

TECNOLÓGICO DE ESTUDIOS SUPERIORES DE TIANGUISTENCO

DIVISIÓN DE INGENIERÍA AMBIENTAL

OPCIÓN IX TESIS

Efecto de agentes químicos y radiación ultravioleta en la degradación de
colorantes del sector textil y alimenticio

**Que para obtener el Título de
INGENIERO AMBIENTAL**

PRESENTA

Arlette Aketzali Acosta Díaz

DIRECTORA DE TESIS:
Dra. Bethsabet Jaramillo Sierra
ASESOR:
Dr. Mario Ibañez Olvera

JUNIO, 2025

ÍNDICE GENERAL

Resumen	1
Abstract	1
Introducción	2
Planteamiento del problema	3
Justificación	4
Objetivos	5
Hipótesis	6
CAPÍTULO I Generalidades	7
1.1 El agua	8
1.2 Fundamento de la química del agua	9
1.3 El ciclo hidrológico	10
1.4 Parámetros de medida de la calidad de las aguas	11
1.4.1 Parámetros físicos	11
1.4.2 Parámetros químicos	13
1.4.3 Parámetros de contaminación orgánica y biológicas	15
1.5 Contaminación del agua	16
1.6 Tratamientos del agua	16
1.7 Procesos de Oxidación Avanzada	18
1.7.1 Ozonificación / Peróxido de hidrógeno (H_2O_2)	18
1.7.2 Proceso Fenton	19
1.7.3 Oxidación Electroquímica	19
1.8 Colorantes y pigmentos	20
1.9 Contaminantes de origen textil	21
1.10 Contaminantes de origen alimenticio	23
1.11 Rojo de Metilo	24
1.11.1 Características de Rojo de Metilo	24
1.11.2 Aplicaciones	25
1.11.3 Efectos nocivos para la salud humana	25
1.11.4 Efectos negativos al ambiente	26
1.12 Azul Brillante	26
1.12.1 Aplicaciones	27

1.12.2 Efectos nocivos para la salud.....	27
1.11.3 Efectos negativos al ambiente.....	28
1.13 Estudio del arte.....	29
CAPITULO II Desarrollo Experimental	35
2.1 Descripción general del desarrollo experimental.....	36
2.2 Preparación de la muestra sintética	38
2.3 Dispositivo Experimental.....	38
2.4 Selección del método de tratamiento	40
2.5 Metodología	42
2.5.1 Degradación con ozono (O_3).....	42
2.5.2 Degradación con O_3 /UV	42
2.5.3 Degradación con O_3 /UV / H_2O_2	42
2.5.4 Degradación con H_2O_2	43
2.6 Análisis de los parámetros experimentales.....	43
2.6.1 Determinación de la Máxima longitud onda	43
2.6.2 Medición de pH.....	44
2.6.3 Medición de color.....	45
2.6.4 Medición del CO_2	46
2.6.5 Análisis de subproductos	46
2.6.6 Determinación de energía	47
CAPITULO III Resultados y discusiones	49
3.1 Descripción general de resultados	50
3.2 Degradación de Rojo de Metilo	50
3.2.1 Efecto de O_3 y O_3 /UV	50
3.2.2 Efecto de O_3 / UV / H_2O_2	53
3.2.3 Efecto H_2O_2	55
3.2.4 Efecto O_3 / H_2O_2	57
3.2.5 Efecto de UV / H_2O_2	60
3.3 Degradación de Azul Brillante.....	62
3.3.1 Efecto de O_3 y O_3 /UV	62
3.3.2 Efecto O_3 / H_2O_2 /UV.....	64
3.3.3 Efecto H_2O_2	66

3.3.4 Efecto O_3/H_2O_2	69
3.3.5 Efecto de UV/H_2O_2	71
3.4 Generación de CO_2	73
3.5 Consumo de energía	74
Conclusiones y Recomendaciones	75
Referencias	78

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Calidad típica de algunas aguas	9
Tabla 2. Tratamientos del agua.....	17
Tabla 3. Principales tecnologías de procesos de oxidación avanzada.....	18
Tabla 4. Metales encontrados en colorantes.....	21
Tabla 5. Clase de colorantes de origen textil	22
Tabla 6. Principales colorantes de origen alimenticio.....	23
Tabla 7. Características generales de RM	24
Tabla 8. Información ecológica.....	26
Tabla 9. Características generales de Azul Brillante	27
Tabla 10. Estudios relacionados a la degradación con Procesos de Oxidación Avanzada	29
Tabla 11. Prueba de experimentación para el Rojo de Metilo (RM).....	40
Tabla 12. Prueba de experimentación para el Azul Brillante	41
Tabla 13. Método de tratamiento por O_3 y O_3/UV	51
Tabla 14. Método de tratamiento por $O_3 / UV/H_2O_2$	54
Tabla 15. Método de tratamiento por H_2O_2	56
Tabla 16. Método de tratamiento por O_3/H_2O_2	59
Tabla 17. Método de tratamiento por UV / H_2O_2	61
Tabla 18. Método de tratamiento por O_3 y O_3/UV	63
Tabla 19. Método de tratamiento por $O_3 / UV/H_2O_2$	65
Tabla 20. Metodo de tratamiento por H_2O_2	68
Tabla 21. Método de tratamiento por O_3 / H_2O_2	70
Tabla 22. Método de tratamiento por UV/H_2O_2	72
Tabla 23. Generación de CO_2	73
Tabla 24. Consumo de energía	74

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Estructura química del agua.....	8
Figura 2.Ciclo hidrológico del agua	11
Figura 3. Descripción global del desarrollo experimental	37
Figura 4.Dispositivo experimental	39
Figura 5.Máxima longitud de onda de Rojo de Metilo	44
Figura 6.Máxima longitud de onda de Azul Brillante	44
Figura 7.Determinación de pH.....	45
Figura 8.Determinación de color	45
Figura 9. Medición del CO_2	46
Figura 10.Representación de soporte de la solución	47
Figura 11.Subproductos de contaminantes	47
Figura 12. Resultados de degradación de Rojo de Metilo por O_3 y O_3/UV	51
Figura 13.Resultados de degradación de Rojo de Metilo por $\text{O}_3/\text{UV} / \text{H}_2\text{O}_2$	53
Figura 14.Resultados de degradación de Rojo de Metilo por H_2O_2	55
Figura 15.Resultados de degradación de Rojo de Metilo por $\text{O}_3/\text{H}_2\text{O}_2$	58
Figura 16.Resultados de degradación de Rojo de Metilo por $\text{UV} / \text{H}_2\text{O}_2$	60
Figura 17.Resultado de degradación de Azul Brillante O_3 y O_3/UV	63
Figura 18.Resultados de degradación de Azul Brillante $\text{O}_3 / \text{UV} / \text{H}_2\text{O}_2$	64
Figura 19.Resultados de degradación de Azul Brillante por H_2O_2	67
Figura 20.Resultados de degradación de Azul Brillante por $\text{O}_3 / \text{H}_2\text{O}_2$	69
Figura 21.Resultados de degradación de Azul Brillante por $\text{UV}/\text{H}_2\text{O}_2$	71

Dedicatorias

A Dios

Al creador de todas las cosas el que siempre me dio fuerzas y sabiduría para finalizar este proceso de anhelo más deseados.

A mis padres

Cesar Acosta Rivera y Veneranda Díaz Zepeda por su esfuerzo y dedicación, por los sacrificios que han hecho siempre durante mi formación de estudios, su cariño y su fe de superar cada obstáculo y alcanzar este logro tan importante sin su ayuda nada de esto sería posible.

A mis hermanos

Caleb y Joshua por motivarme y animarme cada día.

A mi familia

Por confiar en mí, por tenerme como un ejemplo a seguir, su tiempo de dedicación, amor, momentos de felicidad.

Agradecimientos

Es con profunda gratitud que quiero expresar mi más sincero agradecimiento a la Dra. Bethsabeth Jaramillo Sierra por su invaluable guía y apoyo durante mi formación profesional. Su dedicación y pasión por la investigación fueron una fuente constante de inspiración para mí.

A cada uno de los docentes con quien tuve la oportunidad de tener una amistad gracias a su apoyo y consejos para mi formación lo cual mejoré como persona y académicamente brindándome su apoyo incondicional.

Al Tecnológico Nacional de México por el soporte a través de la convocatoria proyectos de investigación científica, desarrollo tecnológico e innovación 2025.

A Emmanuel Ramírez Flores por siempre ser mi soporte brindándome su apoyo, seguridad y amor en todo momento. Tus palabras de aliento me han ayudado a superar cada obstáculo que he tenido. Gracias por siempre confiar en mí y demostrarme tu paciencia para que yo hiciera las cosas con dedicación, este logro también es tuyo.

Quiero agradecer a la persona más importante ya que en cada instante de la vida nunca se rindió por siempre enfrentar los obstáculos de la vida y no darse por vencida a Arlette Aketzali Acosta Díaz quien por su dedicación, empeño y que esto es un recordatorio de todo lo que vas a lograr en un futuro.

Resumen

En este presente trabajo se emplearon Procesos de Oxidación Avanzada para el análisis de degradación en contaminantes de sector industrial los cuales son Rojo de Metilo y Azul Brillante. Los Procesos de Oxidación Avanzada han sido utilizados para el tratamiento de aguas residuales en el sector industrial.

Los procesos específicamente fueron ozono (O_3), peróxido de hidrógeno (H_2O_2) y radiación ultravioleta (UV); así mismo se aplicó combinaciones de los procesos específicos obteniendo eficiencias en algunos casos más eficientes. El proceso de tratamiento consto con un reactor cilíndrico de acero inoxidable donde en la parte central se encuentra la lámpara radiación UV, respectivamente un generador de ozono el cual se suministró en un depósito, finalmente el peróxido de hidrógeno se adicionaba en la muestra sintética a lo antes mencionado cada equipo era en base al tratamiento que se aplicó.

Se obtuvieron eficiencias de degradación de hasta el 98% y 99% para el Rojo de Metilo respectivamente utilizando O_3 , O_3 /UV/ H_2O_2 y O_3 / H_2O_2 y una eficiencia de 97%, 98% y 99% para Azul Brillante utilizando O_3 /UV/ H_2O_2 y O_3 / H_2O_2 después de 60 minutos de tratamiento.

Abstract

In this work, Advanced Oxidation Processes were used to analyze the degradation of industrial pollutants, such as Methyl Red and Brilliant Blue. Advanced Oxidation Processes have been used to treat wastewater in the industrial sector.

The specific processes were ozone (O_3), hydrogen peroxide (H_2O_2) and ultraviolet radiation (UV); likewise, combinations of the specific processes were applied obtaining efficiencies in some cases more efficient. The treatment process consisted of a cylindrical stainless steel reactor with a UV radiation lamp in the central part, respectively an ozone generator which was supplied in a tank, finally the hydrogen peroxide was added to the synthetic sample to the above mentioned each equipment was based on the treatment that was applied.

Degradation efficiencies of up to 98% and 99% were obtained for Methyl Red respectively using O_3 , O_3 /UV/ H_2O_2 and O_3 / H_2O_2 and an efficiency of 97%, 98% and 99% for Brilliant Blue using O_3 /UV/ H_2O_2 and O_3 / H_2O_2 after 60 minutes of treatment.

Introducción

El agua es un recurso natural indispensable para las actividades que desarrolla el ser humano ya que posee propiedades únicas. El sector industrial se ha abastecido en exceso de este recurso natural para el consumo en sus procesos. Los efluentes del sector industrial son desechados contribuyendo a la contaminación del agua, entre la gran diversidad de contaminantes se destacan los colorantes, los cuales son persistentes debido a su toxicidad asociada con el ambiente ha sido dañino, al momento que han sido tratadas las aguas con plantas de tratamiento no han tenido una degradación eficiente para llegar a una posible mineralización y así poder tener una recirculación.

Las aplicaciones de los colorantes en la industria han causado que estos estén presentes en más procesos de transformación de la materia, en sus productos que realizan siendo considerados como contaminantes de los ecosistemas acuáticos. Los Procesos de Oxidación Avanzada (*POAs* por sus siglas en inglés) han tenido mucha importancia para la purificación de aguas residuales provenientes de descargas industriales. Debido a que los procesos generan radical hidroxilo en cantidades eficientes para descomponer los compuestos orgánicos.

En esta investigación se efectuó la aplicación de diversos Procesos de Oxidación Avanzada en el tratamiento de colorantes (Rojo de Metilo y Azul Brillante), utilizando agentes oxidantes en diferentes concentraciones, radiación ultravioleta y sus combinaciones, para analizar las eficiencias de cada uno siendo los procesos con un tiempo de tratamiento de 60 minutos.

El contenido de este trabajo se divide en tres capítulos, el primer capítulo aborda conceptos generales que van desde el agua, así como los parámetros de medida de la calidad de agua, contaminación del agua, tratamientos del agua, procesos abordando específicamente en Procesos de Oxidación Avanzada.

En el segundo capítulo se basa en la descripción general de los tratamientos efectuados donde se explica la metodología que se aplicó para tener una eficiencia en los resultados, utilizando agentes oxidantes como el ozono (O_3), peróxido de hidrógeno (H_2O_2) y radiación ultravioleta (UV), así como procesos de combinación como: O_3 /UV, H_2O_2 /UV, O_3 / H_2O_2 y O_3 /UV/ H_2O_2 teniendo en cuenta que para el H_2O_2 se adicionó en concentraciones iniciales. Posteriormente, para el tercer y último capítulo se observa los resultados teniendo un análisis cualitativamente y cuantitativamente, en donde se observó la degradación de cada colorante (Rojo de Metilo y Azul Brillante), así mismo analizando ciertos parámetros de tiempo, medición de color y pH. Finalmente, en las conclusiones se presentan las eficiencias máximas que se obtuvieron en la degradación respecto al tratamiento de 60 minutos, así también los tratamientos que no fueron tan efectivos al contaminante.

Planteamiento del problema

El agua es uno de los recursos más importantes de la tierra lo cual su contaminación constante genera un impacto ambiental importante del cual debemos preocuparnos. La calidad del agua residual ha llevado a la búsqueda de métodos más eficientes para la eliminación de compuestos químicos que han presentado una alta toxicidad o una baja biodegradabilidad. Las principales fuentes de contaminación son antropogénicas, sector industrial y agrícola.

Los contaminantes del agua residual dentro del sector industrial se encuentran los compuestos orgánicos refractarios de alta toxicidad. Los colorantes, en especial los de origen sintético, presentes en las aguas residuales, son responsables de muchos de los efectos nocivos sobre la flora y la fauna acuática ya que contienen una alta toxicidad, color, olor y pH, no obstante, los métodos convencionales que se han propuesto no han sido tan eficientes en los colorantes más estables y no tan biodegradables para el tratamiento que se les da.

Los métodos convencionales tales como: filtración, sedimentación, absorción, desinfección, entre otros han ayudado al tratamiento del agua sin embargo han generado subproductos a los cuales se les tiene que dar algún tratamiento para su disposición final.

Los Procesos de Oxidación Avanzada han sido alternativas para la degradación de los colorantes lo cual se basan en la generación de radicales hidroxilos capaces de lograr una degradación de contaminantes e incluso en algunos contaminantes llegar a una mineralización. En este presente trabajo se aborda la problemática de contaminación de agua por colorantes del sector industrial teniendo como alternativas a los Procesos de Oxidación Avanzada ya que brindan un tratamiento eficiente en poco tiempo de tratamiento.

Justificación

A lo largo de los años la contaminación del agua ha incrementado a gran medida que ha provocado grandes problemas en el agua. Sus consecuencias han provocado amenaza para la salud, el desarrollo del humano, medioambiental y económico. Los procesos habituales para el tratamiento de agua han sido los procesos biológicos, los físicos o los tratamientos químicos comunes. A pesar de que en su mayoría han sido utilizados los tratamientos no han sido tan eficientes ya que lleva tiempo y necesitan otro tratamiento para sus subproductos, por lo cual ha surgido la necesidad de buscar tecnologías más avanzadas y procesos de degradación de agua lo cual son Procesos de Oxidación Avanzada y sus diferentes combinaciones para tener mayor rendimiento logrando la mineralización.

Los Procesos de Oxidación Avanzada han ayudado a la degradación del agua dentro el sector industrial ya que aplicando los procesos han evitado y minimizado los subproductos que se tienen en los procesos convencionales. Sin embargo, cada colorante es diferente a como reacciona en su oxidación.

Por lo cual se analizaron los colorantes Rojo de Metilo y Azul Brillante a partir de muestras sintéticas ya que derivado a cada muestra su eficiencia fue efectiva en los diferentes procesos de oxidación dado que se tiene variables como: la concentración inicial de la muestra sintética, tiempo de tratamiento y su energía consumida durante el tratamiento llegando así a una eficacia de cada proceso; así mismo alcanzando en algunos tratamientos la mineralización total de los contaminantes.

Objetivos

Objetivo general

Aplicar diversos Procesos de Oxidación Avanzada para la degradación de colorantes en medio acuoso, específicamente Rojo de Metilo y Azul Brillante determinando los parámetros óptimos relativos a la eficiencia del proceso, analizando la concentración inicial de los agentes oxidantes, el pH, el tiempo de tratamiento, análisis cualitativo y cuantitativo del color, consumo energético y determinación de CO₂.

Objetivos específicos

- Acondicionar el reactor de tratamiento para la degradación los contaminantes de sector industrial Rojo de Metilo y Azul Brillante en solución acuosa por diversos Procesos de Oxidación Avanzada.
- Realizar la degradación mediante los procesos de oxidación avanzada: UV, H₂O₂ y O₃ y la combinación de estos (H₂O₂ /UV, UV/H₂O₂ /O₃).
- Determinar la eficiencia de degradación de los contaminantes de estudio.
- Analizar los parámetros experimentales del proceso de degradación.

Hipótesis

Los Procesos de Oxidación Avanzada se basan en la generación de especies químicas con un alto poder de oxidación, principalmente radicales OH caracterizándose por no ser selectivos. Para su generación son utilizados agentes oxidantes como ozono y/o peróxido de hidrógeno, potencializando su disociación con la radiación ultravioleta. Los radicales OH colisionan con los colorantes, formando ácidos carboxílicos de bajo peso molecular que posteriormente son mineralizados, es decir, se obtiene agua y dióxido de carbono.

CAPÍTULO I

Generalidades

1.1 El agua

El agua se define como: “Cuerpo formado compuesto por un átomo de oxígeno y dos de hidrogeno están dispuestos en un ángulo de 105° (figura1) lo cual tiene características relevantes: Líquido, inodoro, insípido en pequeña cantidad incoloro y verdoso en grandes masas, que refracta la luz, disuelve muchas manchas, se solidifica por el frío, se evapora por el calor y más o menos puro, forma la lluvia, los manantiales, los ríos y los mares” (López Sánchez, 2005).

Es un recurso natural crucial para la humanidad y es por ello que nuestros ríos, lagos, aguas subterráneas y aguas costeras deben ser utilizadas de forma sustentable, pensando siempre en las nuevas generaciones (Araque, 2022).

Tiene una gran importancia para la vida humana ya que se usa para las actividades que se desarrollan en la vida diaria, así mismo tiene un gran uso en las actividades laborales ya que el agua es usada en los procesos de producción. El agua es el único elemento que se encuentra en la naturaleza en sus estados sólido, líquido y gaseoso.

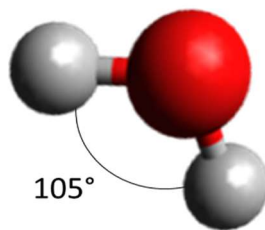


Figura 1. Estructura química del agua. Fuente: (Rosales, 2019).

1.2 Fundamento de la química del agua

El agua natural puede contener una gran variedad de impurezas, características del ciclo hidrológico que ha experimentado previamente. El agua natural puede llegar directamente a la industria desde una captación independientemente o a través de una red de suministros que probablemente entregara el agua con algunas modificaciones en su composición original.

Cuando las impurezas representan elementos nocivos para el uso al que va destinada el agua la denominamos contaminantes. Ya que es el grado de calidad requerido el que ha determinado si una impureza es contaminante o no.

Cada proceso industrial requiere una característica específica del agua (tabla 1) donde se debe de tener en cuenta el origen del agua para llevar acabo su tratamiento y sus especificaciones apropiadas de determinados contaminantes. Para eliminarlos se somete el agua a tratamientos de purificación, a su vez los procesos industriales introducen en el agua unos nuevos contaminantes. Como también los efluentes están sujetos a unas calidades mínimas del vertido, establecidas para el receptor; si no lo cumplen deben someterse a otros tratamientos que den la calidad de vertido necesario o que permitan la recuperación interna del agua (Lapeña, 1999).

Tabla 1. Calidad típica de algunas aguas

	Conductividad	Solidos disueltos totales (SDT)	Sodio (Na)	Dióxido de Silicio(SiO_2)	Carbono Orgánico Total (COT)
Origen	$\frac{S}{cm}$	ppm	ppm	ppm	ppm
Mar	51000	36000	11000	1-20	1-10
Residual urbana	600-2000	500-1500	50-200	5-20	100-300
Rio	100-3000	50-2000	5-800	2-20	10-40
Pozo	150-1000	100-600	1-100	10-30	<1
Pozo salobre	12000-10000	800-60000	150-15000	1-20	1-5
Municipal	600-2000	400-1200	15-150	1-6	2-6
Desminer CF+AF	2-20	2-10	1-5	0.01-0.1	1-4
Id+Lecho mixto	0.1-1	0.1-1	0.05-0.5	0.005-0.02	0.5-1
Pulido condensad	0.1-0.5	<0.2	<0.005	0.005-0.01	0.4-0.6

Chips eléctricos	0.66-0.1	<0.02	<0.0005	<0.005	<0.5
Química pura 25°	0.0548	0	0	0	0

Fuente: (Lapeña, 1999).

Las técnicas de tratamiento de agua cubren una amplia variedad de los procesos de purificación. Si el agua fuera siempre pura o si siempre tuviera una composición constante de los contaminantes presentes su acondicionamiento para un uso industrial determinado sería simple y uniforme. Sin embargo, no es el caso y la variedad de las impurezas, junto con las alternativas diferentes de tratamiento que podemos elegir, cada opción para unas condiciones determinadas, requieren una evaluación experta, basada en unos conocimientos especializados (Lapeña, 1999).

1.3 El ciclo hidrológico

El ciclo hidrológico es el proceso mediante el cual se realiza de agua para las plantas, los animales y el hombre (figura 2) Su fundamento es que cada gota de agua, en cualquier momento en que se considere recorre un circuito cerrado (Rascón, 2005).

El agua natural, agua que encontramos en la superficie de la corteza terrestre, sea dulce o salada, está sometida a las radiaciones energéticas procedentes del sol. Como consecuencia de ello una parte de la misma sufre un cambio de estado pasando a vapor y a la atmósfera. Este vapor de agua cuando llega a las capas altas de la atmósfera, donde la temperatura es más baja, se condensa formando diminutas gotitas, al conjunto de las cuales se les llama nubes (Rascón, 2005).

Cuando estas gotas se hacen mayores, la atracción de la Tierra aumenta, cayendo sobre ella en forma de lluvia, la cual, una vez sobre la misma, discurre, una parte sobre la superficie constituyendo las aguas de escorrentías, que luego unidas forman los ríos. Otra parte se filtra a través de la superficie terrestre (aguas de infiltración), para circular por el interior de la misma, constituyendo las aguas subterráneas, que luego afloran a la superficie en forma de manantiales fuentes o por medio de pozos.

El agua sufre una serie de transformaciones. Así, el paso de líquido a vapor constituye una destilación que la libera de todas las impurezas que contiene (tratamiento natural del agua). Al licuarse el vapor y caer a la Tierra en forma de lluvia disuelve diversas sustancias que se encuentran en la atmósfera, más cuanto más concentradas estén en la misma. Ya en la superficie terrestre siguen disolviendo sustancias, más las subterráneas que las superficiales, hasta llegar al

mar donde se encuentran las aguas superficiales más cargadas de sales (Rascón, 2005).

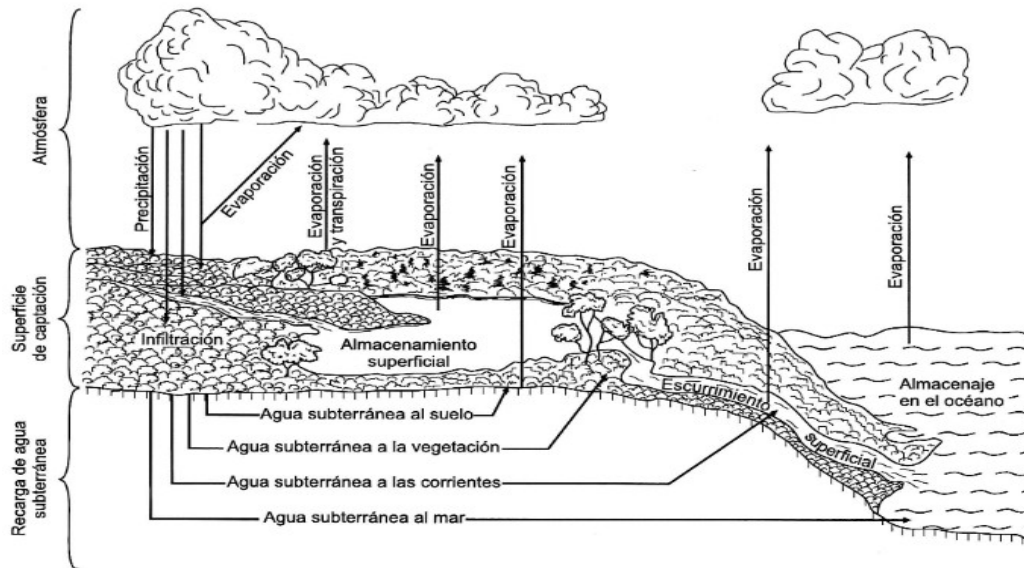


Figura 2. Ciclo hidrológico del agua. Fuente: (Rascón, 2005).

1.4 Parámetros de medida de la calidad de las aguas

La calidad del agua es un aspecto fundamental para la sostenibilidad ambiental, la salud pública y el desarrollo socioeconómico. Al analizar los cuerpos de agua, es importante comprender que su calidad no solo se refiere a su apariencia, sino a una serie de características físicas, químicas y biológicas que determinan si el agua es apta para distintos usos. Los parámetros de calidad del agua permiten evaluar estos aspectos, proporcionando indicadores claros del estado de las aguas y su grado de contaminación o pureza.

1.4.1 Parámetros físicos

Son aquellos que describen las propiedades observables y medibles del agua sin involucrar cambios químicos. Aunque a simple vista algunos de estos aspectos pueden parecer superficiales, influyen directamente en la vida acuática, los procesos biológicos y las actividades industriales.

- **Color**

La determinación del color se efectúa visualmente empleando luz diurna difusa sobre fondo blanco, o mediante el uso de un espectrofotómetro visible. El color que presenta el agua puede ser aparente (agua bruta) o verdadero (agua sin sólidos en suspensión) (Jiménez, 2000).

Se asocia al concepto de color verdadero que hace referencia al color del agua una vez se ha removido las partículas que causan turbiedad, el color afecta estéticamente la potabilidad de las aguas, puede representar un potencial colorante de ciertos productos cuando se utiliza como material de proceso y un potencial espumante en su uso.

- **Sabor y olor**

El olor en el agua puede utilizarse de manera subjetiva para describir cualitativamente su calidad, estado, procedencia o contenido. Aun cuando esta propiedad pueda tener un amplio espectro de posibilidades, para propósitos de calidad de aguas existen ciertos aromas característicos que tipifican algunas fuentes u orígenes, más o menos bien definidos (Clair Sawyer, 2000).

Generalmente, las sales inorgánicas a las concentraciones encontradas de forma natural en el agua potable no afectan adversamente al sabor, de hecho, muchas de las botellas de agua mineral se compran por sus sales características o su sabor sulfuroso. Tanto los sabores y los olores están originados por la interacción de muchas sustancias presentes.

Estas pueden incluir partículas sólidas, vegetación muerta, organismos (plancton, bacterias, hongos), varían sales inorgánicas (por ejemplo: cloruros y sulfatos de sodio, calcio, hierro y magnesio, compuestos orgánicos y gases).

- **Turbidez**

La turbidez es una expresión de la propiedad óptica que causa la dispersión y la absorción de la luz en lugar de su transmisión, sin cambio de dirección o nivel de flujo a través de la muestra. La medición se hace por comparación con la turbidez indicada por diversas sustancias.

La turbiedad o falta de transparencia del agua ha sido causada por materiales suspendidos en ella, tales como arcilla, sedimentos, algas y otros materiales orgánicos.

Existen diversos tipos de turbidímetro modernos dando valores numéricos prácticamente idénticos. El fundamento del turbidímetro de Jackson es la observación de una bujía a través de una columna del agua ensayada, cuya longitud

se aumenta hasta que la llama desaparece. La turbidez se elimina mediante procesos de coagulación, decantación y filtración (Lapeña, 1999).

- **Conductividad**

La conductividad eléctrica de una muestra de agua es la expresión numérica de su capacidad para transportar una corriente eléctrica. Esta capacidad depende de la presencia de iones en el agua, de su concentración total, de su movilidad, de su carga y de las concentraciones relativas, así como de la temperatura (WPCF, 1992).

1.4.2 Parámetros químicos

Son fundamentales para evaluar su calidad y determinar su adecuación para distintos usos, como el consumo humano, agrícola o industrial. Estos parámetros reflejan la presencia de diferentes sustancias químicas disueltas en el agua, que pueden ser naturales o producto de la actividad humana.

- **pH**

Es usado universalmente para determinar si una sola solución es ácida o básica, es una medida de la concentración de iones hidrógeno y se define como $\text{pH} = \log\left(\frac{1}{(H^+)}\right)$. La mayoría de aguas naturales tiene un pH entre 6.0 y 8.0, su medición se realiza con un pH metro bien calibrado, aunque también se puede disponer de papeles especiales que, por coloración, indica el pH. Los valores de pH han de ser referidos a la temperatura de medición, pues varían con ella. El pH se corrige por neutralización (Lapeña, 1999).

- **Dureza**

La dureza debido a la presencia de sales disueltas de calcio y magnesio, mide la capacidad de un agua para producir incrustaciones. Afecta tanto a las aguas domésticas como a las industriales, siendo la principal fuente de depósito e incrustaciones en calderas, intercambiadores de calor, tuberías, etc (Lapeña, 1999).

- **Alcalinidad**

La alcalinidad de un agua residual está provocada por la presencia de hidróxidos, carbonatos y bicarbonatos de elementos como el calcio, el magnesio, el sodio, el potasio o el amoníaco. La concentración de alcalinidad en un agua residual es importante en aquellos casos en los que emplean tratamientos químicos, en la eliminación biológica de nutrientes y cuando se elimina el amoníaco mediante arrastre por aire. La alcalinidad ayuda regular los cambios de pH producidos por la adición de ácidos (Metcalf, 1995).

- **Coloides**

Son partículas de gran volumen y poco peso, con propiedades superficiales especiales y cargados eléctricamente. Algunos coloides son: arcillas, proteínas, óxidos metálicos hidratados, etc. Normalmente, estos coloides de las aguas residuales están en forma de anión. Los coloides pueden ser de origen orgánico (macromoléculas de origen vegetal) e inorgánico (óxidos de hierro y manganeso) (Lapeña, 1999).

- **Cloruros**

El ión cloruro (Cl^-) forma sales solubles suelen asociarse con el ión (Na^+) especialmente en aguas muy salinas. Las aguas con cloruros pueden ser muy corrosivas debido al pequeño tamaño del ión que puede penetrar la capa protectora en la interfase óxido-metal y reaccionar con el hierro estructural (Lapeña, 1999).

- **Sulfatos**

Los sulfatos ($\text{SO}_4^{=}$) son muy abundantes en la naturaleza y su presencia en el agua varía en algunas centenas de miligramos por litro; principalmente depende de la concentración del sulfato de hierro presente en el suelo o en lechos rocosos de ríos. Se sabe que la explotación de pirita en minas, conduce a un incremento del ion sulfato en agua debido principalmente a los procesos de oxidación que sufre el mineral durante su extracción en los drenajes que se hacen para la perforación (Bolaños Alfaro, 2017).

- **Nitratos**

Es un nutriente esencial para las plantas que normalmente se absorbe del suelo con nitrato o como amoníaco. Hay dos orígenes principales de la contaminación por nitratos en los recursos de agua (N.F.Gray, 1996).

- 1) El nitrato se libera cuando la materia orgánica se descompone por las bacterias del suelo, el nitrato producido por la acción microbiana no es utilizado por las plantas y así es arrastrado por las plantas por el agua de lluvia hasta el acuífero contaminado el agua subterránea (N.F.Gray, 1996).
- 2) Los agricultores añaden directamente el nitrógeno inorgánico a los campos de forma de fertilizantes artificiales, donde la aplicación excede las necesidades de la planta o habilidad de la planta para utilizar el nitrato, entonces el exceso o bien se quedará ligado al suelo o, lo más seguro será arrastrado del suelo por la lluvia tanto a las aguas superficiales como a las subterráneas (N.F.Gray, 1996).

- **Hierro**

El hierro es un elemento esencial y es muy difícil que origine una amenaza para la salud en las concentraciones que ocasionalmente se registran en los suministros de agua. Es indeseable en cantidades en exceso y pueden causar numerosos problemas. El hierro es soluble en su estado ferroso Fe^{2+} y se oxida en presencia de aire a la forma insoluble férrica Fe^{3+} , así cuando las aguas subterráneas son anaeróbicas o tienen baja concentración de oxígeno disuelto, todo el hierro estará en forma soluble (N.F.Gray, 1996).

- **Magnesio**

El magnesio se encuentra ampliamente en minerales y rocas, y como el hierro aparece en las aguas subterráneas debido a las condiciones reductoras de los suelos y rocas convirtiéndolo en forma soluble. Una vez expuesto al aire por la aireación, el magnesio se oxida a su forma insoluble y se deposita. El magnesio es más difícil de eliminarlo ya que requiere un pH de entre 8.5 a 9.0 (N.F.Gray, 1996).

1.4.3 Parámetros de contaminación orgánica y biológicas

Los parámetros biológicos miden la calidad del agua basándose en los organismos que habitan.

- **Demanda Biológica de Oxígeno (DBO)**

La cantidad de oxígeno disuelto en el agua consumido por los microorganismos, como bacterias, hongos y plancton, en condiciones anaerobias, para degradar las sustancias orgánicas contenidas en la muestra, de igual manera requiere de condiciones muy específicas y al tratarse de un proceso biológico es más delicado y requiere de mucho tiempo (Castillo, 2022).

- **Demanda Química de Oxígeno (DQO)**

Se define como la cantidad de un oxidante específico que reacciona con una muestra bajo condiciones controladas. La cantidad de oxidante consumida se expresa en términos de su equivalencia en oxígeno (Gil, 2009).

La cantidad de oxígeno necesaria para oxidar la materia orgánica por medios químicos, con agentes oxidantes fuertes como lo es el dicromato de potasio, y convertirla en dióxido de carbono y agua, bajo condiciones específicas.

- **Carbono Orgánico Total (COT)**

El carbono orgánico total (COT) se define como cualquier compuesto que contenga átomos de carbono excepto CO₂ y sustancias relacionadas como carbonato, bicarbonato y similares. Es el sustrato energético para muchos microorganismos y su consumo contribuye al problema del oxígeno disuelto inadecuado en los cuerpos de agua que se convierten en una amenaza para la vida acuática (Mook, 31 de Enero de 2012).

1.5 Contaminación del agua

La contaminación de las aguas es un complejo fenómeno social, económico y ambiental que constituye uno de los más serios obstáculos para el buen vivir. El deterioro de la calidad de las aguas es notorio, altamente nocivo y de grandes dimensiones cuando se trata del impacto ambiental de las actividades extractivas, principalmente hidrocarburíferas y mineras, actividades que han generado una afectación ambiental con muy graves y permanentes daños para la salud y la vida de la gente y a los ecosistemas (Campaña, Abril 2011).

Los problemas que ocasionan a la agricultura moderna e industrias. El crecimiento de la población ha provocado la expansión de las áreas de cultivo, sobreexplotación de los recursos naturales, así como problemas de disponibilidad y degradación de los recursos. Esta situación se agrava debido al manejo inapropiado de los residuos industriales, de los pesticidas y los fertilizantes que contaminan con elementos orgánicos e inorgánicos persistiendo en el ambiente y dispersándose por medio de los procesos de bioacumulación en lagos, ríos, especies, animales y vegetales, lo que contribuye al desequilibrio de los ecosistemas (Velázquez, 2022).

1.6 Tratamientos del agua

Durante los últimos años los fabricantes y distribuidores de sistemas de tratamiento de agua ha crecido. Las diversidades de sistemas disponibles también han aumentado, la mayoría de los sistemas están basados en una filtración, intercambio iónico, carbón activado, osmosis inversa o radiación ultravioleta.

Frecuentemente se utilizan combinaciones de estos procesos en la tabla 2 se describen los diferentes tratamientos del agua.

Tabla 2.Tratamientos del agua

Tratamientos del agua	Descripción
Filtración	Consiste en la remoción de partículas suspendidas y coloidales presentes en una suspensión acuosa que escurre a través de un medio poroso. En general, la filtración es la operación final de clarificación que se realiza en una planta de tratamiento de agua y, por consiguiente, es la responsable principal de la producción de agua de calidad coincidente con los estándares de potabilidad (Valencia, 2000).
Carbón activado	Es un proceso de adsorción, en el cual los contaminantes se atrapan por adsorción en la superficie de las partículas del carbón. Las partículas de carbón activado tienen una microestructura porosa con una superficie muy grande. La eficacia de adsorción depende de: el tamaño de las moléculas, el tamaño de los poros, el área superficial, la concentración de partículas, la temperatura, el tiempo de contacto y otros parámetros (Salas, 2021).
Osmosis inversa	La osmosis inversa es una operación de difusión natural de los fluidos a través de una membrana semipermeable en el que el agua migra desde una zona de baja concentración a una de alta concentración buscando igualar las concentraciones de ambos lados. Sus aplicaciones son para: obtención de agua potable, desalinización del agua, tratamiento de aguas residuales industriales, procesamiento de alimentos, entre otras aplicaciones (Oruna, 2012).
Intercambio iónico	El procedimiento se basa en un intercambio de iones disueltos como nitratos, fluoruros o sulfuros y se intercambian por iones de carga similar. Para ello, el agua residual se dispone en un intercambiador que puede ser tanto catiónico como aniónico. El proceso consiste en un intercambio electrostático entre los grupos funcionales del sólido y la resina, lo que conlleva a una desmineralización (Ortega, 2021).
Radiación ultravioleta	La radiación ultravioleta es un proceso físico por el cual los microorganismos expuestos a longitudes de onda germicidas se vuelven inviables o incapaces de reproducirse e infectar. Una lámpara ultravioleta se aloja en un mango de cuarzo transparente .El agua entra por uno de los extremos de la unidad y fluye alrededor de la lámpara protegida (Díaz, 2018).

1.7 Procesos de Oxidación Avanzada

Es una tecnología que implica la liberación de especies reactivas de oxígeno para la degradación de contaminantes orgánicos y cuyo objetivo principal es la mineralización completa de los contaminantes en productos finales inocuos. Las especies reactivas de oxígeno son radicales libres con al menos un electrón desapareado, responsables del proceso de oxidación (Oturán, 2014).

Los procesos habituales para la purificación de las aguas, tanto residuales como potables, han sido la mayoría los procesos biológicos, los físicos o los tratamientos químicos comunes. En algunos casos, estos métodos no han resultado eficaces para alcanzar el grado de pureza necesario. Por lo cual, ha surgido la necesidad de nuevos procesos de remediación de aguas. Estos nuevos procesos se han llamado Procesos de Oxidación Avanzada (POAs) individual o conjuntamente con los procesos convencionales.

Los POAs se basan en procesos fisicoquímicos y son procesos de tratamiento de aguas que implican la generación y uso in situ de radicales hidroxilos ($\cdot\text{OH}$) como se muestra en la tabla 3 para oxidar la materia orgánica disuelta en el agua hasta su mineralización (Forero, 2005).

Tabla 3. Principales tecnologías de procesos de oxidación avanzada

Tecnologías de oxidación avanzada	Proceso
Ozonificación / Peróxido de Hidrógeno (H_2O_2)	Oxidación en agua / supercrítica, Fotólisis ultravioleta – vacío (UV – V)
Proceso Fenton	Ultravioleta / Peróxido de Hidrógeno (H_2O_2)
Oxidación Electroquímica	Ultravioleta / Ozono

Fuente: (Forero, 2005).

1.7.1 Ozonificación / Peróxido de hidrógeno (H_2O_2)

El ozono es un agente desinfectante (eliminación o inactivación de bacterias, virus y protozoos). Su principal limitación es su inestabilidad en el agua, es efectivo como desinfectante primario en las plantas de tratamiento de agua, controlando su velocidad de descomposición según las características del agua a tratar como el pH, la presencia de contaminantes inorgánicos y orgánicos (Vidal, 2003).

El ozono se puede usar en el tratamiento del agua potable para diversos fines, entre los que se destacan los siguientes:

- Desinfección y control de algas
- Oxidación de microcontaminantes inorgánicos (Fe y Mn)
- Oxidación de microcontaminantes orgánicos (eliminación de olores y sabores, compuestos fenólicos, pesticidas, etc.)
- Oxidación de materia orgánica natural del agua, con diversos objetivos: eliminación del color del agua, incremento de la biodegradabilidad.

La aplicación de ozono favorece la remoción del color con eficiencias de remoción entre 95 % y 97 %, tratando efluentes de la industria. Sin embargo, en lo que se refiere a la reducción de demanda química de oxígeno (DQO) o carbono orgánico total (COT) las eficiencias no exceden usualmente 50 % a 40 %, respectivamente (Rodríguez, 2008).

1.7.2 Proceso Fenton

El proceso de Fenton generalmente incorpora la reacción del peróxido de hidrógeno en presencia de iones de hierro en un medio ácido para producir un agente oxidante fuerte, el radical hidroxilo que degrada aún más los contaminantes (Pignatello, 2006).

El proceso de oxidación Fenton se conoce por su alta efectividad en la descontaminación de aguas provenientes de la industria petroquímica, textil, farmacéutica, papelería, entre otras. (Babuponnusami, Marzo de 2014). Al emplear los procesos Fenton se puede obtener una degradación parcial o total de contaminantes inorgánicos y orgánicos persistentes, dando lugar a una disminución de la toxicidad del efluente (Durán, 28 de Febrero de 2011).

1.7.3 Oxidación Electroquímica

El tratamiento electroquímico de aguas residuales es una tecnología fundamentada en la degradación oxidativa de compuestos químicos a través de reacciones anódicas. En los últimos años, uno de los campos de la ingeniería electroquímica que se está desarrollando es el tratamiento de efluentes industriales, por su gran atractivo para dar solución a los problemas medioambientales. Ya que la mayoría de las sustancias son electroquímicamente activas, la electrólisis se presenta como una opción viable para el tratamiento de descontaminación tanto en efluentes líquidos y sólidos, como en gaseosos (Méndez, 2009).

La electroquímica como técnica de tratamiento permite tanto la eliminación como la regeneración de especies, y utiliza como materia prima del proceso, un reactivo

limpio: la energía eléctrica o vector de descontaminación ambiental. El proceso electroquímico permite tratar una gran variedad de efluentes industriales (incluso de alta toxicidad) y es especialmente efectivo en los poco o nada biodegradables donde realiza disminuciones de la DQO de hasta el 95% (Méndez, 2009).

1.8 Colorantes y pigmentos

Se considera colorante, a una sustancia que posee color (o desarrollarlo a través de una reacción química) y puede transferirlo al medio al cual se aplica; hay así, sustancias cromógenas específicas para diferentes sustratos.

Por ejemplo, para colorear materiales que deben someterse a altas temperaturas como el vidrio o la cerámica son necesarios sales y óxidos inorgánicos que desarrollan o retienen el color bajo las condiciones de fabricación y empleo de esos materiales, mientras que en el teñido de fibras o en la coloración de alimentos preparados o productos farmacéuticos y cosméticos alimentarios se emplean colorantes generalmente (no exclusivamente) orgánicos (Marcano, 2018).

Los pigmentos son compuestos incoloros, coloreados o fluorescentes, insolubles, que no son afectados física o químicamente por el medio al cual se incorporan. Están constituidos por una sustancia colorante orgánica o inorgánica y una base o portador, en relación más o menos definida y para aplicarse deben dispersarse en un vehículo sin combinarse con él (por ejemplo, las tintas y los barnices) (Marcano, 2018).

Los pigmentos y los colorantes difieren en sus características de solubilidad y métodos de aplicación. Un pigmento es insoluble en la mayoría de los solventes, mientras que un colorante es soluble en agua y solventes hidroxílicos: alcohol, propilenglicol, glicerina o en solventes lipofílicos (menos frecuente), por lo cual se utilizan los primeros, como una dispersión, mientras que los colorantes se emplean como una disolución. De esta manera, los pigmentos son usados para colorear y opacar permaneciendo insolubles durante todo el proceso de coloración (Marcano, 2018).

Los colorantes que son más comúnmente utilizados en la industria son los de la familia azo o colorantes azoicos, donde estos destacan por estar compuestos con un doble enlace de moléculas de nitrógeno. Estos compuestos, al igual que la gran mayoría de los colorantes sintéticos, son poco biodegradables, pero se han encontrado diversas condiciones para que puedan ser completamente degradados (Zaruma, 2018).

1.9 Contaminantes de origen textil

La industria textil es una de las más importantes de nuestro país. Sin embargo, es una de las industrias con mayor consumo de agua y las aguas residuales que se generan contienen un gran número de contaminantes de diferente naturaleza. Entre los contaminantes se destacan los colorantes. Estos compuestos se diseñan para ser altamente resistentes, incluso a la degradación microbiana, por lo que son difíciles de eliminar en las plantas de tratamiento convencionales (Martínez, Enero 2014).

En los efluentes textiles se pueden encontrar metales como: arsénico, cadmio, cromo, cobalto, cobre, manganeso, mercurio, níquel, plata, titanio, zinc, estaño y plomo. Muchos de esos metales se generan durante el proceso de teñido. En la tabla 4 se muestran algunos metales presentes en diferentes clases de colorantes (Martínez, Enero 2014).

Tabla 4. Metales encontrados en colorantes

Clase de colorante	Metales
Directo	Cobre
Reactivo	Cobre y Níquel
Ácidos	Cobre, Cromo, Cobalto
Premetalizados	Cobre, Cromo, Cobalto
Mordiente	Cobre

Fuente: (Martínez, Enero 2014).

Uno de los metales más comunes en los colorantes de origen textil es el cobre, este elemento es conocido por sus efectos negativos en cultivos vegetales y microorganismos, lo cual trae como consecuencia una disminución de la fertilidad del suelo (Martínez, Enero 2014).

Los metales pesados en general tienen una baja solubilidad en agua, por lo que la concentración de metales en el agua depende de parámetros como el pH, potencial REDOX, contenido de materia orgánica y cantidad de metal presente. Para los colorantes que contienen metales como parte integral de la molécula, el contenido metálico es esencial para su rendimiento como colorante textil. Debido a la contaminación ambiental que generan los efluentes de la industria textil, la eliminación de los colorantes en este tipo de efluentes representa un reto tecnológico en los procesos de tratamiento de aguas residuales (Martínez, Enero 2014).

Los colorantes textiles tienen diferentes orígenes y aplicaciones, aunque en la actualidad mayormente son utilizados los de origen sintético, los cuales no son biodegradables en el medio ambiente. Por este motivo, se ha visto obligado a buscar

la manera de eliminar estos contaminantes ya que éstas sustancias son consideradas como recalcitrantes. Por ende, a éstas se les debe aplicar procesos adecuados para degradarlos de las aguas residuales de manera efectiva, antes de que sean descargados al ambiente (Zaruma, 2018).

Existen clases de colorantes que se describen en la tabla 5 que se encuentran disponibles comercialmente en el sector de origen textil (Marcano, 2018).

Tabla 5. Clase de colorantes de origen textil

Clase de colorantes	Descripción
Directo	Aquellos que contienen grupos polares, son aplicables directamente en solución y se adhieren a las fibras por interacciones electrostáticas o por la formación de sales. Por costumbre se conocen como colorantes directos aquellos aniónicos que tienen especial afinidad por fibras celulósicas (Marcano, 2018).
Reactivo	Aquellos que poseen en su molécula un grupo reactivo que se une a la fibra mediante enlaces covalentes formando ésteres o éteres. En ello se aprovechan las funciones hidroxilo del algodón y de la lana o el grupo amino de la lana, seda y otras poliamidas. Estos grupos reactivos contienen generalmente halógenos que son sustituidos por las funcione de la fibra (Marcano, 2018).
Ácidos	Los aniónicos solubles en agua que contienen grupos ácidos como: SO_3H , CO_2H , NO_2 , OH (fenólicos) y por lo tanto pueden teñir fibras con grupos básicos como la seda, la lana y la poliamida, fijándose por formación de sales (Marcano, 2018).
Premetalizados	Son soluciones tintóreas creadas mediante un proceso químico previo a la fase de tintura ya que lleva un procedimiento el cual varias moléculas de colorante, generalmente ácido, se asocian con un átomo metálico formando un complejo molecular con afinidad por las fibras proteicas y poliamídicas (Marcano, 2018).
Mordiente	Son sustancia que se utiliza en la industria textil para fijar los tintes en las telas y que el color se adhiera de forma permanente. El mordiente actúa como un puente o enlace entre el tinte y las fibras, de manera que las partículas colorantes se adhieran a la estructura de las fibras (Marcano, 2018).

Fuente: (Marcano, 2018).

1.10 Contaminantes de origen alimenticio

El agua es la materia prima más utilizada en la industria alimentaria y de bebidas. Este sector industrial tiene un impacto negativo en el medio ambiente y la economía debido a la creciente demanda de agua y la producción de aguas residuales. Con la creciente escasez de agua potable, la reutilización de aguas residuales se ha convertido en una importante preocupación económica y ecológica. Por lo tanto, la optimización del consumo de agua y la reutilización de aguas residuales en la industria alimentaria es esencial (Shrivastava, Abril de 2022).

Por otro lado, varios países limitan la reutilización de aguas residuales debido a restricciones legales y a preocupaciones por la salud pública y la seguridad. Esto representa un gran desafío tanto para las industrias como para las administraciones debido a la complejidad técnica y los costos financieros que implica.

El color es una cualidad organoléptica de los alimentos y se aprecia por medio del sentido físico de la vista. También suele ser considerado un factor psicológico de apreciación y un criterio para elegir un producto alimenticio; incluso en los productos de origen vegetal se relaciona con la posibilidad de elegir la maduración y su idoneidad (Rettig, 2014). En la tabla 6 se muestra los colorantes de sector alimenticio lo cual son de distintos compuestos, principalmente orgánicos, algunos que se producen durante el manejo y procesamiento y otros que son pigmentos naturales o colorantes artificiales añadidos (Sanjuan, 2024).

Tabla 6. Principales colorantes de origen alimenticio

Colorante	Descripción
Colorante artificial	Son aditivos sintéticos que se utilizan para dar color a los productos alimenticios. Estos colorantes se producen químicamente en lugar de extraerse de fuentes naturales como vegetales o animales (Sanjuan, 2024).
Colorante natural	Son compuestos químicos derivados de fuentes vegetales (semillas, frutas y hortalizas), insectos (cochinilla y laca), animales (moluscos, caracoles murex, sepias y mariscos), hongos (<i>Blakeslea trispora</i> y <i>Monascus spp.</i>), cianobacterias (<i>Arthrospira spp.</i>), algas o incluso minerales (como arcilla, ocre y malaquita). Se utilizan en la industria alimentaria para proporcionar color a los alimentos de manera segura y atractiva, sin comprometer la salud de los consumidores (Sanjuan, 2024). Su aplicación no solo se limita a la estética, también puede aportar beneficios adicionales como propiedades

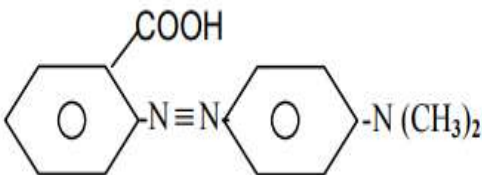
	antioxidantes y antimicrobianas, contribuyendo a la conservación y calidad de los productos alimenticios.
--	---

Fuente: (Sanjuan, 2024).

1.11 Rojo de Metilo

El rojo de metilo (RM) es un compuesto azo que se produce por medio de una reacción de acoplamiento entre el ácido antranílico utilizado como indicador químico en el sector industrial y alimenticio, no obstante, al estar presente en efluentes provoca toxicidad aguda en los seres vivos y la eutrofización de cuerpos de agua. Se recomienda mucho cuidado con este compuesto ya que es nocivo para la salud. En la tabla 7 especifica sus características generales que tiene el RM de acuerdo a análisis establecidos que tiene para su uso (González, 2004).

Tabla 7. Características generales de RM

	Nombre Científico	Ácido dimetilamino-4-Fenilazo-2-benzoico
	Formula molecular	$C_{15}H_{15}N_3O_2$
	Peso molecular	269.31 g/mol.
	Densidad	0.719 g/mL.
	Punto de fusión	175°C.
	Absorbancia máxima	425 nm

Fuente: (González, 2004).

1.11.1 Características de Rojo de Metilo

El Rojo de Metilo tiene diversas características como (Fernández, 2010):

- A diferencia de otros colorantes este presenta la propiedad de detectar ácidos a pH mucho más bajos. Por tanto, detecta ácidos fuertes.
- Es un colorante indicador que se vuelve rojo en soluciones ácidas.
- Indicador utilizado en medios de cultivos bacteriológicos.
- Se utiliza como parte de la identificación a nivel de especie de los bacilos entéricos gramnegativos.

1.11.2 Aplicaciones

El colorante Rojo de Metilo (RM) tiene grandes utilidades en laboratorio y giro industrial lo cual se mencionan a continuación (Fernández, 2010):

- Determinación de pH

El rojo de metilo es un indicador químico que cambia de color según el pH de la solución en la que se encuentra. Es más eficaz entre pH 4.4 y pH 6.2. En soluciones neutras o alcalinas (pH mayor que 6.2), el Rojo de Metilo (RM) es amarillo, mientras que en soluciones ácidas (pH menor que 4.4), se vuelve rojo.

- Detección de ácidos

El Rojo de Metilo (RM) permite determinar la formación de ácidos que se producen durante la fermentación de un carbohidrato.

- Prueba de Rojo de Metilo (RM)

La solución de Rojo de Metilo se utiliza en la prueba RM para identificar la presencia de bacterias.

- Detección de CO₂

Al disolverse el CO₂ en agua se produce ácido carbónico con lo que el pH baja y el color del Rojo de Metilo vira de amarillo a rojo.

1.11.3 Efectos nocivos para la salud humana

Los efectos nocivos a la salud humana por el contacto directo y/o indirecto de este contaminante, los principales efectos son los siguientes:

- Corrosión o irritación cutánea
- Lesiones oculares graves o irritación ocular
- Sensibilización respiratoria o cutánea
- Toxicidad para la reproducción
- Toxicidad específica en determinados órganos
- Peligro por aspiración

1.11.4 Efectos negativos al ambiente

En la tabla 8 se observa los efectos negativos al ambiente de acuerdo a la información ecológica del contaminante (Roth, 2024):

Tabla 8. Información ecológica

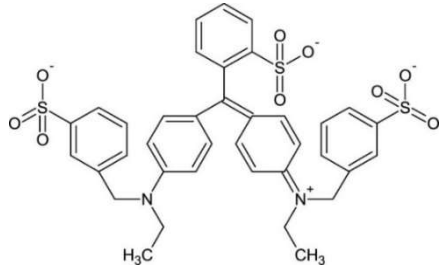
Información ecológica	
Efecto	Descripción
Toxicidad	No se clasificará como peligroso para el medio ambiente acuático.
Procesos de degradación	Demanda Teórica de Oxígeno con nitrificación: 1.996 mg/mg Demanda Teórica de Oxígeno: 1.675 mg/mg Dióxido de Carbono Teórico: 2.266 mg/mg
Potencial de bioacumulación	Se enriquece en organismos insignificadamente
Movilidad en el suelo	No se dispone de datos
En caso de incendio	Forma humos tóxicos de monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno (NOx) y dióxido de carbono (CO ₂)

Fuente: (Roth, 2024).

1.12 Azul Brillante

El colorante Azul Brillante también conocido como Azul 1 es un colorante trifenilmetánico, ampliamente utilizado en la tinción de productos textiles y de cuero, así como en la industria alimentaria en bebidas, en productos lácteos, en polvos, en gelatinas, en dulces, en helados, en jarabes, en extractos y en condimentos (Rojas, 2016). En la tabla 9 especifica sus características generales que tiene el Azul Brillante de acuerdo a análisis establecidos que tiene para su uso (Espinoza, 2021) (Olas, 9 de Julio de 2021).

Tabla 9. Características generales de Azul Brillante

	Nombre científico	Azul FD&C n.º 1, Azul Ácido 9, Erioglaucina y Azul Patente AR.
	Peso molecular	792.85 g/mol
	Punto de fusión	283°C
	Absorbancia máxima	630 nm

Fuente: (Olas, 9 de Julio de 2021)

1.12.1 Aplicaciones

Las principales aplicaciones de Azul Brillante el colorante sintético que ha sido utilizado en el sector industrial de acuerdo en lo siguiente:

Es producido para dos fines en general, grado técnico y grado alimenticio; para fines alimenticios debe contener más del 85% de color activo.

Entre los usos del colorante grado industrial se encuentran para tinción de productos cosméticos y de higiene personal (jabones, shampoo) para tinción de papel, colorante textil y en la industria del cuero, entre otros.

El Azul Brillante grado alimenticio se utiliza como aditivo en la industria de productos lácteos, repostería y de confitería, bebidas gaseosas y medicamentos así como en la elaboración de envases de PET (polietilentereftalato); también es utilizado para producir el color verde en combinación con el amarillo 4 (Markus, 1994).

1.12.2 Efectos nocivos para la salud

El Azul Brillante es un colorante que tiene efectos nocivos a la salud los principales son los siguientes (Olas, 9 de Julio de 2021):

- Toxicidad
- Efectos citotóxicos y genotóxicos
- Irritaciones cutáneas y broncoconstricción

- Enfermedades inflamatorias como la colitis y la enfermedad de Crohn
- Déficit de atención e hiperactividad en niños
- Absorción acumulativa a través de la mucosa lingual y a través de la piel
- Capacidad de inducir reacciones alérgicas en individuos con asma moderada preexistente.

1.11.3 Efectos negativos al ambiente

En países ha tenido alrededor del 90% de aguas residuales que se descargan sin tratamiento a diferentes cuerpos de agua y aproximadamente dos millones de toneladas de residuos industriales son desechados de igual forma en ríos o canales. Dentro de las industrias, las textiles generan una gran cantidad de contaminantes al medio ambiente ya que gran parte de los colorantes que utilizan en sus procesos de teñido son descargados en aguas residuales sin un correcto tratamiento y que ha dañado al medio ambiente en ríos, lagos y canales (Zaruma, 2018).

La industria alimenticia es considerada una de las industrias de mayor impacto sobre el medioambiente, debido a la cantidad de procesos productivos y los subproductos (biomasa residual) que genera. Para todos estos procesos se deben utilizar grandes cantidades de agua de buena calidad, empleada en los procesos de lavado, limpieza y desinfección; actividades que hacen de esta industria una de las de mayor generación de aguas residuales con alta carga de contaminantes orgánicos (Duche, 18 de Febrero 2021). Las aguas residuales derivadas de los diferentes sectores de la industria alimenticia presentan valores significativos de demanda química y biológica de oxígeno, esto es causado por el alto contenido de materia orgánica, sólidos disueltos y suspendidos (incluidos aceites, grasas, grasas), nutrientes como nitrógeno (incluyendo amoníaco), fósforo y minerales. Además, estos vertidos se caracterizan por tener un alto nivel de biodegradabilidad y ausencia de productos químicos tóxicos, lo que las distinguen de las aguas residuales.

1.13 Estudio del arte

De acuerdo a las condiciones que se han tenido respecto a contaminantes en el agua en la tabla 10 muestra diversos autores que han hecho investigación respecto a Procesos de Oxidación Avanzada que ha llevado a un eficiente proceso de degradación del agua contaminada por diversos agentes contaminantes lo cual se muestra a continuación:

Tabla 10. Estudios relacionados a la degradación con Procesos de Oxidación Avanzada

Proceso	Características	Condiciones de operación y resultado	Consideraciones	Referencia
Tratamiento de aguas residuales textiles por el método Fenton.	Efluente de los procesos de lavado y tintado de una fábrica textil DQO=1720 mg $O_2 L^{-1}$ surfactantes aniónicos=9,8 mg L^{-1} .	Reducciones del 86% de la DQO con 3,6 mmol L^{-1} de Fe^{2+} y 0,466 mol L^{-1} de H_2O_2 .	El autor sugiere la utilización del reactivo Fenton como un pretratamiento a una oxidación biológica.	(Kos, Enero de 2010).
Degradación de un biocida textil comercial con Procesos de Oxidación Avanzada : Ozono (O_3), UV y Peróxido de hidrógeno (H_2O_2).	Efluente de una industria textil que incluye tintas, elementos biocidas (clorofenoles) Experimentos realizados a 200 y 1500 mg L^{-1} de DQO.	Lámpara de baja presión de 40W, radiación de $1,6 \cdot 10^{-5}$ Einstein $L^{-1} S^{-1}$ y radio efectivo de 4,31 cm. En 120 minutos se elimina el 55% de la DQO inicial (985 mg L^{-1}) con 2380 mg	Mejora significativa de la biodegradabilidad ($DBO_5/DQO = 0.34$) con respecto a las muestras sin oxidar ($DBO_5/DQO = 0.18$) con la aplicación de 120 minutos de UV / H_2O_2	(Alaton, Febrero de 2007).

		L^{-1} de H_2O_2 (70 mM)	y 70 mM de peróxido.	
Tratamiento a aguas residuales utilizando los Procesos de Oxidación Avanzada: Ozono (O_3).	La eliminación de sulfuros utilizando el ozono es muy eficiente para un pH alcalino siendo muy efectivo para tratar aguas de industrias de origen textil.	En un determinado tiempo de 3 horas, tuvo la remoción de contaminantes un 77.78%, asimismo en este estudio se evaluó la cinética y la disminución de pH, formándose H_2SO_4 (ácido sulfúrico), concluyendo que la eliminación de sulfuros utilizando el ozono es muy eficiente para un pH alcalino.	Los procesos de oxidación avanzada son altamente eficiente y reconocidos por su gran facilidad para degradar compuestos orgánicos, como en este caso al agente oxidante el ozono, altamente eficiente para la purificación del agua contaminada.	(Umbarila, Abril de 2019).
Tratamiento de degradación de contaminantes por Proceso de Oxidación Avanzada : Peróxido de hidrógeno (H_2O_2) y Ozono (O_3).	Efluentes con cianuro que provienen de una industria minera.	La eliminación de cianuro fue dividida en 3 etapas las cuales fueron: pretratamiento con 2 tanques de estabilización de pH, 2 clarificadores primarios, también el tratamiento químico, donde se incluyen reactores.	Se ha demostrado que los agentes oxidantes como H_2O_2 y O_3 son altamente eficientes para la degradación de contaminantes, tratando de una manera completa los efluentes contaminados.	(Valenzuela, 28 de Septiembre de 2018).

Determinación del nivel de degradación y la decoloración de tintes con los Procesos de Oxidación Avanzada : Peróxido de hidrogeno (H_2O_2) y Ozono (O_3).	Tinte de teñido de sector textil.	Usando energía fotofenton en función al pH y su temperatura con los oxidantes H_2O_2 y O_3 , obteniendo buenos resultados de remoción de DQO reduciéndola un 75.68% y regulando su pH, asimismo, un rendimiento de remoción eficiente para la remoción de la decoloración de tinte textil en un 95.44%.	La mezcla del peróxido de hidrogeno y el ozono son eficientes agentes oxidantes con altas capacidades de remover DQO además de tener la capacidad de regular el pH, altamente eficientes en aguas textiles.	(Delgado, 24 de Enero 2017).
Degradación y decoloración de agua contaminada con colorantes textiles mediante Procesos de Oxidación Avanzada: Peróxido de hidrogeno (H_2O_2).	Efluente de agua contaminada con colorante textil.	Se analizó el efecto de la concentración inicial del colorante, el pH de la solución, la concentración de hierro y la concentración de peróxido de hidrógeno mediante un diseño estadístico de experimentos.	Bajo las condiciones se obtuvieron porcentajes de reducción promedio de 65.5% en la DQO y de 77.0% en la decoloración del tinte luego de una hora de tratamiento.	(Duran, Mayo de 2014).
		Un reactor electroquímico discontinuo de vidrio	Remoción superior al 91% en metales	

Depuración refractaria de contaminantes de un efluente de la industria textil por Oxidación Electroquímica.	Efluente de la industria textil por oxidación Electroquímica.	transparente refractario con un tanque en forma de cilíndrica. La oxidación electroquímica se desarrolló con el arreglo de electrodos de hierro: 2 serie, 2 paralelo y la separación entre electrodos de 12 mm.	como: cromo hexavalente, hierro y cobalto, reducción del 71.04% de DQO, 94.9% de color y 77.5% de sólidos suspendidos totales (SST).	(Garay, Octubre de 2022).
Decoloración de efluentes textiles que contienen colorantes reactivos mediante el método de Electro-Oxidación con electrodos de titanio	Efluentes reales y simulados provenientes de los procesos de teñido del algodón con colorantes reactivos.	Se utilizaron dos tipos de reactores, de un compartimiento y compartimiento doble separado con membrana de intercambio. El seguimiento del contenido de colorante y cloro mediante espectrofotometría UV-visible.	El efluente simulado a la concentración de 300 mg/L de colorante rojo, siendo el reactor de dos compartimientos más eficiente con 95.9% de decoloración. En las pruebas piloto se logró decolorar 99.1% al efluente real.	(Cárdenas, 30 de Marzo de 2023).
La Tartrazina, un colorante de la industria	Colorante Tartrazina empleando	Se utilizaron una lámpara de luz ultravioleta, un	Remoción 100% del colorante Tartrazina para la combinación	

agroalimentaria, degradado mediante Procesos de Oxidación Avanzada: UV, Peróxido de hidrogeno (H_2O_2).	fotocatálisis heterogénea con dióxido de titanio y lámpara de luz ultravioleta.	reservorio de vidrio para el almacenamiento del colorante Tartrazina en solución acuosa para someterlo a tratamiento y una bomba que permitía la recirculación de la solución por el sistema de fotorreactor.	de oxidación química mediante agente oxidante peróxido de hidrógeno, además de la combinación experimental del proceso fotoquímico de la fotocatalisis heterogénea	(Rojas, 2008).
Nuevos sistemas electroquímicos y fotoquímicos para el tratamiento de aguas residuales y de bebida.	Aguas residuales que contienen 5-amino-6-metil-2-benzimidazolón (AMBI), el cual es un importante intermediario en la producción industrial de ciertos colorantes.	Los experimentos electroquímicos se realizaron en celdas electrolíticas de 150 mL con un ánodo de Pt de 2.1 cm^2 y un alambre en espiral de zirconio como cátodo.	El tratamiento electroquímico cedió su lugar a un tratamiento biológico en el cual el 100% de la mineralización se obtuvo al cabo de 4 horas adicionales por medio de un reactor a biomasa fija.	(Sarria, 2005).
Degradación del colorante azoico rojo reactivo 120 en soluciones acuosas utilizando sistemas de hierro homogéneos/heterogéneos	El colorante rojo reactivo 120 (RR-120) se consideró para la degradación utilizando procesos homogéneos (Fenton	Se llevó a cabo mediante procesos homogéneos (Fenton y foto-Fenton) y heterogéneos (suspensión de oxihidróxidos y	El grado de oxidación de RR-120 se midió mediante la demanda química de oxígeno (DQO) con porcentajes del	(Sánchez, Abril de 2012).

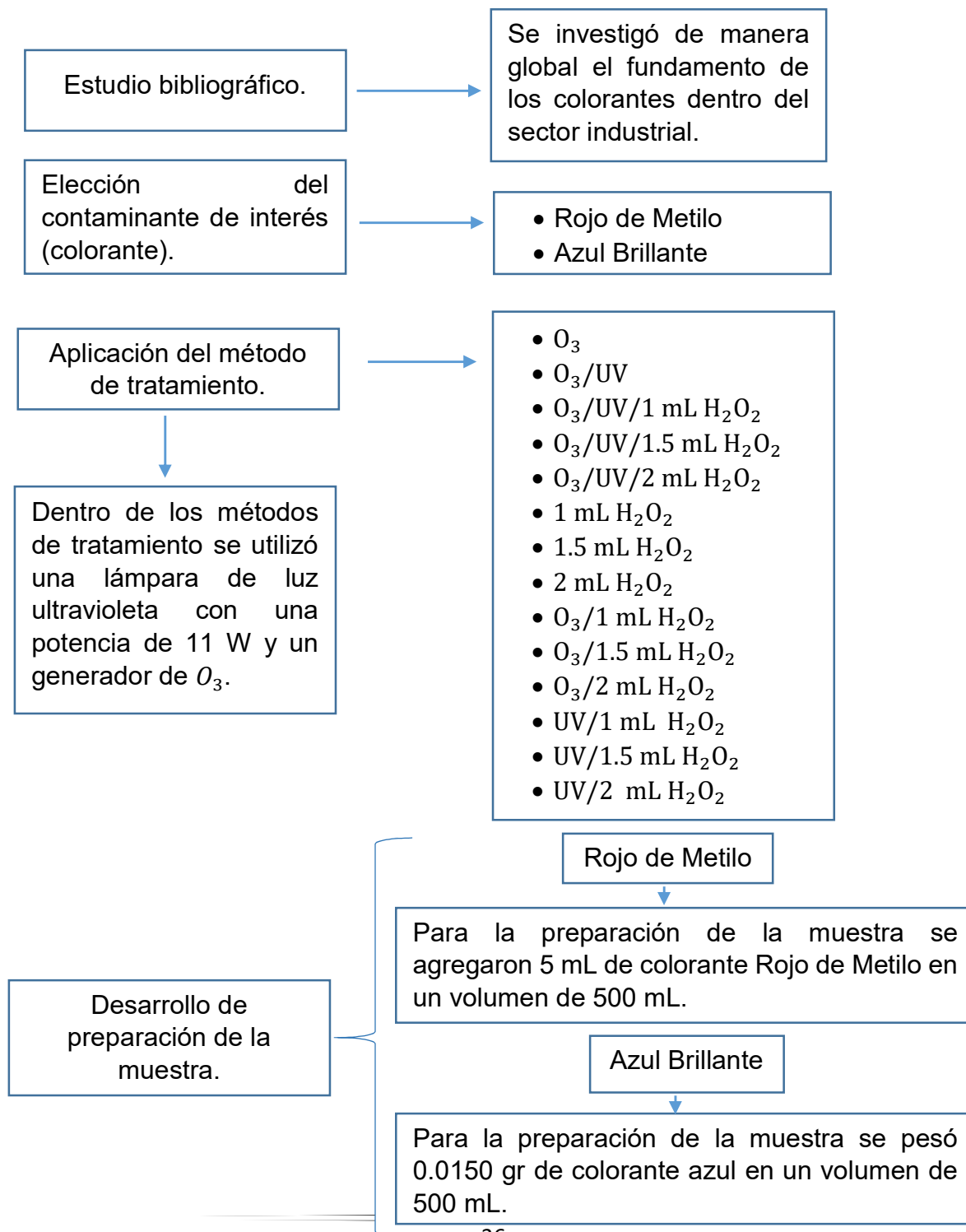
	y foto-Fenton) y heterogéneos	oxihidróxidos soportados en sílice mesoporosa SBA-15), utilizando un reactor discontinuo (volumen total de 500 mL) con agitación constante mediante una barra de agitación magnética.	90 % mediante el proceso foto-Fenton.	
--	-------------------------------	---	---------------------------------------	--

CAPITULO II

Desarrollo Experimental

2.1 Descripción general del desarrollo experimental

En la figura 3 se describe de forma general el procedimiento utilizado para la degradación de los colorantes utilizados.



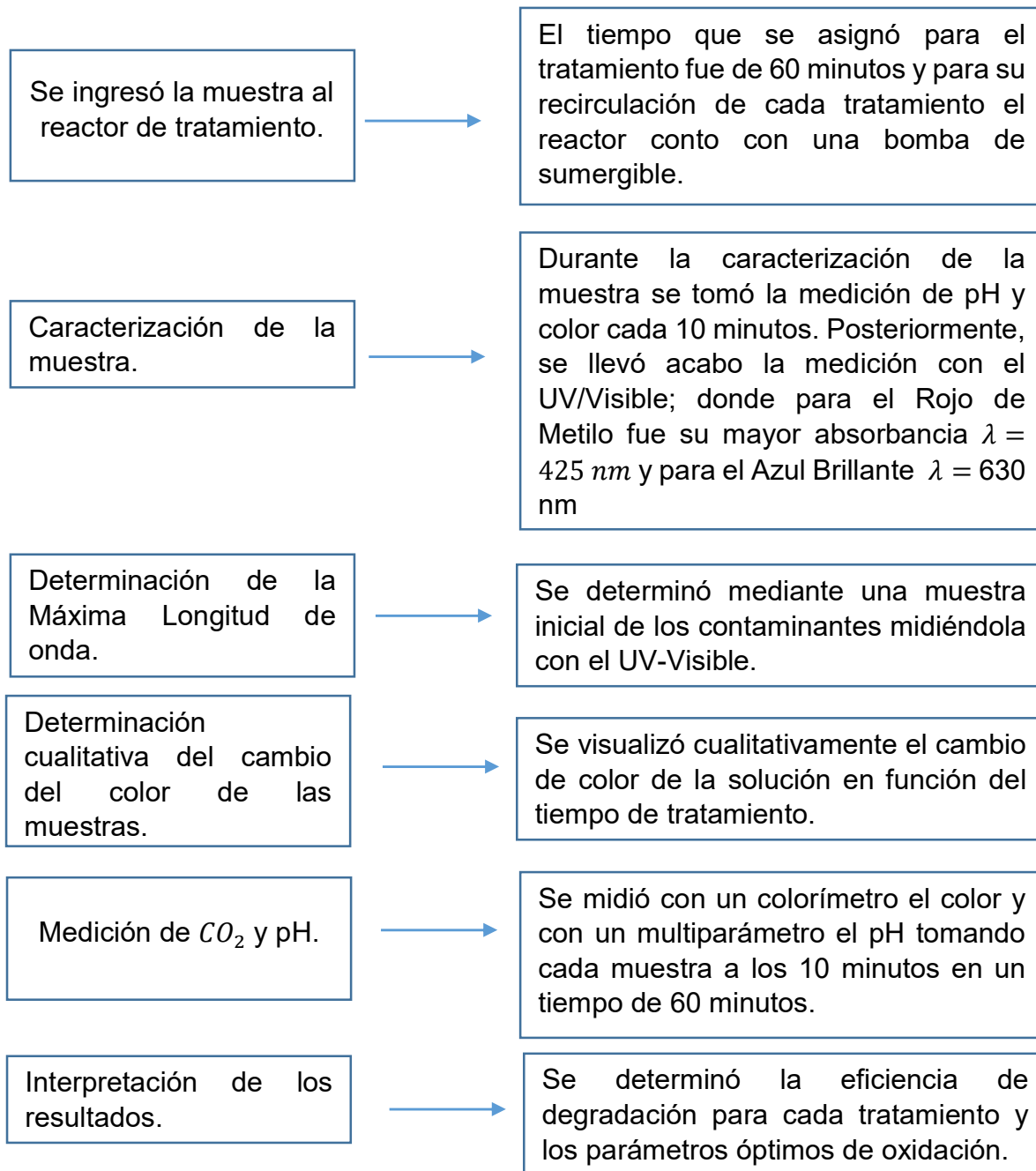


Figura 3. Descripción global del desarrollo experimental. Fuente: (Creación propia).

En el desarrollo experimental se aplicaron diversos Procesos de Oxidación Avanzada en el cual se midieron en cierto tiempo establecido parámetros como el pH, color, concentración de los agentes oxidantes en degradación de colorante de sector industrial.

2.2 Preparación de la muestra sintética

Se realizó la preparación de la mezcla con los contaminantes de estudio lo cual se efectuó como se describe a continuación:

- Para la preparación de la muestra de Rojo de Metilo se agregaron 5 *mL* del colorante en un volumen de 500 *mL*.
- Para la preparación de la muestra del colorante Azul Brillante se pesó 0.0150 gr en un volumen de 500 *mL*.

2.3 Dispositivo Experimental

El dispositivo experimental que se utilizó para los diferentes tratamientos se observa en la figura 4, la cual está constituida por:

- 1) Un reactor de configuración cilíndrica de acero inoxidable de 30 cm de longitud y un diámetro de 5 cm de recirculación, en la parte central se encuentra una lámpara ultravioleta que emiten a 254 nm la lámpara fue utilizada en algunos experimentos que tuvieron gran eficiencia, la solución es recolectada e impulsada en un depósito con una bomba sumergible.
- 2) Para la producción del ozono se utilizó un generador comercial modelo GL-3189^a que utiliza aire atmosférico inyectado con una piedra difusora para garantizar los procesos químicos deseables y suministrado en el depósito.
- 3) La solución es ingresada en el depósito de la solución donde va a ser impulsada para la parte superior del reactor lo cual se recirculada con ayuda de una bomba sumergible.
- 4) El espectrofotómetro UV – Visible principalmente se calibra con una muestra cero y así pueda medir la máxima longitud de onda que tiene el contaminante durante el tratamiento y se determine la degradación y su cambio de color durante cada 10 minutos, en la muestra se medía el pH cada 10 minutos durante 60 minutos
- 5) Un medidor multiparámetros que ayudo a diferenciar el pH que tenía la muestra conforme el tiempo de tratamiento.
- 6) Colorímetro de Hanna Instruments que se encargó de medir el color del contaminante.
- 7) Kit de prueba de CO₂ de Hanna Instruments utiliza el método volumétrico de titulación para determinar el CO₂

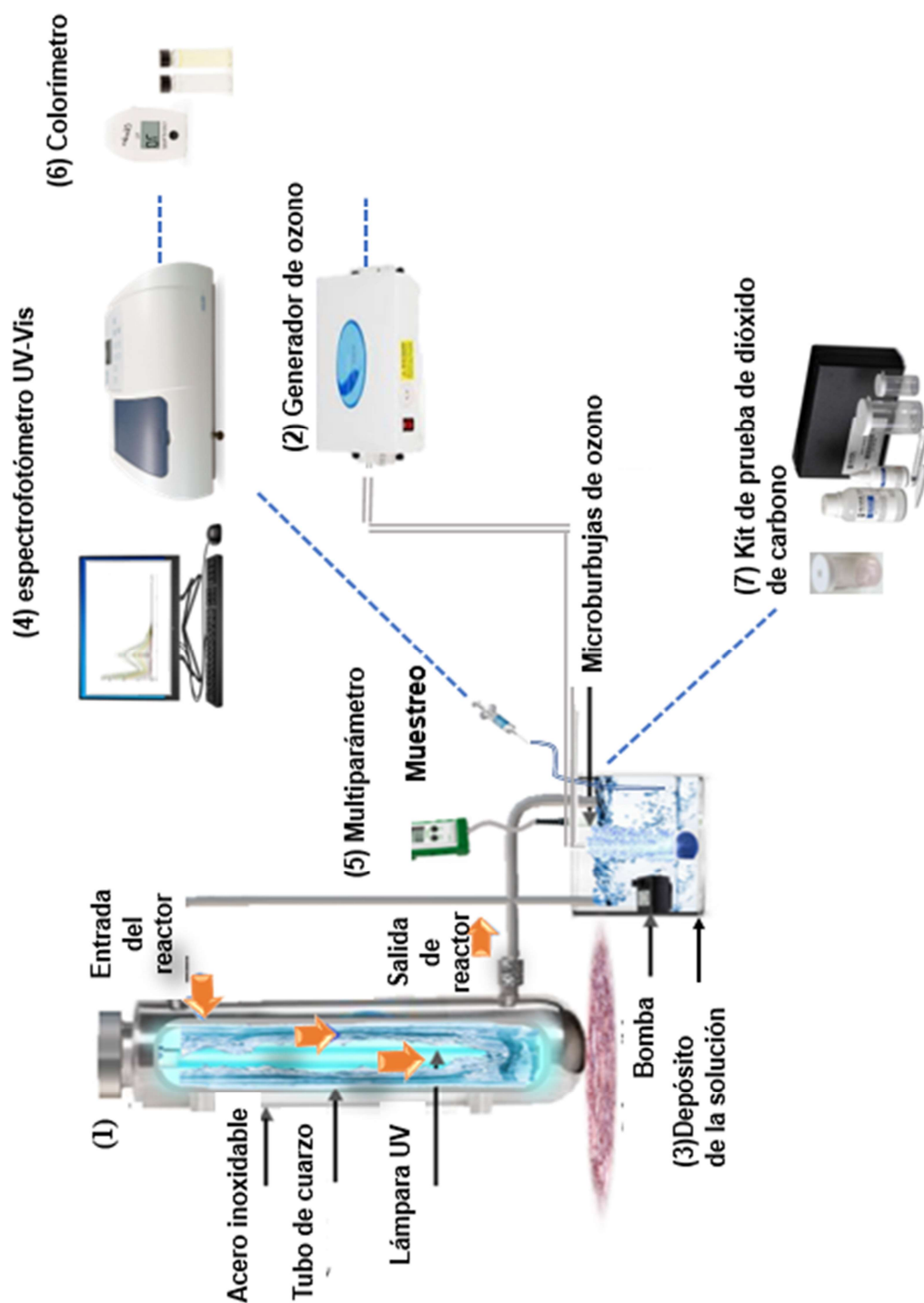


Figura 4. Dispositivo experimental.

2.4 Selección del método de tratamiento

Fueron utilizados diferentes Procesos de Oxidación Avanzada para el tratamiento de los colorantes de estudio, en la tabla 11 y 12 se muestran los métodos aplicados.

Tabla 11. Prueba de experimentación para el Rojo de Metilo (RM)

Método	Tiempo de tratamiento (minutos)					
	10	20	30	40	50	60
O₃	X	X	X	X	X	X
O₃/ UV	X	X	X	X	X	X
O₃/UV/1 mL H₂O₂	X	X	X	X	X	X
O₃/UV/1.5 mL H₂O₂	X	X	X	X	X	X
O₃/UV/2 mL H₂O₂	X	X	X	X	X	X
1 mL H₂O₂	X	X	X	X	X	X
1.5 mL H₂O₂	X	X	X	X	X	X
2 mL H₂O₂	X	X	X	X	X	X
O₃/1 mL H₂O₂	X	X	X	X	X	X
O₃/1.5 mL H₂O₂	X	X	X	X	X	X
O₃/2 mL H₂O₂	X	X	X	X	X	X
UV /1 mL H₂O₂	X	X	X	X	X	X
UV /1.5 mL H₂O₂	X	X	X	X	X	X
UV /2 mL H₂O₂	X	X	X	X	X	X

Fuente: (Creación propia).

Tabla 12. Prueba de experimentación para el Azul Brillante

Método	Tiempo de tratamiento (minutos)					
	10	20	30	40	50	60
O₃	X	X	X	X	X	X
O₃/UV	X	X	X	X	X	X
O₃/UV/1 mL H₂O₂	X	X	X	X	X	X
O₃/UV/1.5 mL H₂O₂	X	X	X	X	X	X
O₃/UV/2 mL H₂O₂	X	X	X	X	X	X
1 mL H₂O₂	X	X	X	X	X	X
1.5 mL H₂O₂	X	X	X	X	X	X
2 mL H₂O₂	X	X	X	X	X	X
O₃/1 mL H₂O₂	X	X	X	X	X	X
O₃/1.5 mL H₂O₂	X	X	X	X	X	X
O₃/2 mL H₂O₂	X	X	X	X	X	X
UV /1 mL H₂O₂	X	X	X	X	X	X
UV /1.5 mL H₂O₂	X	X	X	X	X	X
UV /2 mL H₂O₂	X	X	X	X	X	X

Fuente: (Creación propia).

2.5 Metodología

La metodología se basó principalmente en las selecciones de Procesos de Oxidación Avanzada se evaluaron diferentes métodos para eliminar el contaminante de una muestra. Se utilizaron tratamientos con ozono, radiación ultravioleta y Peróxido de hidrógeno en sistemas simples y combinados.

Posteriormente, se hicieron las muestras sintéticas de cada contaminante teniendo un volumen de 500 mL y una concentración inicial dado que en el Rojo de Metilo se agregaron 5 mL y para la preparación de la muestra del colorante Azul Brillante se pesó 0.0150 gr. Se aplicó cada uno de los Procesos de Oxidación Avanzada con un tiempo determinado de 60 minutos, durante el tiempo se midió el color mediante el colorímetro y el pH multiparamétrico. Respectivamente se midió cada 10 minutos la muestra donde fue ingresada al UV- visible midiendo la absorbancia que tenía el contaminante respecto al tiempo de tratamiento.

Los resultados obtenidos se muestran en el siguiente capítulo. A continuación, se explicarán los métodos que se aplicaron en el tratamiento.

2.5.1 Degradación con ozono (O_3)

La degradación con ozono se llevó a cabo con un generador comercial modelo GL-3189^a que emplea aire atmosférico (todo el tratamiento) el ozono se inyecta por medio de una piedra difusora para que se tuviera más contacto con el contaminante de estudio.

2.5.2 Degradación con O_3 /UV

Durante este proceso consistió en una lámpara de luz ultravioleta que emite a 254nm, donde la lámpara fue cubierta con un tubo de acero inoxidable cilíndrico con 30 cm de longitud y un diámetro de 5 cm de recirculación y ozono (todo el proceso) que estuvo en contacto con la piedra difusora al contaminante.

2.5.3 Degradación con O_3 /UV / H_2O_2

Se adicionó peróxido de hidrógeno H_2O_2 al 30% purificado se vertió directamente en el reactor de tratamiento al iniciar el tiempo de tratamiento. Fueron tres experimentaciones en las que se le adiciona H_2O_2 en diferentes concentraciones iniciales (1mL, 1.5 mL y 2.0 mL).

2.5.4 Degradación con H_2O_2

Teniendo diferentes concentraciones iniciales de peróxido de hidrogeno H_2O_2 al 30% purificado (H_2O_2) fue adicionado al reactor de tratamiento lo cual al iniciar el tratamiento fue efectuado durante el tiempo tratamiento con el contaminante seleccionado.

2.6 Análisis de los parámetros experimentales

La medición de los parámetros en Oxidación Avanzada es fundamental para evaluar la eficiencia de estos tratamientos y garantizar la calidad del agua. Estos procesos utilizan agentes oxidantes muy potentes para descomponer contaminantes. Al medir parámetros es posible optimizar las condiciones de operación y asegurar el tratamiento sea efectivo y seguro. Los parámetros experimentales se describen a continuación.

2.6.1 Determinación de la Máxima longitud onda

Se realizó un barrido utilizando un espectrofotómetro UV-visible para determinar la máxima longitud de onda, la cual es característica para cada contaminante, preparando una solución patrón y realizando una medición de 190 nm a 1000 nm, estableciendo el pico máximo.

En la figura 5 y 6 se observan los espectros obtenidos, determinando la máxima longitud de onda para el Rojo de Metilo en $\lambda = 425$ nm y para Azul Brillante en $\lambda = 630$ nm.

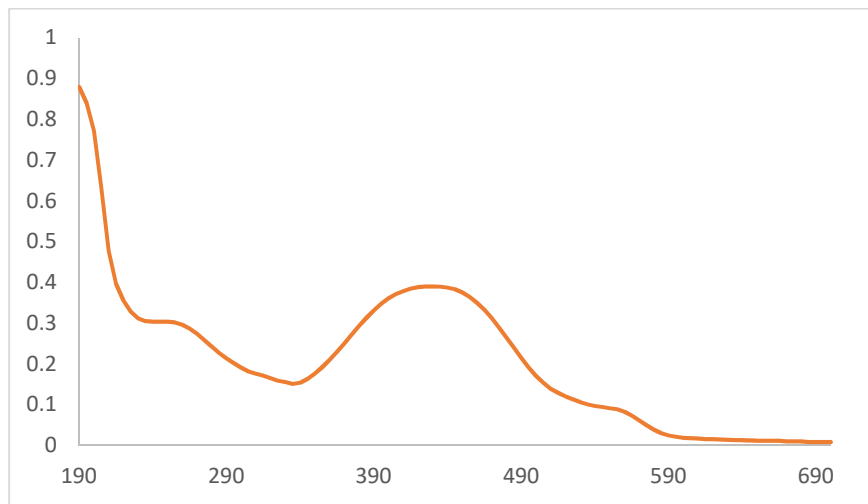


Figura 5. Máxima longitud de onda de Rojo de Metilo. Fuente: (Creación propia).

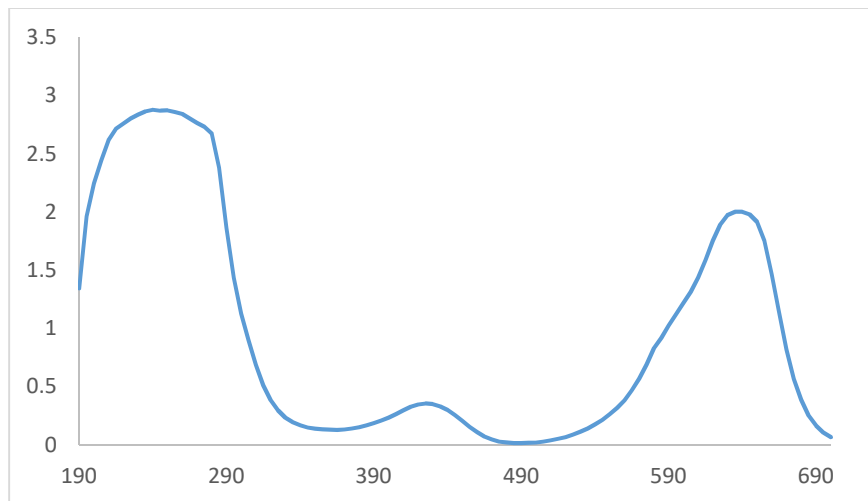


Figura 6. Máxima longitud de onda de Azul Brillante. Fuente: (Creación propia).

2.6.2 Medición de pH

Para evaluar el seguimiento de pH en función del tiempo y para los distintos tratamientos realizados, se emplearon mediciones continuas cada 10 minutos con un equipo multiparamétrico (figura 7). Este procedimiento permitió identificar diferencias significativas en el valor del pH a lo largo del tiempo.



Figura 7. Determinación de pH. Fuente: (Creación propia).

2.6.3 Medición de color

La determinación del color se llevó a cabo mediante el colorímetro (figura 8). Para garantizar la precisión de las mediciones, el equipo se calibro utilizando una muestra de referencia con un valor de color conocido (blanco). Posteriormente, se adicionaron 10 ml de la muestra del contaminante para su medición y se procedió a registrar sus respectivas lecturas de color.



a) Instrumento de medición



b) Blanco y líquido residual

Figura 8. Determinación de color. Fuente: (Creación propia).

2.6.4 Medición del CO_2

Al finalizar el proceso para cada uno de los métodos de tratamiento, se determinó la generación de CO_2 , para lo cual fue utilizado un kit de Hanna Instruments utilizando un método volumétrico de titulación, en donde fueron adicionados 5 mL en vaso de precipitados, posteriormente se adicionó el indicador para finalmente realizar la titulación.

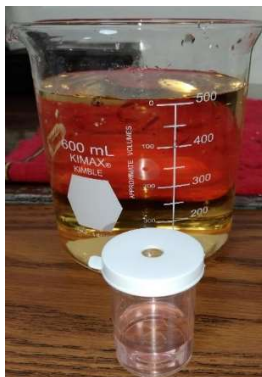


Figura 9. Medición del CO_2 . Fuente: (Creación propia).

2.6.5 Análisis de subproductos

El análisis de subproductos se evalúa la capacidad de cada Proceso de Oxidación Avanzada, el proceso más eficiente el que logra la mayor degradación se selecciona para el análisis de subproductos.

Principalmente se hizo un análisis para saber la eficiencia del contaminante lo cual para el Rojo de Metilo y Azul Brillante el Proceso de Oxidación Avanzada más eficiente fue $\text{O}_3/1\text{mLH}_2\text{O}_2$ teniendo un tratamiento de 60 minutos para cada contaminante. Posteriormente la solución sintética tratada fue colocada en un cartucho de extracción sólido – sólido TC18 donde lo cual se activó con 3 mL de metano así mismo tuvo un soporte universal (figura 10) para que tuviera una firmeza de extracción la solución.



Figura 10. Representación de soporte de la solución. Fuente: (Creación propia).

Durante el lapso de la extracción los subproductos fueron colocados en celdas de vidrio (figura 11) para poder así medir su absorbancia que aún tiene la solución con el contaminante después de una extracción.

a) Subproductos Rojo de Metilo



b) Subproductos Azul Brillante

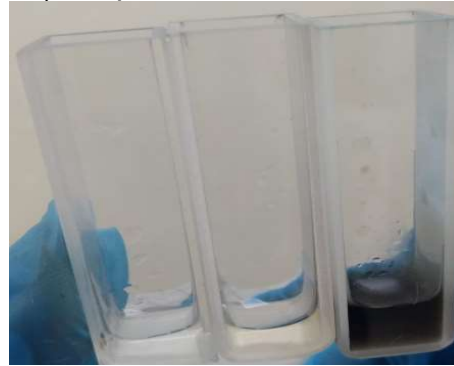


Figura 11. Subproductos de contaminantes. Fuente: (Creación propia).

2.6.6 Determinación de energía

La energía consumida E_{EO} es la necesaria para degradar los contaminantes por orden de magnitud de en una unidad de volumen, la cual fue obtenida mediante la ecuación 1 (Jaramillo, 2019):

$$E_{EO} = \frac{P_{elec} \times t \times 1000}{V \times 60 \times \log(C_0/C_t)}$$

Ecuación 1

Dónde: P_{elec} potencia aplicada en el Sistema [kW], es importante mencionar que, dependiendo del método de tratamiento, esta varia, t es el tiempo de tratamiento [min], V es el volumen [L], C_0 representa la concentración inicial C_t es la concentración en un tiempo t , 1000 and 60 son factores de conversión.

Es importante mencionar que la determinación de la energía se efectuó a los 60 minutos de tratamiento y considerando la potencia consumida de los diversos instrumentos utilizados en el desarrollo experimental, es decir, 11 W para la lámpara ultravioleta, 12 W para el generador de ozono y 4 W para la bomba sumergible.

CAPITULO III

Resultados y discusiones

3.1 Descripción general de resultados

Se presentan los resultados obtenidos de acuerdo a los Procesos de Oxidación Avanzada que se aplicó en los contaminantes de sector industrial, se describen los resultados de Rojo de Metilo y Azul Brillante. Los datos obtenidos de los métodos para la eliminación del colorante tuvieron una eficiencia en un estándar de 80 % - 99 % dado que cada efecto varía dependiendo al tiempo de tratamiento que se aplicó; ya que procesos que tuvieron combinación con H_2O_2 (peróxido de hidrogeno) en el contaminante Rojo de Metilo en un tiempo inicial su eficiencia está arriba de un 90% de degradación . Así mismo para el contaminante Azul Brillante su mayor eficiencia de degradación la tuvo en procesos de combinaciones con O_3 /UV/ H_2O_2 . En los contaminantes se analizó el efecto del pH , el tiempo de tratamiento y cualitativamente se analizó el cambio de coloración en función al tiempo.

3.2 Degradación de Rojo de Metilo

3.2.1 Efecto de O_3 y O_3 /UV

En la figura 12, se observa los resultados obtenidos de la degradación del Rojo de Metilo al aplicar O_3 y O_3 /UV. Al utilizar la combinación de procesos en este caso se observa un efecto positivo en la eficiencia respecto al tiempo de tratamiento , logrando eficiencias de degradación de hasta 50% , 80 % y 98 % mediante la aplicación de O_3 y O_3 /UV.

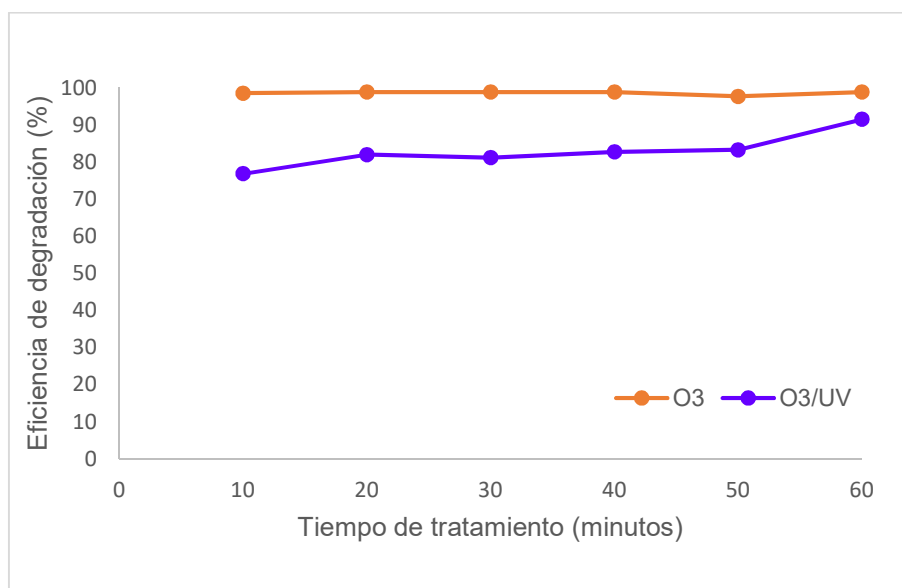


Figura 12. Resultados de degradación de Rojo de Metilo por O_3 y O_3/UV . Fuente: (Creación propia).

En la tabla 13, se observan los resultados cualitativos y cuantitativos obtenidos durante el tratamiento fueron eficaces ya que se llevó a cabo continuamente un análisis cualitativo donde se observa la degradación referente al tiempo, la medición de color para el tratamiento de O_3 en el tiempo inicial mostró una medición de 245 respectivamente conforme se fue decolorando la medición disminuyó lo cual a los 40 minutos mostró una medición de 5 finalmente a los 50 minutos y 60 minutos llegando a una medición de 0. Sin embargo en el tratamiento de O_3/UV su medición inicial fue de 500 respectivamente al tiempo de tratamiento tuvo una decoloración lenta llegando a los 60 minutos con una medición de 120. Su pH en los tratamientos permanecieron constantes donde O_3 su pH inicial fue de 10.29 a 10.01 en su tiempo final y para O_3/UV su pH inicial fue de 6.62 lo cual si hubo una diferencia teniendo 3.50 a los 60 minutos del tratamiento.

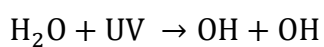
Tabla 13. Método de tratamiento por O_3 y O_3/UV

Método	Tiempo de tratamiento (minutos).						
	0	10	20	30	40	50	60
Análisis Cualitativo							
O_3							
	Medición de color UPC						
	245	25	20	20	5	0	0

O₃/UV	Medición de pH						
	10.29	10.22	10.17	10.15	10.14	10.02	10.01
	Eficiencia						
	0%	98.57%	98.87%	98.90%	98.87%	97.72%	98.89%
	Análisis Cualitativo						
							
	Medición de color UPC						
	500	465	385	285	245	155	120
	Medición de pH						
	6.62	4.94	4.37	4.03	3.77	3.61	3.50
	Eficiencia						
	0%	76.92%	82.02%	81.23%	82.75%	83.34%	91.54%

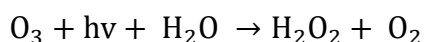
Fuente: (Creación propia).

Los mecanismos cinéticos tienen la finalidad de generar radicales (OH) que se generan dentro del agua el cual ha sido producto de descomposición reactiva que genera fuertes propiedades oxidantes lo cual al estar al contacto con el contaminante puede lograr su degradación o mineralización. Para el caso particular de radiación UV la energía que es transmitida puede mineralizar al contaminante mediante una ruptura de enlaces presentes en los contaminantes. La generación de radicales (OH) es debida al fotólisis que tiene el agua (reacción 1) (Jaramillo, 2019). El efecto de eficiencia fue observado en los resultados obtenidos al tener variables de eficiencias de hasta 90% en 60 minutos de tratamiento.



Reacción 1

En la tabla 13, se observa el efecto de usar O₃ lo cual existe comparación al utilizar radiación ultravioleta se observa que el tratamiento es más lento a comparación con O₃ ya que el ozono en un tiempo inicial tuvo una eficiencia arriba de 90% y con radiación UV su eficiencia inicial es arriba del 50% lo que el beneficio de esta combinación se generan más radicales (OH) mediante la reacción química (reacción 2) (Jaramillo, 2019).



Reacción 2

3.2.2 Efecto de O_3 / UV / H_2O_2

Se efectuó el tratamiento utilizando O_3 / UV / H_2O_2 , considerando que se aplicó diferentes concentraciones inicialmente de peróxido de hidrógeno (1mL , 1.5mL y 2mL).En un tiempo inicial de tratamiento en cada concentración de peróxido de hidrógeno se observa un efecto significativo comparando las curvas las eficiencia fue incrementada en cada proceso (figura 14) llegando a los 60 minutos con una eficiencia de 98.82% O_3 / UV / 1 mL H_2O_2 , 98.82% O_3 / UV / 1.5 mL H_2O_2 y 99.03% O_3 / UV / 2 mL H_2O_2 .

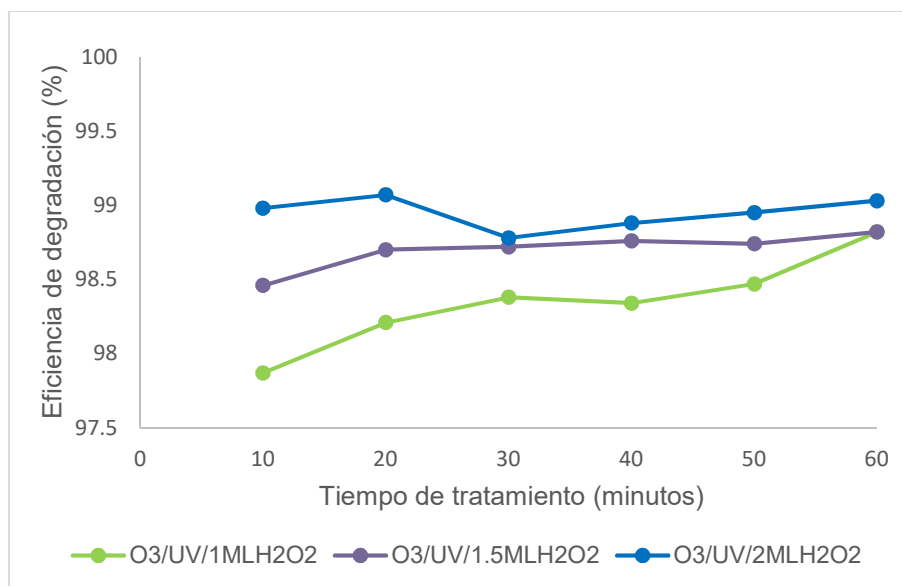


Figura 13.Resultados de degradación de Rojo de Metilo por O_3 /UV/ H_2O_2 . Fuente: (Creación propia).

En la siguiente tabla 14 , se observa que en cada tratamiento la medición de color lo cual en el tratamiento de O_3 /UV/ 1 mL H_2O_2 su medición al iniciar fue de 190 dado que iba pasando el tiempo a los 30 minutos se vio una diferencia de color teniendo 90 y respectivamente al tiempo final logrando una degradación de 0. Su pH fue variando en efecto del tratamiento teniendo un pH inicial de 6.09 y un pH final de 3.75. Respectivamente en el tratamiento O_3 /UV/ 1.5 mL H_2O_2 se observa una gran eficiencia de medición de color ya que inicialmente su color fue de 160 después a los 20 minutos su medición de color fue 5 hasta llegar a los 40 minutos con una medición de 0 respectivamente hasta los 60 minutos.

El pH inicial para este tratamiento fue de 5.10, cambiando a los 30 minutos significativamente a 3.87 posteriormente llegando a un pH final de 3.61. Finalmente para el tratamiento de O_3 /UV/ 2 mL H_2O_2 con respecto a la medición de color

inicialmente el Rojo de Metilo tuvo 100 durante el tratamiento mostro un efecto de degradación a los 10 minutos con una medición de 10 , respectivamente a los 20 minutos una medición de 5 y finalmente a los 40 minutos perdiendo su color a 0. Tuvo un pH inicial de 4.51 su pH fue cambiando llegando a un pH final de 3.63. Por otra parte, cada tratamiento tuvo un análisis cualitativo donde se observa cada 10 minutos su cambio de color.

Tabla 14.Método de tratamiento por $O_3 / UV/H_2O_2$

Método	Tiempo de tratamiento (minutos).						
	0	10	20	30	40	50	60
O_3 / UV / 1 mL H_2O_2	Análisis Cualitativo						
							
	Medición de color UPC						
	190	120	100	90	0	0	0
	Medición de pH						
	6.09	4.64	4.26	4.09	3.91	3.82	3.75
O_3 / UV / 1.5 mL H_2O_2	Eficiencia						
	0%	97.87%	98.21%	98.38%	98.34%	98.47%	98.82%
	Análisis Cualitativo						
							
	Medición de color UPC						
	160	35	5	5	0	0	0
	Medición de pH						
	5.10	4.17	4.01	3.87	3.76	3.66	3.61
	Eficiencia						
	0%	98.46%	98.70%	98.72%	98.76%	98.74%	98.82%

O₃ / UV / 2 mL H₂O₂	Análisis Cualitativo						
							
	Medición de color UPC						
	100	10	5	5	0	0	0
	Medición de pH						
	4.51	4.20	4.03	3.88	3.79	3.69	3.63
	Eficiencia						
	0%	98.98%	99.07%	98.78%	98.88%	98.95%	99.03%

Fuente: (Creación propia).

3.2.3 Efecto H₂O₂

En la figura 14, se observan la obtención de resultados variando las concentraciones de H₂O₂ adicionando 1mL , 1.5mL y 2mL. En todos los casos se observan diferentes incrementos que tuvo de degradación el contaminante respecto al tratamiento.

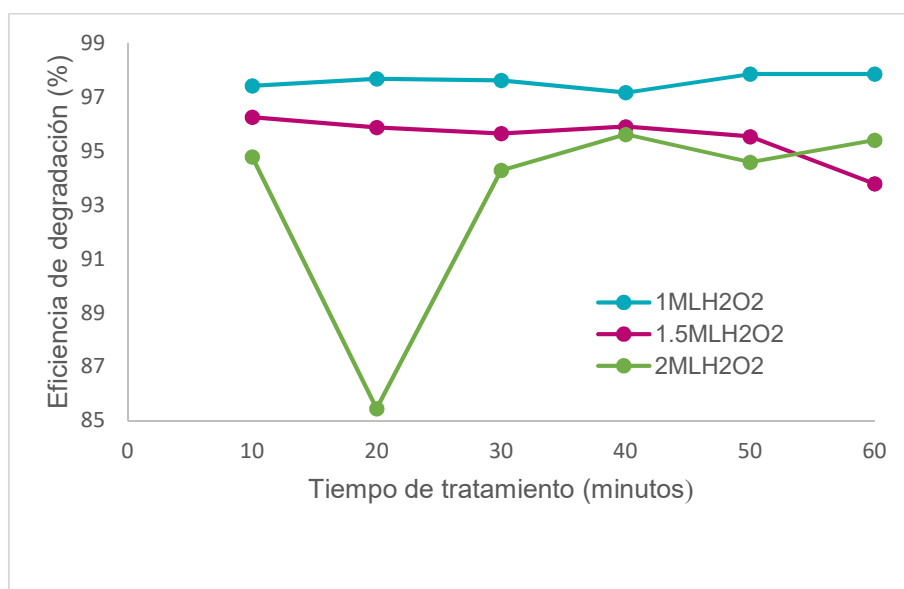
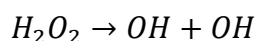


Figura 14. Resultados de degradación de Rojo de Metilo por H₂O₂. Fuente: (Creación propia).

En la tabla 15, se observa la eficiencia de degradación de 94% - 97%, cuando fue el tratamiento de 1 mL H_2O_2 su máxima degradación fue de 97.86% , 1.5 mL H_2O_2 su eficiencia en los 60 minutos de tratamiento fue de 93.79% y en 2 mL H_2O_2 su máxima degradación a los 60 minutos fue de 95.41% mediante la degradación se logra mediante a la colisión de los radicales OH los cuales son generados principalmente mediante la reacción 3 (Jaramillo, 2019). Teniendo una continua medición de color para cada tratamiento, para el tratamiento de 1mL H_2O_2 en el tiempo inicial midio 260 mostrando una decoloración significativa a los 40 minutos de 160 respectivamente a los 20 minutos una medición de 20 llegando finalmente a 15 de medición de color.

El tratamiento 1.5 mL H_2O_2 en el tiempo inicial mostró una medición de 310 , a los 40 minutos mostró una decoloración teniendo una medición de 185 , respectivamente a los 50 minutos una medición más significativa a 35 y finalmente a los 60 minutos teniendo una medición de color de 25.

Posteriormente para el tratamiento 2 mL H_2O_2 a los 0 minutos el Rojo de Metilo su medición de color es de 250 su pérdida de color fue a los 50 minutos teniendo una medición de 100 , posteriormente a los 60 minutos una medición de 50 teniendo así una degradación del color respecto al tratamiento y al tiempo establecido.



Reacción 3

Tabla 15.Método de tratamiento por H_2O_2

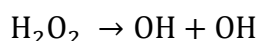
Método	Tiempo de tratamiento (minutos).						
	0	10	20	30	40	50	60
Análisis Cualitativo							
1 mL H_2O_2							
	Medición de color UPC						
	260	225	215	215	160	20	15
	Medición de pH						
	4.78	4.58	4.58	4.57	4.56	4.56	4.56
	Eficiencia						
	0%	97.42%	97.68%	97.62%	97.17%	97.86%	97.86%

1.5 mL H₂O₂	Análisis Cualitativo						
							
	Medición de color UPC						
	310	225	205	200	185	35	25
	Medición de pH						
	6.54	6.49	6.21	6.21	6.12	6.08	6.00
	Eficiencia						
	0%	96.26%	95.88%	95.65%	95.91%	95.54%	93.79%
2 mL H₂O₂	Análisis Cualitativo						
							
	Medición de color UPC						
	205	205	200	200	195	100	50
	Medición de pH						
	5.79	5.78	5.74	5.74	5.74	5.72	5.72
	Eficiencia						
	0%	94.79%	85.45%	94.29%	95.62%	94.59%	95.41%

Fuente: (Creación propia).

3.2.4 Efecto O₃/ H₂O₂

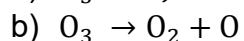
En la figura 15, se observa que el O₃ es un agente oxidante ya que la degradación del contaminante logra tener una rápida degradación al medir su color continuamente y su pH (tabla 16) se observa que el contaminante reacciona de manera rápida llegando a el punto de perder su color así mismo a mineralizarse mediante el tratamiento. Los OH son capaces de optar a recombinarse o de reaccionar de acuerdo a las siguientes reacciones (Jaramillo, 2019):



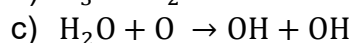
Reacción 4



Reacción 5



Reacción 6



Reacción 7

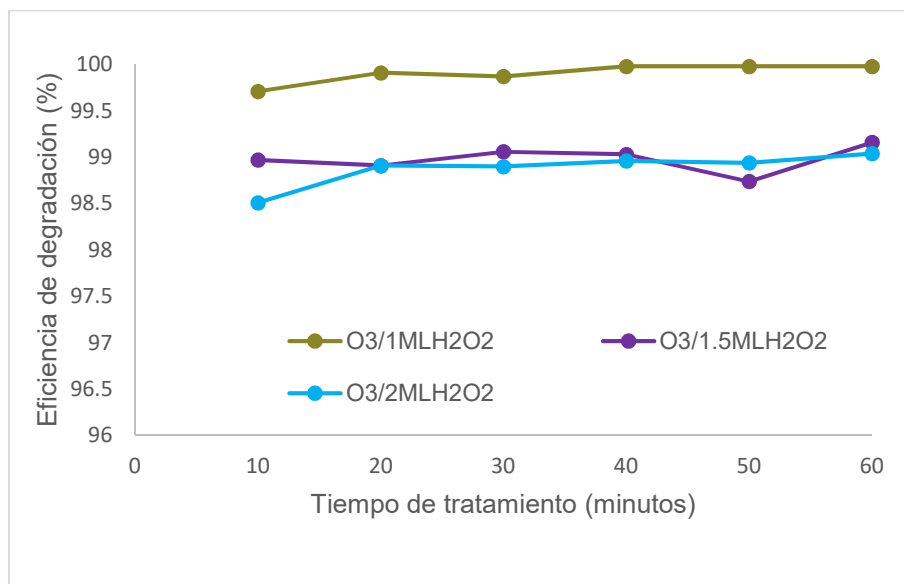


Figura 15. Resultados de degradación de Rojo de Metilo por O_3/H_2O_2 . Fuente: (Creación propia).

La presencia de O_3 acelero la degradación del contaminante ya que su eficiencia fue más efectiva a comparación de los otros tratamientos empleados teniendo una eficiencia en el tratamiento de $O_3/1 \text{ mL } H_2O_2$ con una degradación de 99.98% a los 60 minutos ; lo cual fue eficiente ya que a los 10 minutos ya se observaba una eficiencia máxima de 99.71% , así mismo teniendo un pH inicial de 5.60 y al final del tratamiento su medición de pH fue de 3.82 (tabla 16). A su vez la medición de color dentro del tratamiento fue significativa ya que a los 0 minutos la medición fue de 285 durante el lapso a los 20 minutos el color se degrado a los 10 de color logrando así a los 40 minutos una degradación de 0.

Posteriormente el tratamiento de $O_3/1.5 \text{ mL } H_2O_2$ su máxima eficiencia fue 99.16% donde a los 30 minutos su eficiencia de degradación tenia un porcentaje de 99.06%, lo cual se midió el pH (tabla 16) donde en su tiempo inicial a los 0 minutos la medición fue de 4.82 respecto al tiempo se fue disminuyendo dado que a los 60 minutos su pH final fue de 3.80. En el caso de la medición de color respectivamente tuvo una variación conforme al tiempo dado que en su tiempo inicial fue de 225 a los 10 minutos su degradación fue muy rápida ya que mostraba una medición de 15, respectivamente fue disminuyendo su color a los 20 minutos a 10 consecutivamente hasta los 50 minutos mostrando una medición de 0 logrando así una degradación eficiente en el tiempo establecido de tratamiento.

Finalmente en el tratamiento de $O_3/2 \text{ mL } H_2O_2$ su eficiencia en la degradación respectivamente en el tiempo establecido fue de 99.04% ,lo cual su pH vario durante

el tratamiento (tabla 16) teniendo como pH inicial 4.73 durante el tratamiento el pH fue variando lo cual a los 40 minutos teniendo un pH de 3.69 y finalmente a los 60 minutos 3.50. Por lo tanto durante la medición de color el Rojo de metilo al inicio tuvo 250 ya que conforme paso el tiempo se degradó teniendo una eficiencia de color a los 10 minutos y 20 minutos de 10, dado que en los 30 minutos se degradó totalmente el colorante.

Tabla 16. Método de tratamiento por O_3/H_2O_2

Método	Tiempo de tratamiento (minutos).						
	0	10	20	30	40	50	60
$O_3/1 \text{ mL } H_2O_2$	Análisis Cualitativo						
							
	Medición de color UPC						
	285	100	10	10	0	0	0
	Medición de pH						
	5.60	4.60	4.37	4.14	3.99	3.87	3.82
$O_3/1.5 \text{ mL } H_2O_2$	Eficiencia						
	0%	99.71%	99.91%	99.87%	99.98%	99.98%	99.98%
	Análisis Cualitativo						
							
	Medición de color UPC						
	225	15	10	10	10	0	0
$O_3/2 \text{ mL } H_2O_2$	Medición de pH						
	4.82	4.42	4.16	4.06	3.94	3.88	3.80
	Eficiencia						
	0%	98.97%	98.91%	99.06%	99.03%	98.74%	99.16%
	Análisis Cualitativo						
							
$O_3/2 \text{ mL } H_2O_2$	Medición de color UPC						

	250	10	10	0	0	0	0
	Medición de pH						
	4.73	4.21	4.05	3.78	3.69	3.62	3.50
	Eficiencia						
	0%	98.51%	98.91%	98.90%	98.96%	98.94%	99.04%

Fuente: (Creación propia).

3.2.5 Efecto de UV / H₂O₂

En la figura 16, se observan los resultados obtenidos de la degradación del Rojo de Metilo utilizando la combinación de UV / H₂O₂. Para el cual se obtuvieron eficiencias de degradación de un estándar de 96% - 98% en un tiempo de 60 minutos de tratamiento, con concentración de H₂O₂ diferentes como 1mL , 1.5 mL y 2 mL adicionándolo en el colorante.

La máxima eficiencia que se tuvieron en los tratamiento son las siguientes: UV/1 mL H₂O₂ con una eficiencia de 98.45% a los 60 minutos , UV/1.5 mL H₂O₂ con la eficiencia de 98.22% y 98.49% con UV/2 mL H₂O₂.

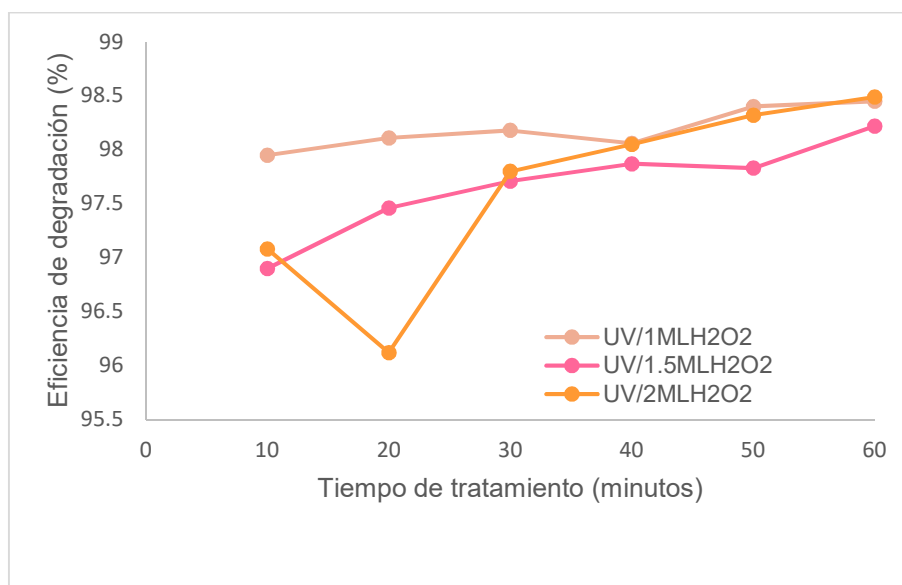
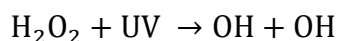


Figura 16. Resultados de degradación de Rojo de Metilo por UV / H₂O₂. Fuente: (Creación propia).

La presencia de UV acelero la degradación del Rojo de Metilo, mediante la reacción 8 que favorece mejor los resultados mediante la fotólisis del agua que produce más radicales OH y así poder tener una degradación más eficiente del contaminante (Jaramillo, 2019):



Reacción 8

De acuerdo a la tabla 17, se observa un análisis cualitativo que se aplicó mediante el tiempo de tratamiento cada 10 minutos; así mismo la medición de color para cada tratamiento fue medida lo cual para UV/ 1mL H₂O₂ su color inicial fue de 265 notando una significativa degradación de color a los 30 minutos de 135 así mismo vario a los 60 minutos a 95. Su pH no disminuyo tanto ya que al tiempo inicial fue de 4.54 y el final de 4.37. Respectivamente en el tratamiento de UV/ 1.5 mL H₂O₂ su color inicial fue 205 teniendo un cambio de color a los 60 minutos de 105. Finalmente para el tratamiento UV/ 2 mL H₂O₂ su color inicial fue de 345 mostrando su degradación a significativamente a los 30 minutos de 135 , respectivamente a los 50 minutos teniendo 95 y a los 60 minutos 50. Sin embargo, el pH fue constante para los tratamientos.

Tabla 17. Método de tratamiento por UV / H₂O₂

Método	Tiempo de tratamiento (minutos).						
	0	10	20	30	40	50	60
Análisis Cualitativo							
UV / 1mL H ₂ O ₂							
	Medición de color UPC						
	265	205	175	170	135	135	95
	Medición de pH						
	4.54	4.44	4.42	4.40	4.40	4.37	4.37
	Eficiencia						
	0%	97.95%	98.11%	98.18%	98.06%	98.40%	98.45%
Análisis Cualitativo							
UV /1.5 mL H ₂ O ₂							
	Medición de color UPC						
	205	205	190	185	150	145	105
	Medición de pH						
	5.26	4.90	4.80	4.79	4.70	4.67	4.60
	Eficiencia						
	0%	96.90%	97.46%	97.71%	97.87%	97.83%	98.22%

UV /2 mL H₂O₂	Análisis Cualitativo						
							
	Medición de color UPC						
	345	225	140	135	120	95	50
	Medición de pH						
	5.18	4.97	4.81	4.74	4.69	4.66	4.57
	Eficiencia						
	0%	97.08%	96.12%	97.80%	98.05%	98.32%	98.49%

Fuente: (Creación propia).

3.3 Degradación de Azul Brillante

3.3.1 Efecto de O₃ y O₃/UV

En la figura 17, se observa la comparación de eficiencias cuando un tratamiento solo tiene O₃ y cuando hay una combinación O₃/UV. Lo cual varía la diferencia de eficiencia que se efectuó a un tiempo de 60 minutos. La eficiencia obtenida son las siguientes respectivamente el colorante Azul Brillante al tener un tratamiento de O₃ tuvo una eficiencia de 97.32% lo cual fue más eficiente ya que el tratamiento de O₃/UV su eficiencia máxima fue de 73.94%.

Durante el tratamiento (tabla 18) se analizó cualitativamente el colorante donde se observa una disminución de color conforme al tiempo; así mismo se aplicó la medición de color para cada tratamiento lo cual O₃ su medición inicial fue de 470 conforme al lapso de tratamiento a los 40 minutos disminuyó significativamente a 150 llegando a los 60 minutos con una medición de color de 80. Para O₃/UV su medición de color inicial fue de 500, sin embargo fue perdiendo su color muy lentamente donde en los 40 minutos midió su color a 300, posteriormente a los 60 minutos fue su medición de 230. Su pH para ambos tratamientos disminuyó respecto al tiempo teniendo pH inicial en O₃ de 4.97 y para O₃/UV de 4.26 finalmente su pH disminuyó lentamente en O₃ de 3.01 y para O₃/UV de 2.92 durante los 60 minutos de tratamiento.

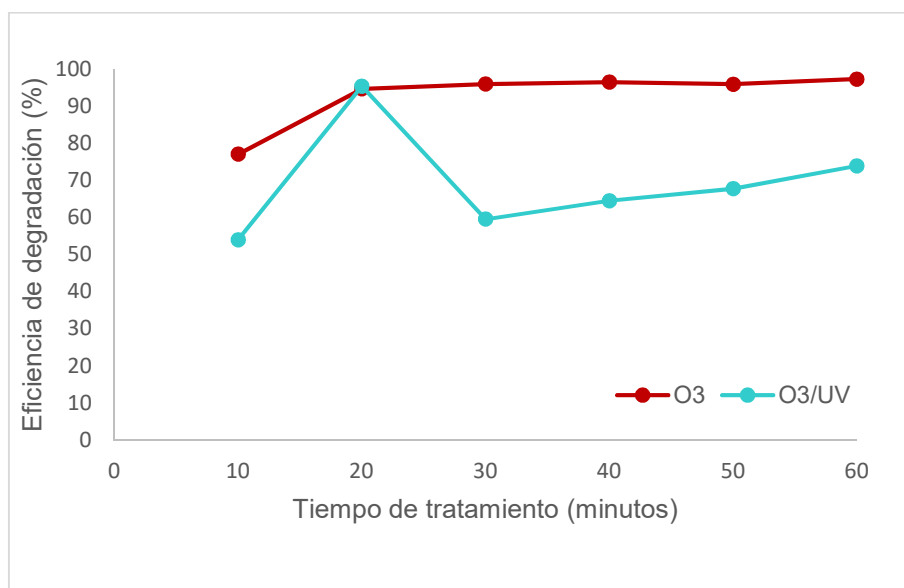


Figura 17. Resultado de degradación de Azul Brillante O_3 y O_3/UV . Fuente: (Creación propia).

De acuerdo en la siguiente tabla 18, como se mencionó anteriormente el color disminuyó más en el tratamiento de O_3 y fue más efectivo en su eficiencia de degradación dado que el O_3 actuó más rápido y con O_3/UV actuó más lentamente.

Tabla 18. Método de tratamiento por O_3 y O_3/UV

Método	Tiempo de tratamiento (minutos).						
	0	10	20	30	40	50	60
Análisis Cualitativo							
O_3							
	Medición de color UPC						
	470	450	400	400	150	100	80
	Medición de pH						
	4.97	3.87	3.36	3.19	3.09	3.03	3.01
	Eficiencia						
	0%	77.07%	94.66%	95.96%	96.50%	95.94%	97.32%

O_3/UV	Análisis Cualitativo						
							
	Medición de color UPC						
	500	480	480	445	300	250	230
	Medición de pH						
	4.26	3.27	3.11	3.06	3.01	2.98	2.92
	Eficiencia						
	0%	54.02%	95.42%	59.56%	64.51%	67.75%	73.94%

Fuente: (Creación propia).

3.3.2 Efecto O_3 / H_2O_2 /UV

En la figura 18, se observa los resultados obtenidos de Azul Brillante, se tuvieron eficiencias de 99.16% en el tratamiento O_3 / UV / 1 mL H_2O_2 tomando en cuenta que a los 30 minutos elevo su eficiencia a 99.98% respectivamente al tiempo fue continua su eficiencia, respectivamente para O_3 / UV / 1.5 mL H_2O_2 a los 60 minutos su eficiencia fue de 98.57% asi mismo el efecto de la combinación al colorante a los 10 minutos su eficiencia fue de 98.63% .Finalmente para el tratamiento de O_3 / UV / 2 mL H_2O_2 la eficiencia respeto al tiempo de tratamiento 98.50% .

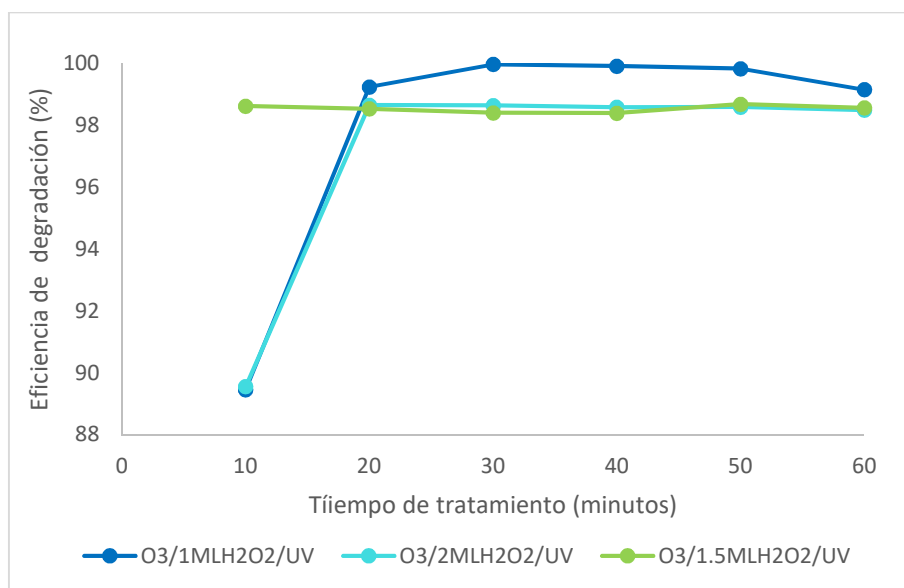


Figura 18.Resultados de degradación de Azul Brillante O_3 / UV / H_2O_2 . Fuente: (Creación propia).

En la tabla 19, se observa el tiempo de tratamiento establecido para cada uno lo cual se aplicó la medición de color y pH. De acuerdo a la medición de color para el tratamiento de O_3 / UV / 1 mL H_2O_2 su medición de color inicial fue de 300 dado que respecto al tiempo de tratamiento se fue degradando teniendo a los 60 minutos una medición de color de 230.

Sin embargo, para el tratamiento de O_3 / UV / 1.5 mL H_2O_2 su degradación fue más rápida teniendo como medición de color de 400 , mostrando una degradación significativa a los 20 minutos de 10 de color , continuamente una degradación más efectiva dentro de los 30 minutos de 0 hasta los 60 minutos de tratamiento. Finalmente el tratamiento de O_3 / UV / 2 mL H_2O_2 con una medición inicial de 300 , teniendo una degradación significativa a los 50 minutos de 20 posteriormente a los 60 minutos una medición de 0 al concluir el tratamiento. Dado que en el color disminuyo llegando a una mineralización del contaminante en el tratamiento de O_3 / UV / 1.5 mL H_2O_2 y O_3 / UV / 2 mL H_2O_2 llegando a la medición de color a cero.

Tabla 19.Método de tratamiento por O_3 / UV / H_2O_2

Método	Tiempo de tratamiento (minutos).						
	0	10	20	30	40	50	60
Análisis Cualitativo							
O_3 / UV / 1 mL H_2O_2							
	Medición de color UPC						
	300	280	280	270	265	255	230
	Medición de pH						
	4.97	3.76	3.34	3.19	3.10	3.05	3.05
	Eficiencia						
	0%	89.46%	99.25%	99.98%	99.92%	99.84%	99.16%
Análisis Cualitativo							
O_3 / UV / 1.5 mL H_2O_2							
	Medición de color UPC						
	400	105	10	0	0	0	0
	Medición de pH						

O₃ / UV / 2 mL H₂O₂	4.62	2.86	2.83	2.83	2.80	2.80	2.78
	Eficiencia						
	0%	98.63%	98.54%	98.41%	98.40%	98.69%	98.57%
	Análisis Cualitativo						
							
	Medición de color UPC						
	300	180	130	100	65	20	0
	Medición de pH						
	4.00	2.89	2.87	2.61	2.50	2.49	2.40
	Eficiencia						
	0%	89.56%	98.66%	98.65%	98.59%	98.60%	98.50%

Fuente: (Creación propia).

3.3.3 Efecto H₂O₂

En la figura 19, se observa los resultados obtenidos de la degradación de Azul Brillante variando la concentración inicial de peróxido de hidrógeno en 1 mL, 1.5 mL y 2 mL. La variación de diferentes concentraciones adicionadas al colorante se tuvieron eficiencias de degradación muy bajas lo cual son las siguientes: 3.37% de degradación 1 mLH₂O₂ , respectivamente una eficiencia 1.66% al tener una concentración de 1.5 mLH₂O₂ y finalmente una eficiencia de 0.50% adicionando 2 mLH₂O₂ .

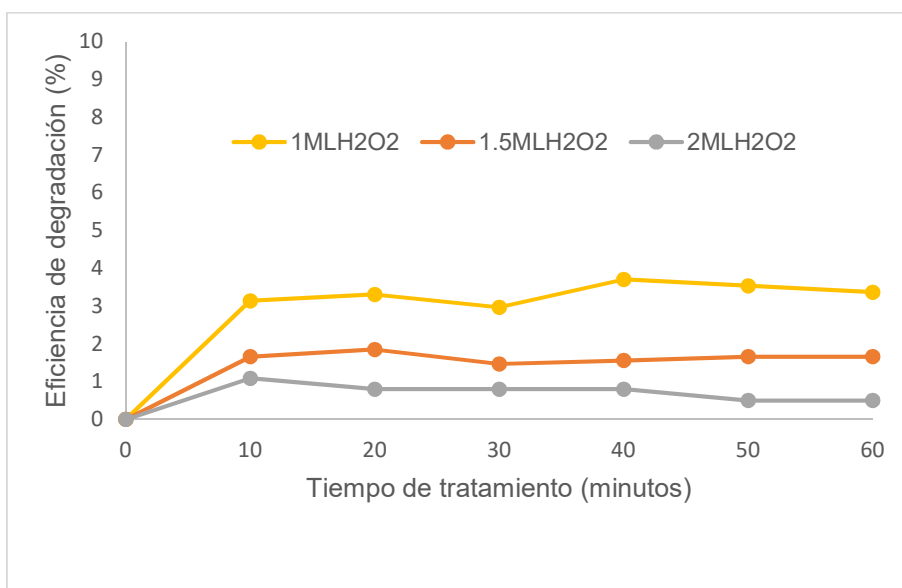


Figura 19. Resultados de degradación de Azul Brillante por H_2O_2 . Fuente: (Creación propia).

Posteriormente en la tabla 20, se observa la eficiencia del peróxido de hidrogeno en las concentraciones antes mencionadas, de acuerdo al análisis cualitativo la degradación no fue apta para el colorante así mismo en la medición de color para cada tratamiento lo cual para 1 mL H_2O_2 su medición de color inicial fue de 345 así mismo en el lapso del tratamiento se observa que disminuye la degradación lentamente a los 30 minutos lo cual su color fue de 320 y dentro de los 60 minutos su medición fue de 280.

Por lo tanto adicionando 1.5 mL H_2O_2 al siguiente tratamiento este contó con una medición inicial de 500, sin embargo transcurriendo el tiempo de tratamiento la degradación disminuyo a los 30 minutos teniendo una medición de 355 llegando a los 60 minutos con una medición de 240. Así mismo adicionando 2 mL H_2O_2 el tratamiento su concentración inicial de 490, por lo que a los 30 minutos de tratamiento su medición de color fue 365 y al concluir a los 60 minutos el tratamiento fue de 250. Por tanto su pH para los tratamientos fue muy constante de su tiempo inicial al final.

Tabla 20. Metodo de tratamiento por H_2O_2

Método	Tiempo de tratamiento (minutos).						
	0	10	20	30	40	50	60
1 mL H_2O_2	Análisis Cualitativo						
							
	Medición de color UPC						
	345	330	320	320	300	300	280
	Medición de pH						
	5.27	5.13	5.08	5.05	5.05	5.00	5.00
	Eficiencia						
	0%	3.14%	3.31%	2.97%	3.71%	3.54%	3.37%
1.5 mL H_2O_2	Análisis Cualitativo						
							
	Medición de color UPC						
	500	430	400	355	260	260	240
	Medición de pH						
	5.48	5.41	5.22	5.22	5.20	5.20	5.18
	Eficiencia						
	0%	1.66%	1.85%	1.47%	1.56%	1.66%	1.66%
2 mL H_2O_2	Análisis Cualitativo						
							
	Medición de color UPC						
	490	395	375	365	310	280	250
	Medición de pH						
	5.40	5.35	5.35	5.30	5.20	5.20	5.10
	Eficiencia						
	0%	1.09%	0.80%	0.80%	0.80%	0.50%	0.50%

Fuente: (Creación propia).

3.3.4 Efecto O_3/H_2O_2

En la figura 20, se observa los resultados obtenidos de la degradación de Azul Brillante mediante O_3/H_2O_2 en este método se aplicaron diferentes concentraciones de H_2O_2 (1mL, 1.5 mL y 2 mL). Obteniendo eficiencias de degradación del 96.86% con 1mL de H_2O_2 y O_3 , empleando O_3 y 1.5 mL de H_2O_2 se obtuvo una degradación de 97.87% así mismo en este tratamiento a los 30 minutos mostro un porcentaje de 96.37% y 97.25% de degradación para O_3 y 2 mL de H_2O_2 .

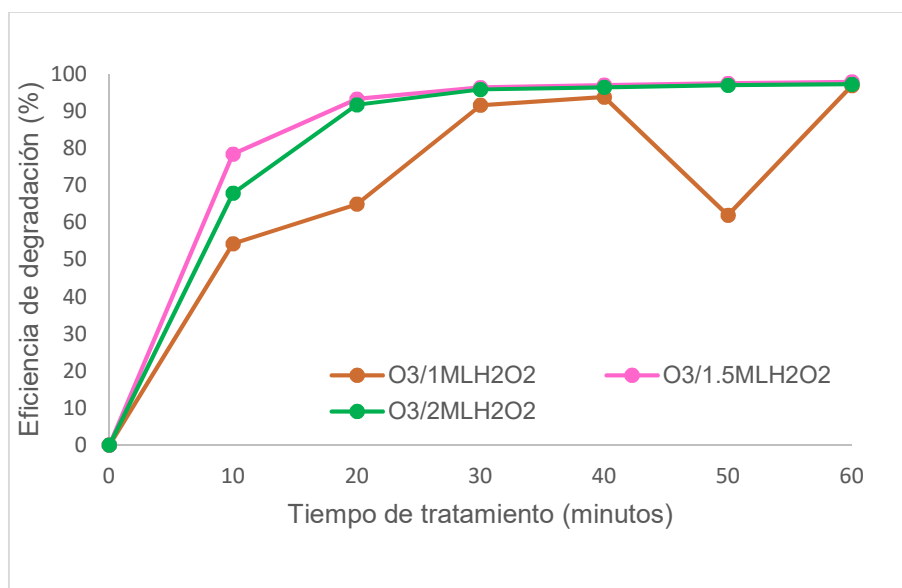


Figura 20. Resultados de degradación de Azul Brillante por O_3 / H_2O_2 . Fuente: (Creación propia).

De acuerdo a la siguiente tabla 21, se observa a grandes rasgos una continua medición de color de los tratamientos efectuados por lo que en el tratamiento de $O_3 / 1\text{mL} H_2O_2$ en su tiempo inicial teniendo una medición de 500 respectivamente a los 40 minutos su medición fue de 200 significativamente llegando así a los 60 minutos de tratamiento con una medición de 50.

De manera que en el tratamiento de $O_3 / 1.5\text{mL} H_2O_2$ avanzo más rápido la degradación lo cual en su tiempo inicial su color tuvo una medición de 500, así mismo en el lapso de los 30 minutos su color disminuyó a 180, finalmente a los 60 minutos de tratamiento teniendo 35 de la medición de color. Finalmente para el tratamiento de $O_3 / 2\text{mL} H_2O_2$ su medición de color al tiempo inicial fue de 500, teniendo una degradación notable a los 30 minutos de 170 en el tiempo de 50 minutos una medición de 86 y al concluir el tratamiento a los 60 minutos una medición de 39. Por lo que su pH no disminuyó tanto lo cual se muestra en la tabla

21 las diferentes mediciones cada 10 minutos y el análisis cualitativo de cada muestra del colorante.

Tabla 21. Método de tratamiento por O_3 / H_2O_2

Método	Tiempo de tratamiento (minutos).						
	0	10	20	30	40	50	60
$O_3/1 \text{ mL } H_2O_2$	Análisis Cualitativo						
							
	Medición de color UPC						
	500	485	480	450	200	100	50
	Medición de pH						
	4.78	4.46	4.03	3.78	3.67	3.53	3.35
	Eficiencia						
	0%	54.30%	64.92%	91.59%	93.77%	61.96%	96.86%
$O_3/1.5 \text{ mL } H_2O_2$	Análisis Cualitativo						
							
	Medición de color UPC						
	500	430	340	180	150	95	35
	Medición de pH						
	4.64	3.32	3.23	3.18	3.09	3.00	3.00
	Eficiencia						
	0%	78.45%	93.27%	96.37%	97.01%	97.50%	97.87%
$O_3 / 2 \text{ mL } H_2O_2$	Análisis Cualitativo						
							
	Medición de color UPC						
	500	450	320	170	150	86	39
	Medición de pH						
	4.63	3.23	3.09	3.09	3.05	3.00	2.80
	Eficiencia						
	0%	67.87%	91.70%	95.85%	96.42%	96.99%	97.25%

Fuente: (Creación propia).

3.3.5 Efecto de UV/ H_2O_2

En la figura 21, se observan los resultados de la degradación de Azul Brillante adicionando H_2O_2 con transmisión de radiación ultravioleta (UV) . De acuerdo al peróxido de hidrógeno adicionaron diferentes concentraciones iniciales (1mL, 1.5 mL y 2mL) , las eficiencias fueron lentas para la degradación del colorante lo cual se obtuvo 44.69% de degradación 1 mL de H_2O_2 y UV , emperando UV y 1.5 mL de H_2O_2 a los 60 minutos del tratamiento su degradación fue 53.60% , finalmente para UV y 2mL de H_2O_2 tuvo una eficiencia de 37.23%.En comparacion de el tratamiento de peróxido de hidrógeno su eficiencia aumenta cuando se agrega UV teniendo un comportamiento similar por lo que se necesita mayor tiempo de tratamiento para el colorante y asi sea más efectiva su degradación.

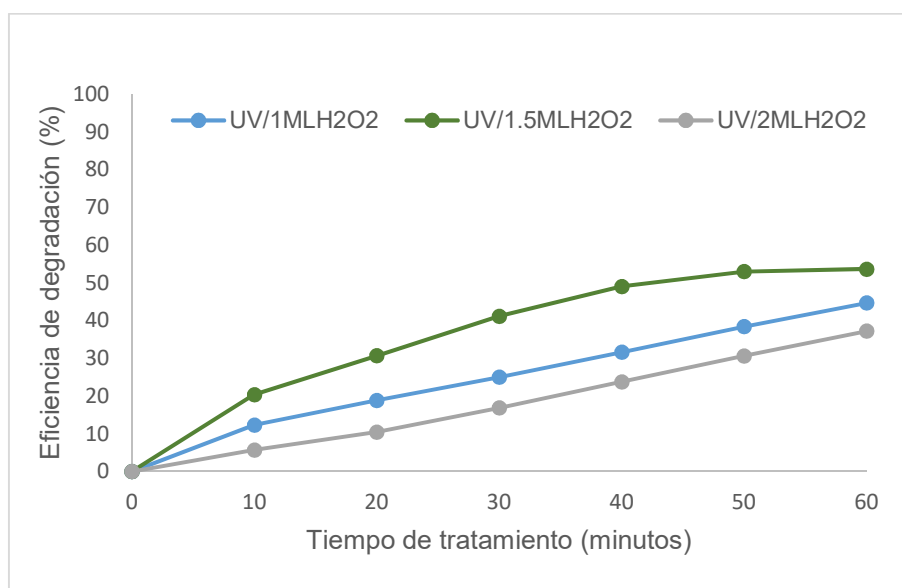


Figura 21.Resultados de degradación de Azul Brillante por UV/ H_2O_2 . Fuente: (Creación propia).

En la tabla 22, se observan los resultados obtenidos durante los tratamientos aplicados lo cual se realizó un análisis cualitativo para cada muestra ya que se observaba cada 10 minutos, dado que también se aplicó una medición de color donde en el tratamiento de UV/ 1mL H_2O_2 se observa que en su tiempo inicial su color midió 400 continuamente su color fue disminuyendo teniendo una medición relativa a los 40 minutos de 280 finalmente llegando a los 60 minutos con una medición de color de 200.Respectivamente en el tratamiento de UV/ 1.5mL H_2O_2 su medición inicial fue de 500 a través del lapso transcurrido a los 30 minutos muestra una medición de color de 285 , teniendo a los 60 minutos una medición de 260.Finalmente para el tratamiento de UV/ 2 mL H_2O_2 su color inicial fue de 450 , teniendo una degradación muy lenta lo cual a los 30 minutos su color era de 400

llegando a los 60 minutos con 250 en su medición de color. De acuerdo a la medición de pH se notó contantemente respectivamente al tiempo de tratamiento.

Tabla 22.Método de tratamiento por UV/H_2O_2

Método	Tiempo de tratamiento (minutos).						
	0	10	20	30	40	50	60
UV / 1mL H_2O_2	Análisis Cualitativo						
							
	Medición de color UPC						
	400	400	350	320	280	260	200
	Medición de pH						
	4.35	4.30	4.28	4.20	4.20	4.09	4.00
UV / 1.5mL H_2O_2	Análisis Cualitativo						
							
	Medición de color UPC						
	500	370	300	285	285	285	260
	Medición de pH						
	5.31	5.21	5.21	5.13	4.89	4.70	4.68
UV / 2mL H_2O_2	Análisis Cualitativo						
							
	Medición de color UPC						
	450	405	405	400	350	300	250
	Medición de pH						
	5.96	5.37	5.20	5.18	5.18	5.10	5.00
UV / 2mL H_2O_2	Eficiencia						
	0%	12.35%	18.86%	25.03%	31.61%	38.39%	44.69%
	Eficiencia						
	0%	20.39%	30.71%	41.16%	49.04%	53.00%	53.60%
	Eficiencia						
	0%	5.72%	10.46%	16.86%	23.80%	30.64%	37.23%

Fuente: (Creación propia).

3.4 Generación de CO_2

De acuerdo a la generación de CO_2 se aplicó una medición (tabla 23) llevando a cabo un método volumétrico de titulación utilizado un kit de Hanna Instruments en cada tratamiento. Lo cual en el contaminante Rojo de Metilo en el tratamiento de UV / 1 mL H_2O_2 tiene un 90 de consumo de CO_2 sin embargo para el Azul Brillante el tratamiento de mayor generación de CO_2 fue $O_3/UV/1.5 mL H_2O_2$ con una medición de 50. Ya que entre más CO_2 es mayor la degradación del contaminante, es decir, los subproductos también son degradados y se logra una mineralización (el contaminante se degrada a CO_2 y agua).

Tabla 23. Generación de CO_2

Método	Rojo de Metilo	Azul Brillante
O_3	12	20
O_3 / UV	33	15
$O_3 / UV / 1 \text{ mL } H_2O_2$	18	15
$O_3 / UV / 1.5 \text{ mL } H_2O_2$	30	50
$O_3 / UV / 2.0 \text{ mL } H_2O_2$	34	21
1 mL H_2O_2	22	10
1.5 mL H_2O_2	11	15
2 mL H_2O_2	11	20
$O_3 / 1 \text{ mL } H_2O_2$	15	10
$O_3 / 1.5 \text{ mL } H_2O_2$	10	18
$O_3 / 2 \text{ mL } H_2O_2$	30	26
UV / 1 mL H_2O_2	90	20
UV / 1.5 mL H_2O_2	51	35
UV / 2 mL H_2O_2	10	10

Fuente: (Creación propia).

3.5 Consumo de energía

En la tabla 24 se observa el consumo de energía en KW.h/L medida en cada tratamiento a los 60 minutos de cada uno respectivamente, considerando que cada método se efectúa con diferentes equipos de tratamiento.

En el Rojo de Metilo se observa que su mayor consumo de energía fue en el tratamiento de UV /1.5 mL H₂O₂ con un consumo de 17.132 KW.h/L y su mínimo consumo para el tratamiento de 1 mL H₂O₂ de consumo de energía de 4.590 KW.h/L. Sin embargo, para el Azul Brillante su mayor consumo fue en el tratamiento de O₃ / UV con 92.450 KW.h/L y su mínimo consumo de energía fue de 18.606 KW.h/L en el tratamiento de 1.5 mL H₂O₂.

Tabla 24. Consumo de energía

Método	Rojo de Metilo	Azul Brillante
O ₃	16.351	20.349
O ₃ / UV	50.343	92.450
O ₃ /UV/1 mL H ₂ O ₂	4.918	26.005
O ₃ /UV /1. 5 mL H ₂ O ₂	4.796	29.237
O ₃ /UV/2. 0 mL H ₂ O ₂	4.679	29.597
1 mL H ₂ O ₂	4.590	20.242
1. 5 mL H ₂ O ₂	6.627	18.606
2 mL H ₂ O ₂	6.500	25.889
O ₃ /1 mL H ₂ O ₂	39.900	21.289
O ₃ /1. 5 mL H ₂ O ₂	15.408	19.138
O ₃ /2 mL H ₂ O ₂	15.859	20.484
UV /1mL H ₂ O ₂	15.567	116.610
UV /1. 5mL H ₂ O ₂	17.132	89.939
UV /2mL H ₂ O ₂	16.469	148.324

Fuente: (Creación propia).

Conclusiones y Recomendaciones

De acuerdo a los resultados obtenidos en los contaminantes de estudio Rojo de Metilo y Azul Brillante se obtuvieron diferentes eficiencias de degradación en el tiempo establecido ya que cada tratamiento tuvo diferentes reacciones con el contaminante. Lo cual mostraron que estos tratamientos fueron efectivos para la degradación en el tiempo determinado, los que lo convierte en opciones para futuras investigaciones en este campo llevando acabo mecanismos químicos que conllevan a la generación de radicales ($\bullet\text{OH}$) caracterizados por tener un alto potencial de oxidación.

Para el Rojo de Metilo se observa que es un contaminante biodegradable a los procesos de oxidación avanzada ya que cada método efectuado tuvo una gran eficiencia de degradación. Cabe mencionar que se obtuvieron máximas y mínimas degradaciones para los contaminantes.

Máxima degradación para Rojo de Metilo fue:

Rojo de Metilo		
Método		Degradación
O_3		98.89%
$\text{O}_3/\text{H}_2\text{O}_2$	$\text{O}_3/1\text{mL H}_2\text{O}_2$	99.98%
	$\text{O}_3/1.5 \text{ mL H}_2\text{O}_2$	99.16%
	$\text{O}_3/2 \text{ mL H}_2\text{O}_2$	99.04%
$\text{O}_3/\text{H}_2\text{O}_2/\text{UV}$	$\text{O}_3/1\text{mL H}_2\text{O}_2/\text{UV}$	98.82%
	$\text{O}_3/1.5\text{mL H}_2\text{O}_2/\text{UV}$	98.82%
	$\text{O}_3/2\text{mL H}_2\text{O}_2/\text{UV}$	99.03%
$\text{UV}/\text{H}_2\text{O}_2$	$\text{UV}/2\text{mL H}_2\text{O}_2$	98.49%

Y mínima degradación para el Rojo de Metilo, no obstante, no se considera una degradación en un estándar bajo lo cual es:

Rojo de Metilo		
Método		Degradación
O_3/UV		91.54%

En el caso de Azul Brillante se observó que el contaminante no es tan biodegradable lo cual su eficiencia de degradación fue en tratamientos con ozono, peróxido de hidrogeno y radiación ultravioleta. Considerando que para llegar a una degradación más alta se recomienda tener más tiempo de tratamiento máximo al tratamiento establecido.

Teniendo así la máxima degradación de los tratamientos con mayor eficiencia de acuerdo al tiempo que se aplicó a cada tratamiento lo cual son:

Azul Brillante		
Método		Degradación
O₃/H₂O₂	O ₃ /1mL H ₂ O ₂	96.86%
	O ₃ /1.5 mL H ₂ O ₂	97.87%
	O ₃ /2 mL H ₂ O ₂	97.25%
O₃/H₂O₂/UV	O ₃ /1mL H ₂ O ₂ /UV	99.16%
	O ₃ /1.5mL H ₂ O ₂ /UV	98.57%
	O ₃ /2mL H ₂ O ₂ /UV	98.50%

En el Azul Brillante se observó que respecto al tiempo establecido de tratamiento el contaminante no fue degradado en su totalidad tomando en cuenta que los tratamientos fueron muy lentos para el contaminante lo cual las mínimas eficiencias son:

Azul Brillante		
Método		Degradación
H₂O₂	O ₃ /1mL H ₂ O ₂	3.37%
	O ₃ /1.5 mL H ₂ O ₂	1.66%
	O ₃ /2 mL H ₂ O ₂	0.50%
UV/H₂O₂	O ₃ /1mL H ₂ O ₂ /UV	44.69%
	O ₃ /1.5mL H ₂ O ₂ /UV	53.60%
	O ₃ /2mL H ₂ O ₂ /UV	37.23%

Generalmente el ozono siempre mostro una eficiencia en la degradación de los contaminantes que se emplearon, aplicando el ozono y en sus combinaciones fue

un tratamiento demasiado rápido en tiempo menores al tiempo de tratamiento llegando finalmente a una eficiencia arriba del 90% de degradación.

Así mismo la combinación del oxidante ozono, peróxido de hidrogeno con radiación ultravioleta para ambos contaminantes su eficiencia fue muy alta en el tiempo de 60 minutos de tratamiento arriba de un 98% de degradación.

Considerando que la aplicación de Procesos de Oxidación Avanzada han sido alternativas efectivas para la degradación de contaminante del sector industrial ya que tiene mayores eficiencias de degradación en poco tiempo de tratamiento.

Referencias

- Alaton, I. A., Febrero de 2007. Degradación de un biocida textil comercial con Procesos de Oxidación Avanzada : Ozono , UV y Peróxido de hidrógeno.. *Revista de Gestión Ambiental*, 82(2), p. 154.
- Araque, M. A., 2022. El agua en la naturaleza. *Diseño hidráulico de plantas de tratamiento de agua potable*, 1(1), pp. 15-24.
- Babuponnusami, M., Marzo de 2014. Una revisión de Fenton y mejoras en el proceso Fenton para el tratamiento de aguas residuales. *Ingeniería Química Ambiental*, 2(1), pp. 557-572.
- Bolaños Alfaro, G. C. C. S. A., 2017. Determinación de nitritos, nitratos, sulfatos y fosfatos en agua potable como indicadores de contaminación ocasionada por el hombre, en dos cantones de Alajuela(Costa Rica). *Tecnología en Marcha*, 30(4), pp. 15-27.
- Campaña, C. N. C. A. R. B., Abril 2011. *Contaminación de las aguas y políticas para enfrentarla*. Primera ed. Quito-Ecuador: Foro de los Recursos Hídricos.
- Cárdenas, M. T. J. M. Q. S. G. H. G. L. U. V., 30 de Marzo de 2023. Decoloración de efluentes textiles que contienen colorantes reactivos mediante el método de electro-oxidación con electrodos de titanio. *Revista de la Sociedad Química del Perú*, 89(3).
- Castillo, J. A. Q., 2022. *Jonathan Alberto Quant Castillo*, Nicaragua: s.n.
- Clair Sawyer, P. M., 2000. *Química para la ingeniería ambiental*. Cuarta ed. Colombia: Mc Graw Hill.
- Delgado, N. D. A. P. N. E., 24 de Enero 2017. Determinación del nivel de degradación y la decoloración de tintes con los Procesos de Oxidación Avanzada. Issue 1.
- Díaz, M., 2018. *Ecuaciones y cálculos para el tratamiento de aguas*. 1 ed. Madrid: PARANINFO,S.A..
- Duche, X. R. B., 18 de Febrero 2021. Avances en el tratamiento de aguas residuales alimenticias para la producción de bioenergía en celdas de combustible microbianas. *infoANALÍTICA*, Especial(1), pp. 11-50.

Duran, J. E. ,. L. C., Mayo de 2014. Degradación y decoloración de agua contaminada con colorantes textiles mediante procesos de oxidación avanzada. *Revista Tecnología en Marcha*, 27(2), pp. 40-50.

Durán, M. S. G. G. G. L., 28 de Febrero de 2011. Evaluación del reactivo de Fenton y la ozonización como pretratamientos para aumentar la biodegradabilidad de soluciones acuosas de dietanolamina de un proceso de endulzamiento de gas de refinería de petróleo.. *Materiales Peligrosos*, 186(2 y 3), pp. 1652-1659.

Espinoza, R. F. ,. J. F. R. M. L. M. B., 2021. Evaluación de colorantes sintéticos en bebidas comercializadas en la ciudad de Trujillo en el periodo 2018 - 2019. *Revista de investigación científica y tecnológica*, 2(3), pp. 124-139.

Fernández, O. A. ,. C. G. d. I. F. J. A. S. N. S. V. R., 2010. *Métodos de identificación bacteriana en el laboratorio de microbiología*, s.l.: s.n.

Forero, J. E. O.-P. O. y. F. R., 2005. Aplicacion de Procesos de Oxidacion Avanzada como tratamiento de Fenol en aguas residuales industriales de refineria. *Ciencia, Tecnología y Futuro*, 3(1), pp. 97-109.

Garay, M. M. M. C. A. A. S. M. B., Octubre de 2022. Depuración refractaria de contaminantes de un efluente de la industria textil por oxidación electroquímica. *ConcienciaDigital*, 5(4), pp. 145-160.

Gil, C. A. L., 2009. *Estandarización y validación de una técnica para medición de la demanda bioquímica de oxígeno por el método respirométrico y la demanda química de oxígeno por el método colorimétrico*, Pereira: s.n.

González, D. M. S., 2004. *Estudio cinético de bromación del rojo de metilo*, Nicaragua: s.n.

Jaramillo, S. B. A. M. C. ,. A. N. H. A., 2019. Assessing some advanced oxidation processes in the abatement of phenol. *Environment Protection Engineering*, 45(3), pp. 24-38.

Jiménez, A. A., 2000. Determinación de los parámetros físico-químicos de calidad de las aguas. *Gestión Ambiental*, 2(23), pp. 12-19.

Kos, L. J. K. M., Enero de 2010. Tratamiento de aguas residuales textiles mediante el método Fenton. 81(4), pp. 105-109.

Lapeña, M. R., 1999. *Tratamiento de aguas industriales: Aguas de proceso y residuales*. MARCOMBO ed. Colombia: s.n.

López Sánchez, R. M. E. y. T. M. J., 2005. *EL AGUA*. 1 ed. Universidad de las Palmas de Gran Canaria: Servicio de Reprografía, Encuadernación y Autoedición de la ULPGC.

- Marcano, D., 2018. *Introducción a la Química de los Colorantes*. Segunda ed. Venezuela: Colección Divulgación Científica y Tecnológica.
- Markus, F. H. F., 1994. "Brilliant Blue FCF as a DyeTracer for Solute Transport Studies-A Toxicological Overview". *Journal of Environmental Quality*, 25(5), pp. 1108-1112.
- Martínez, A. C. ,. C. O. A. E. L. G. R., Enero 2014. Contaminación generada por colorantes de la industria textil. 2(1).
- Méndez, M. E. I. B. A. M. G., 2009. Oxidación electroquímica de compuestos orgánicos de un efluente proveniente de una planta procesadora de productos lácteos. *SciELO*, 24(2).
- Metcalf, E., 1995. *Ingeniería de aguas residuales tratamiento, vertido y reutilización*. Tercera ed. ESPAÑA: McGraw-Hill.
- Mook, M. C. M. A. G. K. B. A. M. I. a. M. A. H., 31 de Enero de 2012. Desalinización. *ELSEVIER*, 285(1), pp. 1-13.
- N.F.Gray, 1996. *Calidad de agua potable*. 1 ed. España: John Wiley & Sons Ltd,Baffins Lane,Chichester,West Sussex PO19 1UD,England.
- Olas, B. J. B. U. B., 9 de Julio de 2021. Los efectos de los colorantes azules naturales y sintéticos en la salud humana: una revisión del conocimiento actual y las perspectivas terapéuticas. *Nutrición avanzada*, 12(6), p. 2301–2311.
- Ortega, R. A. T. ,. N. S. R., 2021. Tratamientos avanzados para la potabilización de aguas residuales. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 31(2), pp. 121-134.
- Oruna, J. C., 2012. Nuevas aplicaciones de la ósmosis inversa. 4(1), pp. 49-57.
- Oturan, M. A. J., 2014. Procesos de oxidación avanzada en el tratamiento de agua y aguas residuales: Principios y aplicaciones.. *Ciencias Ambientales y Tecnología*, 44(23), pp. 2577-2641.
- Pignatello, O. E. ,. M. A., 2006. Procesos avanzados de oxidación para la destrucción de contaminantes orgánicos basados en la reacción de Fenton y química relacionada.. *Ciencia y Tecnología*, 36(1), pp. 1-84.
- Rascón, L. E. M., 2005. *Principios de hidrogeografía:Estudio del Ciclo Hidrológico*. Primera ed. México: s.n.
- Rettig, M. ,. A.-H., 2014. El color en los alimentos un criterio de calidad medible. *Ciencia de los alimentos y la tecnología*, 42(2), pp. 57-66.

- Rodriguez, T. D. B. E. C., 2008. Tratamiento de efluentes industriales de naturaleza recalcitrante usando ozono, peróxido de hidrógeno y radiación ultravioleta. *SciELO*, Volumen 46, pp. 24-38.
- Rojas, A. G. G. A. R. y. A. L., 2008. La Tartrazina, un colorante de la industria agroalimentaria, degradado mediante procesos de oxidación avanzada. *Revista Lasallista de Investigación*, 5(1), pp. 20-27.
- Rojas, J. ,. A. H., 2016. Evaluación de la biodegradación del colorante azul brillante utilizando hongos de la podredumbre blanca y sus consorcios. *Ciencias exactas y naturales* , 19(1), pp. 179-187.
- Rosales, E. T., 2019. *Estructura del agua* , s.l.: s.n.
- Roth, 2024. *Información de seguridad voluntaria apoyándose en el formato de ficha de datos de seguridad conforme al Reglamento (CE)*, s.l.: s.n.
- Salas, M. C. Z. H. J. C. V. B. L. R. M. C. M. J. K. L. A., 2021. Remoción de contaminantes en aguas residuales empleando carbón activado. 1(1), pp. 1-19.
- Sánchez, J. V. P. O. ,. S. P. y. I. H. P., Abril de 2012. Degradación del colorante azoico rojo reactivo 120 en soluciones acuosas utilizando sistemas de hierro homogéneos/heterogéneos. *Revista mexicana de ingeniería química*, 11(1), pp. 121-131.
- Sanjuan, L. K. P. J. ,. P. F. C. L. S. V. G. C. P. E., 2024. Exploración integral de los colorantes naturales en la industria alimentaria: desafíos oportunidades. *Revista Científica Multidisciplinar*, 8(3), pp. 4586-4614.
- Sarria, V. M. S. P. Á. G. R. C. P. R. A. T., 2005. Nuevos sistemas electroquímicos y fotoquímicos para el tratamiento de aguas residuales y de bebida. *Revista Colombiana de Química*, 34(2), pp. 161-173.
- Shrivastava, V. ,. I. A. M. M. M. F. S. R. R., Abril de 2022. Aguas residuales en la industria alimentaria: tecnologías de tratamiento y potencial de reutilización. *Quimosfera*, 293(1).
- Umbarila, O. M. F. J. S. P. R. N. A. V., Abril de 2019. Tratamiento a aguas residuales utilizando los Procesos de Oxidación Avanzada: Ozono. *Revista Facultad de Ingeniería*, 28(51), pp. 25-38.
- Valencia, J. A., 2000. *Teoría y práctica de la purificación del agua*. Tercera ed. Colombia: McGraw-Hill.
- Valenzuela, S. C. C., 28 de Septiembre de 2018. Tratamiento de degradación de contaminantes por Proceso de Oxidación Avanzada : Peróxido de hidrógeno y Ozono . En: s.l.:Quito, p. 345.

Velázquez, C. L. D. J. I. A. O. S. A. C. S. ., G. P. C. ., C. P. y. M. E. P., 2022. Influencia de la contaminación del agua y el suelo en el desarrollo agrícola nacional e internacional. *Ciencias Químico-Biológicas*, 25(1), pp. 1-13.

Vidal, F. J. R., 2003. *Procesos de potabilización del agua e influencia de tratamiento de ozonización*. Primera ed. Madrid: s.n.

WPCF, A., 1992. *Metodos Normalizados para el Analisis de Aguas Potables y residuales*. España: Díaz de Santos, S.A..

Zaruma, A. P. E. J. B. P. N. I. C. H. H. I. S. A., 2018. Los Colorantes Textiles Industriales Y Tratamientos Óptimos De Sus Efluentes De Agua Residual. *Revista de la Facultad de Ciencias Químicas*, 19(1).

ANEXOS



UNIVERSIDAD JUÁREZ
AUTÓNOMA DE TABASCO

“ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE”



Otorga la presente

CONSTANCIA

A: *Bethsabet Jaramillo Sierra, Arlette Aketzali Acosta Diaz, Mario Ibañez Olvera y Antonio Mercado Cabrera*

Por haber obtenido el tercer lugar en el concurso de carteles, del nivel superior modalidad experimental, con el trabajo titulado **Degradación de rojo de metilo aplicando métodos de oxidación química**, en el marco del **5.º Congreso Internacional de Química, Sustentabilidad Energética y Ambiental Dr. Mario Molina Henríquez**, celebrado de manera virtual a través de la plataforma Microsoft Teams®, del 2 al 6 de diciembre de 2024.

Cunduacán, Tabasco, 05 de diciembre de 2024.

Dra. Hermicenda Pérez Vidal
Directora



DIVISIÓN ACADÉMICA DE
CIENCIAS BÁSICAS