



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS

LICENCIATURA EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

**EFFECTO EN LA DECOLORACIÓN DEL PIGMENTO VERDE AZUL
DORACRYL (CLORURO DE DIETIL AMONIO) EN SOLUCIÓN ACUOSA,
TRAS LA EXPOSICIÓN ANTE UN PLASMA NO TÉRMICO AIRE – AGUA A
BAJA PRESIÓN.**

T E S I S

**PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO INDUSTRIAL**

**PRESENTA:
BARTOLO YAÑEZ CARRILLO**

Director: Dr. Fidel Benjamín Alarcón Hernández.

Codirectora: Dra. María del Carmen Fuentes Albarrán.

Codirector: Dr. José Luis Gadea Pacheco



AYALA, MORELOS

JUNIO 2021



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS



Asunto: Voto Aprobatorio

DRA. JOSEFINA VERGARA SÁNCHEZ
DIRECTORA DE LA EESX
P R E S E N T E

Por medio del presente, los revisores de la tesis que lleva por título **EFEECTO EN LA DECOLORACIÓN DEL PIGMENTO VERDE AZUL DORACRYL (CLORURO DE DIETIL AMONIO) EN SOLUCIÓN ACUOSA, TRAS LA EXPOSICIÓN ANTE UN PLASMA NO TÉRMICO AIRE-AGUA A BAJA PRESIÓN.** Que ha realizado el pasante **Bartolo Yañez Carrillo** de la Licenciatura en **Ingeniería Industrial**, otorgamos el **voto aprobatorio** para la impresión de la Tesis, por haberse realizado las correcciones consideradas pertinentes de nuestra parte:

Nombre	Puesto	Firma
Dr. Fidel Benjamín Alarcón Hernández	Director	_____
Dra. María del Carmen Fuentes Albarrán	Co directora	_____
Dr. José Luis Gadea Pacheco	Co director	_____
Dr. Esteban Montiel Palacios	Revisor	_____
M. en C. Eréndira Salgado Baza	Revisora	_____

Atentamente
Por una humanidad culta
Una universidad de excelencia

C.c.e. Bartolo Yañez Carrillo Para su conocimiento.
Archivo.

Se expide el presente documento firmado electrónicamente de conformidad con el ACUERDO GENERAL PARA LA CONTINUIDAD DEL FUNCIONAMIENTO DE LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS DURANTE LA EMERGENCIA SANITARIA PROVOCADA POR EL VIRUS SARS-COV2 (COVID-19) emitido el 27 de abril del 2020.

El presente documento cuenta con la firma electrónica UAEM del funcionario universitario competente, amparada por un certificado vigente a la fecha de su elaboración y es válido de conformidad con los LINEAMIENTOS EN MATERIA DE FIRMA ELECTRÓNICA PARA LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE ESTADO DE MORELOS emitidos el 13 de noviembre del 2019 mediante circular No. 32.

Sello electrónico

FIDEL BENJAMIN ALARCON HERNANDEZ | Fecha:2021-03-25 07:24:03 | Firmante

UJ3OM7xafjJauf2sCznvcoxQqkF1+R8E+ZHJ2GNVUkAgUuj7l+MNRNumBOqo3QfidbMr7Xe+3WIEEnOu444d5cwa7p3as0TY9pX2R+1I5O4I9/7AN5InniwifIPsera5BCnVap2k2/ncp
kEKsUYtSqUnFqcBYN797mBuBBIRhMY4cnbbOZ2DxbL3XnoUSBp1r9GhFHIRw/DnL+KCp3YduxBaZ78ce17xij7Zu6bD0pT15ig6ccPijXMpmKn0FGLa+eHhJyntTPKE2NU8WJ/3
Z2MfP1aIKR626Vv83gslbc+WYc+8jruyJ7B3xusfo1SSkVIW2KkCxS7JG6Qv2rNg==

MARIA DEL CARMEN FUENTES ALBARRAN | Fecha:2021-03-25 10:52:10 | Firmante

d59cvAp+NYE9kZ9JWYmAQqIhBKPdNB4uoy3lfc9uFwSvOnBiF1W3jn36dLDEmxQeCjqGrk5QsJ4YcmYHyQ2VwfhKU5CG6eMin6WYm3UTEWM+ZmWQFIOwpWytBZTtW9hi
+G+ei9nPafk4QL1CcBMv/B0s1Tlud+aBiLydC4UNIEjU0HQVKEeHcKyH+47kcz9DpQqtHoyGVdUktXRWt+GdHgd/Ywt4rMLmgpekopNmrZQVF8OKADMYFtPK/4CL3SP1wP8UI
WAv9yBYH6S2wmH7JAYnVeST9Lk12Y1NAQIRIUFBUEXX5RScAJhA4XC/ygickIUlp4wllWO5QhHSA==

ESTEBAN MONTIEL PALACIOS | Fecha:2021-03-25 11:07:14 | Firmante

FfIk7HLVjY+eTqL/EAUpk6pGqs6SLzqpvmhwHPCisDWGUdWX8gFSTCQ47wvp4M1t8jeC0Y12AyzPSUyPNVj5G4jyR0lg+87qA5vIvG42MwpWJ1DLppmkg2BKYfLrZaQk/L3x7v
D/wB/Eb9FWLaTeXuYG5wSaVTy799M0h7jnbOoZm/r1Del2ITaemu/7lPGfVifbKWE3wozpU0I94eXiim02pp8HAIHNxBKLdEGQtVRRtXfVRtETF11FcykiWCqItXZ5iGmShVUn+R
Uk7vne49OfES1+oLvcNjntMlwjQi5Fd+mA77mZKBmTYLUVf3KmjIRKpm9KUIInbBTgSLRQ==

JOSE LUIS GADEA PACHECO | Fecha:2021-03-25 18:00:51 | Firmante

KoS8kbLz2WnDXjgHLCw1pCA8x7AwAHMZzW0uQFKC++iKb8Y4rF4BC5pisp973solL4CEKKBtFODQZTvtSF7TJdQL/kMBpBP9XKqLTxM/ARbJhLSQ9i6lLi685gxno2tzPKT
DGVJNxb02pZyvy77+OFaAHhevgLxwpNzZUBf4C2ebA+0B1D42qN1FTpyMgkXEKxUlaXF/tV6BNzrWqVMTOVWiqvHbJFrB403vdCQmp70NIPAJlkXQVDSWJp++92/XHayyer2
WuW3DCy5oCQLarLmy1RZrifi9GuMz1keAAal6TDV5iqk4DDhms3NbcHedgsHD7yH60yN8m69yw==

ERENDIRA SALGADO BAZA | Fecha:2021-05-03 11:24:21 | Firmante

XYzBBnwaHEc/WWW22SoTG9kh0NxYqb1jxeMVDPe8gYBKkiYl+/+JkV2VMqh7P+m8Dc8o/j1ijgYq0d77enGcl6XO8gv6PwZXF5u/BDjwHPzabIMvhHJruDrbnZneEkSdYOUaeoH
ydM8eldpCq+P8DKu9p4Jrri4M8OJ8oFkQ0zwnOWFOBvbjkuYvdrEfrbrNKzAi/AWjkCXq7887LP/tzWa4pz97WzuTIEtB8SfXZs+h0K2T8YwhT80DezXA3qxlcp9K4qWdKlInXyIDYX
UlkdB/QOypBV17x3YMMQCbavtLjAW+VqyrdoyTPcLV5TYyxxFXT+aHLXFjwPxuccg==

Puede verificar la autenticidad del documento en la siguiente dirección electrónica o
escaneando el código QR ingresando la siguiente clave:



8HjdqS

<https://efirma.uaem.mx/noRepudio/buoWo9uVi0UmnRZbBPK0ZtC5m6dVxlGg>

DEDICATORIA

A toda mi **FAMILIA**, en especial a mis **PADRES** por todo el apoyo moral y económico; les agradezco sus consejos que me inspiraron a seguir este camino profesional, gracias por su apoyo que me brindaron a pesar de las adversidades, les agradezco su compromiso con mi formación profesional.

A mis **HERMANOS** que siempre estuvieron apoyándome en cada momento.

A mis **MAESTROS** que contribuyeron a mi formación profesional, gracias por forjar la disciplina y el conocimiento en mi persona.

A cada una de aquellas **PERSONAS** que creyeron en **MÍ**, y que estuvieron siempre presentes en todo momento brindándome su apoyo incondicional.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a **DIOS** por darme sabiduría y fuerza.

Agradezco a la Universidad Autónoma del Estado de Morelos por abrirme las puertas para emprender el camino del conocimiento.

Agradezco a la Escuela de Estudios Superiores de Xalostoc, por brindarme el camino para formarme como un profesionalista a través del conocimiento y la disciplina, la constancia y perseverancia.

Agradezco al director de tesis Dr. Fidel Benjamín Alarcón Hernández, por apoyarme a realizar este trabajo de investigación. Gracias por inculcar en mí a participar en el desarrollo de nuevo conocimiento a través de la investigación.

A los revisores que, con su juicio profesional, evaluaron mi tesis de manera asertiva. Gracias por su tiempo que dedicaron en mi trabajo de investigación.

GRACIAS a cada una de las personas que de manera directa o indirecta participaron en este trabajo de investigación.

Índice

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.....	10
1.1. Estructura del trabajo.....	13
1.2. Hipótesis.....	14
1.3. Objetivos.....	14
1.3.1. Objetivo general.....	14
1.3.2. Objetivos particulares.....	14
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO.....	16
2.1. Plasma.....	16
2.1.1. Características.....	17
2.1.2. Tipos de plasmas.....	18
2.2. Generalidades del colorante en la industria.....	20
2.2.1 Colorante.....	21
2.2.2 Clasificación.....	22
2.3. Proceso Avanzados de Oxidación (PAOs).....	32
2.3.1. Procesos Fotoquímicos.....	35
2.3.2. Procesos No Fotoquímicos.....	36
2.3.3. Ventajas de los Proceso Avanzados de Oxidación (PAOs).....	38
2.4. Tratamientos de aguas residuales.....	39
2.4.1 Tipos de tratamientos de aguas residuales.....	39
2.5. Indicadores de la calidad del agua.....	45
2.5.1. Potencial de hidrogeno (pH).....	45
2.5.2. Demanda química de oxígeno (DQO).....	46
2.5.3. Espectro de absorción.....	47
2.5.4. Curva de calibración.....	49
2.5.5. Bioensayo de toxicidad.....	50
CAPÍTULO 3. DESARROLLO EXPERIMENTAL.....	52
3.1 Solución del Verde Azul Doracryl.....	52
3.2. Dispositivo experimental.....	53

3.3. Exposición de la solución acuosa del colorante Verde Azul Doracryl X5GS 200% al plasma no térmico a baja presión	54
3.4. Muestreo	56
3.5 Determinación de la temperatura	58
3.6. Parámetros de calidad del agua.....	58
3.6.1. Determinación del potencial de hidrógeno pH.....	59
3.6.2 Absorbancia.....	60
3.6.3 Bioensayo con semillas de lechuga (<i>Lactuca sativa</i>).....	62
CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y CONCLUSIÓN.....	65
4.1. Absorbancia.....	65
4.2. Potencial de hidrógeno (pH)	67
4.3. Ensayo toxicológico con semillas de lechuga (<i>Lactuca sativa</i>) en solución de colorante Verde Azul Doracryl (cloruro de dietil amonio), expuesta ante un plasma no térmico aire-agua a baja presión	70
4.4. Ensayo toxicológico con semillas de lechuga (<i>Lactuca sativa</i>) en solución de colorante Verde Azul Doracryl (cloruro de dietil amonio), expuesta ante un plasma físico aire-agua a presión atmosférica	72
CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES.....	75
Referencias	78

Índice de figuras

Figura 2.1. Estructura química del colorante Índigo (C ₁₆ H ₁₀ N ₂ O ₂).	22
Figura 2.2. Diagrama de las etapas del tratamiento de las aguas residuales. (Colombia, 2015)	44
Figura 2.3. Representación del espectro de absorción de dos compuestos distintos.	49
Figura 3.1 Solución acuosa colorante Verde Azul Doracryl	52
Figura 3.2 Sistema y Diseño experimental.....	53
Figura 3.3. Exposición del colorante Verde Azul Doracryl ante el plasma no térmico a baja presión.	56
Figura 3.4 Toma de muestras de la solución tras ser expuesta ante el plasma no térmico a baja presión por un tiempo determinado.	58
Figura 3.5. Se vierte solución acuosa en la caja Petri, para la prueba de germinación de semillas de lechuga.	63
Figura 3.6. Colocación de las cajas Petri (pruebas de bioensayo), en un recipiente oscuro, evitar contacto con rayos de luz.....	64
Figura 4.1. Comportamiento del valor de la absorbancia del pigmento Verde Azul Doracryl en solución acuosa tras su exposición a un plasma a baja presión y a presión atmosférica en función del tiempo.	66
Figura 4.2. Comportamiento del pH de la solución acuosa ante el plasma no térmico aire – agua a presión atmosférica y baja presión.	68
Figura 4.3 Porcentaje de germinación de la semilla de lechuga <i>Lactuca sativa</i> expuesta a la solución del pigmento Verde Azul Doracryl ante el plasma no térmico aire-agua a baja presión. Control (-) agua destilada, Control positivo (+) solución acuosa Verde Azul Doracryl sin tratamiento.	70
Figura 4.4. Porcentaje de germinación de semillas de lechuga (<i>Lactuca sativa</i>), en solución acuosa ante un plasma físico aire-agua a presión atmosférica.	73

Índice de tablas

Tabla 2.1. Clasificación de los colorantes por su estructura química.	24
Tabla 2.2. Clasificación de los colorantes según su método de aplicación.	30
Tabla 2.3. Potenciales de oxidación de distintas especies, agentes oxidantes.	33
Tabla 2.4. Comparación de las constantes de velocidad (k en $L mol^{-1} s^{-1}$) del radical hidroxilo con el ozono.....	34
Tabla 3.1 Parámetros para cada tratamiento del sistema experimental. .	54

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

Actualmente la sociedad enfrenta un gran problema en temas de seguridad ambiental, debido a los altos consumos de productos y subproductos que generan residuos contaminantes en sus tres tipos diferentes, como los son residuos sólidos, residuos líquidos y residuos gaseosos, todos éstos repercuten e impactan a los recursos naturales de una u otra forma afectan la estabilidad ambiental.

Desde el punto de vista ambiental y la salud pública, el manejo adecuado de los residuos en las etapas que siguen a su generación permite mitigar los impactos negativos, sobre el ambiente, la salud y reducir la presión sobre los recursos naturales.

La generación de residuos está íntimamente ligada con el proceso de urbanización y crecimiento económico, debido a que la población incrementa su poder adquisitivo lo que conlleva a un alto consumo de bienes y servicios manufacturados.

El agua es un recurso que ha venido solventando las necesidades de la humanidad, utilizándola para las diferentes actividades cotidianas. Este recurso se puede obtener de forma relativamente pura en diferentes fuentes naturales, y se retorna a sus cauces con un cierto grado de contaminación. Debido al crecimiento de la población y el mal uso de esta, actualmente se ha convertido en una prioridad desarrollar mecanismos que ayuden a mitigar el impacto.

En países que se encuentran en desarrollo, aproximadamente el 90 % de aguas residuales se descargan sin tratamiento a diferentes cuerpos de agua y aproximadamente 2 millones de toneladas de residuos industriales, domésticos y agrícolas, son desechados de igual forma en ríos y canales.

La industria textil es uno de los sectores más importantes en México, pero sin embargo, es una de las principales fuentes de contaminación del agua, las aguas residuales que se generan de este sector industrial, contiene un alto contenido de contaminantes peligrosos, por el uso de colorantes y pigmentos sintéticos y artificiales, que son implementados en los

procesos textiles, éstas son algunas de tantas sustancias químicas, que se desechan inmersas en las aguas residuales, dejando como consecuencia un deterioro del entorno.

Los colorantes tienen diferentes orígenes y aplicaciones, en la actualidad los más utilizados son los sintéticos, estos no son biodegradables en el medio ambiente, por tal motivo se consideran recalcitrantes, a estas sustancias se les debe aplicar procesos adecuados para degradarlos de las aguas residuales de manera efectiva, antes de desecharlos a un cuerpo receptor natural. (Zaruma, 2018)

La industria textil es la mayor consumidora de colorantes sintéticos a nivel global. Se estima que se encuentran disponibles en el mercado alrededor de 10, 000 tipos de colorantes de los cuales se producen aproximadamente 700,000 toneladas. (Anon., s.f.)

Se calcula que hasta el 50% de los colorantes utilizados en la industria textil terminan en las aguas descargadas por este sector industrial, debido a su bajo grado de fijación en la tela.

En la Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales y la Norma Oficial Mexicana NOM-002-SEMARNAT-1996 establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal con el fin de prevenir y controlar la contaminación de las aguas y bienes nacionales. Éstas son algunas de las normas oficiales, que se encargan de regularizar las descargas de las aguas residuales que genera el sector industrial. (Diario Oficial de la Federación)

Teniendo en cuenta todos los aspectos negativos, en los últimos años se ha visto la necesidad de desarrollar, adaptar, mejorar e implementar nuevos y mejores mecanismos para eliminar las sustancias químicas que se encuentran en las aguas residuales, entre estos nuevos métodos se encuentran, los plasmas que no solo alcanzan importantes resultados industriales, sino que también son muy eficientes y efectivos, debido a que pueden alcanzar estos resultados y al mismo tiempo, reducir los costos de producción al no generar productos indeseables, materiales de desecho, residuos tóxicos ni contaminantes al ambiente.

Los plasmas ofrecen dos características importantes para las aplicaciones industriales, una de ellas es que pueden obtenerse temperaturas y densidades de energía mucho mayores que las alcanzadas por medios químicos u otros conocidos y pueden producir especies reactivas energéticas como rayos ultravioletas, luz visible, partículas cargadas, radicales libres, átomos reactivos, estados atómicos excitados y fragmentos moleculares reactivos, que permiten cambios físicos o químicos que serían muy difíciles de alcanzar a través de reacciones químicas ordinarias.

Hoy en día es necesario el desarrollo de mejores tecnologías, capaces de descontaminar el agua, que deben integrar el compromiso entre alta eficacia, enfocado a contaminantes complejos y refractarios y bajos costos de tratamientos, principalmente en países en desarrollo y emergentes. Las tecnologías de oxidación avanzada (OAPs-Advanced Oxidation Processes), en la actualidad se están consolidando como una de las tecnologías más eficaces y versátiles en el tratamiento de efluentes contaminados.

En este trabajo de investigación, se muestran los efectos observados en la decoloración del pigmento Verde Azul Doracryl en solución acuosa, expuesto ante un plasma no térmico aire-agua a baja presión, y se evalúan los cambios obtenidos con este método para remover este tipo de agentes tóxicos.

1.1. Estructura del trabajo

La estructura y procedimientos de esta investigación experimental se describe a continuación.

- Capítulo 1. Introducción. En este apartado se sustentan los propósitos generales del trabajo de investigación, que a continuación se desarrolla con más detalle, se presenta el objetivo general, objetivos particulares, y la hipótesis de la cual se parte.
- Capítulo 2. Marco Teórico. Se presenta la contextualización teórica del mecanismo, se plasman los fundamentos básicos necesarios para llevar a cabo este trabajo adecuadamente conforme los objetivos planteados.
- Capítulo 3. Desarrollo experimental. Se muestra la metodología implementada para llevar a cabo este proyecto, se presentan los materiales, insumos y equipos utilizados, preparación de la solución acuosa, tiempo de exposición al plasma, método de muestreo para extraer la solución y realizar las pruebas correspondientes conforme lo marcan los objetivos específicos.
- Capítulo 4. Resultados y discusión. Presentación de los resultados obtenidos, de las pruebas realizadas durante el proceso de experimentación, se procesan los datos en gráficos representativos, se analizan los comportamientos y se procede a la discusión del tema.
- Capítulo 5. Conclusiones. Se emiten las conclusiones más representativas obtenidas de todo el desarrollo del proyecto de investigación que se llevó a cabo.

1.2. Hipótesis

El número de moléculas de aire (presión interna del sistema) presentes en la exposición del pigmento Verde Azul Doracryl (Cloruro de dietil amonio) en solución acuosa ante un plasma no térmico aire-agua a baja presión, modifica la rapidez de decoloración del compuesto en estudio.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Determinar los cambios generados respecto de la absorbancia en una solución acuosa del pigmento Verde Azul Doracryl (Cloruro de Dietil Amonio), tras su exposición a un plasma no térmico aire-agua a baja presión.

1.3.2. Objetivos particulares

- Construir un dispositivo experimental con electrodos de tungsteno en el cual se pueda generar un plasma no térmico aire-agua a baja presión dentro de la solución de estudio, y que permita la eficiente toma de muestras para analizar.
- Exponer durante un tiempo específico ante el plasma no térmico aire-agua a baja presión, la solución acuosa del colorante. Realizar este proceso para diferentes potencias del plasma.

- Observar y cuantificar el efecto que tiene el plasma aire-agua a baja presión en el cambio de la absorbancia del colorante como función del tiempo, de la potencia del plasma y de la presión a la que se expone la solución de interés al plasma.

CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO

2.1. Plasma

Humphy Davy desarrolló la descarga de arco eléctrico en estado estable usando corriente directa en el año 1808; el tubo de descarga eléctrica de alto voltaje con corriente directa fue desarrollado por Michael Faraday en 1830. William Crookes identificó a este tipo de sustancia como un cuarto estado de la materia en 1879. (SOTELO, s.f.)

El plasma fue introducido por primera vez por Irving Langmuir (1928), el plasma era conocido como una mezcla de electrones, iones, átomos, y neutrones con la propiedad de casi neutralidad eléctrica con una sensibilidad apreciable a la presencia de campos eléctricos y magnéticos (Pacheco, 2009) y representa aproximadamente el 98% de la materia del universo. La primera aplicación práctica del plasma fue para realizar polimerización del estireno llevado a cabo por Goodman en 1960. Entre las primeras aplicaciones del plasma a nivel industrial se encuentran el corte, la soldadura y la síntesis de partículas ultrafinas esferoidización e iluminación (Francisco J. Gordillo Vázquez IAA-CSIC).

El plasma puede existir en un amplio intervalo de temperatura, es decir, a temperatura ambiente como la luz fluorescente de un tubo hasta millones de grados Celsius como en el interior del sol.

El plasma se encuentra ionizado, es decir, compuesto por partículas con cargas eléctricas positivas y negativas, que forman un gas de carga eléctrica total nula que presenta un comportamiento colectivo debido a las interacciones eléctricas simultáneas entre las partículas. (SOTELO, s.f.)

2.1.1. Características

El plasma presenta diferentes características que lo distinguen como el cuarto estado de la materia en el universo.

- Los plasmas son buenos conductores eléctricos y térmicos debido al gran movimiento de los electrones.
- Capacidad de permitir la propagación y transmisión de ondas electrostáticas y electromagnéticas en una gran diversidad.
- Los plasmas son buenos emisores de radiación en un espectro muy amplio. Esta capacidad de emitir radiación constituye una propiedad importante que permite sondearlo para conocer sus propiedades y establecer un diagnóstico de los parámetros que lo caracterizan como, densidad y temperaturas de los iones, electrones y neutrones que lo componen, frecuencias de oscilación y espesor óptico.
- El aspecto fundamental que distingue el plasma del resto de los estados de la materia es, que cada partícula cargada actúa simultáneamente con un número considerable de partículas cargadas vecinas, de esta manera se forma un comportamiento colectivo, gracias a que el campo coulombiano de cada carga no alcanza al ser bloqueado por el campo coulombiano de cargas de signo opuesto (SOTELO, s.f.).

2.1.2. Tipos de plasmas

El fundamento de la producción de plasma es aportar energía térmica, mecánica o eléctrica a un gas para provocar su ionización, dependiendo de la cantidad de energía transferida al gas se obtiene plasma térmico o no térmico.

Los plasmas producidos por descargas eléctricas son divididos en las siguientes dos categorías. Plasmas térmicos y plasmas no térmicos.

Plasma térmico

El plasma térmico es uno de los procesos que superan la barrera de los 3,000 °C, por lo que la capacidad de transferencia de energía se multiplica enormemente en función de gas plasmágeno utilizado, además es una fuente rica en radiación, con un espectro muy amplio (incluye radiación ultravioleta e infrarroja). Se categoriza por su alta densidad de energía y la igualdad de la temperatura entre las partículas pesadas y los electrones (Ruvalcaba, 2014).

El estado termodinámico del plasma se aproxima al equilibrio termodinámico local (ETL), la existencia del equilibrio cinético, y la existencia del equilibrio químico o composición son características muy importantes en el ETL. Los plasmas térmicos pueden ser producidos por arcos transferidos en corriente directa y antorcha de plasma o por descargas de radio frecuencia (RF) acopladas inductivamente. Estos plasmas operan a corrientes típicas entre 10 a 1000 A (A = Amper), y requieren altas temperaturas para mantener la conductividad eléctrica para la ionización térmica. Este tipo de plasmas es utilizado en la degradación de residuos peligrosos (Ruvalcaba, 2014).

Este tipo de plasmas se emplea donde se requiere altas temperaturas, como lo son en procesos de fundición en la industria metalúrgica, en la incineración de residuos, o como medio activo para procesos de síntesis química, producción de acetileno a partir de gas natural. Alvarez-Ordóñez A., Teagasc Food Research Centre de Cork (Irlanda) Tamara Calvo, Prieto M., González-Raurich M. y López M. del departamento de Higiene y Tecnología de los Alimentos de la Universidad de León. (19/01/2015). (<https://www.interempresas.net/Alimentaria/Articulos/131487-Tecnologias-emergentes-de-conservacion-de-los-alimentos-plasma-atmosferico-no-termico.html>).

Plasma no térmico

El plasma no térmico existe desde hace mucho tiempo, fue observado en un laboratorio desde hace más de ciento cincuenta años, este tuvo fama por producir ozono a partir de aire y agua. Este tipo de plasma ha recibido nombres como descarga de barrera dieléctrica, corona de barrera dieléctrica, plasma de descarga silenciosa, corona de energía alta, plasma de haz electrónico, destrucción de corona, oxidación electrocatalítica entre otros nombres más que se le han atribuido (Lindo Cox, 2005).

La generación de plasma se lleva a cabo mediante la aplicación de un campo eléctrico o electromagnético a un gas, en la que los electrones libres toman la energía del campo lo que produce su aceleración hasta que su energía se eleva lo suficiente para ionizar los átomos o las moléculas del gas con las que colisionan, liberando más electrones que provocan a su vez más ionizaciones. Los electrones con energía adecuada producen disociación molecular, formando átomos y radicales libres, siendo, asimismo, capaces de excitar átomos y moléculas a niveles superiores de energía que, al retornar al estado más estable, emiten el exceso de energía en forma de radiaciones electromagnéticas de amplio espectro e incluyendo radiaciones en el rango ultravioleta.

El plasma está constituido por moléculas y átomos en estado excitado o estado normal, iones positivos y negativos, radicales libre, electrones y radiación ultravioleta, y en presencia de gases como oxígeno y nitrógeno, en esta mezcla también se encuentran presentes especies reactivas de oxígeno y nitrógeno tales como ozono, superóxido, radical hidroxilo, oxígeno singlete, oxígeno atómico, óxido nítrico, dióxido de nitrógeno, con capacidad de inactivar una amplia gama de microorganismos, como lo son bacterias, mohos, levaduras, esporos, incluso virus, priones y parásitos. (Klämpfl y col., 2012; Hayashi y col., 2013; Alkawareek y col., 2014; Mai-Prochnowa y col., 2014).

2.2. Generalidades del colorante en la industria

Se desconoce el año en que el hombre dio inicio al uso del teñido en su vestimenta, pero existen escritos en China, que abarcan de 2600 a.C. En esta época obtenían los colorantes por medio de plantas e insectos, este trabajo tradicional paso de generación en generación hasta convertirse en un campo muy importante en el sector industrial.

Los colorantes utilizados en la industria textil tienen diferentes orígenes y aplicaciones, en los últimos años se han utilizado con mayor frecuencia los de origen sintético, este tipo de colorante no es biodegradable en el medio ambiente; por tal motivo se han buscado alternativas para eliminarlos, debido a su toxicidad son contaminantes recalcitrantes a la degradación biológica. A las sustancias contaminantes de este tipo se les debe aplicar un tratamiento especial para ser eliminadas de las aguas residuales y puedan ser vertidas en los cuerpos receptores sin riesgo de dañar a la vida acuática.

2.2.1 Colorante

Los colorantes son conocidas como anilinas, estas son sustancias solubles en agua o disolventes en el medio en el que se aplican, son retenidos en el substrato por absorción retención mecánica o por enlace iónico o covalente, adhiriéndose a la fibra por medio de un anillo aromático acoplado con una cadena lateral, la cual es necesaria para generar resonancia. Las estructuras de resonancia causan el desplazamiento o aparición de bandas de absorción en el espectro visible los cuales son por lo tanto responsables del color. (H. Panda, Niir Project Consultancy Services, (2013).

Los colorantes están diseñados para tener un enlace fuerte con las moléculas del polímero que constituye la fibra textil. La correlación que existe entre la estructura química con el color se ha realizado en la síntesis del colorante mediante el uso de un cromógeno-cromóforo con un auxócromo. El cromógeno es una estructura aromática que contiene anillos de benceno, naftaleno y antraceno. El grupo cromóforo es el que se encarga de dar el color y se puede representar por los siguientes radicales, los cuales forman una base de la clasificación química de los colorantes.

- Azo ($-- N = N --$)
- Carbonilo ($> C = O$)
- Carbón-Carbono ($> C = C <$)
- Carbunitrógeno ($> C=NH$ o $- CH=N-$)
- Nitroso ($--NO$ o $N-OH$)
- Nitro ($--NO$ o $=NO-H$)
- Azufre ($>C=S$)

2.2.2 Clasificación

En la actualidad existen una gran cantidad de colorantes comerciales en el mercado global, a los cuales el ser humano se ha dado a la tarea categorizarlos de acuerdo con sus características únicas que los distinguen en cada grupo.

❖ Colorantes naturales

Los colorantes naturales, como bien lo dice su nombre “natural” son de origen natural, se obtienen de plantas y resinas. Uno de estos colorantes es el Índigo que se creó en la India y se expandió por Europa. Este colorante proviene de una gran variedad de plantas y presenta un color azul característico.

El colorante Índigo se utiliza principalmente para teñir vestimenta de algodón y mezclilla, debido a su solidez, resistencia a la luz, resistencia al lavado y a los ácidos. En la siguiente Figura 2.1. se muestra la estructura química del colorante índigo.

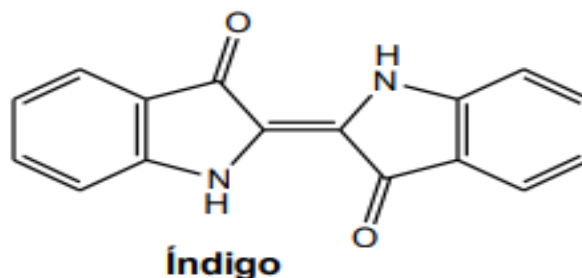


Figura 2.1. Estructura química del colorante Índigo (C₁₆H₁₀N₂O₂).

Los colorantes naturales pueden clasificarse según sus características físicas en.

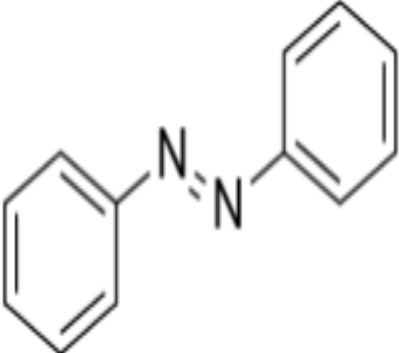
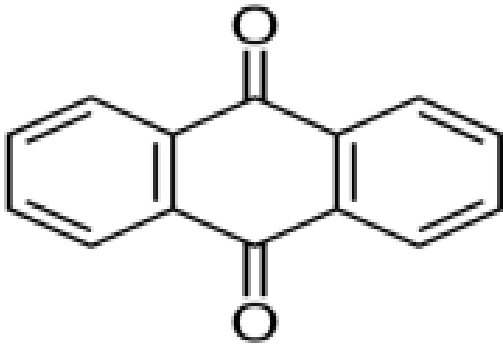
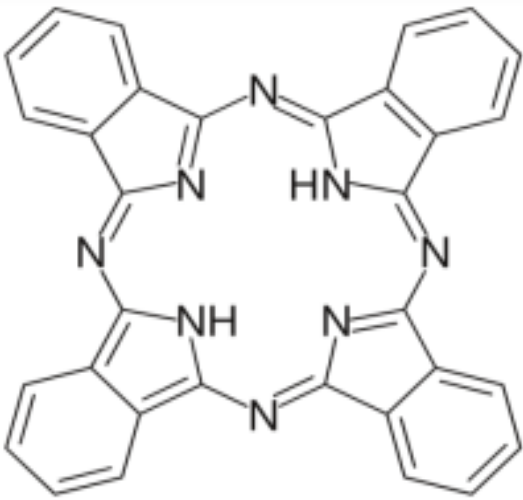
1. **Colorantes directos:** Son los grupos de colorantes antocianina, carotinoide derivado de calcona. Se usan para teñir o pintar en frío o en caliente.
2. **Mordentados:** Por sí solos no tienen el poder de teñir, solo con un tratamiento especial de sales metálicas solubles que reaccionan sobre la fibra.
3. **Tipo de reducción:** Derivados de indol, este material se encuentra en el interior de los vegetales o animales, pero son compuestos insolubles, para darles solubilidad, se les aplica una sustancia reductora, obteniéndose una solución incolora que se aplica a la fibra, en la cual, mediante una oxidación, aparece el color.
4. **Pigmentos:** Polvos de materiales minerales, son insolubles que no pueden teñir por sí solos, pueden mezclarse con resina, caseína, en grupo, etc. (L.V. Gonzalez, 2008).

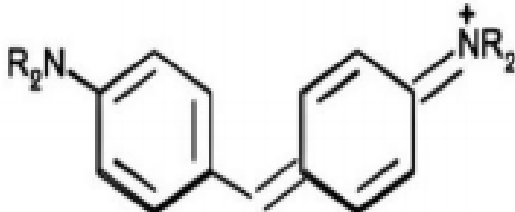
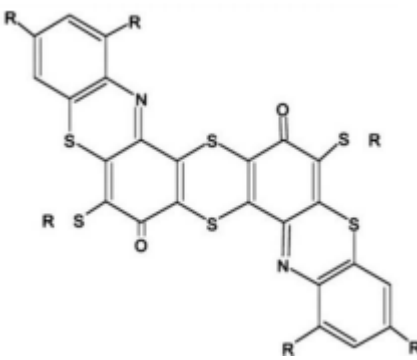
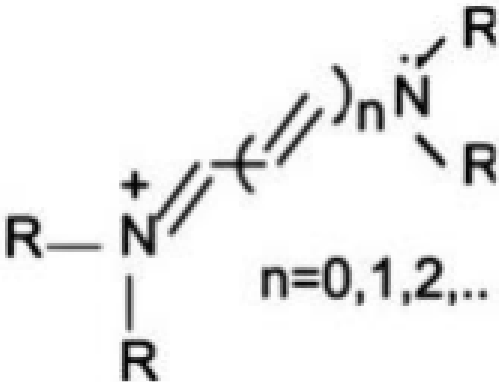
Estos compuestos, en general, pueden clasificarse de las siguientes maneras.

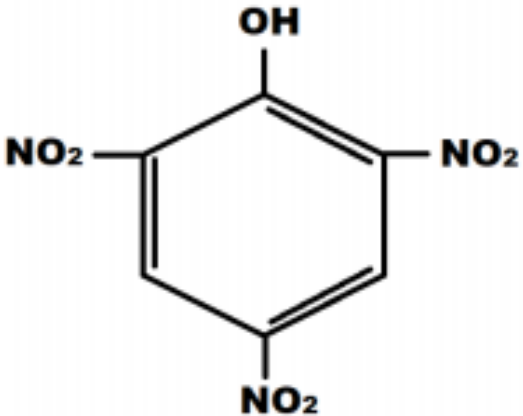
❖ **Colorantes por estructura química**

En la Tabla 2.1. se muestra la clasificación de los colorantes utilizados en la industria textil según su estructura química (grupo cromóforo característico).

Tabla 2.1. Clasificación de los colorantes por su estructura química.

Familia	Grupo cromóforo	Descripción
Azoicos		<p>Este grupo de colorantes es el más importante dentro de la industria textil con una producción aproximada del 70 % de los colorantes orgánicos del mercado.</p>
Antraquinonas		<p>Son quinonas tricíclicas derivadas del antraceno que a menudo contienen uno o más grupos hidroxilo.</p>
Ftalocianina		<p>Estos colorantes están formados por la unión de 4 grupos isoindol (dos anillos fusionados, uno bencénico, y el otro, una piridina) mediante cuatro átomos de nitrógeno, dando lugar a un anillo de 16 átomos: ocho de nitrógeno y ocho de carbono, alternados</p>

		con dobles enlaces conjugados.
Ion arilcarbonio		Su estructura química está conformada por un átomo de carbonilo unido a dos o tres anillos aromáticos.
Sulfuro		Grupo de colorantes totalmente insolubles en agua, pero solubilizable por reducción. Proporciona una gama de colores bajos y apagados
Polimetino	 <p style="text-align: center;">$n=0,1,2,\dots$</p>	Se clasifican en tintes neutros, catiónicos y aniónicos. En los extremos de su cadena poseen un grupo donador y un sustractor de densidad electrónica.

Nitro		<p>Son un grupo de colorantes incoloros cuando se encuentran aislados. Su absorción se encuentra muy cerca del campo visible por combinación de grupos auxocromos débiles, adquiriendo una tonalidad amarillenta.</p>
-------	---	---

Los colorantes más utilizados por la industria textil son los del grupo azo o azoicos, que se distinguen por su doble enlace entre átomos de nitrógeno. Estos colorantes al igual que los sintéticos son poco biodegradables, se han realizado diferentes estudios para determinar las condiciones en las que puedan ser biodegradables. Se ha encontrado y demostrado que algunos de estos compuestos son cancerígenos y mutagénicos (L.V. Gonzalez, 2008).

❖ Colorantes por método de aplicación

Esta clasificación de los colorantes se basa en las técnicas utilizadas para fijar el colorante en la vestimenta, la cual depende de la estructura química del material a teñir y de las sustancias cromogénicas. Algunos mecanismos de transferencia y adhesión son la formación de puentes de hidrogeno, la insolubilización, la formación de soluciones sólidas, la formación de enlaces salinos y enlaces covalentes.

- **Colorantes directos**

Son los colorantes que tiene grupos polares ($\text{RHN}_3^+\text{RSO}_3$, etc), se aplican directamente a la solución y se adhieren a las fibras por interacción electrostática o por la formación de sales. Comúnmente se conocen como directos a los colorantes aniónicos que tienen especial afinidad por fibras celulósicas.

- **Colorantes ácidos**

Son las sustancias aniónicas solubles en agua que contiene grupos ácidos SO_3H , CO_2H , NO_2 , OH (fenólicos) y éstos pueden teñir fibras con grupos básicos como la seda, la lana, la poliamida, fijándose por formación de sales.

- **Colorantes básicos**

Los catiónicos solubles en agua con grupos básicos como NHMe_2^+ , NH_2Me_2^+ , NMe_2 , NH_2 ; tienen afinidad con los grupos ácidos de la lana seda, poliacrilonitrilo. Las fibras celulósicas pueden ser teñidas con básicos, pero para fijarlo es necesario pretratar la fibra con sustancias ácidas.

- **Colorantes sustantivos**

Tienen como grupos polares las sales sódicas, potásicas o de amonio de un sustituyente ácido sulfónico en la estructura molecular, también se conocen como colorantes directos, presentan estructuras alargadas que se adaptan paralelamente a fibras celulósicas (algodón o lino), en la cual se mantiene unidos por puentes de hidrógeno (colorantes directos simples). Se fijan a las fibras proteínicas (lana y seda) por adsorción y se mantienen unidas a ellas por fuerzas Van de Waals. Es necesario aplicar tratamientos para fijarlos sobre el tejido y así mejorar su solidez al lavado. Entre estos tratamientos se tienen:

- **Colorantes dispersos**

Éstos colorantes son poco solubles en agua, pero solubles en solventes orgánicos y/o en fibras no polares. Se aplican a partir de una suspensión acuosa (coloidal), con ayuda de agentes dispersantes, como jabones, la fibra extrae el colorante de la dispersión y forma una solución sólida. Éstos pueden ser de energía alta, media o baja; los colorantes de alta energía son resistentes a la sublimación, tienen baja velocidad de difusión en la fibra y requieren de altas temperaturas para su aplicación.

- **Colorantes transferidos**

Se usan en procesos en los cuales el color es transferido de un sustrato inerte (papel) que los contiene, el tejido por simple contacto, calentando la superficie del transferidor (papel) de modo que el colorante sublime y se adsorba sobre la fibra y luego se difunda en ella y forma una solución sólida. Se recomienda utilizar colorantes dispersos de media y baja energía. Es condicionante que el colorante sea volátil y al mismo tiempo debe ser soluble en la fibra.

- **Colorantes reactivos**

Estos colorantes poseen en su molécula un grupo reactivo que se une a la fibra mediante un enlace covalente formando ésteres o éteres. En éstos se aprovecha las funciones hidroxilo del algodón y de la lana o el grupo amino de la lana, seda y otras poliamidas. Estos grupos reactivos contiene halógenos que son sustituidos por las funciones OH y NH de la fibra.

- **Colorantes VAT**

Éstas son sustancias insolubles en agua, pero por reducción forman una sal soluble: compuesto leuco, incoloro o débilmente coloreado. Con la solución del compuesto leuco llamada tina (vat), se impregna en la fibra y una vez adsorbida la sal, aquella se expone al aire que re-oxida el colorante sobre la fibra y el cromógeno insoluble queda adherido. La característica estructural común de los colorantes VAT es un sistema quinoideo condensado.

- **Colorantes de azufre**

Son colorantes poliméricos insolubles en agua que contienen azufre como integrante del cromóforo o enlazando la cadena del polímero (-S-S-). Son utilizados para fibras celulósicas y se aplican en soluciones de forma reducida la cual una vez adsorbida por la fibra, es reoxidada por el aire u otro agente oxidante y el colorante insoluble queda adherido.

- **Colorantes de pigmentación: pigmentos**

Son sustancias insolubles tanto en agua como en la fibra a teñir. Se preparan por precipitación de un colorante sobre un sustrato inactivo como sales de aluminio, de estaño, material silíceo, talco, etc. El colorante utilizado en la preparación de un pigmento puede ser natural o sintético de los llamados colorantes de alquitrán. Los pigmentos son las sustancias más utilizadas por una gran variedad de materiales.

- **Abrillantadores y fluorescentes**

No son colorantes, pero éstos producen el efecto óptico del brillo porque adicionan la luz a los objetos que los contienen. Las sustancias absorben en las regiones no visibles (UV) y emiten en la visible, lo cual hace el efecto de blanqueo del objeto tratado con estas sustancias porque aumentan el rango de radiación emitida en el visible. Un exceso de abrillantador provoca las coloraciones violetas. (Marias, 1976)

En la Tabla 2.2. se categoriza el tipo de colorante, fibra en la que se fija y se adhiere el método de aplicación y el grupo cromóforo al que pertenece el colorante.

Tabla 2.2. Clasificación de los colorantes según su método de aplicación.

Tipo	Fibra	Método de aplicación	Grupos cromóforos
Ácidos	Nylon, lana, seda, papel, tintas y piel.	Normalmente para baños de tinte neutros o ácidos.	Azo, antraquinona, trifenilmetano, nitro y nitroso.
Básicos	Papel, poliacrilonitrilos, nylon, poliéster y seda.	Para baños de tintura básicos.	Azo, trimetilmetano y antraquinona.
Discretos	Algodón, rayón, piel y nylon.	Inmersión de la fibra en un baño con un	Azo

		electrolito. Forman enlaces puentes de hidrógeno.	
Dispersos	Poliéster, poliamida, acetato, acrílico y plásticos.	En forma de suspensión coloidal con altas temperaturas y presión. Unión del colorante por interacciones dipolares.	Azo, antraquinona y nitro.
Mordaz	Lana, piel y algodón.	Aplicado en conjunto con sales.	Azo y antraquinona.
Reactivos	Algodón, lana, seda y nylon.	Los grupos reactivos del colorante reaccionan con los grupos funcionales de la fibra para enlazarse covalentemente bajo la influencia de la temperatura y el pH.	Azo y antraquinona.
Al azufre	Algodón y rayón.	/se aplica en solución, en forma reducida, sobre la fibra y posteriormente se reoxidan con aire u otro agente oxidante.	Estructuras indeterminadas.
A la tina	Algodón, rayón y lana.	Reducción con hidrosulfito de sodio, después de la impregnación se oxida.	Antraquinona e índigos.

(Cervantes, 2015)

En la Tabla 2.2. se muestra que el grupo cromóforo más utilizado en la industria textil para el teñido de fibras es el de tipo Azo. Se calcula que alrededor de los 10,000 colorantes que se producen el 30% son de tipo Azo, éstos son los de mayor uso en la industria textil, se calcula que el 70 % son de la producción total. Con el uso de colorantes aumenta la demanda del agua, debido a que los procesos de fijación de los colorantes en las fibras/telas se efectúa en medio acuoso. Cabe resaltar que se requieren de 200 litros de agua para producir un kilo de producto textil (A. E. Ghaly, 2014).

2.3. Proceso Avanzados de Oxidación (PAOs)

Las aguas contaminadas por la actividad humana pueden ser procesadas eficientemente por plantas de tratamiento biológico, por adsorción con carbón activado u otros adsorbentes, tratamientos químicos convencionales, oxidación térmica, cloración, ozonización, permanganato de potasio, etc. En algunos casos estos procedimientos resultan inadecuados para alcanzar el grado de pureza que exige la ley o por el uso ulterior del efluente tratado.

En los países industrializados se está recurriendo al uso de las Tecnologías Avanzadas de Oxidación (TAOs) o Procesos Avanzados de Oxidación (PAOs). Los PAOs pueden aplicarse a la remediación y/o detoxificación de aguas especiales, estos métodos pueden utilizarse de manera simple o combinados entre ellos o con otros métodos convencionales. También permiten la desinfección por inactivación de bacterias y virus.

Los PAOs se basan en procesos fisicoquímicos capaces de producir grandes cambios en la estructura química de los contaminantes. El concepto de PAOs fue inicialmente establecido por Glaze y colaboradores que lo definieron como proceso que involucra la generación y uso de especies transitorias, principalmente el radical hidroxilo ($\text{HO}\bullet$), este

radical puede ser generado por medios fotoquímicos, y posee alta efectividad para la oxidación de materia orgánica.

Los PAOs se utilizan especialmente como pretratamiento previo a un tratamiento biológico para contaminantes resistentes a la biodegradación, o como postratamiento para efectuar un pulido de las aguas tratadas, antes de realizar la descarga de estas a un cuerpo receptor. (Ollis, 1995)

La explicación de la eficiencia de estas técnicas está en los procesos involucrados ya que se tienen una mayor factibilidad termodinámica y una velocidad de oxidación muy alta por la participación de los radicales hidroxilos (HO•). Esta especie generada en la reacción posee propiedades adecuadas para atacar a todos los compuestos orgánicos y reaccionar de 10^6 - 10^{12} veces más rápido que los oxidantes alternativos como el O₃. (Ollis, 1995)

En la Tabla 2.3 se encuentran presentes los potenciales de oxidación de distintas especies, que demuestran que después del Flúor el HO• es el oxidante más energético, y así se continua en la tabla de manera descendente.

Tabla 2.3. Potenciales de oxidación de distintas especies, agentes oxidantes.

Especie	E^0 (V, 25 °C)
Flúor	3.03
Radical hidroxilo	2.80
Oxígeno atómico	2.42
Ozono	2.07

Peróxido de hidrógeno	1.78
Radical per hidroxiló	1.70
Permanganato	1.68
Dióxido de cloro	1.57
Ácido hipocloroso	1.49
Cloro	1.36
Bromo	1.09
Yodo	0.54

En la Tabla 2.4. se presenta la diferencia en la constante de velocidad de reacción de diferentes compuestos con el radical hidroxilo y con el ozono, para hacer eficientes los PAOs se deben generar altas concentraciones de radicales hidroxilos en estado estacionario.

Tabla 2.4. Comparación de las constantes de velocidad (k en $L mol^{-1} s^{-1}$) del radical hidroxilo con el ozono.

Compuestos	HO•	O
Alquenos clorados	$10^9 - 10^{11}$	$10^{-1} - 10^3$
Fenoles	$10^9 - 10^{10}$	10^3
Aromáticos	$10^8 - 10^{10}$	$1 - 10^2$
Cetonas	$10^9 - 10^{10}$	1
Alcoholes	$10^8 - 10^9$	$10^{-2} - 1$
Alcanos	$10^6 - 10^9$	10^{-2}

A continuación, se describe la clasificación de los Procesos Avanzados de Oxidación, procesos Fotoquímicos y No Fotoquímicos.

2.3.1. Procesos Fotoquímicos

La eficiencia de la destrucción fotoquímica de un compuesto puede modificarse drásticamente en relación con el diseño del reactor (tipo de lámpara, geometría, hidrodinámica, etc.), lo que incide sobre el consumo de energía eléctrica. Los Procesos Avanzados por Oxidación mediados por luz no son recomendables para procesar mezclas de sustancias de una alta absorptividad, o con altos contenidos de sólidos en suspensión, la eficiencia cuántica disminuye por pérdida de luz, por dispersión y/o absorción competitiva. (Ollis, 1995)

En seguidas se enlistan los PAOs que pertenecen al grupo de procesos Fotoquímicos.

- I. Oxidación en agua sub/ y supercrítica.
- II. Procesos fotoquímicos.
- III. Fotólisis del agua en el ultravioleta de vacío (UVV).
- IV. UV/ Peróxido de hidrógeno (H_2O_2).
- V. UV/Ozono (O_3).
- VI. Foto – Fenton y relacionadas.
- VII. Fotocatálisis heterogénea.

2.3.1.1. Ventajas de los procesos Fotoquímicos

- ❖ Evitan cambios drásticos de pH (ejemplo O_3 requiere pH altos).

- ❖ Aumentan la velocidad de reacción en comparación con la misma técnica en ausencia de luz. Esto evita el uso de tanques grandes y hace más compactos a los sistemas de tratamientos.
- ❖ Reducen costos operativos debido a un menor consumo de potencia para generar HO•.
- ❖ Evitan el uso de O₃ o reduce su proporción, con la consiguiente reducción de costos, riesgos para la salud y preocupaciones ambientales.
- ❖ Es posible utilizar los procesos fotolíticos directos, sin el agregado de reactivo químico alguno. Este proceso es importante para compuestos que reaccionan lentamente con HO• hacen posible la destrucción de compuestos orgánicos clorados tales como trihalometanos, clorometanos, cloroetanos, aromáticos y fenoles mediante el uso de irradiación de 254 nm.
- ❖ Aumenta la flexibilidad del sistema ya que permite el uso de una variedad de oxidantes y condiciones de operatividad. (Ollis, 1995)

2.3.2. Procesos No Fotoquímicos

En estos tipos de procesos se originan sustancias reactivas muy potentes, principalmente el radical hidroxilo, a través de la transformación de especies químicas o mediante la utilización de distintas formas de energía, con excepción de la irradiación luminosa.

A continuación, se encuentra los PAOs pertenecientes al grupo de procesos no Fotoquímicos

- I. Ozonización en medio alcalino (O_3/OH^-).
- II. Ozonización con peróxido de hidrogeno (O_3/H_2O_2).
- III. Proceso Fenton (Fe^{2+}/H_2O_2) y relacionados
- IV. Oxidación electroquímica.
- V. Radiólisis $\dot{\gamma}$ y tratamientos con haces de electrones.
- VI. Plasma no térmico.
- VII. Descarga electrohidráulica – Ultrasonido.

Ventajas de los procesos no fotoquímicos

Entre las ventajas de los procesos resaltan éstas:

- ➔ La materia prima utilizada (aire u oxígeno) es muy asequible, y solo requiere un tratamiento previo no muy complejo (filtración o secado).
- ➔ Reacciona muy rápidamente con contaminantes orgánicos e inorgánicos debido a su elevado potencial redox y reactividad.
- ➔ Debidamente con la disminución con la DQO y la desinfección, disminuye el color y la turbidez.
- ➔ Los posibles excesos de ozono en el agua se descomponen rápidamente pasando a oxígeno, sin dejar agentes extraños en el medio (M. Mohseni, 2005).

Desventajas de los procesos fotoquímicos

Entre las desventajas de los procesos son:

- ➔ El rendimiento energético de la generación del ozono es muy bajo y la concentración del ozono en el gas ozonizado es relativamente baja 2-5 % en aire.
- ➔ La etapa controlante es la transferencia de materia del ozono a la fase acuosa.

- ➔ El ozono es irritante y tóxico a altas concentraciones, por lo que el ozono residual debe eliminarse, aunque su eliminación es fácil.
- ➔ El costo es relativamente elevado. (M. Mohseni, 2005).

2.3.3. Ventajas de los Proceso Avanzados de Oxidación (PAOs)

- ❖ Son muy útiles para contaminantes refractarios que resisten otros métodos de tratamientos, principalmente el biológico.
- ❖ Sirven para tratar contaminantes a muy baja concentración.
- ❖ Mejoran las propiedades organolépticas del agua tratada.
- ❖ Eliminan efectos sobre la salud de desinfectantes y oxidantes residuales como es el caso del cloro.
- ❖ No solo cambian de fase al contaminante, si no lo transforman químicamente.
- ❖ No se forman subproductos de reacción, o se forman en baja concentración.
- ❖ Permiten transformar contaminantes refractarios en productos tratables, luego por tratamientos más económicos como el tratamiento biológico.
- ❖ Consumen menos energía, mucha menos energía, que otros métodos.
- ❖ Generalmente se consigue la mineralización completa (destrucción) del contaminante. En cambio, las tecnologías convencionales, que no emplean especies fuertemente oxidantes, no alcanzan a oxidar completamente la materia orgánica.

- ❖ Son ideales para disminuir la concentración de compuestos formados por pretratamientos alternativos, como la desinfección. (Ollis, 1995)

2.4. Tratamientos de aguas residuales

Las aguas residuales provenientes de la industria ponen en riesgo el medio ambiente, al ser descargados estos efluentes contaminados en los cuerpos receptores. Una técnica o método para la degradación de contaminantes recalcitrantes con la ayuda de un agente oxidante y con luz ultravioleta, se logran a degradar una gran cantidad de contaminantes orgánicos. La fotocatalisis es uno de los tratamientos más viables para tratar aguas con efluentes contaminados que genera la industria textil. (Zaruma, 2018).

El tratamiento de aguas residuales es un proceso que permita acondicionar el agua para su uso posterior. La falta de estos tratamientos tiene ciertas implicaciones en los sectores ambientales, económicos y sociales, como pueden ser la destrucción de los mantos acuíferos, de la flora y la fauna. El diagrama de la Figura 2.2. es una representación esquemática de las etapas del tratamiento de aguas residuales.

2.4.1 Tipos de tratamientos de aguas residuales

2.4.1.1. Pre-tratamiento

Este primer tratamiento (proceso físico) es el que recibe las aguas residuales directamente de las tuberías, y este es el encargado de realizar una eliminación de contaminantes de gran tamaño como lo son basura, artículos flotantes, arena, arcilla, grasa, entre otros, y son extraídos a través de rejillas que impiden el paso de estos contaminantes a la siguiente etapa.

2.4.1.2. Tratamiento primario

El propósito de esta etapa (proceso físico o fisicoquímico) es eliminar los sólidos en suspensión a través de un proceso de sedimentación por gravedad o asistida por una sustancia química. En esta etapa el agua residual se deja reposar en grandes estanques decantadores retenida por unas horas, donde se le agregarán algunos compuestos químicos, como sales de hierro, aluminio y polielectrolitos floculantes para completar el proceso.

→ Remoción de sólidos o cribados

Esta acción se realiza mediante la remoción de sólidos de gran tamaño mediante el cribado, para eliminar sólidos grandes, arenas, etc. Que pudieran estar presentes en el objeto de estudio. Con esta etapa se elimina todo el material orgánico e inorgánico de gran tamaño.

→ Sedimentación

En la sedimentación son removidos entre el 60 y 65 % de los sólidos sedimentables, de un 30 a 35 % de los sólidos suspendidos; es un proceso en el que se generan lodos están conformados por materia orgánica. Los depositadores se conocen como estanques sedimentadores primarios o clarificadores primarios.

→ **Desbaste**

Consiste en la retención de sólidos gruesos del agua, mediante una reja, manual o autolimpiable, o un tamiz o luz de malla. Con la finalidad de alcanzar una mejor filtración en el tratamiento, en cada etapa eliminar lo innecesario.

2.4.1.3. Tratamiento secundario

Es un proceso, generalmente, de tipo biológico, en donde se realiza la eliminación de la materia orgánica en disolución y en estado coloidal mediante un proceso de oxidación biológica. En esta etapa se lleva a cabo un proceso biológico natural, debido a la presencia de microorganismos presentes en el agua y que se desarrollan en un reactor o cuba de aireación. Los procesos biológicos aeróbicos y anaeróbicos y fisicoquímicos son parte de esta etapa del proceso de depuración del agua residual.

→ **Lodos activos**

A esta etapa también se le denomina proceso aerobio de biomasa suspendida, en ésta normalmente se utiliza un mecanismo para suministrar oxígeno disuelto y promover el crecimiento de organismos biológicos que remueven sustancialmente la materia orgánica. Las aguas residuales entran en contacto con flóculos biológicos previamente formados, en los que se absorbe la materia orgánica y es degradada por las bacterias presentes, así se mantiene una concentración de organismos aerobios, esto se lleva a cabo en una balsa aireada o tanque de aireación.

→ Camas filtrantes

Las aguas residuales son rociadas en la superficie de una profunda cama compuesta de carbón, piedra caliza o fabricada especialmente de medios plásticos. Éstas deben tener altas superficies para soportar las biopelículas que se forman. Las películas biológicas de bacterias, protozoarios y hongos que se forman en la superficie del medio, degradan a los compuestos orgánicos contenidos en el agua residual, a los cuales utilizan como fuentes de energía.

→ Reactor biológico de cama móvil

Este reactor se realiza la adición de medios inertes en vasijas de fangos activos, con la intención de proporcionar un sitio para el crecimiento de los microorganismos y así reunir la biomasa, mantener una alta densidad de la población.

→ Filtros aireados biológicos

Estos filtros biológicos combinan la filtración con una reducción biológica de carbono, nitrificación o desnitrificación. La finalidad de este medio dar solución a los microorganismos que se adhieren a él y a los sólidos suspendidos que están en el filtro, que en etapas anteriores por alguna razón técnica no pudo ser retenida en su etapa correspondiente.

→ Reactores biológicos de membranas

Es un sistema con barrera de membrana semipermeable, el reactor biológico es responsable de la degradación biológica y la separación física de la biomasa y el agua a través de un sistema de filtración por membrana.

→ **Sedimentación secundaria**

Esta etapa es la final del proceso tratamiento secundario, en esta etapa son retirados los flóculos biológicos, produciendo agua tratada con bajos niveles de materia orgánica y materia suspendida.

2.4.1.4. Tratamiento terciario

Es la etapa final del tratamiento, en la cual se utilizan una serie de procesos para aumentar la calidad del agua acorde a los valores de los parámetros establecidos en la legislación para su descarga en ríos, lagos.

→ **Filtración**

Las filtraciones de carbón activado detienen gran parte de los residuos de materia suspendida y las toxinas residuales, son retenidas por el carbón sobrante de la filtración.

→ Desinfección

El objetivo de proceso es reducir substancialmente el número de microorganismos patógenos que será descargada nuevamente en su causa natural. La efectividad de este proceso dependerá de la calidad del agua tratada y del tipo de desinfección que se aplique. La desinfección, comúnmente, se efectúa con cloro, ozono y luz UV (Colombia, 2015).

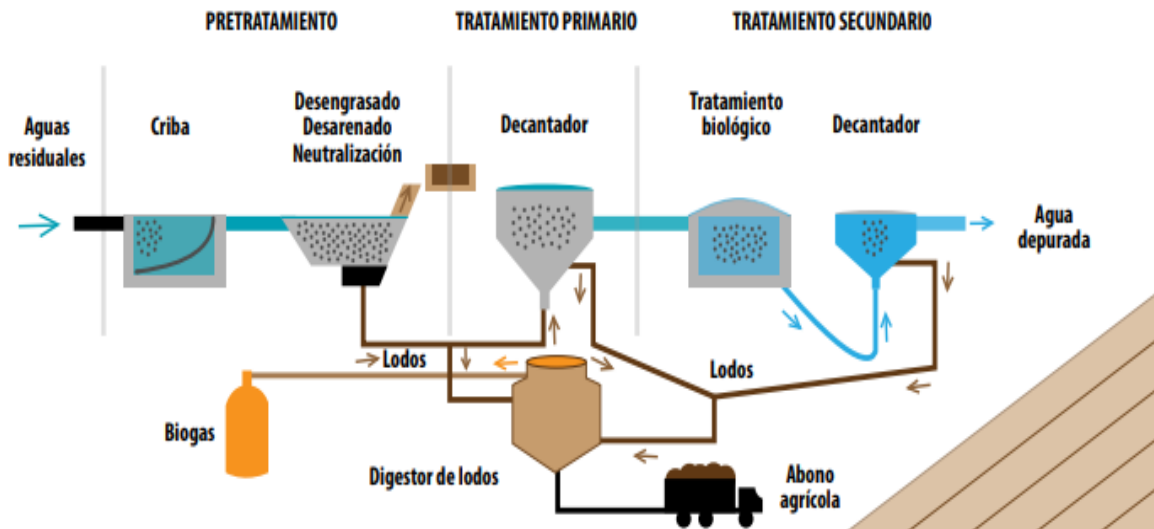


Figura 2.2. Diagrama de las etapas del tratamiento de las aguas residuales. (Colombia, 2015)

2.5. Indicadores de la calidad del agua

2.5.1. Potencial de hidrogeno (pH)

El potencial de hidrógeno es un parámetro que se utiliza como referente para determinar la concentración de iones hidrógeno en determinadas sustancias y esto nos permite categorizar si presenta alcalinidad o acidez. Este parámetro se emplea para medir, evaluar, controlar y/o corregir la calidad de agua, que es vertida en los mantos acuíferos o cualquier otro cuerpo receptor. La determinación del pH es uno de los procedimientos analíticos más importantes y utilizados en las ciencias químicas y bioquímicas, porque permite determinar características importantes sobre la estructura y actividad de las moléculas.

El valor del pH puede variar entre 0 y 14 de unidades. El valor de pH de una sustancia está determinado por el número de protones (iones H^+) y el número de iones hidroxilo (OH^-), si el número de protones de hidrógeno es igual al número de iones hidroxilo, esto indica que la sustancia es neutra. Cuando el número de iones hidroxilo es mayor la solución es básica (alcalina), y cuando el número de protones es mayor es ácida.

Existen diferentes métodos para determinar el pH, algunos más complejos que otros, pero con el mismo objetivo. Uno de los más sencillos es empleando tiras de papel indicador (viran). El procedimiento consiste en sumergir la tira indicadora en la sustancia, de la cual se quiere conocer el pH. Después de, aproximadamente, un minuto, sacar la tira de papel y comparar el cambio(vire) de color contra estándares para diferentes valores de pH. El estándar que más coincida con los colores de la tira corresponderá al pH de la sustancia. Otro método más sofisticado y preciso, es mediante un potenciómetro (equipo para medir pH). El electrodo del equipo se

sumerge por unos segundos en la sustancia, el valor del pH se mostrará en la pantalla del mostrador.

La NOM-002-ECOL-1996, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal, establece que el rango permisible de pH (potencial hidrógeno) en las descargas de aguas residuales es de 10 y 5.5 unidades y en ningún caso deberá estar fuera de este intervalo (Diario Oficial de la Federación).

2.5.2. Demanda química de oxígeno (DQO)

El análisis de Demanda química de oxígeno (DQO), es un parámetro químico, que representa una medida de la materia orgánica e inorgánica presente en la disolución y/o suspendida que puede ser químicamente oxidada, por la acción de agentes oxidantes, bajo condiciones ácidas y se mide como miligramos de “oxígeno” equivalente a la fracción orgánica disuelta y/o suspendida por litro de disolución (agua residual). (Landy Irene Ramirez Burgos, 2008)

En una planta de tratamiento, debería efectuarse el análisis de DQO cuando el agua residual ingresa, durante su proceso y al final de éste para evaluar la eficiencia de la planta.

Los métodos más usados, precisos, y confiables para determinar la DQO son el de oxidación por dicromato y el método colorimétrico de reflujo cerrado. Estos métodos utilizan los siguientes reactivos: (Landy Irene Ramirez Burgos, 2008)

- Dicromato de potasio ($K_2Cr_2O_7$), agente oxidante.
- Sulfato de plata (Ag_2SO_4), catalizador de la reacción.
- Sulfato mercúrico ($HgSO_4$), sirve para precipitar algunos iones inorgánicos como el cloro.
- Sulfato ferroso amoniacal hexahidratado $Fe (NH_4)_2(SO_4)_2 \cdot 6H_2O$, para titular el exceso de cromo.
- Ácido sulfúrico concentrado (H_2SO_4), medio donde se realiza la reacción (Landy Irene Ramirez Burgos, 2008).

Los residuos generados con la determinación de la demanda química de oxígeno son considerados peligrosos, debido a que contienen mercurio, plata y cromo en concentraciones por arriba de lo permitido, bajo la norma NOM-052-SEMARNAT-2005, que establece las características, el procedimiento de identificación, clasificación y los listados de los residuos peligrosos. (Diario Oficial de la Federación).

2.5.3. Espectro de absorción.

La espectrofotometría UV-visible, es una técnica analítica muy utilizada, que se fundamenta en la relación que existe entre la absorción de luz por parte de una solución y su concentración. Cuando se hace incidir luz monocromática (de una sola longitud de onda) sobre un medio homogéneo, una parte de la luz incidente es absorbida por el medio y otra transmitida. (Química, 2010) Ver Figura 2.3.

Toda sustancia es diferente una de la otra y cada una de ella tiene su propio espectro de absorción, el cual es una curva que muestra la cantidad de energía radiante absorbida, absorbancia, por la sustancia en cada longitud de onda del espectro electromagnético, es decir, a una determinada longitud de onda de la energía radiante, cada sustancia absorbe una cantidad de radiación que es distinta a la que absorbe otra sustancia. Este método se rige por dos leyes fundamentales ley de Lambert y ley de Beer.

Ley de Lambert

Esta ley establece que cuando pasa luz monocromática por un medio homogéneo, la disminución de la intensidad del haz de luz incidente es proporcional al espesor del medio, lo que equivale a decir que la intensidad de la luz transmitida disminuye exponencialmente al aumentar aritméticamente el espesor del medio absorbente. (Química, 2010)

Ley de Beer

La intensidad de un haz de luz monocromática disminuye exponencialmente al aumentar aritméticamente la concentración de la sustancia absorbente, cuando este haz pasa a través de un medio homogéneo. (Química, 2010)

Absorbancia: Se define como la cantidad de energía absorbida por una sustancia pura o en solución.

Las mediciones de absorbancia y transmitancia se hacen por comparación entre una sustancia muestra y una sustancia estándar conocida (solución referencia), absorbancia cero o inicial.

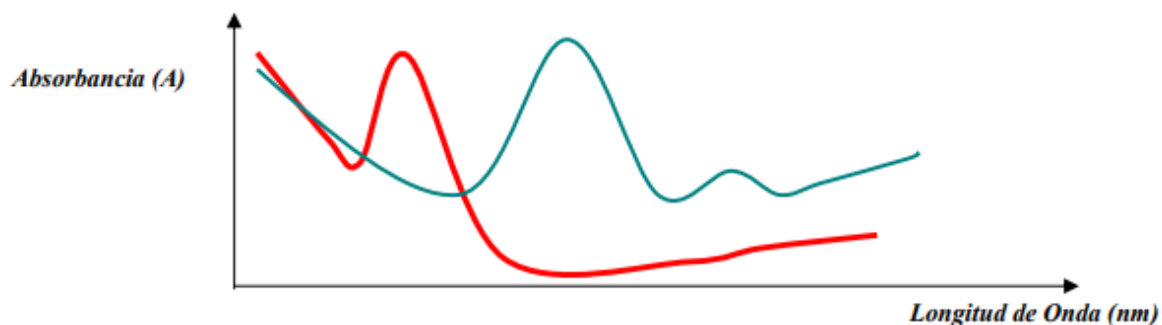


Figura 2.3. Representación del espectro de absorción de dos compuestos distintos.

2.5.4. Curva de calibración.

La curva de calibración es un método muy utilizado para determinar la concentración de una sustancia. Esta curva de calibración es una relación de concentraciones conocidas de las sustancias, con la absorbancia de cada una de ellas a la longitud de onda máxima, que permite conocer, el comportamiento, la tendencia en función de la representación gráfica. (Química, 2010)

Cuando se tiene la gráfica, se determina la función matemática que represente el comportamiento de “n” número de puntos, donde cada punto se encuentra definido por un punto “x” (variable independiente), una variable “y” absorbancia (variable dependiente). La curva de calibración se encuentra definida por una ordenada al origen “b” y una pendiente m, mediante la ecuación 1.

$$y = mx + b$$

Ecuación 1.

2.5.5. Bioensayo de toxicidad.

Las pruebas de toxicidad involucran un agente o estímulo el cual es aplicado a un organismo y a este último se conoce como sujeto, el cual es sometido a prueba de sobrevivencia. Los bioensayos de toxicidad tienen como finalidad conocer y evaluar el grado de toxicidad de una sustancia química, un contaminante o alguna otra sustancia. Los sujetos (organismos vivos) son expuestos ante la sustancia contaminada (agente) durante un tiempo predefinido.

El sujeto es evaluado a través de una característica cuantificable, que permite determinar el grado de mortalidad o letalidad en los organismos vivos, además de alguna otra característica del sujeto que permita ser más preciso en los resultados y conclusiones.

2.5.5.1. Germinación de semillas de lechuga “*Lactuca sativa*”.

La lechuga pertenece a la familia de dicotiledónea más grande del reino vegetal, para esta prueba se utiliza semillas de lechuga de género *Lactuca*, de la especie *Lactuca sativa* fue descrita por el naturista sueco Carlos Linneus en el año 1753. Las raíces laterales de la lechuga presentan mayor densidad cerca de la superficie del suelo, lo que facilita la mayor absorción de los nutrientes y la humedad. (Platina, 2017)

La semilla de lechuga (lechuga orejona) que se utiliza para este experimento tiene un 95 % de germinación, lo que representa un alto porcentaje de germinación, dando una mayor confiabilidad a los experimentos realizados con este tipo de lechuga.

La primera fase de germinación de la semilla es la hidratación de la membrana celular, se activan y se prosigue con el crecimiento radicular hasta que rompe la testa, comienza la elongación y continúa con la aparición de los cotiledones. Un segundo factor para la óptima germinación de la semilla de lechuga es la temperatura, el intervalo óptimo de germinación es de 18° a 21° C. (Platina, 2017)

CAPÍTULO 3. DESARROLLO EXPERIMENTAL

3.1 Solución del Verde Azul Doracryl

En este estudio, se preparó una solución acuosa de 1000 ml del colorante Verde Azul Doracryl X5GS 200%, con una concentración de 100.99 mg/L, esta solución es el objeto de estudio para realizar el experimento en 4 tratamientos distintos.

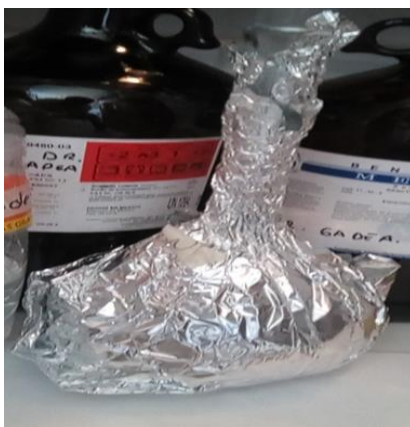


Figura 3.1 Solución acuosa colorante Verde Azul Doracryl

3.2. Dispositivo experimental

Para construir el dispositivo de tratamiento por plasma no térmico a baja presión, se realiza el diseño y se procede a construir el dispositivo con un cámara de vidrio de 750 ml. El sistema experimental se muestra en la Figura 3.2. El sistema consiste en una cámara de vidrio, en éste se realizan 3 perforaciones, 2 en forma lateral y una en la parte inferior próxima al fondo del frasco (estos 3 orificios son para colocar el medidor al vacío, la bomba de vacío y la válvula de paso). En la parte superior tiene una cubierta fija que permite el aislamiento del sistema interno del exterior, sobre ésta tiene insertados un electrodo fijo con un aislante y un electrodo móvil sujeto a un tornillo. Este último se encuentra en el interior de una jeringa que permite el desplazamiento vertical del electrodo para controlar la distancia entre este y la solución. Además, el dispositivo cuenta con un termómetro, en escala Celsius en la cubierta superior.

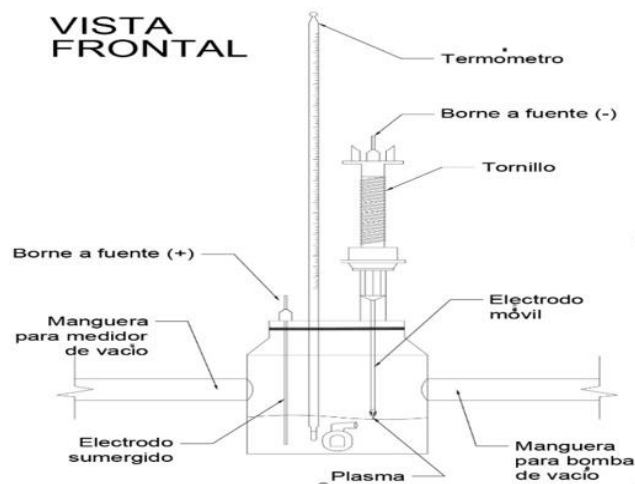


Figura 3.2 Sistema y Diseño experimentales.

3.3. Exposición de la solución acuosa del colorante Verde Azul Doracryl X5GS 200% al plasma no térmico a baja presión

Se vierte 250 ml de la solución acuosa del colorante Verde Azul Doracryl X5GS 200% al sistema experimental (dispositivo). El sistema se conecta, y se ajustan los parámetros de voltaje y de corriente de la fuente (SPELLMAN SL600) definidos previamente para realizar el experimento. Se activa la bomba de vacío (ROTARY VANE VACUUM PUMP Modelo 71096) y el medidor de presión al vacío (CPS VG200, Digital Vacrometer). Los parámetros de corriente (mili Amper) para cada tratamiento son distintos, los cuales se muestran en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1 Parámetros para cada tratamiento del sistema experimental.

Tratamiento	Tiempo (minutos)	Concentración (mg/L)	Voltaje (volts)	Amperaje (mA)	Presión (Torr)
1	50	100.99	1500	10	24
2	50	100.99	1500	15	24
3	50	100.99	1500	20	24
4	50	100.99	1500	30	24

A continuación, se describe la metodología implementada para llevar a cabo el experimento.

- ➔ 1.- Se deposita la solución acuosa en el dispositivo y se fija la cubierta superior (quedando un electrodo sumergido en la solución), para aislar el sistema interno del exterior y lograr un sistema a baja presión. Se activa la fuente de voltaje y de corriente de acuerdo con los parámetros definidos en la Tabla 3.1 (para cada tratamiento la corriente es distinta), se ajusta el electrodo móvil a una distancia de 2 mm aproximadamente de la superficie de la solución hasta generar el plasma (no se permite plasma intermitente).
- ➔ 2.- Se activa el medidor de presión al vacío y se enciende la bomba de vacío, para lograr un sistema de experimentación a baja presión. La presión debe bajar hasta 24 Torr, cuando el plasma está estable y una presión de 24 Torr, se toma una muestra, se identifica como tiempo cero y se registran los datos necesarios. Después se procede a monitorear y controlar el sistema experimental, así mismo se mide el tiempo de exposición de la solución acuosa ante el plasma no térmico a baja presión, para analizar el efecto que tiene en la decoloración de la solución acuosa.
- ➔ 3.- Al transcurrir 5 minutos desde su inicio de monitoreo (tiempo cero), se procede a tomar las lecturas de la presión y la temperatura, se interrumpe el tratamiento, se procede a extraer una muestra del sistema y se reanuda el tratamiento. Posteriormente, se extraen muestras cada 5 minutos, hasta lograr 50 minutos de exposición de la solución acuosa ante el plasma a baja presión y obtener 11 muestras del sistema. Ver Figura 3.3.

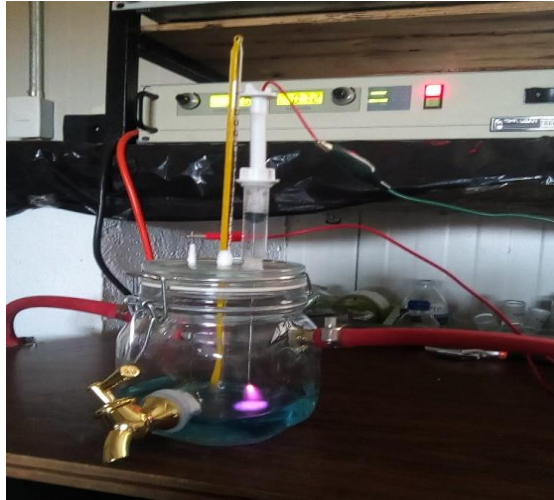


Figura 3.3. Exposición del colorante Verde Azul Doracryl ante el plasma no térmico a baja presión.

3.4. Muestreo

La toma de muestras se realizó cada 5 minutos, con la siguiente metodología, para los 4 tratamientos diferentes. Al inicio de cada tratamiento se realizan pruebas testigo.

1. Colocación del equipo de protección personal básico, para trabajar con sustancias tóxicas. Uso de bata blanca, guantes de látex, gafas de seguridad y cubre bocas, con el propósito de evitar tener contacto directo con la solución y evitar respirar los vapores emitidos por la misma.
2. Se procede a realizar una prueba testigo con agua destilada, con prueba de bioensayo (3 ml), además una muestra en tiempo cero de la solución del colorante Verde Azul Doracryl con el análisis de pH (20 ml), estudio de espectrofotómetro (10 ml) y prueba de bioensayo (3 ml). (Este paso es

exclusivo para el inicio de cada tratamiento). La solución restante de la muestra se regresa a la cámara de reacción.

3. Cada 5 minutos después del tiempo cero. Se verifica la presión del sistema interno a 24 Torr. Se toma la lectura de temperatura del sistema a través del termómetro escala Celsius.
4. Con un vaso de precipitado graduado se toma una muestra de 20 ml de la solución. Después de cada recolección de muestra el vaso de precipitado debe ser enjuagado con agua destilada y escurrido con la finalidad de evitar que las muestras siguientes sean expuestas a contaminación por agentes ajenos a la solución acuosa y se obtenga un resultado erróneo.
5. La muestra extraída del sistema es de 20 ml, que se distribuyó de la siguiente manera, (para realizar las diferentes pruebas a analizar). Se utilizaron los 20 ml iniciales para medir el potencial de hidrógeno con el potenciómetro, después se tomaron 10 ml para el estudio en el espectrofotómetro y 3 ml para las pruebas de bioensayo. Después del análisis de la muestra, el sobrante se retorna al sistema para reanudar el tratamiento (debe verificarse la presión interna del sistema y la posición del electrodo móvil).



Figura 3.4 Toma de muestras de la solución tras ser expuesta ante el plasma no térmico a baja presión por un tiempo determinado.

3.5 Determinación de la temperatura

Para determinar la temperatura del sistema, se utilizó un termómetro analógico de mercurio con escala Celsius (100°C), la lectura se toma directamente del termómetro sumergido en la solución acuosa, tomando el primer registro a tiempo cero y después cada 5 minutos hasta completar los 50 minutos del tratamiento.

3.6. Parámetros de calidad del agua

Los parámetros utilizados en este estudio, para medir la calidad del agua después de cada tratamiento son los siguientes.

1. Potencial de hidrógeno (pH): Se tomaron lecturas de la solución para conocer el comportamiento de la acidez y alcalinidad del colorante Verde Azul Doracryl a través del tiempo tras la exposición ante el plasma no térmico a baja presión.

2. Absorbancia. Se analiza la absorbancia para conocer la cantidad de luz transmitida o absorbida a través de la solución acuosa. Además, permite conocer las concentraciones el comportamiento de la concentración de la solución a través del tiempo de exposición.

3. Bioensayo. Proporciona datos de pruebas realizadas en términos de cantidad de germinación de semillas, para establecer el cambio de toxicidad del colorante Verde Azul Doracryl a través del tiempo tras la exposición ante el plasma no térmico a baja presión.

A continuación, se muestra la metodología implementada para determinar los parámetros de la calidad del agua.

3.6.1. Determinación del potencial de hidrógeno pH.

- a. Para determinar este parámetro de la calidad del agua, se utilizó un medidor de pH, estilo lápiz digital preciso. Se procedió a encender el dispositivo y se realizó la calibración correspondiente de este dispositivo con una solución estándar, en este caso se utilizó un buffer de valor 7.0.

- b. Después de la calibración del medidor, se procedió a tomar una muestra de la solución en estudio en tiempo cero, con un vaso de precipitado graduado se extrajeron 20 ml, en seguida se colocó el dispositivo en la muestra, se espera unos segundos hasta lograr que el dispositivo estabilice su lectura, para poder tomar registro de ella de manera correcta.

- c. La toma del pH se realiza en el tiempo cero y después cada 5 minutos hasta completar 50 minutos de exposición del tratamiento ante el plasma no térmico, al final del tratamiento se tienen 11 medidas. Después de regresar la solución a la cámara de reacción, el vaso se limpia con agua destilada y se deja secar.

3.6.2 Absorbancia.

Para realizar el análisis de la absorbancia de la muestra, se utilizó un espectrofotómetro (HACH DR 3900), el principio de funcionamiento de este dispositivo es hacer pasar un haz de luz sobre la muestra y medir la cantidad de energía radiante que es absorbida por las moléculas del colorante verde Azul Doracryl, además esto nos permite determinar la concentración de la solución a través del tiempo tras su exposición ante el plasma no térmico.

Para realizar el estudio de este indicador, se monitoreo una muestra al tiempo cero y después cada 5 minutos, para obtener 50 minutos en total de exposición de la solución ante el plasma no térmico para cada tratamiento.

Para medir la absorbancia se utilizó la siguiente metodología.

1. Se enciende y se calibra el espectrofotómetro con una muestra de agua destilada para definir el cero.
2. De la muestra inicial de 20 ml, se extrae con una pipeta 10 ml y se vierten en la cubeta del espectrofotómetro.
3. Se coloca la cubeta del espectrofotómetro en su interior, se inicia la medición de la absorbancia, se toma registro de la lectura y se procede a retirar la solución del espectrofotómetro. Se retorna al sistema experimental.
4. Se lava y limpia la cubeta del espectrofotómetro con agua destilada y se deja secar.
5. Al término de cada 5 minutos se procede a tomar la siguiente muestra y regresar al paso 2 de esta metodología. Repetir estos pasos hasta lograr los 50 minutos de exposición de la solución acuosa ante el plasma no térmico a baja presión para cada tratamiento.

3.6.3 Bioensayo con semillas de lechuga (*Lactuca sativa*).

Para realizar este ensayo de toxicidad, se utilizaron semillas de lechuga *Lactuca sativa*, con un alto porcentaje de germinación, es decir, > 95% de germinación.

Los bioensayos se realizaron de acuerdo con los siguientes pasos:

1. Se realizó limpieza profunda de las cajas Petri.
2. Se colocó en cada caja Petri una pieza circular de papel filtro grueso.
3. Se identificó cada caja Petri con fecha de experimento, número de tratamiento y número de muestra.
4. Se humedeció el papel filtro en la caja Petri con 3 ml de la solución acuosa, los cuales fueron adicionados con una pipeta. Figura 3.5.
5. Se depositaron 10 semillas de lechuga orejona en toda la superficie del papel filtro y la caja Petri de manera dispersa, evitando colocar semillas demasiado juntas.



Figura 3.5. Se vierte solución acuosa en la caja Petri, para la prueba de germinación de semillas de lechuga.

Al finalizar, cada caja Petri fue colocada en el interior de una bolsa oscura, con la finalidad de que no se expusieran a los rayos de la luz, para evitar pérdida de humedad y permitir una temperatura constante, para lograr una germinación homogénea. Este procedimiento se realizó para cada uno de los tratamientos que se efectuaron a diferentes amperajes (mA). El tiempo que se estableció para dar lectura de los resultados de esta prueba de bioensayos fue de 120 horas (5 días). Ver Figura 3.6.



Figura 3.6. Colocación de las cajas Petri (pruebas de bioensayo), en un recipiente obscuro, evitar contacto con rayos de luz.

CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y CONCLUSIÓN

En el presente capítulo se muestran los resultados obtenidos durante la exposición del colorante Verde Azul Doracryl ante un plasma no térmico aire – agua a baja presión. En este estudio se evaluaron los cambios de valor de temperatura, indicador de calidad del agua como el potencial de hidrógeno, la absorbancia y la toxicidad mediante pruebas de bioensayo con semillas de lechuga. Todos los valores presentados corresponden al valor promedio de las medidas realizadas de tres repeticiones por variable.

4.1. Absorbancia

En la Figura 4.1 se presenta el comportamiento de la absorbancia del pigmento Verde Azul Doracryl expuesto ante un plasma no térmico aire – agua a baja presión en función del tiempo. Además, se observa el comportamiento de la solución acuosa sometida al plasma no térmico, pero a presión atmosférica.

Se observa que el comportamiento de la absorbancia de la solución acuosa (colorante Verde Azul Doracryl) ante el plasma aire-agua a baja presión y a presión atmosférica, desciende al ser sometida ante el plasma durante el tiempo de exposición. La disminución del valor de la absorbancia está directamente ligada con la corriente aplicada a cada uno de los tratamientos, es decir, T1 = 10 mA, T2 = 15 mA, T3 = 20 mA y T4 = 30 mA, a mayor corriente aplicada mayor es el valor de disminución de la absorbancia en el tiempo.

El comportamiento de la solución acuosa en condiciones de baja presión es semejante entre tratamientos, para esta condición se llegó a un mínimo de 0.314, con el tratamiento que corresponde a una disminución del 90.17 % de la absorbancia inicial. Por otra parte, al

término de los 50 minutos de cada uno de los tratamientos la absorbancia disminuyó en 26.53%, 46.68%, 74.90% y 90.17% para los tratamientos 1, 2 3 y 4 respectivamente, en condiciones de baja presión. Lo que muestra a mayor corriente aplicada, mayor es el porcentaje de disminución en el valor de la absorbancia.

Se observa que en el comportamiento de la solución acuosa en condiciones de presión atmosférica el porcentaje de disminución en el valor de la absorbancia es mayor que al de baja presión. Para los tratamientos 1, 2, 3 y 4 corresponden a porcentajes de 64.44%, 72.58%, 90.52%, 93.03% respectivamente.

En términos generales el comportamiento de la absorbancia en función del tiempo a presión atmosférica tiende a un comportamiento asintótico para el tratamiento T3 Y T4.

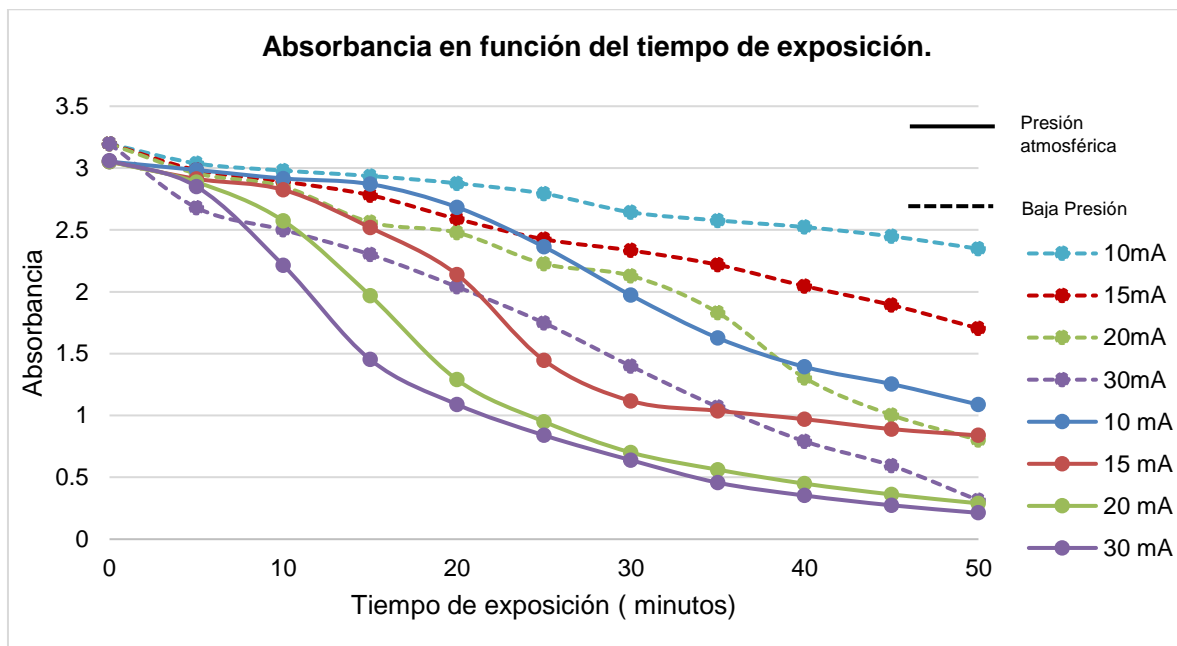


Figura 4.1. Comportamiento del valor de la absorbancia del pigmento Verde Azul Doracryl en solución acuosa tras su exposición a un plasma a baja presión y a presión atmosférica en función del tiempo.

4.2. Potencial de hidrógeno (pH)

Enseguida se muestra el comportamiento del potencial de hidrógeno para la solución acuosa a presión atmosférica y baja presión.

En la siguiente gráfica se observa el comportamiento del cambio del pH del colorante Verde Azul Doracryl ante el plasma no térmico en condiciones de baja presión y presión atmosférica. Esta medida permite determinar la acidez o alcalinidad de la solución conforme transcurre el tiempo de exposición al plasma para cada uno de los tratamientos.

El comportamiento de la solución acuosa a baja presión es decreciente (líneas punteadas), como se observa en la Figura 4.2. Para los cuatro tratamientos el valor de pH desciende considerablemente en los 10 minutos iniciales de exposición ante el plasma, después de ese tiempo disminuye a menor proporción. Esto representa que al inicio del experimento la solución está próxima a neutra y conforme transcurre el tiempo de exposición se vuelve más ácida, además, se observa que al aplicar mayor intensidad de corriente este tiene un efecto proporcional en la solución, reflejando este efecto en forma de acidez de la solución.

Para los tratamientos (T1, T2, T3 y T4) el pH de la solución inicial es de 6.3, al transcurrir el tiempo de 50 minutos de exposición de la solución acuosa ante el plasma no térmico aire – agua a baja presión, el pH de la solución acuosa fue de 4.2, 4.0, 4.0 y 3.8 para los tratamientos T1, T2, T3 y T4 respectivamente.

En la figura 4.2. se observa que el comportamiento de la solución acuosa en condiciones de presión atmosférica es semejante al de baja presión, al igual que el de baja presión en sus primeros 10 minutos de exposición de la solución ante el plasma disminuye

considerablemente con respecto al resto del tiempo, es decir, es donde se aprecia mayor disminución en poco tiempo. En el tiempo restante la acidez de la solución disminuye en menor proporción.

Para los tratamientos (T1, T2, T3 y T4), a Presión atmosférica, el pH de la solución inicial es de 5.6, después del tiempo de exposición de la solución acuosa ante el plasma aire – agua a presión atmosférica, el pH de la solución final para cada uno de los tratamientos es de 3.0, 2.9, 2.7 y 2.3 para los tratamientos T1, T2, T3 y T4 respectivamente.

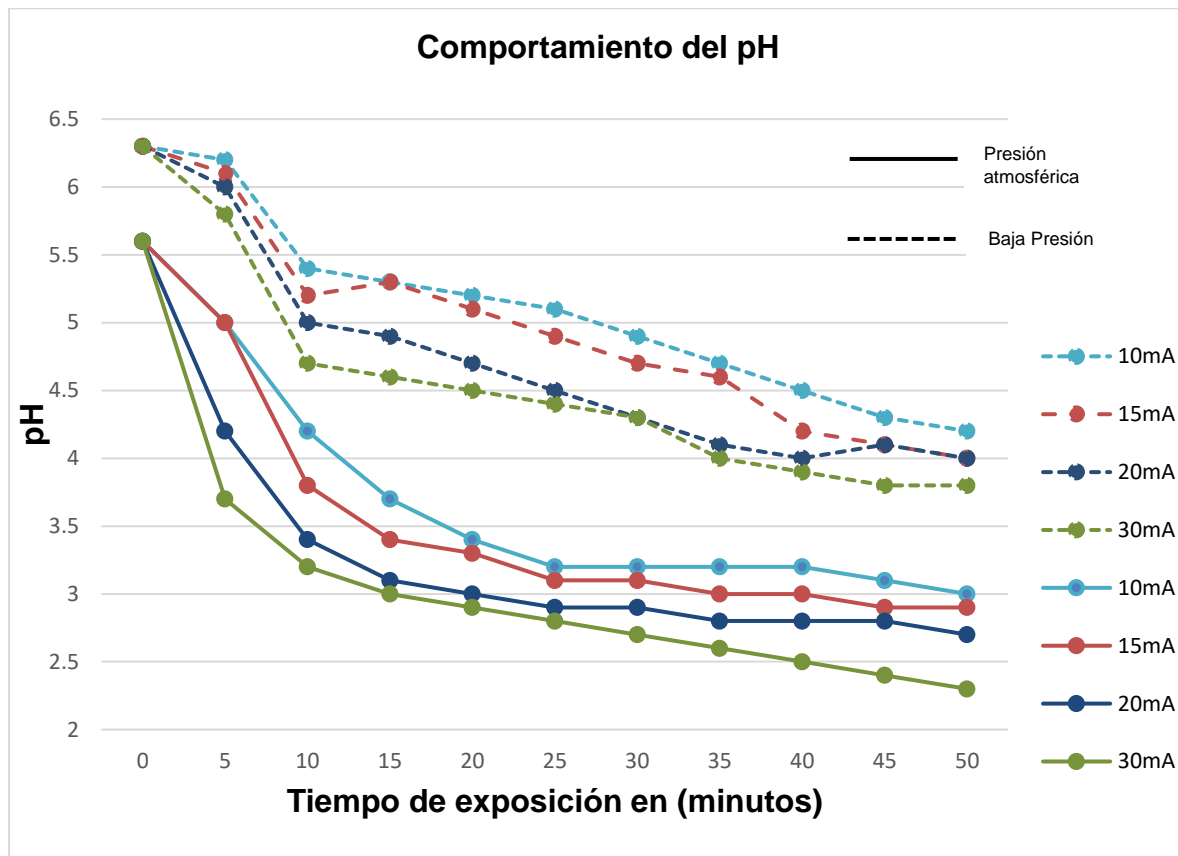


Figura 4.2. Comportamiento del pH de la solución acuosa ante el plasma no térmico aire – agua a presión atmosférica y baja presión.

En términos generales a lo que corresponde al potencial de hidrógeno en la solución acuosa, en las dos condiciones mencionadas la acidez de la solución aumenta conforme aumenta el tiempo de exposición y conforme el valor de la intensidad de corriente es mayor, cabe resaltar que la acidez de la solución a presión atmosférica en los primeros minutos es cuando se presenta su mayor reacción.

La disminución del pH de la solución, varios autores la atribuyen a la formación de ácidos carboxílicos durante la degradación de los contaminantes orgánicos. Además, los resultados de absorbancia muestran una mayor decoloración producto de la transformación del colorante en compuestos intermediarios (ácidos carboxílicos, por ejemplo). Por otra parte, la solución en estudio a presión atmosférica al final obtuvo mayor acidez, debido a que el sistema estuvo en interacción con el aire lo que beneficio a la generación de ion hidronio.

Se observa claramente que el comportamiento de la solución en condiciones de presión atmosférica tiene mayor efecto en la acidez debido a que el pH inicial es de 5.6 y para el final el pH disminuye en un 46.42%, 48.21%, 51.78% y 58.92% para los tratamientos T1, T2, T3 y T4 respectivamente. Para los tratamientos a baja presión el pH inicial de la solución es de 6.3 y para el término de exposición de la solución ante el plasma no térmico aire – agua, se disminuyó en 33.33%, 36.50%, 36.50% y 39.68% para los tratamientos T1, T2, T3 y T4 respectivamente.

4.3. Ensayo toxicológico con semillas de lechuga (*Lactuca sativa*) en solución de colorante Verde Azul Doracryl (cloruro de dietil amonio), expuesta ante un plasma no térmico aire-agua a baja presión

En la siguiente gráfica se muestra el porcentaje de germinación de semilla de lechuga *Lactuca sativa*, al ser expuesta en una solución acuosa del pigmento Verde Azul Doracryl, que fue sometida a diferentes tiempos y tratamientos de plasma no térmico aire-agua a baja presión (24Torr) por un tiempo de 50 minutos, y cada 5 minutos se extrajo una muestra para realizar esta prueba. Los tratamientos realizados se realizaron a una intensidad de 10 mA, 15 mA, 20 mA y 30 mA para los tratamientos T1, T2, T3 y T4 respectivamente con un voltaje de 1500v.

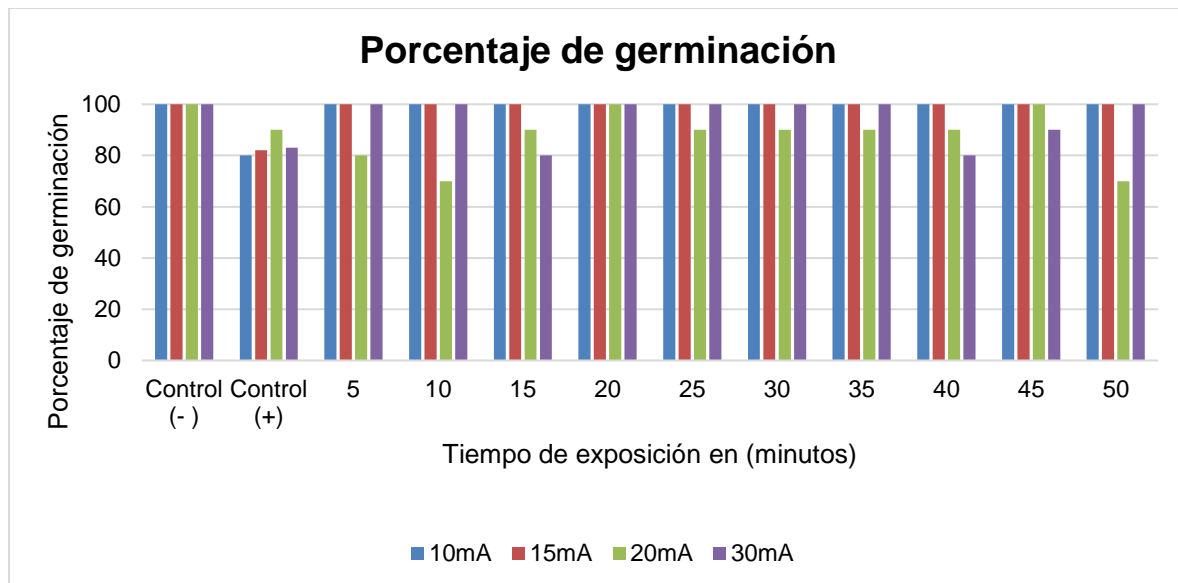


Figura 4.3 Porcentaje de germinación de la semilla de lechuga *Lactuca sativa* expuesta a la solución del pigmento Verde Azul Doracryl ante el plasma no térmico aire-agua a baja presión. Control (-) agua destilada, Control positivo (+) solución acuosa Verde Azul Doracryl sin tratamiento.

Los controles (-) y (+) testigo, se realizaron con la finalidad de tener algún antecedente, para utilizarlo como referencia para los tratamientos realizados.

Control negativo (-): En esta prueba se evalúa todos los factores que pudieran afectar la germinación de las semillas de lechuga, esta prueba no evalúa la solución del colorante Verde Azul Doracryl. Para la prueba se utilizó agua destilada, para el cual se espera una germinación de las semillas mayor al 95%.

Control positivo (+): En este caso, la prueba realizada fue con la solución del pigmento Verde Azul Doracryl, con la finalidad de evaluar la sensibilidad de la semilla ante una solución contaminada, es decir, sin previo tratamiento.

En la gráfica 4.3, se observa claramente que para los tratamientos 1 y 2, con una intensidad de corriente 10 mA, y 15 mA respectivamente, el porcentaje de germinación de semillas para estos dos tratamientos es del 100 % en cada una de las muestras extraídas, es decir, desde el minuto 5 hasta el 50.

Para el tratamiento 3 con una corriente aplicada de 20mA, se refleja un cambio en el porcentaje de germinación de las semillas con respecto a los tratamientos T1 y T2, presentándose con un mínimo porcentaje de germinación del 70 % en el tiempo de 10 y 50 minutos. El porcentaje del 100 % de germinación se obtuvo en el minuto 20 y 45.

El tratamiento 4 el mínimo porcentaje de germinación fue del 80 % en los minutos 15 y 40. Cabe resaltar que en el minuto 20, para los 4 tratamientos en estudio el porcentaje de germinación fue del 100 %, sin importar el valor de la intensidad de corriente.

En la figura 4.3 se observa como en el control negativo (-), el porcentaje de germinación es del 100 % de las semillas, con esto se demuestra que el agua destilada es un testigo eficiente al germinar las semillas en su totalidad. Relacionando resultados, al parecer con los tratamientos T3 y T4 se obtienen los peores resultados de germinación. Sin embargo, en el tratamiento T3 en 8 de 10 muestras se obtienen porcentajes menores o igual que testigo (+) por lo que enseñaría que los subproductos formados durante el tratamiento son más tóxicos que el comportamiento original. En el caso del tratamiento T4, solo en 2 de 10 muestras tienen porcentajes menores o iguales que el testigo (+).

El control positivo (+), el nivel de germinación de semillas es inferior a los valores obtenidos tras los tratamientos usados, por lo que se determina claramente que la solución acuosa del pigmento Verde Azul Doracryl afecta la germinación de la semilla en un valor significativo, por lo que al ser tratadas las aguas que contengan este tipo de pigmento, se obtendrían buenos resultados para ser utilizadas en sector de la agricultura. No ser tratadas afectaría directamente a los cuerpos receptores de agua y a los organismos acuáticos que dependen de éste.

4.4. Ensayo toxicológico con semillas de lechuga (*Lactuca sativa*) en solución de colorante Verde Azul Doracryl (cloruro de dietil amonio), expuesta ante un plasma físico aire-agua a presión atmosférica

En la figura 4.4 se muestra el porcentaje de germinación de la semilla de lechuga *Lactuca sativa*. Cuando las semillas son expuestas a soluciones de colorante tratada a diferentes tiempos con plasmas generados a presión atmosférica, pero con distintas potencias.

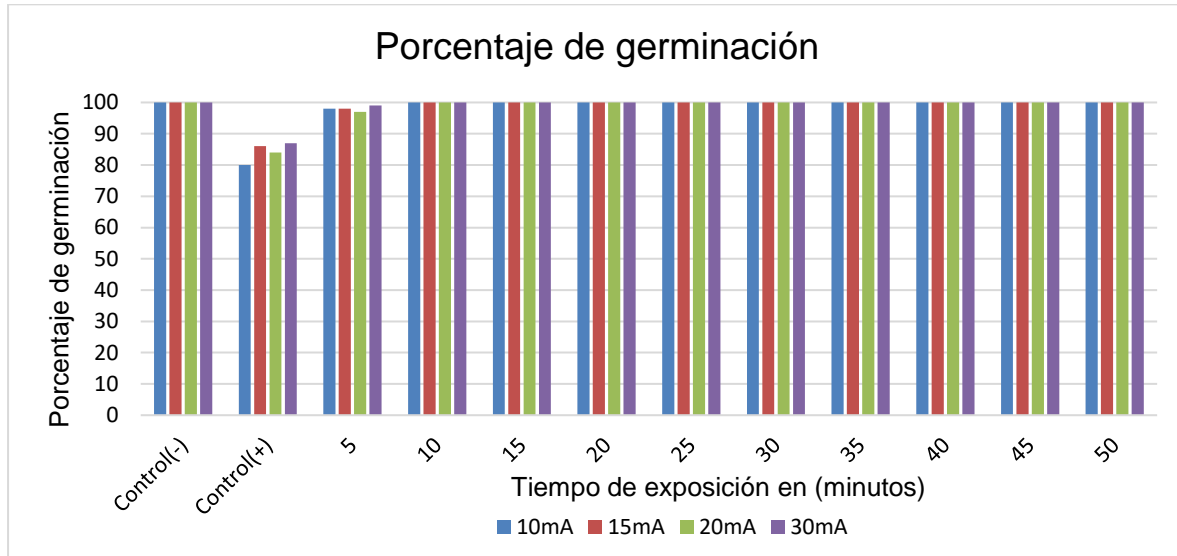


Figura 4.4. Porcentaje de germinación de semillas de lechuga (*Lactuca sativa*), en solución acuosa ante un plasma físico aire-agua a presión atmosférica.

Para el control negativo el porcentaje de germinación es del 100% en los cuatro tratamientos, por lo que se determina que la semilla es viable, no hay algún factor de riesgo que pudiera afectar el resultado de germinación.

Para el control positivo, se observa que el resultado de germinación es menor al control negativo, lo cual se atribuye a la alta cantidad de colorantes presentes en el agua, y esto tiene efecto en la germinación eficiente de la semilla.

Para los tratamientos que se realizaron en condiciones de presión atmosférica, se observa claramente en los 4 tratamientos, que tuvieron el mismo comportamiento en la germinación de las semillas, es decir, la solución acuosa tratada con plasma físico a presión atmosférica

en un tiempo de 50 minutos con una corriente de 10 mA 15 mA, 20 mA y 30 mA para los tratamientos T1, T2, T3 y T4 respectivamente, tiene un resultado positivo muy significativo , debido a que el resultado es el 100 % de la germinación de las semillas.

Al comparar los resultados se observa claramente que el tratamiento con plasma generado a presión atmosférica es más eficiente. Los resultados indican que los compuestos presentes en el aire tienen un efecto significativo en la decoloración del contaminante estudiado. La ausencia de aire tiene un gran impacto negativo en el tratamiento con plasma, debido a que no se genera radicales hidroxilo e iones hidronio y, por tanto, los niveles de degradación del contaminante no son adecuados.

CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES

Se implementó un dispositivo experimental ajustable, que permitió la generación del plasma y manejo de la solución de manera eficiente. Este dispositivo permitió extraer las muestras de una forma rápida y segura.

Se realizaron pruebas experimentales para evaluar los cambios y efectos en la solución acuosa al ser expuesta al plasma no térmico aire-agua a baja presión y presión atmosférica mediante los tratamientos T1 (10 mA), T2 (15 mA), T3 (20 mA) y T4 (30 mA), con un tiempo de exposición total de 50 minutos para cada uno de ellos.

Se observó que la decoloración del pigmento Verde Azul Doracryl (Cloruro de dietil amonio) disminuyó cuando el plasma no térmico fue generado a baja presión, pero no se lograron niveles adecuados debido a que no se produjeron suficientes radicales hidroxilos, los cuales son los responsables de degradación de los compuestos orgánicos en los Procesos Avanzados de oxidación.

Se lograron mayores porcentajes de decoloración cuando el agua con contaminante fue sometida a un plasma generado a presión atmosférica debido a que los compuestos presentes en el aire permitieron una mayor producción de radicales hidroxilos y, por lo tanto, una mayor transformación del colorante.

Cuando el plasma fue generado a baja presión alcanzaron porcentajes de decoloración del 26.53%, 46.68%, 74.91% y 90.17% cuando la solución se expuso a los tratamientos T1, T2, T3 Y T4 respectivamente. El T4 con una corriente de 30mA es el de mayor disminución de manera significativa.

Cuando el plasma fue generado a presión atmosférica alcanzaron porcentajes de decoloración del 64.35%, 72.50%, 90.49% y 93.03% cuando la solución se expuso a los tratamientos T1, T2, T3 y T4 respectivamente. El T4 con una corriente de 30 mA es el de mayor disminución de manera significativa.

El pH mostro una tendencia decreciente cuando el plasma fue generado a presión atmosférica y a baja presión. En el caso de baja presión, el pH inicial de 6.3 disminuyo hasta 4.2, 4.0, 4.0 y 3.8 para los tratamientos T1, T2, T3, y T4, respectivamente. A presión atmosférica el pH iniciales de 5.6 disminuyo hasta 3.0, 2.9, 2.7 y 2.3 para los tratamientos T1, T2, T3 y T4, respectivamente. Esta disminución en el pH podría atribuirse a los subproductos (ácidos carboxílicos) de la degradación del colorante.

Cuando el plasma fue generado a presión atmosférica, se observó que el porcentaje de germinación de semillas de lechuga fue mayor cuando se utilizaron soluciones sometidas a diferentes tiempos de tratamiento en comparación a los porcentajes logrados cuando fueron expuestas a la solución sin tratar. Por lo tanto, se deduce que los subproductos generados durante el tratamiento con plasma a presión atmosférica son menos tóxicos que el contaminante original.

En general, se observa que los porcentajes de germinación de semillas de lechuga cuando se utiliza plasma generado a presión atmosférica son mayores que cuando el plasma es generado a baja presión.

Las semillas expuestas a soluciones tratadas con T3 y T4, en los cuales el plasma fue generado a baja presión, mostraron menores porcentajes de germinación. Sin embargo, se considera que el tratamiento T3 fue menos eficiente debido a que en el 80% de los tiempos analizados la germinación fue menor o igual que la de las semillas sometidas a la solución sin

tratar. Por tanto, se deduce que durante el tratamiento con plasma producido comuna intensidad de corriente de 20 mA y un voltaje de 1500 V se formaron compuestos intermediarios igual o más tóxicos que el contaminante original.

Referencias

- A. E. Ghaly, R. A., 2014. Production, characterization and treatment of textile effluents. *Eng. Process Technol*, Volumen 5, pp. 1-18.
- Abdenouri, N. e. a., Junio 1999. "Separation of gold from sulfide using a plasma are fuming process". *Plasma chemistry and plasma processing*.. Vol. XIX, núm. 2 ed. Nueva York: Springer New York Chemistry.
- Anon., 1996. *NOM-002-SEMARNAT-1996 Establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipl con el fin de crevenir y controlar la contaminación de las aguas y bienes nacionales*.. Ciudad de México: Diario Oficial de la Federación.
- Anon., s.f.
- Bittencourt, J., 1986. *Fundamentals of plasma physics*. Primera ed. Oxford: Pergamon Press.
- Cervantes, J. N. C., 2015. Remoción de colorantes tipo Azo usando liquidos ionicos. *Tesis Magistral Centro de investigación e Innovación Tecnológica IPN*, Volumen 1.
- Colombia, F. y. N., 2015. Estas son las etapas del proceso de tratamiento de aguas residuales.. *Fibras y normas de colombia*., p. 25.
- D. Mantzavinos, R. H. A. L. y. I. M., Mayo 1996. *Conferecia Internacional en Tecnologías de Oxidación para Tratamientos de Aguas y Aguas Residuales*.. Alemania, Goslar.
- G., Y. L. S. y. M. P. M. M., 2013. *Evaluación de diferentes procesos de tratamiento para la remoción de colorantes sintéticos utilizados en la industria textil*. s.l.:SEMARNAT (Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales),IMTA..
- I., T., 2013. *El cuarto estado de la materia*., s.l.: Depto. de Física Molecular Inst. Estructura de la Materia..
- Kamenetski, D. A. F.-., 1979. *El plasma, cuarto estado de la materia*.. s.l.:s.n.
- L.V. Gonzalez, E. E., 2008. Biodegradación anaeróbica de colorantes azoicos textiles usando carbón activado. *Biotechnologías*, Volumen 12, pp. 34-47.
- Landy Irene Ramirez Burgos, M. d. c. D. D. d. B., 2008. Demanda quimica de oxigeno de muestras acuosas.. *quimica ambientalde los residuos peligrosos*. , 1(968-36-9000-9), p. 156.
- Marias, M. d. I., 1976. Química y Física de las fibras textiles. *Alhambra*, Issue 84, pp. 84-205.
- Marin O. A., O. P. M., 2013. *Operación y Mantenimiento de plantas de tratamiento de aguas residuales con el proceso de lodos activados*.. Jalisco: Arturo Nelson Villarreal..

Norma Oficial Mexicana, NOM-001-SEMARNAT-1996, 1996. *Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en bienes y aguas nacionales.*. Ciudad de Mexico: Diario Oficial de la Federación.

Norma Oficial Mexicana, N.-0.-E.-1., 1994. *Establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales acuerpos receptores, provenientes dela industria de pigmentos y colorantes.*. Ciudad de Mexico: DOF.

Ollis, J. P. S. y. D. F., 1995. *Environ Progress*. pp. 88-103.

Platina, G. S. D. R. D. L., 2017. *Manual de producción de lechuga*. Boletín INIA/N° 09. ed. Santiago, Chile: Instituto de Desarrollo Agropecuario y Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA).

Quimica, G. s. y. T., 2010. *Introducción teórica Fundamentos de espectrofotometría*. II(11).

Riccardi, C. e. a., Febrero 2001. *"A SF RF plasma reactor for research on textil treatment"*. *Plasma Sources Science and Technology*.. Vol. X, núm 1. ed. Bristol: Institute of Physics Publishing..

Ruvalcaba, L. S., 2014. *Desarrollo de un sistema para generación de plasma en una descarga de barrera dielectrica coplanar.*. *centro de investigación en ciencia aplicada y tecnologia avanzada* , Volumen 1, p. 91.

SOTELO, J. P. P., s.f. *El plasma ese universo de todos...tan desconocido*. *El contacto nuclear ININ HOY*.

Zaruma, P. E., 2018. *Los colorantes textiles industriales y tratamientos optimos de sus efluentes de aguas residuales*. *Facultad de Ciencias Quimicas*, Issue 1390-1869, p. 47.