón-Gacia, N. Navas, A. Martin, E. Roman, J. Cabeza, and L. F. Capitán-Vallvey, "Determination of tramadol, metamizole, ropivacaine, and bupivacaine in analgesic mixture samples by HPLC with DAD detection," *J. Chromatogr. Sci.*, vol. 47, no. 3, pp. 231–237, 2009, doi: 10.1093/chromsci/47.3.231.

[50] J. Contreras Rouraa, S. Guach Wilsona, S. Pérez Martiatua, T. Lafferte García, and Y. Hernández Fernández, "Validación de un método cromatográfico para la valoración del Metamizol sódico en la Dipirona-600 y el Espasmofoorte Validation of a chromatographic method for the assessment of sodium metamizole in La COVID - 19 es una enfermedad reciente debido al surgim," *Cent. Nac. Investig. Cient.*, vol. 52, no. 2, pp. 187–204, 2021.

[51] L. M. Rendón, S. Lopera, and N. Y. Valencia, "Estabilidad de los medicamentos después del primer uso.," *J. Pharm. Pharmacogn. Res.*, vol. 6, no. 5, pp. 412–423, 2018.

[52] R. Bellés, "Estudio Del Proceso Foto-Fenton Con Dosificación De H₂O₂Para El Tratamiento De Aguas Residuales", *Univ. Politec. Catalunya*, pp. 3–71, 2018.

[53] JUNTA DIRECTIVA E.S.E HOSPITAL SAN ANTONIO, "Convocatoria 002 Hospital San Antonio de Padua La Plata, Huila - Elección Revisor Fiscal," Gobernación del Huila, 2020.

[54] D. Madera López and M. F. Viloría Soto, "CONTAMINANTES EMERGENTES EN DIFERENTES MATRICES DE AGUAS Y TRATAMIENTOS ALTERNATIVOS PARA SU ELIMINACIÓN," 2020.


[56] The jamovi project (2021). jamovi. (Version 2.2) [Computer Software]. Retrieved from <https://www.jamovi.org>.

[57] R Core Team (2021). R: A Language and environment for statistical computing. (Version 4.0) [Computer software]. Retrieved from <https://cran.r-project.org>. (R packages retrieved from MRAN snapshot 2021-04-01).

- [58] Fox, J., & Weisberg, S. (2020). car: Companion to Applied Regression. [R package]. Retrieved from <https://cran.r-project.org/package=car>.
- [59] Lenth, R. (2020). emmeans: Estimated Marginal Means, aka Least-Squares Means. [R package]. Retrieved from <https://cran.r-project.org/package=emmeans>.
- [60] Sylvania, "Lámparas Germicidas UV-C Ultra Clásico," 2020.
- [61] M. Barroso, "Peróxido de Hidrógeno," 2019.
- [62] IDEAM, "Instructivo Para La Toma De Muestras De Aguas Residuales," *Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial – República de Colombia*, vol. 3. p. 17, 2007, [Online]. Available: <http://www.ideam.gov.co/documents/>
- [63] Ministerio de agricultura, *Decreto 1594 de 1984*, vol. 1984, no. Junio 26. 1984, p. 55.
- [64] M. Graza, F. Carrillo, M. Soria, y N. Picazo, "Oxidación avanzada: generando radicales oxidantes para la remoción de contaminantes recalcitrantes", *Univ. Autónoma de Coahuila*, vol. 16, núm. 66, p. 2021, 2021, [En línea]. Disponible en: <http://www.cienciacierta.uadec.mx>
- [65] J. E. Sanchez Ramirez, "Contaminantes emergentes en nuestros ecosistemas acuáticos: enemigos invisibles", *Ing. y Región*, vol. 19, pp. 18–21, 2018, doi: 10.25054/22161325.1750.
- [66] M. Cuenca, "Contaminantes Emergentes: Origen Y Destino", *Univ. Rey Juan Carlos*, 2019.
- [67] M. J. Rubio Hurtado and V. Berlanga Silvestre, "Cómo aplicar las pruebas paramétricas bivariadas de Student y ANOVA en SPSS . Caso práctico.," *Rev. d'Innovació i Recer. en Educ.*, vol. 5, pp. 83–100, 2012, doi: 10.1344/reire2012.5.2527.
- [68] V. Pinos. "Cápsula | Procesos de Oxidación Avanzada". Inicio | Universidad de Cuenca. <https://www.ucuenca.edu.ec/> (accedido el 26 de enero de 2023).

ANEXOS

Anexo A. Ficha técnica de la lámpara UV [60]

Generic		
Lampara esterilizadora sumergible UV		
La lámpara esterilizadora sumergible UV genera luz en el espectro ultravioleta (UV), altamente efectiva para esterilizar áreas y superficies.		
CARACTERÍSTICAS		
	<p>Filamento de alta calidad para un alto rendimiento y ahorro de energía. Adopta un tubo de vidrio de cuarzo a prueba de explosiones para una alta transmisión de rayos ultravioleta. Diseño seguro a prueba de agua para uso sumergible. El interruptor de alimentación independiente es ideal para un uso más seguro. Adecuado para controlar bacterias malignas en acuarios y peceras.</p>	
DATOS FÍSICO	DATOS ELÉCTRICOS	PRECAUCIÓN
Diámetro: 2cm Altura: 24cm Material: Cristal de cuarzo Longitud del cable: 150cm	Potencia de entrada: 13W Tensión de operación: 110-120V	La radiación proveniente de la luz UV es dañina para los ojos y la piel. Utilice la lámpara en ausencia de personas, animales y plantas. No mire directamente a la lámpara germicida cuando esté en funcionamiento

Anexo B. Ficha técnica Dipirona [33]

Producto	Dipirona 500mg
Principio activo	Dipirona
Expediente	19928652
Titular	LABORATORIOS ECAR S.A.
Registro sanitario	INVIMA 2012M-0001423-R1
Modalidad	Fabricar y vender
Fórmula	Solución inyectable
Vía	Intramuscular
ATC	Metamizol sódico
Grupo Terapéutico principal	Analgesico

Anexo C. Ficha técnica peróxido de Hidrógeno 50% [61]

H₂O₂ Peróxido de Hidrógeno 50%	
Es uno de los productos químicos más versátiles, seguros y deseables desde el punto de vista ecológico que existen en la actualidad, ya que no es agresivo con el medio ambiente. Es adecuado para la mayoría de las aplicaciones industriales.	
USOS: Puede actuar como oxidante (en pHs alcalinos) y como reductor (en pHs ácidos). Se emplea en la mayoría de los casos como oxidante y como blanqueador en la industria textil, en cosméticos, síntesis orgánicas, tratamientos de aguas residuales industriales, fabricación de productos químicos y como agente anti cloro para la neutralización del mismo. En la industria de la minería puede usarse como oxidante de muchos iones metálicos, en el procesamiento del oro y la plata.	
PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS	
Parámetros	Especificaciones
Color y forma	Líquido transparente
Concentración H ₂ O ₂ (% en peso)	50.0
Concentración H ₂ O ₂ (G/L) A 20 °C	598
Contenido de oxígeno activo	23.5
Densidad a 20 °C (g/cm ³)	1.18
Color específico medio (cal/g °C)	0.790
Punto de congelación °C	-52
Punto de ebullición °C	114

Anexo D. Ficha técnica del I Sulfato ferroso [55]

FeSO₄	
Sulfato ferroso	
El Sulfato ferroso se obtiene como subproducto del decapado de acero y de muchas operaciones químicas, también por la acción del ácido sulfúrico diluido sobre el hierro y por oxidación de piritas al aire seguida de lixiviación y tratamiento con residuos de hierro.	
USOS	
Como pigmento de óxido de hierro, otras sales de hierro, ferritas, purificación de aguas y alcantarillados, fertilizantes, aditivos de piensos, suplemento dietético en la industria de alimentos, en las artes gráficas, colorantes, industria farmacéutica, limpieza y mantenimiento, metalurgia, papelera, textil y tintas.	
PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS	
Parámetros	Especificaciones
Umbral de olor:	inoloro
Punto de inflamación:	No inflamable
Densidad relativa:	3 (agua = 1)
Solubilidad en agua:	Soluble

Punto de ebullición:	572 °F (300 °C)
Punto de fusión:	147 °F (64 °C)
Peso molecular:	278 g/mol
pH	3-4

Anexo E. Reporte de concentración muestras analizadas

Tratamiento	H2O2 (mg/L)	Tiempo (min)	Área (min)	Área (min)	Área de cuantificación	Dipirona (µg/mL)	Remoción (%)	S (µg/mL)	Dipirona (µg/mL)	Remoción (%)
Agua destilada	100	60	122342	374385	496727	1.168	99.77	0.01697	1.191	99.76
			122546	376764	499310	1.292	99.74			
			122356	373211	495567	1.112	99.78			
Agua destilada	100	120	555404	522454	1077858	29.102	94.18	0.82045	29.395	94.12
			534896	539882	1074778	28.954	94.21			
			552553	546689	1099242	30.130	93.97			
Agua destilada	200	60	351648	230953	582601	5.296	98.94	0.18980	5.596	98.88
			369945	225463	595408	5.911	98.82			
			352658	235896	588554	5.582	98.88			
Agua destilada	200	120	375238	224964	600202	6.142	98.77	0.18487	6.488	98.70
			389456	220468	609924	6.609	98.68			
			376589	235483	612072	6.712	98.66			
Agua residual hospitalaria	100	60	168865	948431	1117296	30.998	93.80	0.70475	30.335	93.93
			167242	932568	1099810	30.157	93.97			
			169899	923548	1093447	29.851	94.03			
Agua residual hospitalaria	100	120	151165	757872	909037	20.987	95.80	0.49893	20.560	95.89
			150023	752648	902671	20.681	95.86			
			153236	735486	888722	20.011	96.00			
Agua residual hospitalaria	200	60	372681	451668	824349	16.916	96.62	0.66200	16.871	96.63
			369847	441136	810983	16.274	96.75			
			373548	461316	834864	17.422	96.52			
Agua residual hospitalaria	200	120	628485	432130	1060615	28.273	94.35	0.77774	28.144	94.37
			623465	420365	1043830	27.466	94.51			

			645698	423659	1069357	28.693	94.26			
Blanco			360667	966708	1327375	41.096	91.78	0.89454	41.139	0.00
			382356	960237	1342593	41.828	91.63			
			382453	932356	1314809	40.492	91.90			