



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS
ESCUELA DE ESTUDIOS SUPERIORES DE XALOSTOC

EFFECTO DE LA EXPOSICIÓN DEL COLORANTE
TEXTIL ROJO VERSATINT EN SOLUCIÓN
ACUOSA, ANTE UN PLASMA DE AIRE

T E S I S

QUE PRESENTA:

JORGE CLETO DIAZ

PARA OBTENER EL TITULO DE:

INGENIERO INDUSTRIAL

Director: Dr. Fidel Benjamín Alarcón Hernández.

Codirectora: Dra. María del Carmen Fuentes Albarrán.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS



ESCUELA DE ESTUDIOS SUPERIORES DE XALOSTOC

Secretaría de Docencia

Departamento de Servicios Académicos

Ayala, Morelos a 19 de octubre del 2020.

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 **EFFECTO DE LA EXPOSICIÓN DEL COLORANTE TEXTIL ROJO VERSATINT EN SOLUCIÓN ACUOSA, ANTE UN PLASMA DE AIRE**. Que ha realizado el pasante de la Licenciatura en **Ingeniería Industrial, Jorge Cleto Diaz**, otorgamos nuestro voto de aprobación para su impresión por haberse realizado las correcciones consideradas pertinentes de nuestra parte.

Atentamente
Por una humanidad culta
Una universidad de excelencia

M. en C. Eréndira Salgado Baza

Dra. María del Carmen Fuentes Albarrán

Dr. José Luis Gadea Pacheco

Dr. Esteban Montiel Palacios

Dr. Fidel Benjamín Alarcón Hernández

**UA
EM**

Una universidad de excelencia

RECTORÍA
2017-2023

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:2020-11-10 17:51:04 | Firmante

oKwmGxOhXGNjnunsQsctoLvX0UikwMNPabuC89uc0e+E9Lvzfa3RE/nkw1VrvhJ9f3OLZJvmbiI/ORkJO05CnwqATzbwqoe+YqWWRr8kTiXXzfyUCLYyPs4Muzygi+7y9HoGknAAWjMaiArizbSSyPvOfc/h6L1JILP1floe0FVYH1oGCXYzwTrq97A4xlVekLHIDfYDXMXsavRDob5FTIDOBByghq/HXc3UU6W7jy7u0P4b7VqdMmfmL92Ek9VrKDZ10O97p/IVNHV0mO19K+OwNu/uZcG1vW6xbaLTgumoXBxg1vTe0Su0LSD3zFjgipeIIZ5zz2KEqfIbTw==

MARIA DEL CARMEN FUENTES ALBARRAN | Fecha:2020-11-10 18:12:36 | Firmante

kqdDMIM9C0M+KMKjFxoanRVsI4riJwG9KyAQXC/3oxiqmvrkNCvd4psYE2BfVPC0MAxPBHkyNWTIOMf/oxOJyMvyQren9sZuEa4WBQzcSjop2Oo/Wyj7aFExtUwr5uDxumCGT2P3uOrHlllGEH3DrSH3KJn+qP5Zg7hOE5Vw9dKglBGIK3IGP1IN/VUOXK2qG9UJ3XQ5JGwQlycJEMjS4x9RxiOAxuEe4MLhAQ0BoO/qItz3jXsBepIXScWvNzrPILIRz/1xG8fx12pwEAK/PwPBfzW/ozZ52AObYQ7Hrr8MvrljleoE4AlrBF4nsEuzOvkIII7a7oSPCu/G4A==

ESTEBAN MONTIEL PALACIOS | Fecha:2020-11-10 21:00:00 | Firmante

s1wuWzFbSQ7Q5bQCJwEwx0czbicSiB5lhHhx4K/sxW+JPNstmVIO1W8XXkqgNFsZ/Z1KIKHqXsYIZdprOIJtSVIFRfcNWgAj9vboFBulmQsradMDxfUbwGaNw4UZvaaS5zRu7j5CraqcqyVTfHUsAU3j1R1RtoCjkb58UcmfF5n2QalzDB8Ugqk8yF9EKXcdg8/quT7N53HntI4IBX87WGSdb2dpE36BGndJVsI2k3AgJEMfxAmKnxcm07yxXz/07W+A4mnnO5x2et7DdsecsSAK3FrtWjDRyzT6jdDKCmRqjTuusjKbkQX/uaqv7hjyw/22NjnQ==

ERENDIRA SALGADO BAZA | Fecha:2020-11-12 16:31:55 | Firmante

LAM7MPHqHBF1TreBLELEJe5iG7dH1Hbf9W9ewq81Hi38mnJOCmNY9zLQjwC5gmjcdBc/iR4CcdKPkBjYwq6RoF9fsmM3xOKJNWIYyBLWSyU8J3WQcloN90eaGxEnimTMJ9eBObfY2fzFmHALDZb+o2p4/EU8OxSB+UBmn+9FkI7SEh1IMmUImGOtZ1T8gVoP5rA8SJM8NaNMG4I3MrgBIRkRqtd+P17I5Dg7k1PvDcuI/AEmia5SBJII/Tr8ds6oqXFEXErwozk9WakiUyRPPYgN7x4ISbAnPrIG2GbXhNGp1fdz+TXGfYpA3uRcD5BToITXAMg6leRInvg==

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



uBzdSk

<https://efirma.uaem.mx/noRepudio/8IKHGseDCz2SUD5qqwbbDymxPDeAztr>

A mis padres Jesús Cleto y Francisca Díaz...

AGRADECIMIENTOS

Al Dr. Fidel Benjamín Alarcón Hernández por su paciencia y valiosas enseñanzas, por permitirme formar parte de su equipo de trabajo, por su apoyo y guía en mi formación.

A los miembros del jurado por tomarse el tiempo de leer el presente trabajo y por los comentarios hechos al respecto: M. en C. Eréndira Salgado Baza, Dra. María del Carmen Fuentes Albarrán, Dr. Esteban Montiel Palacios, Dr. Fidel Benjamín Alarcón Hernández.

A mi tan apreciada UNIVERSIDAD ESCUELA DE ESTUDIOS SUPERIORES DE XALOSTOC.

A mis padres, Jesús Cleto Álvarez y Francisca Díaz Antúnez, por el amor y cuidado que tuvieron para conmigo. Por creer en mí, por darme ese impulso, por ser una motivación en mi vida, por formarme y guiarme en mi camino de una manera correcta.

A mis hermanos, Mari y Javi, a la mayor por ser siempre para mí, un ejemplo a seguir, al pequeño por su apoyo y comprensión.

A Dios por permitir cada logro, por la salud y la vida.

Votos aprobatorios	2
Firmas de conformidad	3
Dedicatoria	4
Agradecimientos	5

INDICE

LISTA DE FIGURAS.....	8
.....	9
LISTA DE TABLAS.....	9
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN.....	10
I.1. Hipótesis	13
I.2. Objetivos	13
I.2.1. Objetivo general	13
I.2.2. Objetivos particulares.....	13
CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO.....	14
II.1. Colorantes textiles	14
II.1.1. Consumo de colorantes textiles en México y en el mundo.....	16
II.1.2. Clasificación	17
II.2. Generalidades del colorante textil Rojo Versatint.....	18
II.3. Plasmas.....	19
II.4. Parámetros que indican la calidad del agua	24
II.4.1. Parámetros físicos.....	24
II.4.2. Parámetros químicos	25
II.4.3. Demanda Química de Oxígeno (DQO)	25
II.4.4. Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)	25
II.4.5. pH (Potencial de Hidrógeno)	26
II.4.6. Absorbancia	26

II.4.7. Curva de calibración.....	28
II.4.8. Parámetros biológicos.....	29
II.5. Ensayos toxicológicos con semillas de lechuga <i>Lactuca sativa</i>	30
CAPÍTULO III. DESARROLLO EXPERIMENTAL.....	32
III.1 Dispositivo experimental.....	32
III.2 Preparación de la solución de colorante textil Rojo Versatint.....	33
III.3 Exposición de la solución con colorante al tratamiento por plasma.....	33
III.4. Muestreo.....	35
III.5. Indicadores de calidad del agua.....	35
III.6. Determinación del potencial de hidrógeno (pH).....	36
III.7. Determinación de absorbancia.....	37
III.8. Curva de calibración.....	38
III.9. Medición de temperatura.....	40
III.10. Realización de bioensayo.....	41
CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	43
IV.1. Absorbancia.....	43
IV.2. Potencial de hidrógeno (pH).....	45
IV.3. Temperatura.....	46
IV.4. Ensayo toxicológico con semillas de lechuga (<i>Lactuca sativa</i>).....	48
CAPÍTULO V. CONCLUSIONES.....	50
BIBLIOGRAFÍA.....	52

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Estructura química del colorante textil Rojo Versatint	..... 15
Figura 2.2	Ejemplo de reactor para tratamiento de agua residual con plasma frío	..... 16
Figura 2.3	Espectro de absorción	..... 24
Figura 2.4	Morfología de la semilla y la plántula de lechuga <i>Lactuca sativa</i>	..... 27
Figura 3.1	Diagrama del dispositivo experimental	..... 29
Figura 3.2	Exposición al plasma	..... 31
Figura 3.3	Lectura de pH	..... 34
Figura 3.4	Muestra en blanco (agua destilada)	..... 35
Figura 3.5	Medición de absorbancia de la solución	..... 35
Figura 3.6	Curva de calibración del Rojo Versatint en solución acuosa	..... 36
Figura 3.7	Medición de temperatura de la solución	..... 37
Figura 3.8	Bioensayos con semillas de lechuga <i>Lactuca sativa</i>	..... 39
Figura 4.1	Absorbancia de solución acuosa de colorante Rojo Versatint para cada tratamiento, comparadas con el tiempo de exposición.	..... 40
Figura 4.2	Concentración de la solución experimental	..... 41
Figura 4.3	Comportamiento del pH de la solución experimental expuesta al plasma en los	..... 42

	cuatro tratamientos a diferente Voltaje.	
Figura 4.4	Cambio de Temperatura en los diferentes tratamientos con respecto al tiempo de exposición y la cantidad de Voltaje aplicado para cada uno.	..... 44
Figura 4.5	Porcentaje de germinación de semilla de lechuga <i>Lactuca sativa</i> , expuesta a la solución de colorante Rojo Versatint sometida al tratamiento de plasma.	..... 45

LISTA DE TABLAS

Tabla 3.1	Parámetros utilizados en cada tratamiento con plasma.	..... 30
Tabla 3.2	Cambio de absorbancia (A) en función de la concentración (C) del Rojo Versatint en solución acuosa.	..... 36

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

El deterioro ambiental que cada día se agudiza como consecuencia del desarrollo de actividades humanas sin cuidado por el medio ambiente. En los últimos años, la problemática sobre la contaminación ambiental y el consecuente calentamiento global, han sido tema de interés mundial, uno de estos retos es la depuración de las aguas residuales. Entre la variedad de sustancias contaminantes descargadas, es posible encontrar desde metales pesados (mercurio, cadmio, cromo, arsénico, plomo, etc.), contaminantes emergentes (compuestos orgánicos persistentes, endocrinos, antibióticos, etc.), hidrocarburos, materia orgánica, hasta compuestos que producen la coloración de los efluentes (colorantes y pigmentos).

La afectación a los ecosistemas por los reiterados vertimientos de efluentes teñidos realizados por empresas, han generado preocupación no solo en las autoridades locales sino también en la comunidad en general, debido a que este tipo de eventos evidencian el alto grado de impacto que sufren diariamente los recursos naturales y muestran la despreocupación por parte de las empresas de tratar y cuidar que sus efluentes no afecten el medio ambiente natural.

El tema relacionado con el agua es de gran preocupación debido a su continua escasez y nivel de contaminación. Los principales contaminantes de este medio provienen de las aguas residuales de fábricas, uso doméstico e higiene personal. Los colorantes industriales han generado bastante interés de estudio debido a sus niveles de uso y a su presencia en aguas residuales que son vertidas en ríos y mares ocasionando su contaminación. Éstos son utilizados por las industrias textiles para la realización de tejidos, estampados y acabados de sus productos.

Una clase de colorantes textiles son los llamados poliméricos dentro de los cuales se encuentran los poliméricos de polioxialquileno, los cuales proporcionan los rendimientos requeridos en las fábricas y tienen moléculas grandes. Se conoce como un colorante polimérico de polioxialquileno a aquel que cumple con los requisitos de rendimiento

necesarios en las fábricas y tiene moléculas grandes, altamente solubles en agua, que no pueden penetrar en la superficie de la fibra y pueden lavarse fácilmente durante el teñido y acabado acuoso normal. Su presentación puede ser líquida o en polvo.

Dentro de este grupo se encuentra el colorante textil Rojo Versatint o Versatinto; se utiliza para registrar las fibras textiles mediante códigos en las maquinarias de operación durante su procesamiento, pero desaparecen en la etapa final, sin agregar ninguna operación adicional y sin influir en el tono final de la tela, incluso si es blanca.

La situación ideal en la industria textil, más que verter aguas residuales con cantidades permitidas de químicos, es la capacidad de reciclar estas aguas para dar un segundo uso dentro de sus mismos procesos o para destinarla a la agricultura. Con estas medidas no solo se beneficia al medio ambiente y se favorece el ahorro del agua, también se reducen costos de suministro.

En particular, para tratar de dar solución a tales problemas, se utilizan los llamados procesos avanzados de oxidación (AOP's por sus siglas en inglés), y es donde se exponer una solución acuosa del colorante Rojo Versatint o Versatinto ante un plasma de aire.

Los plasmas se pueden clasificar de varias formas, una de ellas es según su equilibrio térmico, en plasmas calientes (térmicos) y fríos (no térmicos). Los plasmas térmicos son aquellos en los cuales los electrones y las demás partículas que se encuentran en él están en equilibrio térmico, es decir tienen la misma temperatura.

En cambio, en los plasmas fríos, los electrones tienen una temperatura mayor a la de las demás partículas que lo componen; este tipo de plasmas se pueden generar a presión atmosférica y a temperatura ambiente mediante una diferencia de potencial que permita la transferencia de corriente eléctrica entre los electrodos y, así puedan llevarse a cabo las reacciones químicas de óxido-reducción necesarias para poder degradar el contaminante que se encuentra en la solución.

Los plasmas fríos resultan muy útiles para muchas aplicaciones técnicas tales como: Síntesis de nano partículas, modificación de superficies, Limpieza, esterilización y erosión

por mencionar algunas. Esto se logra gracias a la falta de equilibrio térmico, que hace posible mantener baja la temperatura, por una parte, de las especies iónicas y neutras y por otra, de los electrones.

Al aplicar un plasma frío a una solución se generan varias especies reactivas, entre estas especies se encuentran fotones en el rango visible y en el ultravioleta, partículas cargadas (electrones e iones), especies neutras muy reactivas, como los radicales libres o átomos de oxígeno, flúor y cloro; especies atómicas y moleculares excitadas, entre otros (Gordillo, 2008).

En particular en este proyecto, se evaluó el efecto que experimenta el colorante textil Rojo Versatint en medio acuoso al ser expuesto a un plasma de aire a baja presión bajo diferentes condiciones de generación del plasma.

El presente trabajo de investigación se distribuye de la siguiente manera.

- ❖ Capítulo 1 Introducción. Proporciona una contextualización general acerca del tema de investigación, la razón por la que se desea indagar sobre ello, así como los objetivos generales y particulares del proyecto.
- ❖ Capítulo 2 Marco teórico. Se explica brevemente acerca de la utilización del colorante tipo textil, clasificación de los mismos y efectos en la salud; así como los parámetros que indican la calidad en agua y las técnicas para evaluarlos.
- ❖ Capítulo 3 Desarrollo experimental. Se explican de manera detallada los pasos para llevar a cabo esta investigación, materiales y equipos utilizados, preparación de la solución de interés, proceso de exposición al plasma frío, extracción de las muestras y medición de parámetros.
- ❖ Capítulo 4 Resultados y discusión. Se muestran los resultados obtenidos durante todo el tratamiento, así como análisis y discusión de estos.

- ❖ Capítulo 5 Conclusiones. Se presentan las conclusiones más relevantes de la investigación.

I.1. Hipótesis

La aplicación de plasma físico de aire (mediante 4 tratamientos de diferente potencia: 25 mA y un voltaje de 1000, 1500, 2000 y 2500 V respectivamente) a una solución acuosa de colorante polimérico Rojo Versatint, induce la transformación del colorante en un compuesto menos tóxico para el medio ambiente.

I.2. Objetivos

I.2.1. Objetivo general

Determinar el cambio de la concentración de colorante textil Rojo Versatint en solución acuosa tras la aplicación de un plasma físico de aire, mediante la evaluación de absorbancia y bio toxicidad.

I.2.2. Objetivos particulares

- ❖ Ensamblar un dispositivo experimental para la generación del plasma físico de aire en presencia de la solución acuosa.
- ❖ Variar el voltaje de generación del plasma a una intensidad de corriente eléctrica constante y cuantificar el comportamiento de la solución acuosa al ser sometida al plasma de diferente potencia.
- ❖ Evaluar el efecto en la solución acuosa de colorante al ser expuesto a un plasma de aire, mediante la medición del cambio de absorbancia, pH, temperatura, así como toxicidad.

CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO

II.1. Colorantes textiles

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

Los colorantes pueden ser definidos como sustancias que cuando son aplicadas a un sustrato le imparten color. Los colorantes son retenidos en el sustrato por absorción, retención mecánica, o por un enlace iónico o covalente. Son usados comúnmente en textiles, papel y piel.

Los colorantes poliméricos permiten ajustar sus propiedades físicas (solubilidad, absorción, migración y viscosidad), no subliman, no son abrasivos y generalmente tienen baja toxicidad.

Hoy en día existen muchos productos hechos a base de colorantes poliméricos, cada uno diseñado para satisfacer las necesidades de mercados específicos. Por ejemplo, los colorantes Versatinto se utilizan para codificar las fibras textiles durante el procesamiento, pero desaparecen en la etapa final, sin agregar ninguna operación adicional para la degradación del contaminante en los desechos residuales.

La industria de colorantes está muy relacionada con la industria textil de manera que un incremento en la producción de fibras requerirá mayor producción de colorantes, aunque no en la misma proporción (Anjaneyulu *et al.*, 2005 y Días *et al.*, 2007). Hay alrededor de 100,000 colorantes, y se producen al año 700,000 toneladas en todo el mundo (Supaca, *et al.* 2004)

La principal fuente emisora de colorantes es la industria textil (Anjaneyulu *et al.*, 2005 y Días *et al.*, 2007). En el proceso de teñido se generan una gran cantidad de efluentes con colorantes ya que alrededor del 30% de estos compuestos se pierden debido a las ineficiencias del procesamiento y son descargados a los efluentes. El uso de una amplia variedad de colorantes químicos da origen, en periodos cortos de tiempo, a efluentes extremadamente variados en su composición, que requieren de un tratamiento de aguas muy complejo (Nigam *et al.*, 1996; Kandelbauer *et al.*, 2005 y Días *et al.*, 2007).

Los colorantes textiles tienen diferentes orígenes y aplicaciones, aunque en la actualidad mayormente son utilizados los de origen sintético, los cuales son difíciles de biodegradar en el medio ambiente. Por este motivo, se ha visto obligado a buscar la manera de eliminar estos contaminantes ya que estas sustancias son consideradas como recalcitrantes al tratamiento biológico. Por ende, a éstas se les debe aplicar procesos adecuados para degradarlas de las aguas residuales de manera efectiva, antes de que sean descargados al ambiente.

Los colorantes poliméricos de polioxialquileno entre los que se encuentra el Rojo Versatint no son biodegradables, y tienden a acumularse en los organismos vivos, causando diversas enfermedades y trastornos. Estos compuestos son recalcitrantes a los tratamientos convencionales de las aguas residuales. El intervalo de concentraciones de colorante Rojo Versatint, en las aguas residuales de origen textil, está entre 100 y 500 mg/L (Nigam *et al.*, 1996; Kandelbauer *et al.*, 2005 y Días *et al.*, 2007).

En otras palabras, las aguas residuales con colorantes sintéticos son consideradas como unas de las más complicadas de tratar. Por este motivo, los efluentes con este tipo de sustancias deben ser tratados de manera adecuada antes de ser descargados al ambiente, de lo contrario se está afectando directamente a los ecosistemas y, principalmente, a los cuerpos de agua.

Colorantes textiles tipo poliméricos.

Estos colorantes empleados en la industria textil se caracterizan por su grupo funcional cromóforo que está representado por $-N=N-$. En esta clase destacan tres familias: monoazo, diazo y triazo; cada una de ellas existe con diferentes propiedades. Así se encuentran los colorantes azo: ácidos, básicos, reactivos, directos, dispersos y pigmentos, siendo los colorantes monoazo dispersos los que mayor consumo tienen debido a que se usan para teñir fibras e hilos de poliéster, acetato, nylon y acrílico (Kirk-Othmer, 1993).

II.1.1. Consumo de colorantes textiles en México y en el mundo

La industria textil mexicana se caracteriza por el alto volumen de agua que usa en sus procesos, la cual es contaminada durante la producción de hilos o telas. En el año 2003 los cerca de 2,500 establecimientos textiles existentes generaron 0.7 m³/s de aguas residuales y produjeron 14 mil toneladas de DBO (CNA, 2004). Para el mejor aprovechamiento de los recursos hidráulicos y uso racional del agua se requiere, sustituir materias primas, utilizar equipos de proceso más eficiente y reusar el agua tratada en servicios y procesos donde se requiera agua con calidad inferior a la potable (Cruz, 2003).

Los colorantes más utilizados a nivel mundial en la industria textil, papelera, cosmética, y farmacéutica son del tipo polimérico, de los que existen aproximadamente 3000 tipos que se usan en la industria textil (Nigam et al, 2000).

Un poco más de la mitad de la producción mundial de colorantes está destinada a la producción de colorantes textiles y alrededor del 15% a industrias como el papel, piel, etc. El 25% corresponde a la producción de pigmentos orgánicos (IMTA, 2000). Actualmente existen cerca de 100 mil diferentes tipos de colorantes en el mercado, de los que aproximadamente entre el 10% y 15% de la producción total de colorantes de este tipo son descargados al medio ambiente a través del agua residual (Tan et al., 1999). Esto es peligroso debido a que algunos de estos colorantes o sus subproductos son altamente tóxicos, mutagénicos o carcinogénicos (Kalyuzhny et al, 1999).

La principal fuente de contaminación en los efluentes textiles está constituida por la presencia de colorantes poliméricos que son difíciles de degradar en sistemas de tratamiento convencional. Cada tipo de colorante presenta características físicas, químicas

y biológicas diferentes, que les atribuyen características recalcitrantes y efectos tóxicos para el ambiente.

II.1.2. Clasificación

Hay varias formas de clasificar a los colorantes textiles, una de ellas está dada por la siguiente descripción.

- ❖ Colorantes ácidos. - Este término se le da a los colorantes capaces de tener interacciones de carga con el sustrato como la fibra de lana o seda. Los colorantes ácidos son compuestos orgánicos aniónicos que requieren para fijarse a la fibra que ésta esté disponible con sitios catiónicos. La ionización del colorante se logra al aplicar junto con él un ácido orgánico, que puede ser ácido acético, a un pH entre 2-6 unidades. El colorante que sobresale por su producción es el colorante diazo, Rojo ácido (Manu B. y Chaudhari S., 2002).

- ❖ Colorantes básicos. - Son colorantes catiónicos que llevan una carga positiva en la porción cromófora de la molécula, aunque también la carga puede estar deslocalizada o distribuida a través de la porción catiónica del colorante. En condiciones alcalinas o neutras estos colorantes se comportan como colorantes dispersos. Estos colorantes se utilizan a menudo para teñir fibras de poliéster y nylon modificado debido a que producen alta intensidad de color y mayor brillantez en la fibra que otros colorantes. Se aplican en solución acuosa con suficiente ácido acético para mantener el pH entre 4 y 6 unidades, tienen gran capacidad de teñido ya que sólo 1 mg/l de colorante produce una fuerte coloración al agua, además de que tiene la capacidad de ser adsorbido en muchos minerales y en la materia orgánica presente en el agua (Singh P. y Lyengar L., 2007).

- ❖ Colorantes reactivos. - Son colorantes aniónicos con varios grupos sulfónicos, que los hacen ser muy solubles en agua. Consisten básicamente de tres componentes: un grupo cromóforo, un grupo de unión y un grupo reactivo. Durante el teñido, el colorante se hidroliza lo que causa baja fijación de la fibra, además de incrementar su

solubilidad. Estos colorantes se caracterizan por tener en su estructura uno o más grupos reactivos complejos que pueden ser sensibles a la hidrólisis. La disminución de la reactividad de estos colorantes es causada por la presencia de grupos donadores de electrones como son el hidrogeno, nitrito, hierro, sulfuro, metano por mencionar algunos. El principal uso de estos colorantes es para teñir fibras naturales como algodón, lana y sintéticas como la poliamida (nylon) (Prem Kumar T., 2007).

- ❖ Colorantes dispersos. - Son colorantes aniónicos insolubles en agua por lo que se emplean en forma de dispersiones acuosas para teñir fibras sintéticas hidrófobas. Se utilizan en la tinción de poliéster, nylon, diacetato y triacetato de celulosa, así como fibras acrílicas (Singh P. y Lyengar L., 2007).
- ❖ Colorantes mordentes. - Su característica principal es que no se fijan por si mismos a la fibra, sino que necesitan de un metal, que generalmente es cromo, para formar lacas. El proceso se llama “mordentado” el cual consiste en tratar en medio ácido (pH 2-6) el colorante junto con sales metálicas tales como cromato de sodio para formar el complejo metálico en el sitio de teñido. Son estables, no se desmetalizan fácilmente y no son afectados al tratarlos con soluciones alcalinas o con ácidos débiles (Cruz, 2003).
- ❖ Colorantes directos. - Son colorantes aniónicos que se aplican en solución acuosa en presencia de un electrolito para hacer el teñido de la fibra, su estructura es compleja ya que contiene usualmente más de dos ligaduras azo; su principal uso es para teñir fibras de algodón, celulosa y viscosa (producto que se obtiene mediante tratamiento de la celulosa). La ventaja principal de éstos es que son muy estables a la luz y se absorben fácilmente en las impurezas del agua (Cruz, 2003).

II.2. Generalidades del colorante textil Rojo Versatint

Los colorantes Versatinto se utilizan para registrar mediante códigos las fibras textiles durante el procesamiento respectivo, pero con la peculiar característica de que ese registro desaparece al final del proceso.

Un colorante polimérico de polioxialquileno tiene moléculas grandes, altamente solubles en agua, incapaz de penetrar en la superficie de la fibra y pueden lavarse fácilmente durante el teñido y acabado acuoso normal. Su presentación puede ser líquida o en polvo (Pure & Appl. Chem.,1996. Printed in Great Britain. 1996 IUPAC).

Nombre comercial: Rojo Versatint.

Nombre similar: Rojo Versatinto, colorante polimérico Rojo Versatinto.

En la Figura 2.1 se muestra la estructura química del colorante Rojo Versatint:

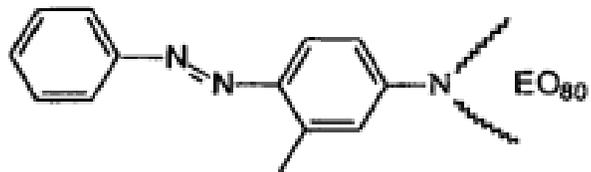


Figura 2.1 Estructura química del Rojo Versatint

II.3. Plasmas

Un plasma es definido como un gas ionizado parcial o totalmente, el cual está constituido por electrones, radicales libres, partículas neutras, entre otros.

Su principal clasificación está enfocada en la temperatura de sus componentes; así se dividen en plasmas térmicos y no térmicos. En los plasmas térmicos todos sus componentes están en equilibrio térmico y, las temperaturas que alcanzan son extremadamente elevadas por lo que no se podrían manipular en un laboratorio. Mientras que, en los plasmas fríos, los electrones tienen una temperatura mayor que el resto de las especies de su composición, en otras palabras, están en desequilibrio térmico. Además, la temperatura de las especies pesadas (átomos, iones y moléculas) está en el intervalo de 25 a 100 °C. Por estas características, su fácil manejo y accesibilidad pueden ser controlables en el laboratorio; razón por la que son utilizados en múltiples aplicaciones.

En la figura 2.2 se aprecia un ejemplo de reactor usado para generar plasma, empleado para estudiar los efectos producidos en un compuesto en solución acuosa.

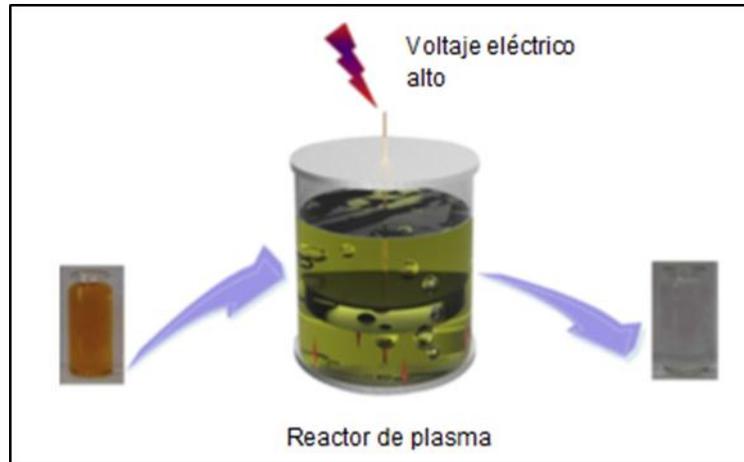


Figura 2.2 Ejemplo de reactor para tratamiento de agua residual con plasma frío [Jiang et al., (2014)]

El tratamiento de aguas residuales mediante plasmas es considerado también como un proceso avanzado de oxidación y, es adecuado para degradar contaminantes emergentes debido a su rápida tasa de remoción y compatibilidad ambiental.

Existen varios tipos de plasmas fríos con diferentes propiedades y aplicaciones, entre éstos se encuentran los de descarga corona, barrera dieléctrica, de arco, entre varios más. Los plasmas fríos pueden ser empleados en otras áreas tecnológicas; por ejemplo, iluminación, industrias de alimentos, esterilización, industria de materiales, por mencionar a algunos.

La generación de un plasma frío es relativamente sencilla, pues es producido mediante descargas eléctricas, con voltaje e intensidad dependientes de cada aplicación.

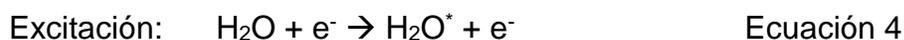
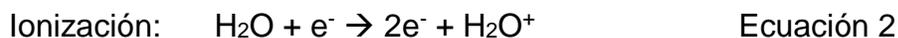
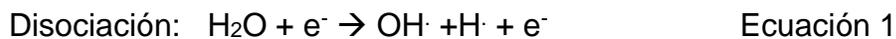
La distribución de la descarga eléctrica para generar el plasma en la muestra del compuesto en solución acuosa se divide principalmente en tres tipos, descarga eléctrica sobre la superficie, directamente en el líquido y por medio de burbujas o vapor. En el caso

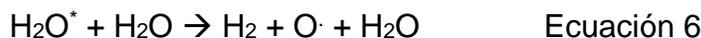
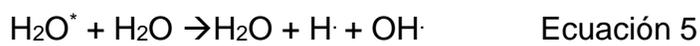
de las descargas eléctricas sobre la superficie (el presente caso), el líquido actúa como un electrodo, por lo cual la descarga tiene una deficiencia, pues ésta es transportada por los iones de su composición a través del agua, los cuales tienen menor movilidad en comparación de la movilidad de los electrones en un electrodo metálico.

Los diferentes tipos de distribución del plasma, a pesar de tener múltiples características coinciden en los mecanismos de reacción química y fenómenos físicos que generan. Esto es, la formación de especies moleculares, radicales libres y luz ultravioleta. Entre las especies generadas por un tratamiento con plasma se encuentran:

❖ Radicales hidroxilos.

Cuando una descarga eléctrica es aplicada en un medio acuoso, las moléculas de agua generan radicales hidroxilos y radicales hidrógenos, por medio de fenómenos de disociación, ionización y excitación (por vibración o rotación) de las mismas. Al aplicar cierto voltaje en una muestra de agua, las partículas adquieren una carga eléctrica en ellas, capaz de generar los procesos o fenómenos mencionados anteriormente; cada uno con un umbral de energía diferente. Por ejemplo, para las reacciones de disociación (Ecuación 1), la energía necesaria promedio para que se lleve a cabo es de aproximadamente 7.0 eV. En las reacciones de ionización (Ecuaciones 2 y 3), la energía necesaria es de 13 eV; mientras que para las reacciones de excitación (Ecuación 4) la energía promedio necesaria es menor a 1 eV. En las ecuaciones 5 a 7 se muestran las reacciones químicas en un estado de relajación de las moléculas de agua, después de haber pasado por un estado de excitación.

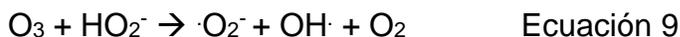




Los radicales hidroxilos son los encargados de producir las reacciones de oxidación, en un tratamiento de plasma. Cuando los radicales hidroxilos están en contacto con la materia orgánica pueden presentar tres diferentes mecanismos de reacción, éstos son: extracción de un átomo de hidrógeno, adición electrofílica de enlaces no saturados y transferencia de electrones.

❖ Especies a base de oxígeno.

Cuando el oxígeno es expuesto a un tratamiento de plasma, es decir se le aplica una descarga eléctrica, sus átomos se pueden disociar (potencial estándar $E^\circ_{\text{O}/\text{H}_2\text{O}} = 2.42 \text{ V}$) y aumentar la velocidad de producción de radicales hidroxilos. Cuando el ozono está en contacto con peróxido de hidrógeno y a su vez éstos se encuentran en presencia de plasma, el ozono reacciona con el ion hidroperóxido generando un ion superóxido, ion hidróxido e hidrógeno molecular, tal y como se muestra en las ecuaciones 8 y 9.



❖ Peróxido de hidrógeno.

El peróxido de hidrógeno puede ser formado por recombinación de los radicales hidroxilos. El H_2O_2 incrementa la formación de radicales hidroxilo generando así una mayor reacción de oxidación.

❖ Reducción de especies.

Cuando el tratamiento de plasma se lleva a cabo en presencia de especies reductoras, es más posible la remoción de contaminantes del agua mediante degradación reductiva. Una de las especies reductoras son los electrones del agua formados por irradiación, los cuales pueden degradar componentes debido a su elevada afinidad electrónica. Mientras que el radical hidrógeno formado por la colisión de los electrones con las moléculas de agua, es un agente reductor fuerte.

Los radicales H pueden reaccionar de dos formas al estar en contacto con compuestos orgánicos:

- 1.- Adicionando hidrógeno a enlaces insaturados y
- 2.- Extrayendo hidrógeno de componentes saturados.

❖ Luz ultravioleta:

El plasma al estar en contacto con el agua emite luz ultravioleta como resultado de la excitación y relajación de las especies presentes en ella; estos estados a su vez son producidos por la colisión entre electrones y moléculas.

❖ Onda de choque:

Cuando el plasma se expande y toca el agua se produce una onda de choque, la cual es generada por la descarga eléctrica aplicada. Esta onda de choque puede inducir a que sucedan reacciones químicas o pirolíticas.

❖ Pirolisis:

La pirolisis es una reacción química que permite degradar moléculas orgánicas con calor en ausencia de oxígeno, es decir en condiciones anaerobias (Jiang et al., 2014).

II.4. Parámetros que indican la calidad del agua

La calidad del agua se mide en base a un conjunto de parámetros físicos, químicos y biológicos. Esto es evaluado con el fin de observar si la muestra de agua cumple con las medidas adecuadas para su posterior uso o propósito. Algunos de estos también pueden ser utilizados como indicadores de la degradación o transformación del compuesto diluido en el agua de estudio.

II.4.1. Parámetros físicos

- ❖ Características organolépticas: (Color, olor y sabor) Son un claro indicador de contaminación del agua, la cual en estado puro es incolora, inodora e insípida. La presencia de color en una muestra de agua natural puede deberse principalmente a la presencia de algas, microorganismos u óxidos metálicos.
- ❖ Temperatura: Es un parámetro físico que está relacionado con la concentración de oxígeno disuelto en el agua, pues a medida que la temperatura aumenta la concentración de O₂ disminuye, provocando así la muerte de especies acuáticas aerobias.
- ❖ Conductividad: Es una medida indirecta de la concentración de sales o sólidos disueltos en una muestra de agua. Los sólidos disueltos están presentes en forma de cationes y aniones, es decir tienen una carga eléctrica, por lo cual le proporcionan conductividad al medio acuoso. Por lo tanto, un elevado nivel de conductividad es un claro indicativo de una gran cantidad de sólidos o sales disueltas en el agua. La unidad de medición de la conductividad en aguas naturales generalmente se da en (μS/cm).
- ❖ Turbidez: Es una característica física relacionada con la presencia de sólidos en suspensión en el agua. A mayor concentración de sólidos suspendidos mayor grado de turbidez del agua. Sus unidades de medición son UNT o NTU por sus siglas en inglés (Nephelometric Turbidity Units). La presencia de turbidez en el agua contribuye a un tratamiento de desinfección deficiente, pues es un parámetro que causa interferencia en ello.

II.4.2. Parámetros químicos

Se utilizan para evaluar la presencia de materia orgánica, inorgánica y gases en una muestra de agua. A continuación, se describen algunos de ellos.

II.4.3. Demanda Química de Oxígeno (DQO)

Es un parámetro que mide la cantidad de oxígeno disuelto necesario para oxidar la materia orgánica presente en una muestra de agua mediante un agente químico; es decir se encarga de evaluar la cantidad total de materia orgánica presente en el agua ya sea natural o residual. Por lo cual es un parámetro que está directamente relacionado con el grado de contaminación de una muestra de agua.

Una forma de llevar a cabo la medición de DQO, es tomando una porción de la muestra a analizar a la cual se agregará cierta cantidad de un agente oxidante fuerte (por ejemplo, dicromato de potasio $K_2Cr_2O_7$) en medio ácido a una temperatura de 150 °C y en presencia de un catalizador para facilitar la reacción de oxidación; después de un lapso de aproximadamente 2 horas la materia orgánica presente en la muestra será oxidada a dióxido de carbono y agua. Una vez transcurrido este tiempo, la muestra deberá estabilizarse a temperatura ambiente para poder medir el $K_2Cr_2O_7$ consumido y así realizar una relación estequiometría para evaluar el oxígeno consumido. El resultado obtenido es la DQO y sus unidades de medida son mg O_2/L .

Debido a que casi toda la materia orgánica presente en una muestra de agua es oxidada a CO_2 y H_2O por el empleo de agentes oxidantes fuertes, los valores de DQO siempre serán mayores a los de DBO.

II.4.4. Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)

La demanda bioquímica de oxígeno es un parámetro químico que mide la cantidad de oxígeno disuelto necesario para que los microorganismos (bacterias) puedan oxidar la materia orgánica presente en una muestra de agua, bajo condiciones aerobias.

Para poder realizar esta medición se debe tomar una muestra del agua a analizar, la cuál será inoculada con bacterias a una temperatura ambiente de 25 °C durante 5 días de

incubación. Una vez transcurridos los 5 días se mide el oxígeno disuelto, el cuál debió medirse previamente al inicio de la prueba. La diferencia entre ambos valores es el valor de DBO₅ expresado también en mg O₂/L.

II.4.5. pH (Potencial de Hidrógeno)

Por definición, el pH es el logaritmo negativo de la concentración de iones hidrógeno presentes en una solución. Este parámetro indica el grado de acidez o alcalinidad de una sustancia; el cual es medido generalmente con un potenciómetro, o de otra manera usando tiras indicadoras de pH, las cuales se comparan con una escala según su vire o cambio de color. El rango de medición de pH va de 0-14, siendo 7 el valor que indica neutralidad. Valores inferiores a 7 indican el grado de acidez de una muestra y, cabe mencionar que entre más ácida sea una muestra mayor es su concentración de iones hidrógeno; por lo tanto, a medida que el valor de pH aumenta la concentración de iones hidrógeno disminuye, siendo así un valor superior a 7 indicativo de alcalinidad.

El pH es un parámetro muy importante en términos de calidad de agua, tanto para aguas naturales como para aguas residuales. Los valores de pH de las aguas residuales deben estar en un rango de 6 a 9 establecido por la NOM-001-SEMARNAT-1996, valor de pH al cual se pueden llevar a cabo la mayoría de los procesos biológicos de los ecosistemas. Así que, si el valor de pH es alterado, se pueden alterar o inhibir los procesos biológicos posteriores, además de afectar la vida acuática del medio en el que será descargada el agua residual.

II.4.6. Absorbancia

La espectrofotometría es una técnica analítica que permite determinar la concentración de un compuesto presente en una solución, mediante la medición de su absorbancia.

Esta técnica se basa en la Ley de Lambert-Beer, la cual establece que la absorbancia está directamente relacionada con las propiedades intrínsecas del analito, su concentración y la longitud de la trayectoria del haz de radiación que atraviesa la muestra. La Ley de Lambert-Beer está descrita con la ecuación 10 mostrada a continuación

$$A = C \cdot \varepsilon \cdot L$$

Ecuación 10

Donde

A = Absorbancia de la muestra

C = Concentración de la especie absorbente (mol/L)

ε = Absortividad molar expresada en $\text{l} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$

L = Longitud del paso óptico de la muestra (cm)

En otras palabras, la medición de la absorbancia indica la cantidad de luz absorbida por una muestra. Para realizar la medición de este parámetro se utiliza un equipo llamado espectrofotómetro en el cual es introducida una celda que contiene una muestra del analito; en esta muestra se hace pasar un haz de luz o radiación monocromática, la cual atraviesa la superficie de la celda y es absorbida (en cierta cantidad) por las partículas del compuesto en solución. Al evaluar la medición de la absorbancia de alguna muestra es común que la gráfica o espectro de absorbancia indique más de 2 picos a una longitud de onda diferente, tal y como se muestra en la figura 2.3; siendo considerado el pico máximo como la longitud de onda de trabajo en la que se basarán los resultados.

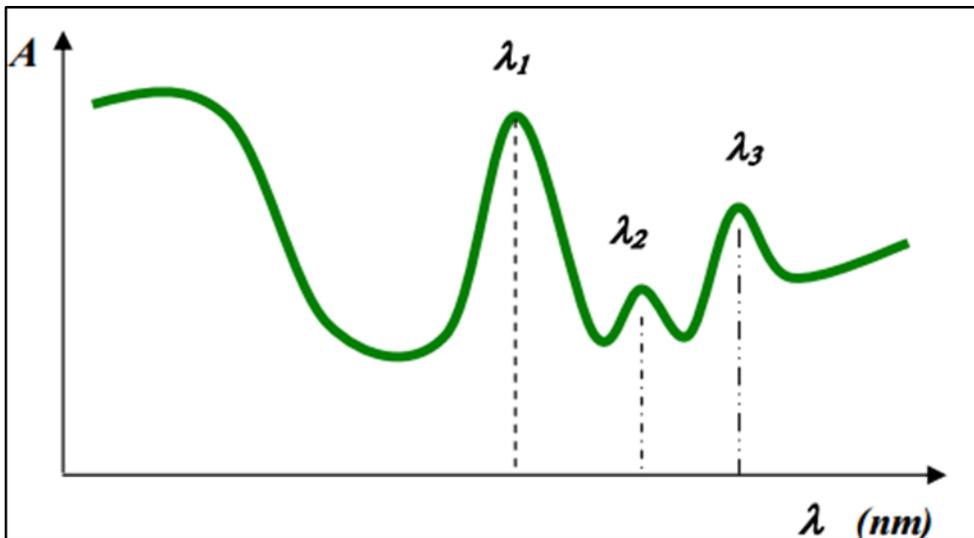


Figura 2.3 Espectro de absorción [Neira M. (2010)]

La luz restante que no es absorbida por la muestra es conocida como transmitancia.

II.4.7. Curva de calibración

Es un método utilizado para evaluar de manera indirecta la concentración de un compuesto presente en una muestra. Para obtener la curva de calibración se necesita evaluar la absorbancia de al menos 5 muestras con concentración conocida (diferente una de la otra), a una misma longitud de onda.

Para hacer las determinaciones cuantitativas, se considera la longitud de onda correspondiente a un máximo de absorbancia, pues se minimiza de esta forma el error de medición y se maximiza la sensibilidad. La curva de calibración consiste, en graficar la absorbancia (A) medida en función de la concentración (C) elegida, para lo cual se preparan soluciones de la sustancia de interés de concentraciones conocidas y se mide la absorbancia a la longitud de onda óptima.

Con la gráfica obtenida se puede establecer una función matemática que represente el comportamiento de la curva, la cual es determinada por el método de mínimos cuadrados. Esta ecuación se describe a continuación ($A = m c + n$) y, está relacionada con la concentración y absorbancia del analito.

$$A = m c + n$$

Ecuación 11

Donde:

A: Absorbancia.

n: Intercepción de la recta

m: Pendiente de la recta y que corresponde al producto entre absortividad de la muestra y el espesor b de la cubeta.

De esta manera cuando se analice una muestra y se desee saber su concentración, sólo se sustituyen los valores en la ecuación anterior.

II.4.8. Parámetros biológicos

El objetivo y análisis aplicado para determinar la calidad de una muestra de agua mediante estos parámetros, depende del tipo de agua a evaluar. Si se trata de agua destinada para su uso y consumo humano, los estudios que se le realizan son de tipo microbiológico; que se enfocan en determinar la presencia de coliformes o microorganismos patógenos en ella, capaces de producir enfermedades intestinales, tales como el cólera.

En cambio, si se trata de una muestra de agua residual tratada, los estudios aplicados tienen como fin evaluar el efecto de algún contaminante (presente en el agua) sobre organismos de prueba y, por tanto, permiten analizar el impacto ambiental que pudiera tener en caso de ser desechada o reutilizada en otras áreas, por ejemplo, como agua de riego.

Estos estudios se conocen con el nombre de bioensayos o ensayos toxicológicos; son realizados bajo condiciones ambientales controladas y evalúan efectos como inhibición, muerte, crecimiento, proliferación, cambios morfológicos, fisiológicos, etc.; con los cuales se permite conocer si el agua es adecuada para el buen desarrollo y crecimiento de microorganismos.

Los organismos de prueba empleados en los bioensayos son conocidos como bioindicadores, y pueden ser de tipo animal (larvas o insectos) o vegetal (germinación de semillas).

Los ensayos toxicológicos pueden ser clasificados de acuerdo a su duración, sistema de ensayo o propósito, de la siguiente manera:

❖ Duración:

Corto, mediano y largo plazo.

❖ Método o sistema de ensayo:

Estático, con renovación, o de flujo continuo.

❖ Propósito para el cual serán utilizados:

Control de calidad de vertidos, evaluación de compuestos específicos, toxicidad relativa, etc. (Castillo G., 2004)

II.5. Ensayos toxicológicos con semillas de lechuga *Lactuca sativa*

Uno de los bioindicadores empleados para realizar un ensayo toxicológico son las semillas de lechuga *Lactuca sativa*, las cuales son de fácil y rápida germinación, además de ser muy sensibles a la exposición de algún contaminante. Por lo cual cualquier interferencia o alteración en su medio de desarrollo, desencadenará algún efecto negativo presentado ya sea por una disminución en su porcentaje de germinación, inhibición de crecimiento, muerte, entre otros.

La morfología de la semilla y plántula de lechuga *Lactuca sativa* es mostrada en la figura 2.4.

El sistema en el que se lleva a cabo este análisis es de tipo estático y, es utilizado para determinar la toxicidad aguda de una muestra de agua. El tiempo de exposición al agua de ensayo es en promedio 120 horas (5 días), pero esto dependerá de los días necesarios para lograr la germinación de la semilla a utilizar, descritos en el empaque de compra.

Cabe mencionar que varias reacciones y procesos involucrados en los bioensayos suelen presentarse en la mayoría de las semillas, por lo que el efecto de un contaminante sobre esta especie de semilla puede considerarse representativo para todas las demás semillas o plántulas en general.

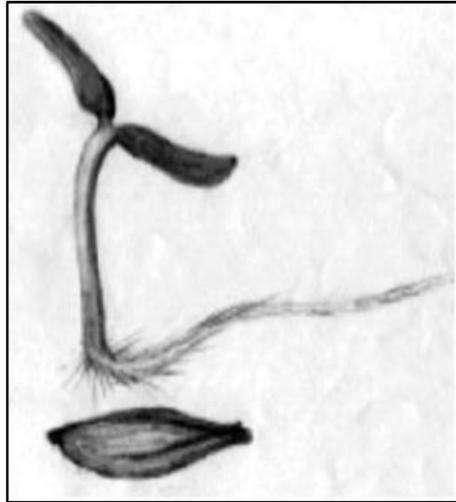


Figura 2.4 Morfología de la semilla y la plántula de lechuga *Lactuca sativa* (Castillo G., 2004)

Para evaluar el efecto de un contaminante sobre el bioindicador, no es necesario que se presente la completa inhibición de la semilla, puesto que existen contaminantes cuya concentración es tan pequeña que no afecta en la germinación de la semilla, pero si en la rapidez de crecimiento y tamaño de la radícula y el hipocótilo de las plántulas.

Los bioensayos pueden ser aplicados con cualquier tipo de agua residual, ya sea agua contaminada con colorantes, pesticidas, elevada turbiedad, o cualquier tipo de contaminante; no es necesario llevar a cabo un tratamiento previo de filtración, por lo cual es un análisis muy sencillo.

CAPÍTULO III. DESARROLLO EXPERIMENTAL

Para desarrollar el dispositivo experimental en el que se generaría el plasma se empleó una cámara de reacción de vidrio de 1000 ml, 2 electrodos de tungsteno, 1 termómetro con escala en grados celcius, una fuente de voltaje marca Spellman modelo SL600 y 2 cables conductores con caimanes. Los reactivos utilizados fueron colorante textil Rojo Versatint y agua destilada.

III.1 Dispositivo experimental

Para llevar a cabo el tratamiento por plasma, primero se tuvo que diseñar y elaborar un prototipo (mostrado en la figura 3.1). Este dispositivo consiste en una cámara de reacción de vidrio de 1000 ml con 2 electrodos de tungsteno, colocados a través de una tapa móvil situada en la parte superior. Ambos electrodos están insertados en tapones de hule para evitar su movimiento. El extremo inferior de uno de los electrodos se coloca dentro de la solución, mientras que el extremo del otro electrodo se encuentra al borde de la misma sin tocarla; este último es en el que se lleva a cabo la generación de plasma.

El sistema cuenta con un termómetro situado dentro de la solución con el material a degradar para verificar la temperatura mientras se lleva a cabo el tratamiento.

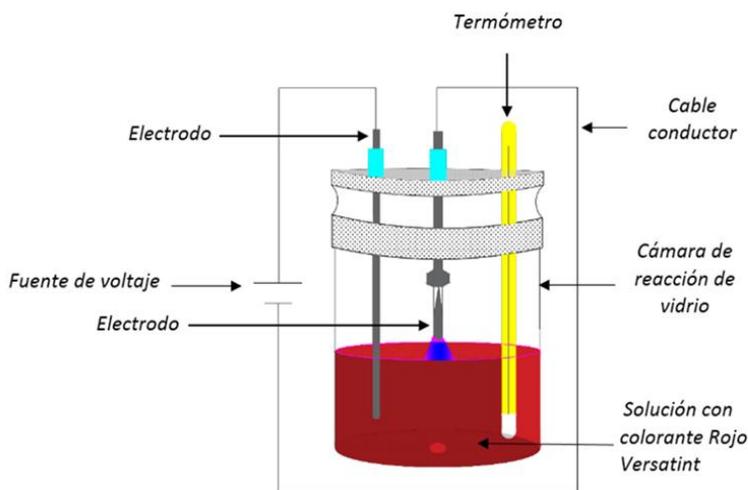


Figura 3.1 Diagrama del dispositivo experimental (Imagen propia)

III.2 Preparación de la solución de colorante textil Rojo Versatint

La concentración a la cual se llevó a cabo la exposición de la solución experimental fue de 14,158.6 mg/l. Para obtener esta disolución se colocaron 4247.6 mg de colorante pesado con una balanza analítica (marca ADAM, modelo PW 254) en 300 ml de agua y se diluyó perfectamente. Posteriormente se hicieron los experimentos establecidos.

III.3 Exposición de la solución con colorante al tratamiento por plasma

Una vez realizada la solución del colorante Rojo Versatint (disuelta en la cámara de reacción de vidrio del dispositivo experimental) se procedió a conectar la parte correspondiente a la generación del plasma. La intensidad de corriente y voltaje utilizados para generar el plasma pueden modificarse dependiendo del tratamiento deseado con la fuente empleada (SPELLMAN SL600). Se llevaron a cabo exposiciones de la solución a cuatro diferentes características del plasma (tres repeticiones de cada uno) con una duración de 150 minutos, en los que se dejó fija la corriente de generación del plasma y sólo se varió el voltaje. De cada exposición se realizaron 10 tomas de muestra para las medidas de cada uno de los parámetros de interés. Los parámetros utilizados en los tratamientos son mostrados en la tabla 3.1.

Tabla 3.1 Parámetros utilizados en cada tratamiento con plasma.

Tratamiento	Tiempo de exposición (minutos)	Concentración inicial del colorante (mg/l)	Voltaje (V)	Intensidad de la corriente (mA)
1	150	14,158.6	1000	25
2	150	14,158.6	1500	25
3	150	14,158.6	2000	25
4	150	14,158.6	2500	25

A continuación, se describen los pasos para realizar el tratamiento por plasma:

- ❖ Una vez armado el dispositivo y conectado a la fuente de voltaje, se seleccionaron los parámetros a utilizar (amperaje y voltaje). Se acercó poco a poco el electrodo (cátodo) a la solución, hasta que hubiera una distancia de 1 mm (aproximadamente) entre él y la superficie del agua y fuera posible generar el plasma. Una vez obtenido el plasma, se verificó que su generación fuera constante durante todo el tratamiento. La exposición de la solución acuosa del colorante Rojo Versatint al plasma se muestra en la figura 3.2.
- ❖ Cada tratamiento tiene una duración de 150 minutos, pero la medición de los parámetros de calidad y toma de muestras se realizó cada 15 minutos, efectuando así 10 intervalos de tiempo hasta completar el tiempo final.



a)

Figura 3.2 Exposición al plasma:

a) Dispositivo con solución acuosa de colorante



b)

b) Exposición al plasma

III.4. Muestreo

La toma de muestras entre cada intervalo de tiempo se realizó de la siguiente manera:

- 1) Se utilizó el equipo de seguridad necesario, que en este caso consistió de guantes de látex, lentes de protección y cubre bocas. A pesar de que el contaminante con el que se trabajó no es tóxico, se deben seguir las medidas de seguridad e higiene para evitar la contaminación de muestras y que los resultados se vean afectados.
- 2) Una vez transcurridos los primeros 15 minutos de tratamiento, se extrajeron 25 ml de la solución con colorante Rojo Versatint con una pipeta. Después de realizar la medición de los parámetros, la cantidad sobrante de la solución se regresa al dispositivo para continuar con el siguiente intervalo de tiempo. Cabe mencionar que después de cada toma de muestras, la pipeta y todo el instrumental utilizado se enjuaga con agua destilada, para evitar la contaminación de las muestras siguientes.
- 3) Después de haber terminado la toma de muestras del primer intervalo de tiempo, se realizó el mismo procedimiento para los períodos restantes.

III.5. Indicadores de calidad del agua

Los parámetros para medir la calidad del agua en esta investigación después de ser sometida al tratamiento por plasma, así como su utilidad se describen a continuación:

- ❖ **Potencial de hidrógeno (pH):** La medición se realizó para evaluar la acidez o alcalinidad del agua antes y después del tratamiento.
- ❖ **Absorbancia:** Puesto que este parámetro es un claro indicativo de contaminación del agua, fue necesario medirla para verificar si existía un aumento o disminución de ella en las muestras de agua sometida al tratamiento por plasma. Este parámetro se utiliza para determinar la concentración del compuesto de interés de manera indirecta.
- ❖ **Temperatura:** Para determinar el grado térmico en el que se encontraba el agua tratada antes, durante y al final de cada tratamiento.

- ❖ Bioensayo: Los ensayos toxicológicos con semillas de lechuga *Lactuca sativa* permitieron evaluar la toxicidad del agua antes y después de cada tratamiento.

El procedimiento con el que se llevó a cabo la medición de los indicadores de calidad del agua se describe a continuación.

III.6. Determinación del potencial de hidrógeno (pH)

La medición de pH se realizó usando el potenciómetro digital PH-009. Antes de evaluar el pH de cualquier muestra es necesario calibrar el instrumento con el que se realiza la medición, en este caso se utilizó una solución buffer con PH = 4. Para llevar a cabo la calibración solo se necesita encender el potenciómetro digital e introducirlo en un volumen suficiente del buffer, para verificar que no exista algún error en la medición.

Una vez calibrado el instrumento, se procedió a evaluar el pH del agua después de cada 15 minutos de tratamiento de la siguiente manera:

- 1) Se extrajeron 15 ml de agua con una pipeta de 10 ml y se colocaron en un vaso de precipitado de 50 ml.
- 2) Se introdujo el potenciómetro digital PH-009 y se esperó a que la lectura se estabilizara. Ver figura 3.3
- 3) Después de realizar cada medición el electrodo se enjuagó con agua destilada para evitar contaminación de muestras.



Figura 3.3 Lectura de pH

III.7. Determinación de absorbancia

La absorbancia es un parámetro que permite evaluar la cantidad de luz absorbida por un compuesto presente en una solución; la absorbancia siempre dependerá de la concentración del compuesto a analizar.

Antes de realizar la medición de las muestras de agua tratada se midió la absorbancia de una muestra blanco, la cual consiste de 10 ml de agua destilada colocados en una celda o cubeta. Se prosiguió a elegir el programa adecuado y se realizó la medición. Ver figura 3.4.

Una vez establecido el blanco, se prosiguió a medir la absorbancia de las muestras con contaminante de la siguiente manera. Ver figura 3.5.

- 1) Cada 15 minutos de tratamiento, se tomaron 10 ml de agua tratada con una pipeta graduada y se colocaron dentro de una cubeta para absorbancia.
- 2) Antes de ingresar la cubeta al espectrofotómetro, se limpiaron las paredes de la misma con papel absorbente, para evitar interferencias en la medición.

3) Posteriormente, la cubeta se introdujo al equipo y se seleccionó la opción “medición”. Después de realizar la lectura de absorbancia, la solución fue regresada al dispositivo para continuar con su tratamiento. El interior de la celda se enjuagó perfectamente con agua destilada, para evitar contaminación de las muestras posteriores.



Figura 3.4 Medición del blanco

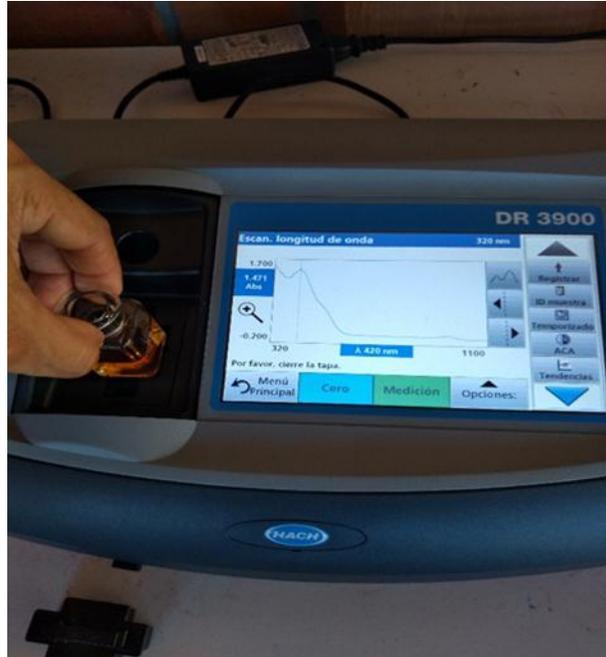


Figura 3.5 Medición de la absorbancia

III.8. Curva de calibración

La tabla 3.2 muestra las concentraciones utilizadas para llevar a cabo la curva de calibración y la figura 3.6 muestra el cambio de la absorbancia como función de la concentración del Rojo Versatint en solución acuosa, a una longitud de onda (λ) de 477 nm.

Los valores aquí mostrados, son los que se utilizaron para obtener la ecuación de la curva de calibración considerada.

Tabla 3.2 Cambio de absorbancia (A) en función de la concentración (C) del Rojo Versatint en solución acuosa.

Concentración (mg/l)	Absorbancia
0.0033	4.668
0.0030	4.456
0.0027	3.999
0.0024	3.581
0.0021	3.198
0.0018	2.797
0.0015	2.290
0.0012	1.838

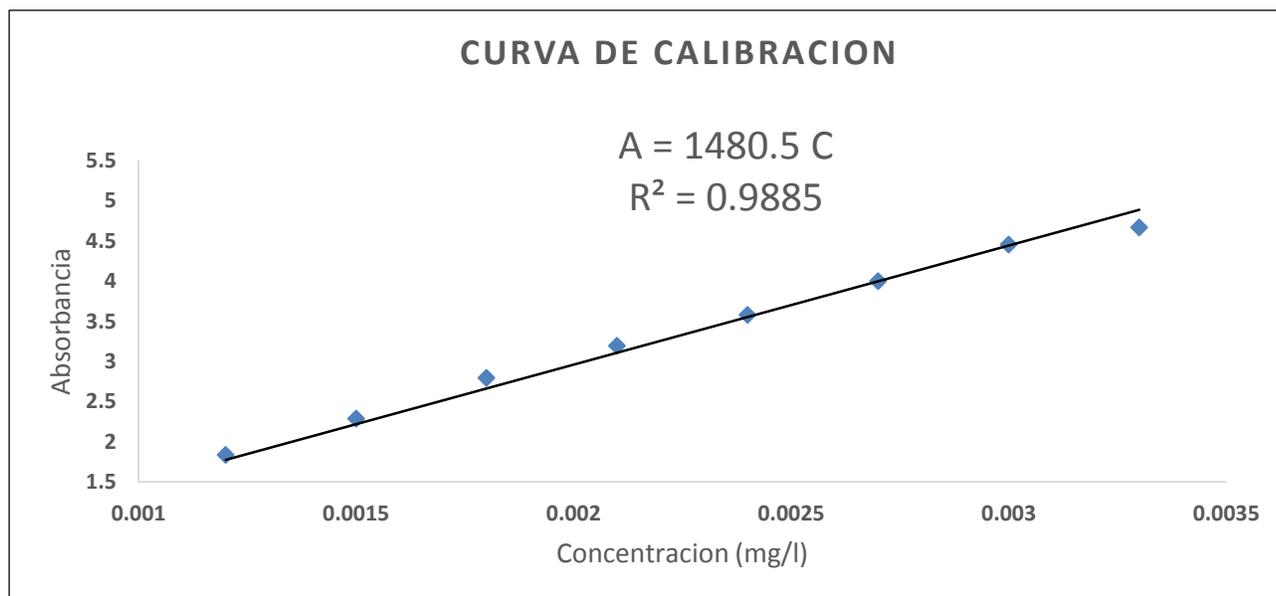


Figura 3.6 Curva de calibración del Rojo Versatint en solución acuosa, a longitud de onda $\lambda = 477\text{nm}$.

La curva de calibración es de gran utilidad, ya que cuando se somete la solución bajo estudio al tratamiento de degradación del contaminante, se conoce el valor de la concentración inicial de la muestra, no así el que se tiene después del tratamiento. Es en

esta parte, donde la ecuación de la curva de calibración se utiliza, pues con ella se estima el valor de la concentración de la solución tratada mediante el valor de la absorbancia.

Considerando lo anterior, la concentración del contaminante (Rojo Versatint en solución acuosa) se estima mediante la sustitución de los valores de la absorbancia en la ecuación siguiente:

$$C = \frac{A}{1480.5} \quad \text{Ecuación 12}$$

III.9. Medición de temperatura

Se utilizó un termómetro como lo muestra la Figura 3.7 para medir la temperatura de la solución. Esto se hizo antes, durante y al final de cada exposición de la solución al plasma. Los cambios de temperatura en relación al tiempo de exposición al plasma se midieron cada 15 minutos.



Figura 3.7 Medición de temperatura de la solución

III.10. Realización de bioensayo

El bioindicador utilizado para evaluar la toxicidad del agua, antes y después de ser sometida a un tratamiento por plasma, fue la semilla de lechuga orejona de la especie *Lactuca sativa*. Dichas semillas deben estar libres de plaguicidas o algún otro químico que interfiera en su porcentaje de germinación. Además, se debe tomar en cuenta el número de días promedio en los que se logrará la germinación; la cantidad de días depende de la marca y especie de lechuga utilizada. En este caso es de 2 a 3 días.

El procedimiento para realizar el bioensayo fue el siguiente:

- 1) Previo a realizar los bioensayos con agua tratada se realizaron dos bioensayos adicionales para cada tratamiento que servirán de estándar, uno fue con agua destilada, y otro con la solución de colorante textil antes del tratamiento.
- 2) Los bioensayos se llevaron a cabo en cajas Petri de vidrio, las cuales fueron previamente lavadas.
- 3) En cada caja Petri, se colocó un trozo de papel filtro de forma circular.
- 4) Transcurridos los primeros 15 minutos de tratamiento, se extrajeron 3 ml de agua tratada mediante una pipeta graduada de 10 ml y se colocaron sobre el papel filtro, de manera que quedara humedecido completamente. Este procedimiento se realizó una vez por cada intervalo de tiempo, realizándose así 10 bioensayos por cada tratamiento (tres repeticiones de cada tratamiento).
- 5) Después de esperar que la solución en la caja Petri alcance la temperatura ambiente, se colocaron 10 semillas de lechuga *Lactuca sativa* sobre el papel filtro húmedo, dejando espacio suficiente entre ellas para permitir su germinación, tal y como se muestra en la figura 3.8.
- 6) Una vez realizado el bioensayo, cada caja fue cerrada y etiquetada con fecha, tiempo de exposición y número de tratamiento.

7) Posteriormente las cajas se almacenaron en un lugar fresco (25 °C), evitando elevadas temperaturas y su consecuente pérdida de humedad.



Figura 3.8 Bioensayos con semillas de lechuga *Lactuca sativa*

CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se explican los resultados obtenidos tras someter una solución acuosa de colorante textil Rojo Versatint a los diferentes tratamientos de plasma.

Los resultados analizados se enfocan en evaluar algunos indicadores de calidad del agua, tales como: absorbancia, concentración, pH, temperatura y bioensayos de toxicidad.

IV.1. Absorbancia

En la figura 4.1 se puede apreciar el cambio en la absorbancia del compuesto textil Rojo Versatint en solución acuosa, respecto al tiempo de exposición al plasma (150 minutos) de cada tratamiento.

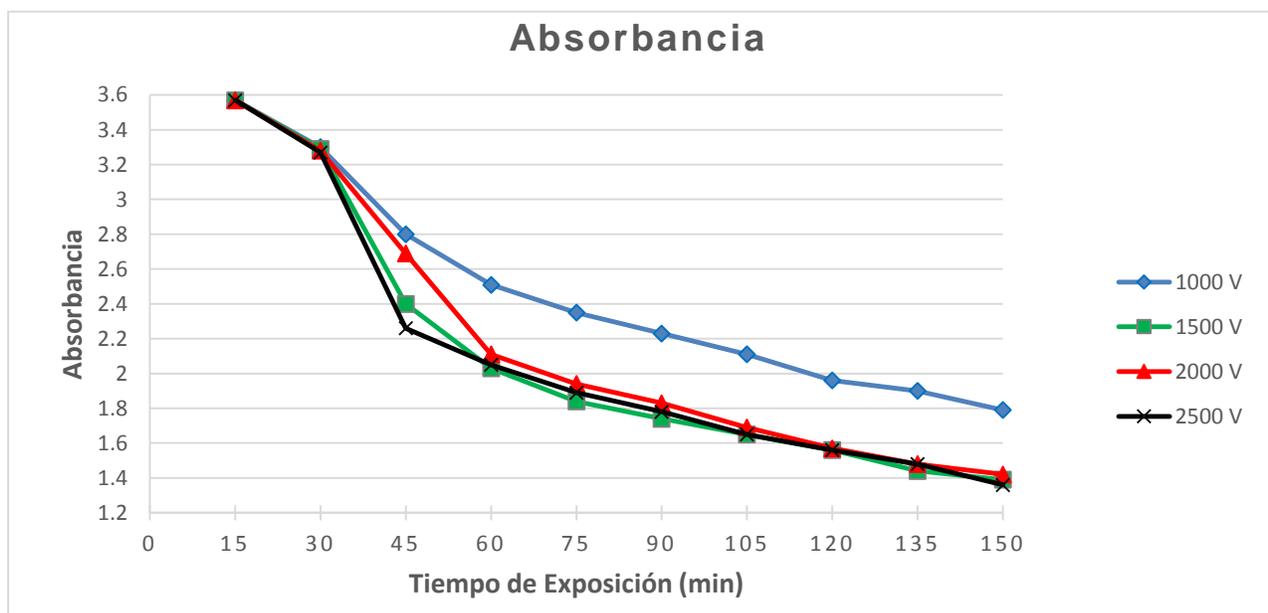


Figura 4.1 Cambio de la absorbancia de la solución Rojo Versatint para cada tratamiento.

Se observa que los valores de absorbancia de la solución en estudio disminuyen al ser expuesta al plasma. La reducción de éstos está directamente relacionada con el valor del voltaje aplicado en los tratamientos (1000, 1500, 2000 y 2500 Volts). En particular, hay una diferencia considerable entre el cambio de absorbancia obtenida tras la exposición a un voltaje de 1000 V respecto de los tres restantes. Para los otros tres voltajes (1500,

2000 y 2500 V) el comportamiento en la disminución del valor de absorbancia es muy parecido y es mayor la disminución que con respecto de 1000 V.

Para los cuatro tratamientos se nota una disminución de la absorbancia donde se alcanzaron valores al final del tiempo de exposición de: 1.79, 1.39, 1.42 y 1.36 cuando se utilizaron voltajes de 1000, 1500, 2000 y 2500 V, respectivamente. Para los tratamientos 2, 3 y 4 se observa un decrecimiento prácticamente idéntico en función del tiempo de exposición. Mientras que para el tratamiento 1 fue mucho menor. En términos porcentuales, se observó un decremento de 49.9 %, 61.1 %, 60.3 % y 62 % para los tratamientos 1,2,3 y 4 respectivamente.

De forma general, la disminución en la absorbancia de la solución en estudio (Rojo Versatint) se debe al procedimiento al que fue expuesta. Esta disminución de absorbancia permite determinar mediante la curva de calibración, como es el cambio de concentración del colorante en la solución. Ver figura 4.2.

En términos generales y por construcción, el comportamiento geométrico de las curvas de cambio de la absorbancia y la concentración es el mismo para los cuatro tratamientos.

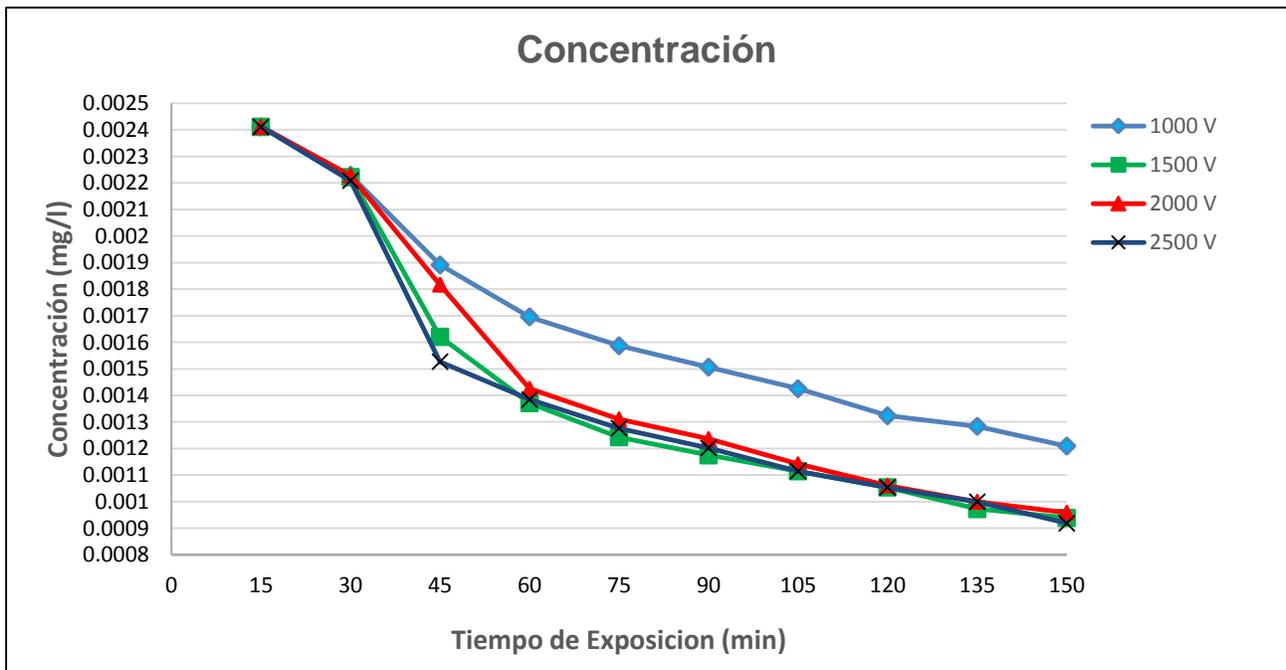


Figura 4.2 Cambio de la concentración de la solución Rojo Versatint para cada tratamiento.

IV.2. Potencial de hidrógeno (pH)

En la figura 4.3, se muestra el comportamiento del pH de la solución acuosa de colorante Rojo Versatint al ser expuesta a un tratamiento de plasma con variación en el voltaje.

Se observa que los valores de pH de la solución acuosa Rojo Versatint, tienen un comportamiento decreciente conforme aumenta la cantidad de voltaje y el tiempo de exposición al plasma; esto indica que la solución aumenta su nivel de acidez conforme avanza el tratamiento.

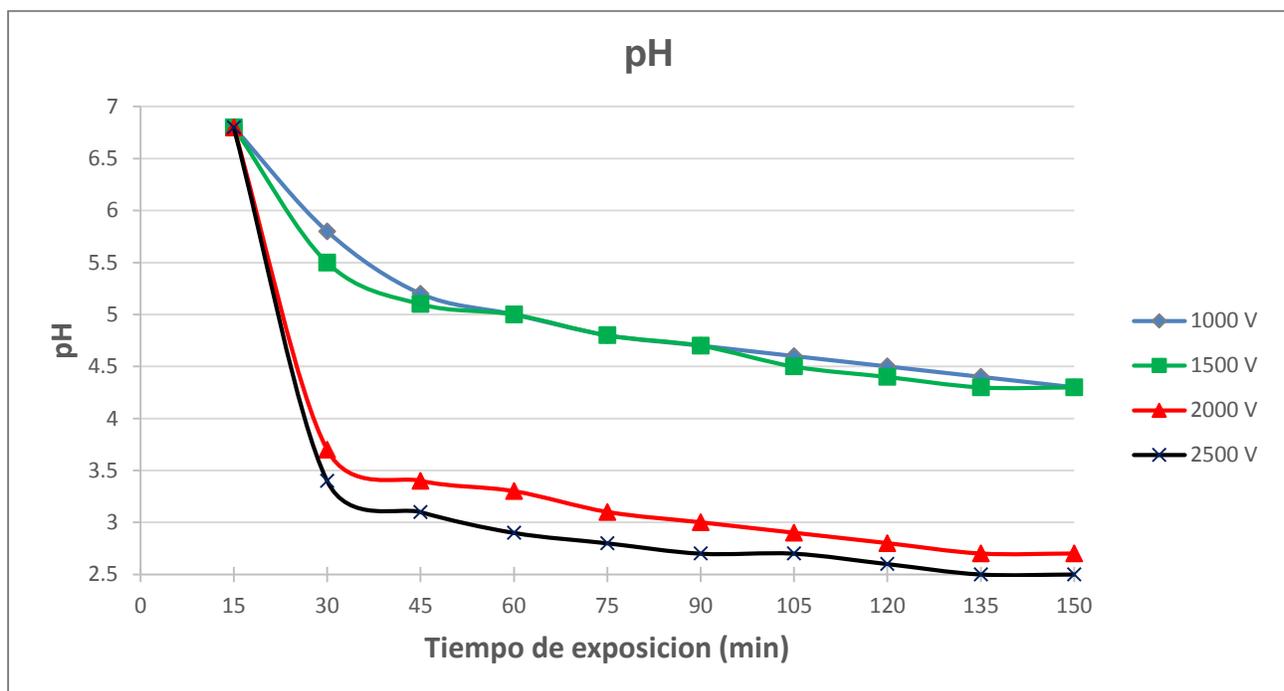


Figura 4.3 Comportamiento del pH de la solución experimental expuesta al plasma en los cuatro tratamientos a diferente voltaje

La disminución de pH se presenta en todos los tratamientos, pero se observa una diferencia notoria en los tratamientos con 2000 V Y 2500 V. Por otra parte, para todos los tratamientos se observa que, en los dos primeros intervalos de tiempo, que van de 0 a 30 minutos, el decrecimiento es más rápido en comparación al resto.

En términos porcentuales, se observó un decremento de 36.8 %, 36.8 %, 60.3 % y 63.2 % cuando se aplicaron voltajes de 1000, 1500, 2000 y 2500 V, respectivamente, lo cual

muestra que el valor del voltaje elegido para el tratamiento si influye en los resultados. A mayor voltaje, mayor cambio de pH.

Es importante mencionar que el valor mínimo de pH (2.5) se observa en el cuarto tratamiento a partir de los 135 minutos, manteniendo ese valor de pH hasta cumplir el tiempo final del tratamiento.

Basándose en los resultados y tomando en cuenta el uso o destino que tenga un agua residual de este tipo, es de suma importancia mencionar que un pH ácido puede provocar efectos contaminantes y tóxicos en el ambiente.

IV.3. Temperatura

En la figura 4.4 se muestra el cambio de temperatura que experimentó la solución al ser sometida a cada uno de los tratamientos de plasma con relación al tiempo de exposición (150 minutos).

Se observa que la temperatura inicial (37 °C) es la misma para los cuatro tratamientos, y va teniendo una tendencia creciente conforme avanza el tiempo de exposición al plasma. El comportamiento del cambio de temperatura es muy parecido para cada tratamiento, pero con diferentes valores. Se muestra que a mayor potencia eléctrica (mayor voltaje) la rapidez de cambio de la temperatura es mayor.

Se registró un aumento de temperatura al final del tiempo de exposición de la solución al plasma de entre 17 °C hasta 22 °C, dependiendo del voltaje utilizado. A mayor voltaje, mayor temperatura.

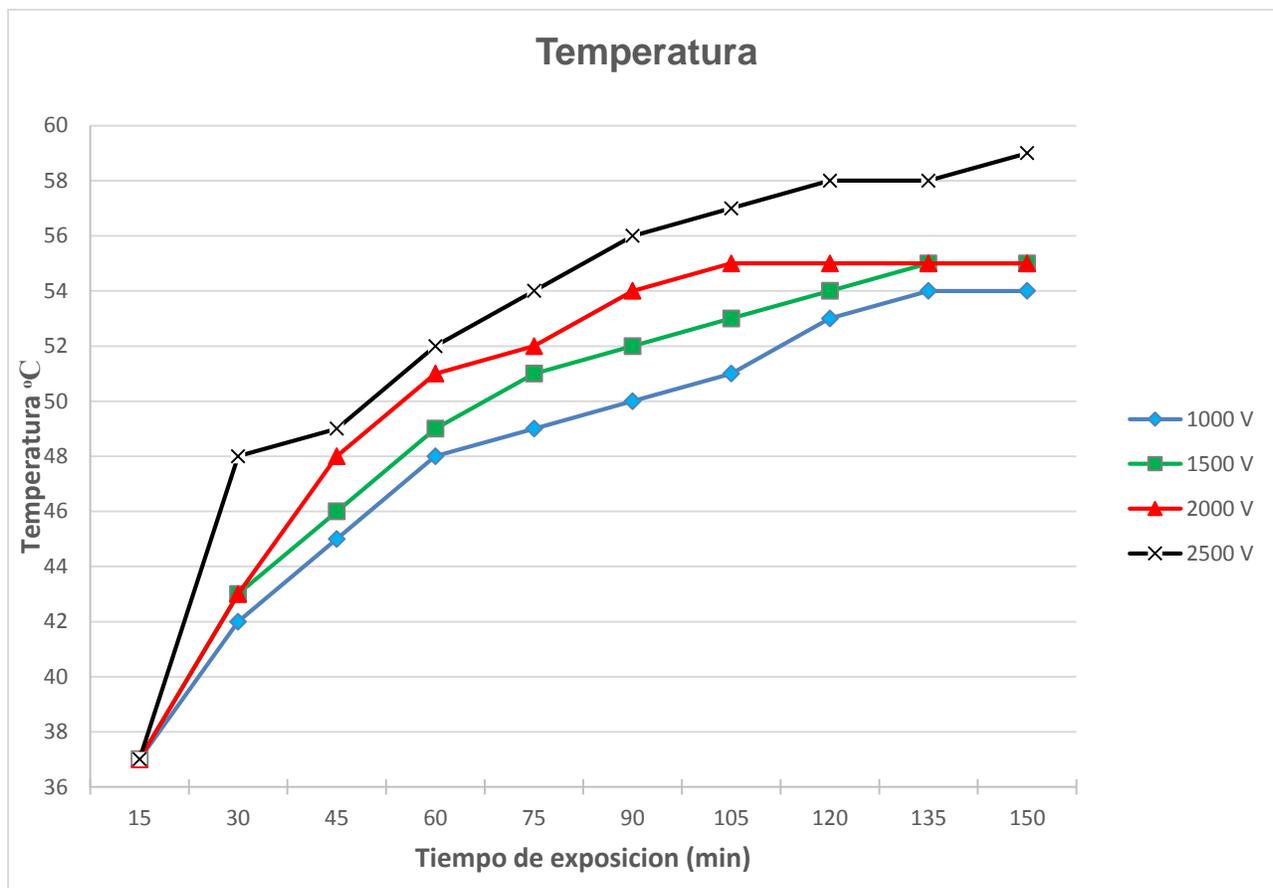


Figura 4.4 Cambio de temperatura en los diferentes tratamientos con respecto al tiempo de exposición y la cantidad de voltaje aplicado para cada uno

De forma general se puede decir que, a mayor cantidad de potencia eléctrica utilizada para generar el plasma, mayor será la rapidez del aumento de la temperatura y por lo tanto el proceso será más acelerado, con lo que se creará un cambio en las propiedades tanto físicas como químicas de la solución expuesta.

IV.4. Ensayo toxicológico con semillas de lechuga (*Lactuca sativa*)

En la figura 4.5 se muestra el porcentaje de germinación que se logró obtener de las semillas de lechuga *Lactuca sativa* después de ser hidratadas con una solución acuosa de colorante Rojo Versatint, la cual fue sometida a tratamientos de plasma con variación en el voltaje aplicado.

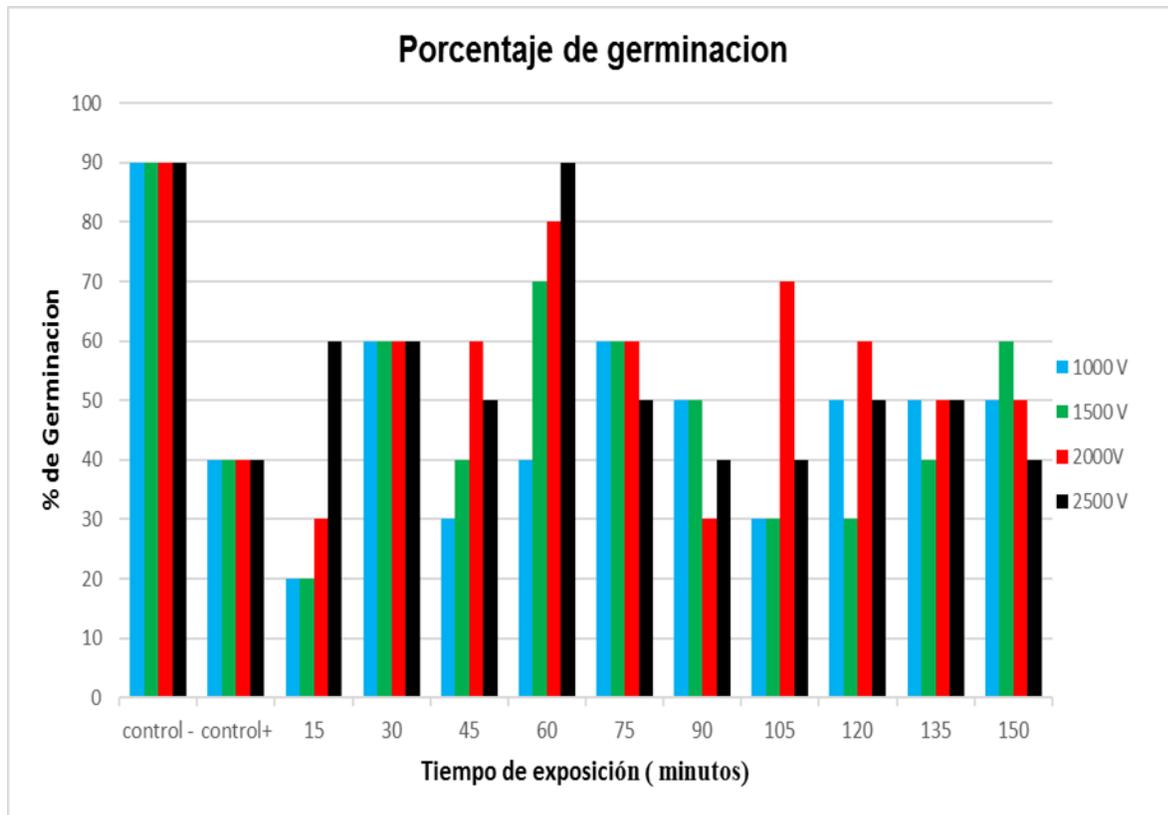


Figura 4.5 Porcentaje de germinación de semilla de lechuga *Lactuca sativa* hidratadas con solución de colorante Rojo Versatint sometida al tratamiento de plasma. Control (-) agua destilada. Control (+) Solución Rojo Versatint sin tratamiento.

En el gráfico se toman como referencia un control negativo y un control positivo.

- ❖ **Control negativo:** Es un experimento que evalúa todos los factores que pudieran afectar el resultado de germinación, excepto el contaminante de interés. En este proyecto se utilizó agua destilada como control negativo, de manera que se esperaba que la germinación fuera igual o mayor a 90%.

❖ **Control positivo:** Ensayo realizado para evaluar la sensibilidad de los organismos (semillas de lechuga) al ser expuestos a una sustancia de referencia. En este trabajo se tomó como control positivo la solución de colorante Rojo Versatint sin tratar.

En la gráfica anterior (figura 4.5) se puede observar que el porcentaje de germinación de las semillas hidratadas con agua destilada alcanzaron un 90 % en promedio, mientras que las hidratadas con solución de interés sin tratar, solo alcanzaron un 40 %. Este dato indica que la solución de estudio es tóxica de inicio. Comparando esta última con los porcentajes de germinación respecto de las semillas hidratadas con la solución tratada a los diferentes tiempos de exposición, se puede observar un cambio evidente en la germinación.

Por otra parte, se tiene que durante los primeros 15 minutos de exposición para los tratamientos de 1000 V, 1500 V y 2000 V, es en donde se registran los porcentajes más bajos de germinación. Este resultado podría estar en relación directa con la cantidad de contaminante (Rojo Versatint) que existe en la solución al inicio de cada tratamiento y de los subproductos químicos que se generan por la exposición al plasma.

En general la toxicidad de la solución cambia (sube o baja) para todos los tratamientos y en todos los tiempos. En el tiempo de exposición de 60 min y para los tratamientos de 2000 V y 2500 V se podría decir que el porcentaje de germinación es adecuado, alcanzando y rebasando el 80 % como lo establecen los estándares aceptables de toxicidad.

Cabe mencionar que si bien el porcentaje más alto de germinación de los cuatro tratamientos pertenece al tratamiento 4 (2500 V) con un 90% de germinación, es solo a los 60 minutos donde se observa tal comportamiento. Es decir, es en este tiempo y para ese tratamiento donde se conjugan valores adecuados de todos los parámetros involucrados para que esto ocurra.

CAPÍTULO V. CONCLUSIONES

- ❖ Se implementó un dispositivo experimental ajustable con el que se logró generar un plasma de aire estable en solución acuosa
- ❖ En general, se observó la disminución de la concentración del colorante textil Rojo Versatint en solución acuosa, tras su exposición a un plasma físico de aire.
- ❖ El plasma fue generado a diferentes voltajes (1000, 1500, 2000 y 2500 V) a una intensidad de corriente eléctrica constante (25 mA). El proceso de degradación del colorante Rojo Versatint fue monitoreado mediante absorbancia, pH, temperatura, así como toxicidad encontrándose que: Los porcentajes de degradación del colorante Rojo Versatint fueron del 49.9, 61.1, 60.3 y 62 % cuando se utilizaron voltajes de 1000, 1500, 2000 y 2500 V, respectivamente, después de 150 minutos de tratamiento.
- ❖ El pH de la solución con colorante rojo Versatint disminuye al ser sometida al plasma en función de la potencia de éste y del tiempo de exposición. El pH inicial de 6.8 se redujo a 4.3, 4.3, 2.7 y 2.5 cuando se utilizaron voltajes de 1000, 1500, 2000 y 2500 V, respectivamente, después de 150 minutos de tratamiento.
- ❖ los valores de temperatura aumentaron para todos los tratamientos como función del voltaje generador del plasma y del tiempo de exposición. La temperatura inicial de 37 °C se incrementó hasta 54 °C, 55 °C, 55 °C y 59 °C cuando se utilizaron voltajes de 1000, 1500, 2000 y 2500 V, respectivamente, después de 150 minutos de tratamiento.
- ❖ La evaluación del cambio de toxicidad de la solución con Rojo Versatint tras su exposición al plasma se realizó mediante la germinación de semillas de lechuga *Lactuca sativa* hidratadas con la solución expuesta al plasma de aire. Se observó que la toxicidad cambia para todos los tratamientos y tiempos de exposición. El porcentaje de toxicidad disminuyó de manera significativa para los tratamientos 3 y 4 (2000 y 2500

V), en los cuales se alcanzó un porcentaje de germinación de 80 % y 90%, respectivamente, a los 60 minutos de exposición al plasma. Por su parte, con el control positivo (solución de colorante sin tratar) se obtuvieron porcentajes de germinación del 40 %.

BIBLIOGRAFÍA

- Banat M., Nigam P., Singh D. y Marchant R. (1996). Microbial decolorization of textile dyecontaining effluents: a review. *Biosource Technology*; 58 (3),217 - 227.
- Beydilli M., Matthews R. y Pavlostathis S. (2000). Decolorization of a reactive copperphthalocyanine dye under methanogenic conditions, 1st. World Water Congress of the 1 International Water Association (IWA), Paris 2000, 3-7 july, Book 1. Industrial Wastewater Treatment, 215-222.
- Carliell, C.M., Barclay, S.J., Naidoo, N., Buckley, C.A., Mulholland, D.A. Senior, E. (1995). Microbial decolourasition of a reactive azo dye under anaerobic conditions. *Water Science and Technology*; 21 (1), 61–69
- Castillo M. G. (2004). 1ª Edición. IMTA. IDRC. 189 Pp. Santiago, Chile. ISBN 968-5536-33-3. Ensayos toxicológicos y métodos de evaluación de calidad de aguas. Estandarización, intercalibración, resultados y aplicaciones
- Chung, K.T., Stevens, S.E.J., (1993). Degradation of azo dyes by environmental microorganisms and helminths. *Environmental Toxicology*; 12 (11), 2121-2132.
- Comisión Nacional del Agua (CNA). (2004). Estadísticas del agua en México.
- Comisión Nacional del Agua (CNA). (2004). www.cna.gob.mx
- Cooper, P. (1993). Removing colour from dyehouse waste waters- a critical review of technology available. *Journal of Society Dyers Colourists*; 109 97-100.
- Cruz, A. y Buitrón, G. (2000). Biodegradation of disperse blue 79 using sequenced anaerobic/aerobic biofilters. *Water Science Technology*;44 (4), 159-166.

- Dorantes-García V., Díaz-Reyes J. y Pérez-Benítez A. (2008). Síntesis sencilla de óxido de tungsteno (VI) a partir del filamento de un foco. Educación química. 341-348.
- Echarri L. (2007). Población, ecología y ambiente. Tema 8 Contaminación del agua. Consultada el 26 de abril de 2017, de: [www.unav.es/ecologiaing0708/Tema%208%20Contaminacion%20del%20agua%2007%20\(1\).pdf](http://www.unav.es/ecologiaing0708/Tema%208%20Contaminacion%20del%20agua%2007%20(1).pdf)
- Echarri L. (2007). Opciones de tratamiento de aguas residuales mediante carbón activo. GEDAR (Gestión de Aguas y Residuos). Consultada el 17 de abril de 2017, de: https://www.gedar.com/PDF/Industrial/GEDAR-Carbon_Activo_Aguas_Residuales.pdf
- Field, J.A. , Cervantes, F.J. , Van der Zee, F.P., Lettinga, G. (2000). Role of quinones in the biodegradation of priority pollutants: a review. Water Science and Technology;42 (5- 6), 215-222.
- Forero J., Ortiz O.P. , y Ríos F. (2005). Aplicación de procesos de oxidación avanzada como tratamiento de fenol en aguas residuales industriales de refinería. Colombia. CT&F (Ciencia, Tecnología y Futuro) Vol. 3 Núm. 1
- Gil M., Soto A.M. , Usma J.I. , Gutiérrez O. (2012). Contaminantes emergentes en aguas, efectos y posibles tratamientos. Instituto Tecnológico Metropolitano. Artículo de revisión.
- Gil M.J., Soto A.M. , Usma J.I. y Gutiérrez O.D. (2012). Contaminantes emergentes en aguas, efectos y posibles tratamientos. Producción + Limpia. Vol.7, No.2. 52-73
- Gordillo V. F. (2008). Plasmas fríos. Investigación y Ciencia. Sevilla, España.
- Isik, M., Sponza, D.T. (2004). Decolorization of azo dyes under batch anaerobic/aerobic sequential conditions. Journal of Environmental Science health, Part A. Toxic/hazard Substances. Environmental Engineering; 39 (4) 1107-1127.

- Jiang B., Zheng J., Qiu S., Wu M., Zhang Q., Yan Z., y Xue Q. (2014). Review on electrical discharge plasma technology for wastewater remediation. *Chemical Engineering Journal*. China University of Petroleum. 236. 348–368. DOI: 10.1016/j.cej.2013.09.090
- Kapdan, I. K., Oztekin, R. (2003). Decolorization of textile dyestuff reactive orange 16 in fedbatch reactor under anaerobic condition. *Enzyme Microbiology Technology*; 33(2-3) 231-235.
- Kirk-Othmer. (1993). Azo dyes. *Enciclopedia of Chemical Technology*; (3,4,8 and 9), Editorial John Willey & Son, 74-82, 753-773 y 857-863.
- Lourenco, D., Novais, M., Pinheiro, H. (2000). Reactive textile dye color removal in a sequencing batch reactor. *Water Science and Technology*; 42 (5-6) 321-328.
- McMullan, G., Meehan, C., Conneely, A., Kirby, N., Robinson, T., Nigam, P., Banat, I.M., Marchant, R. y Smyth, W.F. (2001). Mini review: microbial decolourisation and degradation of textile dyes. *Applied microbiology biotechnology*; 56 (1-2), 81-87.
- Melgoza, R.M. , and Buitrón, G. (2000). Anaerobic/aerobic treatment of colorants present in textile effluents. *Water Science of Technology*; 50 (2) 149-155.
- Monte P. I. (2016). Agua, pH y equilibrio químico: Entendiendo el efecto del dióxido de carbono en la acidificación de los océanos. 1ª edición.
- Norma Oficial Mexicana NOM-039-SSA1-1993.
- Norma Oficial Mexicana NOM-CCA-031-ECOL/1993
- Parámetros y características de las aguas naturales (n.d.). Ingeniería de Tratamiento y Acondicionamiento de Aguas. Consultado el 28 de abril de 2017, de: <http://www.oocities.org/edrochac/sanitaria/parametros1.pdf>
- Pérez A.F. Y Camacho A. K. (2011). Tecnologías para el tratamiento de aguas servidas. Universidad Veracruzana. Facultad de Ciencias Químicas.

- Peternel, I., Koprivanac N., Kusic H. (2006). UV- Based processes for reactive azo dye mineralization. *Water Research*; 40 525-532.
- REMTAVARES (Red Madrileña de Tratamientos Avanzados para Aguas Residuales con Contaminantes no Biodegradables). (2008). Consultada el 17 de abril de 2017, de: <http://www.madrimasd.org/blogs/remtavares/2008/01/16/82477>
- Rogalla, F., Badard, M., Hansen, F., Dansholm, P. (1992). Upscaling a compact nitrogen removal process. *Water Science and Technology*; 26 (5-6) 1067-1076.
- Rubio-Clemente A., L. Chica E., A. Peñuela G. (2014). Application of Fenton process for treating petrochemical wastewater. Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.
- Smyth, W.F. (2001). Microbial decolourisation and degradation of textile dyes. *Applied Microbiology*; 15 233-245.
- Solsona F. y Méndez J.P. (EPA) (2003). Environmental Protection Agency. Folleto informativo de tecnología de aguas residuales. 71-84. Consultada el 20 de abril de 2017, de: <https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-06/documents/cs-99-064.pdf>.
- Stoltz A. (2001). Basic and applied aspects in the microbial degradation of azo dyes. *Applied Microbiological Biotechnology*; 56 69-80.
- Tratamiento de aguas residuales (n.d.). Consultada el 17 de abril de 2017, de: http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lar/oropeza_b_vm/capitulo4.pdf
- Weber, E.J. Adams, R.L. (1995). Chemical and sediment-mediated reduction of the azo dye disperse blue 79. *Environmental Science and Technology*; 29 (5) 1163-1170.
- Zhang F. , Knapp S. , Tapley N. (1999). Decolourization of cotton bleaching effluent with wood rotting fungus, *Water Research*; 33 (4), 919-928