



TECNOLÓGICO DE ESTUDIOS SUPERIORES DE COACALCO

Unidad de Estudios de Posgrado e Investigación

MAESTRÍA EN SISTEMAS AMBIENTALES

T É S I S

DESARROLLO Y PRUEBA DE UN FILTRO DE
GRAFENO PARA LA RETENCIÓN DE COLORANTES
AZOICOS DE LAS AGUAS RESIDUALES DE LA
INDUSTRIA TEXTIL

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO(A) EN SISTEMAS AMBIENTALES

PRESENTA:

ING. ÁNGEL HERNÁNDEZ CERVANTES

DIRECTOR(A) DE TESIS:

DRA. MARÍA TERESA TORRES MANCERA

COACALCO DE BERRIOZÁBAL, MÉXICO, SEPTIEMBRE, 2025

RESUMEN

El presente proyecto está relacionado con un sistema que contiene una matriz a base de grafeno para la eliminación de colorantes azoicos como naranja A-1, amarillo y rojo 57 de las aguas residuales provenientes de la industria textil, más específicamente con aquellos procesos de la industria textil en donde sus aguas residuales de proceso presenten colorantes los cuales requieren eliminar para su posterior descarga en el alcantarillado.

Se estima que hasta un 50% de los colorantes utilizados en la industria textil termina en las aguas descargadas por este sector industrial debido a su bajo grado de fijación en las telas. Entre los colorantes se tienen: Azoicos, antroquinonas, ftalocianina, ion arilcarbonio, sulfuro, polimetino y nitro.

La presencia de una cantidad muy pequeña de colorantes Azo en agua (<1ppm) es muy visible. Esto afecta el mérito estético, la transparencia y la solubilidad en agua y gas. La reducción de la penetración de la luz a través del agua disminuye la actividad fotosintética, causando deficiencia de oxígeno y desregulando los ciclos biológicos de la biota acuática. Muchos colorantes Azo también son altamente venenosos para el ecosistema y los mutágenos, lo que significa que pueden tener efectos agudos o crónicos sobre los organismos, dependiendo del tiempo de exposición y la concentración del colorante

ABSTRACT

This project is related to a system that contains a graphene-based matrix for the elimination of azo dyes such as orange A-1, yellow and red 57 from wastewater coming from the textile industry, more specifically with those industry processes. textile where its process wastewater contains dyes which require removal for subsequent discharge into the sewer.

It is estimated that up to 50% of the dyes used in the textile industry end up in the waters discharged by this industrial sector due to their low degree of fixation in the fabrics. Among the dyes are: Azo, anthroquinones, phthalocyanine, arylcarbonium ion, sulfide, polymethine and nitro.

The presence of a very small amount of Azo dyes in water (<1ppm) is very visible. This affects aesthetic merit, transparency and solubility in water and gas. The reduction of light penetration through water decreases photosynthetic activity, causing oxygen deficiency and deregulating the biological cycles of aquatic biota. Many Azo dyes are also highly ecosystem poisonous and mutagenic, meaning they can have acute or chronic effects on organisms, depending on the exposure time and concentration of the dye.

CONTENIDO

Introducción	6
Antecedentes	8
Justificación	14
Planteamiento del Problema	17
Objetivo general	19
Objetivos específicos	19
Marco Teórico	20
Parámetros según la NOM:	21
Industria Textil	23
Colorantes	26
Grafeno	30
METODOLOGÍA	35
Producción de grafeno	35
Remoción del colorante	35
Caracterización del agua	36
Resultados	36
Referencias:	39

INTRODUCCIÓN

La industria textil ha sido una de las primeras actividades económicas en desarrollarse, desempeñando un papel fundamental en la economía y sociedad mexicanas. Sin embargo, esta industria también es una de las mayores consumidoras de agua y generadoras de aguas residuales, las cuales contienen una amplia gama de contaminantes químicos, incluidos los colorantes azoicos. Estos colorantes, utilizados ampliamente por su variedad y estabilidad, son altamente resistentes a la degradación, lo que plantea serios problemas ambientales y de salud pública debido a su potencial cancerígeno y toxicidad para la vida acuática.

En México, el consumo textil per cápita alcanzó los 13,1 kg por habitante en 2019, lo que implica una gran cantidad de agua utilizada y, subsecuentemente, aguas residuales generadas. Por ejemplo, la producción de un par de jeans de algodón teñidos con colorantes índigos puede requerir hasta 42 litros de agua. El reto de tratar estas aguas residuales de manera eficiente y sostenible se hace cada vez más urgente, dadas las regulaciones ambientales cada vez más estrictas y la creciente preocupación por la sostenibilidad.

El presente trabajo de tesis tiene como objetivo desarrollar y probar un filtro innovador basado en grafeno-lignina para la retención de colorantes azoicos en las aguas residuales de la industria textil, específicamente de la empresa FYNOTEJ. El grafeno, conocido por sus excepcionales propiedades adsorbentes, combinado con lignina, un biopolímero natural y renovable,

ofrece una solución prometedora para mejorar la eficiencia de los procesos de tratamiento de aguas residuales.

Este proyecto no solo busca cumplir con las normativas ambientales vigentes al reducir los niveles de contaminantes en las descargas de aguas residuales, sino que también pretende minimizar los riesgos para la salud y el medio ambiente. La implementación exitosa de este filtro podría representar un avance significativo en las prácticas de tratamiento de aguas residuales, promoviendo un enfoque más sostenible y responsable dentro de la industria textil.

En las siguientes secciones, se detallará la metodología propuesta, incluyendo la caracterización del agua residual de FYNOTEJ, el desarrollo del filtro, y la evaluación de su desempeño a través de pruebas experimentales y simulaciones. Se espera que los resultados de este estudio puedan aplicarse a gran escala, contribuyendo a la mejora de la calidad del agua y al bienestar ambiental general.

ANTECEDENTES

La industria textil es de las primeras actividades económicas que se desarrollaron, marcando el despliegue de la industria en México. Esta industria ha tenido un papel central en las actividades de la sociedad mexicana. En 2019 el consumo textil per capita llegó a los 13,1kg/hab/año.

La cantidad de agua necesaria para fabricar las prendas varía de acuerdo con la fibra textil y colorante usada: Un par de jean de algodón con colorantes índigos, necesita un mínimo de 42 litros de agua para ser teñidos, lavados y acabados. El algodón es la fibra que más consume agua en su proceso de tintura: 30-150L/kg de material textil.

Bermeo & Tinoco (Bermeo & Tinoco Gómez, 2019) en el trabajo Remoción de colorantes de efluente sintético de industria textil aplicando tecnología avanzada, emplearon la técnica de electrocoagulación para remover colorantes sintéticos de efluentes provenientes de la industria textil. La metodología aplicada se basa en las variaciones de densidad de corriente, pH y tiempo de residencia, las variables de respuesta son porcentaje de remoción de color y la de demanda química de oxígeno. Obtuvieron una remoción del 97.57% de demanda química de oxígeno y 99.11% de color a densidad de corriente 27.9A/m², pH de 10 y en un tiempo de reacción de 8min.

Entre los trabajos que han estudiado la eliminación de colorantes en aguas de la industria textil utilizando grafeno o lignina está el de Coello et al. (International Conferences and Exhibition on Nanotechnologies and Organic Electronics, 2015, 1646:38-45) en el trabajo Removal of acridine Orange from water by

grapheme oxide, reportan el uso de óxido de grafeno producido por el método Hummer para la absorción del tinte naranja de acridina en agua. Los resultados muestran que el equilibrio de adsorción, con la eliminación del 40% del colorante, se alcanza en aproximadamente 1 hora, y que la capacidad de adsorción aumenta a concentraciones inicial es más altas. El valor más alto de naranja de acridina adsorbido fue 229.8 mgg equivalente al 92% de porcentaje de remoción usando la concentración inicial de naranja de acridina 0.10 mg/mL.

Swaminathan et al. (International Journal of Environmental Science and Technology, 2015, 12: 3499–3508) en el trabajo An effective removal of methylene blue dye using polyacrylonitrile yarn waste/graphene oxide nanofibrous composite, estudiaron la eliminación de azul de metileno en agua apartir de la combinación de nano fibras de poliacrilonitrilo y óxido de grafeno en contrando que una concentración de nanofibras de 1.5% peso/peso con respecto al grafeno oxidado se obtiene la mejor remoción del colorante hasta en un 70%.

Oliveira et al. (JournalEnvironmentalScienceandHeath,2020,55(1): 2097-106) en el trabajo Graphene-based materials production and application in textile waste wáter treatment: color removal and phytotoxicity using Lactuca sativa as bioindicator, hicieron uso del óxido de grafeno para remoción de colorantes como el azul de metileno y azul brillante, logrando una eliminación del 99% y 29% respectivamente logrando un equilibrio a los 30 minutos. Además, realizaron ensayos de fito toxicidad al utilizar el agua tratada con semillas de lechuga.

Gao et al. (Bioresources, 2019, 14(4):8100-8113) en el trabajo, utilizaron una combinación del óxido de grafeno modificado con bagazo de caña logrando una eficiencia de remoción del colorante magenta del 55.4%. Cueva-Orjuela & Hornaza-Anaguano (DYNA, 2017,84(203):291-297) en el trabajo Sugarcane bagasse and its potential use for the textile effluent treatment, reportan el uso del bagazo de caña tratado para la remoción del rojo básico número 46 en solución acuosa logrando tener una eficiencia de remoción del 86.9%. Chandanshive et al. (Environmental Research, 150:88-96, 2016) en el trabajo Efficient de colorization and detoxification of textile industry effluent by Salvinia molesta in lagoon treatment, utilizaron una planta acuática Salvinia molesta la cual presenta una cantidad de lignina del 80% para remover un colorante azo Rubine GLP logrando una eficiencia de remoción del 97%.

Desarrollo y Prueba de un Filtro de Grafeno para la Retención de Colorantes Azoicos de las Aguas Residuales de la Industria Textil

La contaminación del agua por colorantes azoicos provenientes de la industria textil representa uno de los mayores desafíos ambientales en la actualidad. Estos compuestos orgánicos son notoriamente difíciles de eliminar debido a su estabilidad química y resistencia a la degradación biológica, lo que resulta en la persistencia de estos contaminantes en los cuerpos de agua y afecta gravemente a los ecosistemas acuáticos.

Tradicionalmente, diversas técnicas han sido implementadas para abordar este problema, incluyendo métodos físicos, químicos y biológicos. Entre los

métodos físicos, la adsorción se ha destacado por su eficacia y simplicidad operativa. Los materiales adsorbentes convencionales, como el carbón activado, han mostrado limitaciones en términos de capacidad de adsorción y regeneración. En respuesta a estas limitaciones, los materiales basados en grafeno han emergido como una solución prometedora debido a sus propiedades únicas, como su alta área superficial, estructura porosa y capacidad para interactuar con diversos tipos de contaminantes.

El grafeno y sus derivados, como el óxido de grafeno (GO) y el óxido de grafeno reducido (rGO), han sido objeto de intensas investigaciones debido a su potencial para mejorar significativamente la eficiencia de los procesos de adsorción. Estudios recientes han demostrado que los filtros de grafeno pueden alcanzar altas tasas de eliminación de colorantes azoicos, superando a muchos de los adsorbentes tradicionales. Además, estos filtros ofrecen la ventaja de ser regenerables, lo que contribuye a la sostenibilidad del proceso.

En su revisión sobre la eficiencia de diversos métodos recientes para la eliminación de colorantes en aguas residuales, (Katheresan, 2019) analizaron múltiples tecnologías, incluyendo la adsorción, procesos de oxidación avanzada (POA), coagulación y floculación, así como tratamientos biológicos y de membrana. Los resultados indicaron que los materiales de grafeno destacan por su alta capacidad de adsorción debido a su gran área superficial y estructura porosa, logrando eficiencias de eliminación de colorantes superiores al 90% en algunos casos. Además, los autores señalaron que los métodos basados en grafeno ofrecen ventajas en términos de regeneración y

reutilización, lo que los hace prometedores para aplicaciones industriales sostenibles.

El presente trabajo se centra en el desarrollo y la prueba de un filtro de grafeno específicamente diseñado para la retención de colorantes azoicos en las aguas residuales de la industria textil. A través de una serie de experimentos, se evaluará la eficiencia de adsorción del filtro, su capacidad de regeneración y su viabilidad práctica para su implementación a escala industrial. Este estudio no solo busca aportar una solución eficaz al problema de la contaminación por colorantes, sino también contribuir al avance de las tecnologías de tratamiento de aguas residuales mediante la incorporación de materiales avanzados como el grafeno.

En los siguientes apartados, se presentarán los antecedentes teóricos y prácticos que fundamentan esta investigación, así como un análisis detallado de estudios previos que han explorado el uso de materiales de grafeno en la remoción de colorantes azoicos. Este contexto permitirá comprender el estado actual del conocimiento y las brechas que esta tesis pretende abordar.

Esta introducción establece el contexto y la relevancia del problema, explica brevemente las técnicas utilizadas y justifica la elección del grafeno como material adsorbente, proporcionando una base sólida para el desarrollo del capítulo de antecedentes.

Según el estudio de (Smith & Johnson , 2022), titulado "Enhanced adsorption capacity of azo dye on reduced graphene oxide modified with polydopamine",

se observó un incremento significativo en la capacidad de adsorción del tinte azoico sobre el grafeno reducido modificado con polidopamina. Los resultados demostraron que la modificación con polidopamina mejoró la afinidad del material hacia el tinte, resultando en una mayor eficiencia de adsorción en comparación con el grafeno reducido sin modificar. Este hallazgo sugiere el potencial prometedor de utilizar materiales compuestos de grafeno modificado para la eliminación de tintes azoicos en aguas residuales industriales.

JUSTIFICACIÓN

El producto se refiere a un sistema que contiene una matriz a base de grafeno-lignina para la eliminación de colorantes azoicos como naranja A-1, amarillo y rojo 57 presentes en las aguas residuales de la industria textil y laboratorios de investigación que trabajen con dichos colorantes, con la finalidad de cumplir con la normatividad vigente en relación con los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales. La eliminación de colorantes azoicos de las aguas residuales es importante debido a que su exposición a largo plazo puede ocasionar riesgos a la salud y a que se sabe son cancerígenos. Además, de que pueden modificar las propiedades químicas y físicas del suelo y cuerpos de agua, causando daños a la flora y fauna del medio ambiente.

Mitrogiannis et al. (Journal Environmental Chemistry Engineering, 2015, 3: 670-680) en el trabajo Biosorption of methylene blue onto *Arthrospira platensis* biomass: Kinetic, equilibrium and thermodynamic studies, hacen uso de la biomasa de la cianobacteria *Arthrospira platensis* como biosorbente para la eliminación del colorante azul de metileno tipo catiónico en soluciones acuosas reportando una adsorción de 312.5 mg de colorante/g de biomasa a pH de 7.5 y una temperatura de 25°C. Por otra parte, Hornik et al. (Chemical Papers, 2013, 67: 254-264) en el trabajo Continuous sorption of synthetic and dried biomass of microalga *Chlorella pyrenoidosa* reportan la absorción de colorantes catiónicos como el verde de malaquita a partir de biomasa de la microalga *Chlorella pyrenoidosa* inmovilizada en

espuma de poliuretano teniendo rendimientos de hasta el 50% de eliminación de los colorantes en soluciones acuosas. En ambos casos los métodos la eficiencia de eliminación del colorante en solución acuosa fue mayor al 50%, sin embargo, presenta la desventaja de requerir una gran cantidad de biomasa para el tratamiento de agua contaminada con colorante.

Entre los tratamientos donde se hace uso de los métodos fisicoquímicos está el caso de Castro-Peña & Durán-Herrera (Revista Tecnología En Marcha, 2014, 27(2):40–50) en el trabajo Degradación y de coloración de agua contaminada con colorantes textiles mediante procesos de oxidación avanzada, reportan el proceso Foto-Fenton ($H_2O_2/Fe^{2+}/UV$) para degradar el colorante textil COLRON RED SD3B en un 77%, a las condiciones de operación de pH 2, 100 ppm de colorante, 80 ppm de hierro y 102 ppm de peróxido de hidrógeno. Carvalho et al. (Water Research, 2016, 98: 39-46) en el trabajo Efficiency comparison of ozonation, photolysis, photocatalysis and photoelectroncatalysis method sin real textile waste water de colorization, reportaron el uso de nanotubos de TiO_2 como fotocatalizador con ozonización a un rango de pH 3-8 teniendo una reducción del 50% de eliminación del color después de 60 minutos. A estos métodos se les conoce como Procesos de Oxidación Avanzada (POAs). Éstas técnicas utilizan diversos agentes oxidantes como ozono (O_3), O_3 / peróxido de hidrógeno (H_2O_2) O_3 / catalizador, radiación ultravioleta (UV), UV/ O_3 , UV/ H_2O_2 , sus interacciones, es decir, $O_3/UV/H_2O_2$, pero además Hierro (Fe^{2+})/ H_2O_2 y fotocatalisis (homogénea o heterogénea). Estos procesos oxidativos de fase líquida consisten en sistemas continuos, donde se mezcla el agua residual con los

agentes oxidantes respectivos para la degradación completa por el radical hidroxilo generado “insitu”. En estos procesos los parámetros óptimos a considerar son: la concentración de peróxido de hidrógeno, magnitud de pH, concentración inicial de colorante, e intensidad de la radiación UV.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Problemática a resolver

El proyecto está relacionado con el tratamiento de aguas, más específicamente con aquellos procesos de la industria textil en donde sus aguas residuales de proceso presenten colorantes los cuales requieren eliminar para su posterior descarga en el alcantarillado

El agua residual generada por los diversos procesos textiles tiene que ser limpia de grasas, aceites, colorantes y otros productos químicos antes de su descarga al descargar al alcantarillado.

Se estima que hasta un 50% de los colorantes utilizados en la industria textil termina en las aguas descargadas por este sector industrial debido a su bajo grado de fijación en las telas. Entre los colorantes se tienen: Azoicos, antroquinonas, ftalocianina, ionarilcarbonio, sulfuro, polimetino y nitro.

Estos colorantes en una exposición a largo plazo o accidental pueden ocasionar riesgos a la salud. El peligro más común de los colorantes reactivos son los problemas respiratorios debido a la inhalación de partículas de colorantes. A veces pueden afectar el sistema inmunitario de una persona y, en casos extremos, esto puede significar que la próxima vez que la persona inhale el tinte, su cuerpo puede reaccionar dramáticamente.

El colorante tipo azoico se ha encontrado que muestran evidencias cancerígenas en la escisión reductora. Estos tintes son capaces de alterar las propiedades físicas y químicas del suelo, deteriorando los cuerpos de agua y causando daños a la flora y la fauna en el medio ambiente. Se observó que la

naturaleza tóxica de los tintes causa la muerte de los microorganismos del suelo, lo que a su vez afecta la productividad agrícola.

La presencia de una cantidad muy pequeña de colorantes Azo en agua (<1ppm) es muy visible. Esto afecta el mérito estético, la transparencia y la solubilidad en agua y gas. La reducción de la penetración de la luz a través del agua disminuye la actividad fotosintética, causando deficiencia de oxígeno y desregulando los ciclos biológicos de la biota acuática. Muchos colorantes Azo también son altamente venenosos para el ecosistema y los mutágenos, lo que significa que pueden tener efectos agudos o crónicos sobre los organismos, dependiendo del tiempo de exposición y la concentración del colorante (Arroyo & Cárcamo Economía y Sociedad, 2010,14(25); 51-68; Brañezetal. Revista Perú, 2018. 23 (26):129-144).

OBJETIVO GENERAL

- Diseñar un filtro a base de grafeno-lignina para la retención de colorantes azoicos de aguas residuales de la industria textil como FYNOTEJ

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar el agua de FYNOTEJ
- Determinar la base del filtro que retendrá los colorantes
- Simular el proceso para verificar su funcionalidad

MARCO TEÓRICO

Los colorantes utilizados en la industria textil son compuestos químicos esenciales para conferir color a las fibras de los tejidos, lo cual permite una amplia gama de diseños y acabados en los productos textiles. Estos colorantes se dividen principalmente en dos categorías: colorantes naturales y sintéticos, siendo los últimos los más comúnmente utilizados en la actualidad debido a su variedad de tonalidades y estabilidad. (Colorantes Azoicos y su Aplicación en la Industria Textil, 2024)

Los colorantes sintéticos, como los colorantes azoicos, se caracterizan por su capacidad para unirse químicamente a las fibras, asegurando que el color sea duradero y resistente al lavado y la exposición a la luz. Además, los avances recientes en la química del color han permitido la creación de tintes más ecológicos y seguros, contribuyendo a una mayor sostenibilidad en la industria textil. (Tiempo de Inventos, 2024)

Los efectos en la salud de los colorantes azoicos, se puede afirmar que estos compuestos, ampliamente utilizados en la industria textil, han suscitado preocupaciones debido a su potencial para liberar aminas aromáticas, sustancias que pueden ser perjudiciales para la salud humana. Algunos estudios han demostrado que ciertas aminas aromáticas derivadas de los colorantes azoicos pueden ser carcinogénicas, lo que ha llevado a la regulación y restricción del uso de ciertos colorantes azoicos en textiles que están en contacto directo con la piel. Además, la exposición prolongada a

estos colorantes puede causar reacciones alérgicas y otros problemas de salud, lo que subraya la importancia de utilizar alternativas más seguras y sostenibles en la industria textil

Las aguas residuales generadas por la industria textil son una preocupación significativa debido a la gran cantidad de productos químicos que contienen, incluidos los colorantes utilizados en el proceso de teñido. Estos efluentes pueden tener un impacto negativo en el medio ambiente y la salud humana, debido a la presencia de compuestos tóxicos y difíciles de degradar. Entre los contaminantes comunes se encuentran los colorantes azoicos, que no solo afectan la calidad del agua, sino que también pueden liberar sustancias potencialmente cancerígenas. La gestión adecuada de estas aguas residuales es crucial para minimizar su impacto, y se han desarrollado diversas tecnologías para tratar y reducir la carga contaminante antes de que las aguas sean vertidas al medio ambiente

El tratamiento de aguas es el proceso mediante el cual se eliminan o reducen los contaminantes del agua para hacerla segura para su uso previsto, ya sea para el consumo humano, la descarga en cuerpos receptores, o usos industriales. Este proceso puede incluir diversas etapas, como la coagulación, floculación, filtración y desinfección, con el objetivo de cumplir con los estándares de calidad establecidos por normativas oficiales (NOM).

PARÁMETROS SEGÚN LA NOM:

Para el tratamiento de aguas, las normas oficiales mexicanas especifican varios parámetros clave que deben ser monitoreados y controlados:

1. **pH:** Este parámetro mide la acidez o alcalinidad del agua. Según la NOM-127-SSA1-1994, el rango aceptable de pH para agua potable es de 6.5 a 8.5 (NOM-127-SSA1-1994).
2. **Turbidez:** Se refiere a la claridad del agua. La NOM-127-SSA1-1994 establece que la turbidez en el agua potable debe ser menor a 1 NTU (NOM-127-SSA1-1994).
3. **Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO):** Mide la cantidad de oxígeno requerido por microorganismos para descomponer materia orgánica en un periodo de 5 días. Este parámetro es fundamental para evaluar la carga orgánica en el agua (NOM-003-SEMARNAT-1997).
4. **Demanda Química de Oxígeno (DQO):** Indica la cantidad total de oxidantes necesarios para descomponer la materia orgánica e inorgánica. Este parámetro se utiliza para evaluar la contaminación general del agua (NOM-003-SEMARNAT-1997).
5. **Coliformes Totales y Fecales:** Son indicadores de la presencia de bacterias que pueden causar enfermedades. Para agua potable, la NOM-127-SSA1-1994 exige que no haya coliformes fecales presentes (NOM-127-SSA1-1994).
6. **Sólidos Suspendidos Totales (SST):** Mide la cantidad de partículas en suspensión en el agua. Este parámetro es relevante para la calidad

del agua tratada y se regula en la NOM-003-SEMARNAT-1997 (NOM-003-SEMARNAT-1997).

7. **Metales Pesados:** Incluyen elementos como plomo, mercurio y cadmio. Los límites para estos contaminantes son establecidos por diversas NOMs dependiendo del uso final del agua (NOM-001-SEMARNAT-1996).
8. **Nitratos y Nitritos:** Indicadores de contaminación por fertilizantes o desechos orgánicos, con límites estrictos en agua potable según la NOM-127-SSA1-1994 (NOM-127-SSA1-1994).

INDUSTRIA TEXTIL

La industria textil es de las primeras actividades económicas que se desarrollaron, marcando el despliegue de la industria en México. Esta industria ha tenido un papel central en las actividades de la sociedad mexicana, además de figurar entre las industrias más antiguas, tuvo un papel protagónico en la Revolución Industrial y ha sido una de las actividades industriales críticas para la economía de países en vías de desarrollo. La industria textil está íntimamente vinculada con el sector de la confección de prendas de vestir; del total de telas que se producen a nivel mundial la mitad se destina a la industria de la confección y el resto a usos múltiples ya que los textiles se utilizan en la fabricación de productos varios que van desde productos industriales hasta productos para el hogar (Arroyo y Cárcamo, 2010; Vera y Vera, 2012).

En 2015 la población mundial ha alcanzado los 7,400 millones de personas y el consumo textil per cápita llegó a los 13,1 kg/hab/año. (Brañez y col., 2018). El TLCAN ha estimado que empresas de Estados Unidos incrementan su papel como compradores e inversionistas en la economía mexicana, convirtiendo a México en un sitio favorable para las compañías de los sectores de fibras, textil, confección y tiendas departamentales norteamericanas que buscan establecer un mercado de proveedores que se encuentren cerca de sus complejos matrices y un bajo costo y manteniendo altos estándares de calidad.

La proximidad geográfica con Estados Unidos, las diferencias salariales, la inversión en infraestructura, la experiencia de la industria textil nacional y el acceso al libre mercado, han permitido que desde 1998, México se sea el principal exportador de ropa a Estados Unidos, superando a países como Taiwán, China y América Latina. De acuerdo a un estudio de Kurt Salmon Associates para el Banco Nacional de Comercio Exterior, 463 firmas extranjeras de textiles y confecciones se han establecido en México, de las cuales 71.9% son de Estados Unidos y el resto de Canadá, Asia y Europa.

El Estado de México y la Ciudad de México de acuerdo con los últimos datos del censo industria 2018, contribuyen con el 53% de la producción de textiles y prendas de vestir. El Estado de México se constituye actualmente como el primer estado productor textil del país y el segundo estado productor de prendas de vestir a nivel nacional (Hernández y Galindo, 2006; Vera y Vera, 2012).

Otro factor que favorece a la industria textil es que para 2019 México reportó 12 acuerdos de Libre Comercio con 44 países lo que lo está posicionando a nivel mundial a pesar del incremento de la mano de obra de China (Vera y Vera, 2012).

Sin embargo, este posicionamiento ha promovido que la industria textil después de la industria del petróleo sea la segunda industria más contaminante del medio ambiente. La cantidad de agua necesaria para fabricar las prendas que vestimos varían de acuerdo a la fibra textil y colorante usados: Un par de jean de algodón con colorantes índigos, necesita un mínimo de 42 litros de agua para ser teñidos, lavados y acabados. Una vez en los hogares, se emplean 21 litros cada vez que se lavan arrojando al alcantarillado colorantes químicos (Brañez y col., 2018; Villegas y Gonzales, 2013). El algodón es la fibra que más consume agua en su proceso de tintura: 30 - 150 L/kg de material textil (Brañez y col., 2018; Castells, 2012). La industria textil se caracteriza también por ser una actividad que genera más residuos contaminantes. El agua residual generada por los diversos procesos textiles tiene que ser limpia de: grasas, aceites, colorantes y otros productos químicos antes de su descarga al alcantarillado (Brañez y col., 2018). Es así que el presente proyecto se centra en el desarrollo de un filtro a base a de láminas de grafeno-lignina para la remoción de colorantes que son químicos que al ser vertidos en las aguas ocasionan la muerte de la flora y la fauna aledaña.

COLORANTES

El término colorante abarca todo compuesto que cuando es aplicado sobre un objeto le confiere color y que mantiene sus propiedades de color por un tiempo prolongado. La industria textil es la de mayor consumo y empleo de diferentes tintes y colorantes. La producción anual de colorantes sintéticos se calcula en 700,000 toneladas (Al-Ghouti y col., 2010).

Se estima que hasta un 50% de los colorantes utilizados en la industria textil termina en las aguas descargadas por este sector industrial debido a su bajo grado de fijación en las telas (Cervantes, 2008).

Los colorantes textiles tienen diferentes orígenes y aplicaciones, aunque en la actualidad mayormente son utilizados los de origen sintético, los cuales no son biodegradables en el medio ambiente. Por este motivo, se ha visto obligado a buscar la manera de eliminar estos contaminantes ya que estas sustancias son consideradas como recalcitrantes. Por ende, a éstas se les debe aplicar procesos adecuados para degradarlos de las aguas residuales de manera efectiva, antes de que sean descargados al ambiente.

En la actualidad se utilizan diferentes tipos de tintes en las industrias, clasificados en dos grandes grupos: los colorantes y los pigmentos. Los colorantes son solubles en agua y son definidos como compuestos capaces de impartir color a una fibra, sin ser afectados por factores como la luz, temperatura y jabón (Garzón, 2009).

Los colorantes pueden clasificarse de acuerdo con su clasificación química y a su método de aplicación, en este proyecto nos centraremos en su estructura química. Entre los colorantes tenemos los siguientes:

Azoicos: Son los colorantes más utilizados que llegan hasta un 70% de los colorantes orgánicos en el mercado.

Antraquinonas: Son quinonas tricíclicas derivadas del antraceno que a menudo contienen uno o más grupos hidroxilo.

Ftalocianina: Éstos colorantes están formados por la unión de cuatro 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 con dobles enlaces conjugados

Ión arilcarbonio: Su estructura química está conformada por un átomo carbonilo unido a dos o tres anillos aromáticos.

Sulfuro: Grupo de colorantes totalmente insolubles en agua pero soluble por reducción. Proporciona una gama de colores bajos y apagados.

Polimetino: 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: 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 (Pinto, 2015)

Al momento no hay pruebas que sugieran que la mayoría de los colorantes utilizados actualmente en el teñido y acabado son riesgosos a la salud humana en los niveles de exposición que los trabajadores generalmente enfrentan en las fábricas. Sin embargo, con una exposición excesiva a largo plazo o accidental, puede haber riesgos para la salud y, en consecuencia, todos los colorantes y productos químicos deben tratarse con cuidado. El peligro más común de los colorantes reactivos son los problemas respiratorios debido a la inhalación de partículas de colorantes. A veces pueden afectar el sistema inmunitario de una persona y, en casos extremos, esto puede significar que la próxima vez que la persona inhale el tinte, su cuerpo puede reaccionar dramáticamente. Esto se llama sensibilización respiratoria y los síntomas incluyen picazón, ojos llorosos, estornudos y síntomas de asma, como tos y sibilancias (Hassaan, 2016).

Los problemas de salud más predominantes relacionados con los procesos de tintura y acabado surgen de la exposición a químicos que actúan como irritantes. Estos pueden causar irritación de la piel, picazón o taponamiento de la nariz, estornudos y dolor en los ojos. Incluyen resinas a base de formaldehído, amoníaco, ácido acético, algunos productos químicos resistentes a la contracción, algunos blanqueadores ópticos, carbonato de

sodio, sosa cáustica y lejía. Ciertos tintes reactivos, tina y dispersos también son reconocidos como sensibles a la piel (Health and Safety Executive, 2016).

Gran parte de los tintes no son fijados en las telas por lo que se desechan en los efluentes, por lo que estos efluentes son ricos en colorantes y productos químicos, algunos de los cuales no son biodegradables y cancerígenos y representan una gran amenaza para la salud y el medio ambiente. Se han utilizado varios procesos de tratamiento primario, económico y terciario como la floculación, los filtros de goteo y la electrodiálisis para tratar estos efluentes.

Sin embargo, estos tratamientos no son efectivos contra la eliminación de todos los colorantes y productos químicos utilizados. Los efluentes no solo contienen una alta concentración de colorantes utilizados en la industria, sino que también contienen los productos químicos utilizados en las diversas etapas de procesamiento. Algunos metales traza como Cr, As, Cu y Zn están presentes en estos efluentes y son capaces de causar varios problemas de salud, como hemorragia, ulceración de la piel, náuseas, irritación severa de la piel y dermatitis. Los efluentes textiles también contienen otras impurezas orgánicas y microbianas (Hassan y col., 2016; Nese y col., 2007)

Los colorantes tipo azoico se ha encontrado que muestran evidencias cancerígenas en la escisión reductora. Estos tintes son capaces de alterar las propiedades físicas y químicas del suelo, deteriorando los cuerpos de agua y causando daños a la flora y la fauna en el medio ambiente. Se observó que la

naturaleza tóxica de los tintes causa la muerte de los microorganismos del suelo, lo que a su vez afecta la productividad agrícola.

La presencia de una cantidad muy pequeña de colorantes Azo en agua (<1ppm) es muy visible. Esto afecta el mérito estético, la transparencia y la solubilidad en agua y gas. La reducción de la penetración de la luz a través del agua disminuye la actividad fotosintética, causando deficiencia de oxígeno y desregulando los ciclos biológicos de la biota acuática. Muchos colorantes Azo también son altamente venenosos para el ecosistema y los mutágenos, lo que significa que pueden tener efectos agudos o crónicos sobre los organismos, dependiendo del tiempo de exposición y la concentración del colorante Azo (Savin y Butnaru, 2008; Chung, 1983).

Entre los materiales que involucra la tecnología que estamos proponiendo está el grafeno y la lignina de los cuales hablaremos a continuación

GRAFENO

El carbono es el cuarto elemento más abundante en el universo (después del hidrógeno, helio y oxígeno). Además de ser un elemento polimórfico, el cual puede existir en tres formas diferentes, diamante, grafito y como fullerenos. El grafito es un material anisotrópico, lo cual quiere decir que sus propiedades, tales como térmicas y eléctricas, varían según la dirección en las que son examinadas, por ejemplo, se considera un excelente conductor térmico y eléctrico si lo observamos desde dentro del plano laminar, sin embargo, dichas propiedades disminuyen cuando lo vemos desde un punto de vista

perpendicular (debido a que las fuerzas de van der Waal son muy débiles entre lámina y lámina. Al separar una única lámina de átomos de carbono del grafito se obtiene el grafeno (Chung, 2002).

El grafeno se define como una fina lámina plana de átomos de carbono con hibridación sp^2 en dos dimensiones (2D), formando una estructura similar a un panel de abeja (Ajay y Chee, 2013). Fue aislado por primera vez en el año 2004, por los físicos Andre K. Geim y Konstantin S. Novoselov, al pegar un trozo de celo sobre la superficie de un grafito, pero no fue hasta el año 2010 cuando el grafeno comenzó a generar interés en el resto de los científicos, al ganar sus descubridores el Premio Nobel de física.

Este interés fue debido a las características únicas del material, como la excelente conductividad eléctrica, su amplia superficie, dureza y una gran conductividad térmica. Además, al proceder de una sustancia natural como el grafito, tiene menor riesgo ambiental que los materiales inorgánicos (Bunch, 2008; Zhu y col., 2010; Baladin y col., 2008).

El grafeno es el material más resistente que se conoce en la naturaleza, más fuerte que el acero estructural con su mismo espesor y más duro que el diamante, y, sin embargo, su grosor oscila entre 1 y 10 átomos de carbono. Al ser tan fino y apreciarse solamente dos de sus dimensiones, se le considera un material bidimensional, el único que es capaz de mantenerse estable hasta con el grosor de un átomo.

Debido a que tiene un tamaño de 50 nm es considerado un “nanomaterial”. La nanotecnología se basa en el control de la materia a escalas de entre 1 y 100 nanómetros y ha sufrido un gran avance en los últimos años. Uno de sus avances a destacar se encuentra en el campo biomédico, con el uso de materiales con características especiales como los puntos cuánticos (QD) o los nanotubos de carbono, utilizados para la obtención de imágenes o tratamiento de cáncer. El grafeno y sus derivados, el óxido de grafeno, están siendo estudiados para sus aplicaciones biomédicas como sensores FET/FRET, espectroscopia de masa, diferenciación celular y control de su crecimiento y en el tratamiento del cáncer, entre otros.

Presenta propiedades de elasticidad y flexibilidad y está dotado de una gran conductividad térmica y eléctrica, lo que le permite disipar el calor y soportar intensas corrientes eléctricas sin calentarse. Es prácticamente transparente, hidrófugo y tan denso que ni siquiera el gas helio puede atravesarlo. Además, presenta otras muchas cualidades, como la alta movilidad de sus electrones, propiedad que eleva su potencial uso en los veloces nano dispositivos del futuro.

El grafeno tiene increíbles propiedades mecánicas, electrónicas, químicas, magnéticas y ópticas que lo han convertido en uno de los nanomateriales más estudiados en la actualidad.

A continuación, enumeraremos sus características:

- Es carbono puro

- Es bidimensional, unas 100.000 veces más delgado que el cabello humano.
- Es el material más resistente de la naturaleza, 200 veces más que el acero estructural con su mismo espesor.
- Es más duro al rayado que el diamante.
- Es más flexible que la fibra de carbono y elástico.
- Con la misma densidad que la fibra de carbono, es 5 veces más ligero que el aluminio. Una lámina de grafeno de 1 m² pesa solo 0,77 mg.
- Es hidrófugo, repele el agua y la corrosión.
- Es inerte químicamente, no reacciona con el oxígeno del aire ni se oxida.
- Posee una gran superficie específica (SSA) de 2.600 m²/g, de modo que un gramo bastaría para cubrir totalmente un campo de fútbol.
- Es tan denso que ni siquiera los átomos de helio son capaces de atravesarlo. Sin embargo, sí permite el paso del vapor de agua.
- Es casi transparente a la luz, pues la absorción óptica de una sola capa de grafeno es de solo ~2,3% en el espectro visible.
- Tiene una alta conductividad térmica y eléctrica, mayor que las del cobre y la plata.
- Se calienta menos al conducir los electrones (menor efecto Joule) y consume menos electricidad para una misma tarea que el silicio.
- Es multiplicador de frecuencias, por lo que permite trabajar a altas frecuencias de reloj.
- Soporta la radiación ionizante, con lo que es aplicable en ámbitos como el sanitario (radioterapia, etc.)
- Es biocompatible, no es tóxico para las células biológicas.
- Es bactericida, pero permite el crecimiento de células. Las bacterias no crecen en él y, por tanto, puede ser útil en la industria alimentaria o en la biomedicina.

- Puede reaccionar químicamente con otras sustancias para formar compuestos nuevos con diferentes propiedades, lo que abre un abanico prácticamente ilimitado de campos de aplicación.

Existen diferentes métodos de síntesis de grafeno como son:

- i. Deposición química de vapor o microondas
- ii. Método de descarga de arco
- iii. Reducción química
- iv. Exfoliación micro-mecánica
- v. Reducción térmica

Por otro lado, a partir del grafeno se obtiene el óxido de grafeno el cual fue reportado por primera vez en 1840 por Schafhaeutl, y en 1859 por Brodie. La historia de la evolución de los métodos de síntesis y la estructura química del óxido de grafeno han sido ampliamente revisados. En la actualidad, el método de síntesis más utilizado es el propuesto por Hummers y Offeman en 1958 (Hansora y col., 2015), sin embargo, no es tan eficiente por lo que nuestro equipo de trabajo ha investigado nuevos métodos llegando al método denominado C&R el cual está próximo a patentarse.

Además otro de los materiales a utilizar para este prototipo es la lignina la cual puede ser obtenida de residuos sólidos orgánicos.

METODOLOGÍA

PRODUCCIÓN DE GRAFENO

El método C&R para producción de grafeno diseñado por nuestro equipo de trabajo está próximo a ser patentado ya que se obtiene hasta una eficiencia del 90%. A grandes rasgos el grafito es transformado a grafeno por la acción del ácido acético y el peróxido de hidrógeno junto con un baño ultrasónico.

La reacción es la siguiente:



3 -C- 3

8 -H- 8

5 -O- 5

La caracterización del grafeno se realizará por infrarrojo con transformada de Fourier, microscopia electrónica de barrido.

REMOCIÓN DEL COLORANTE

La remoción de los colorantes se medirá a partir de absorción de acuerdo a que cada uno de los colorantes presentan un espectro de adsorción característico entre los 550 y 600 nm.

Además, el prototipo será probado a diferentes concentraciones del colorante (1-10 g/L) y flujo con la finalidad de medir su eficiencia de remoción y poder optimizar.

CARACTERIZACIÓN DEL AGUA

El agua residual de la industria textil será analizada con la finalidad de verificar que cumpla con la normatividad mexicana.

La DQO se medirá a partir de un equipo HANNA Instruments HI83399 utilizando viales con reactivo para DQO HI93754C-25 para DOQ alta y baja.

A partir de la NMX-AA-051-SCFI-2016 se realizará la medición de metales pesados por adsorción atómica ya que diversos colorantes para ser fijados presentan metales pesados

RESULTADOS

El tratamiento de aguas, más específicamente con aquellos procesos de la industria textil en donde sus aguas residuales de proceso presenten colorantes los cuales requieren eliminar para su posterior descarga en el alcantarillado.

Se estima que hasta un 50% de los colorantes utilizados en la industria textil termina en las aguas descargadas por este sector industrial debido a su bajo grado de fijación en las telas. Entre los colorantes se tienen: Azoicos, antroquinonas, ftalocianina, ion arilcarbonio, sulfuro, polimetino y nitro.

La presencia de una cantidad muy pequeña de colorantes Azo en agua (<1ppm) es muy visible. Esto afecta el mérito estético, la transparencia y la solubilidad en agua y gas. La reducción de la penetración de la luz a través del agua disminuye la actividad fotosintética, causando deficiencia de oxígeno y desregulando los ciclos biológicos de la biota acuática. Muchos colorantes Azo

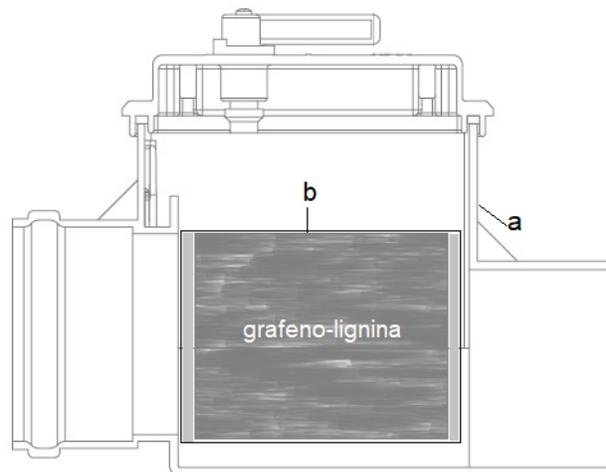
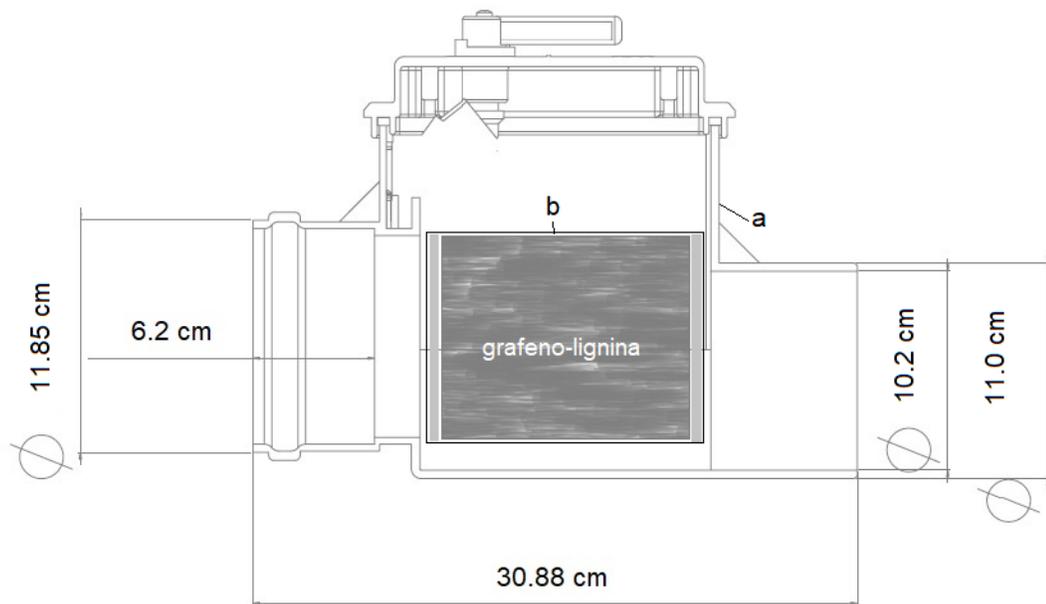
también son altamente venenosos para el ecosistema y los mutágenos, lo que significa que pueden tener efectos agudos o crónicos sobre los organismos, dependiendo del tiempo de exposición y la concentración del colorante

Se han obtenido los siguientes resultados

TABLA 1 CONCENTRACIÓN DE REMOCIÓN DEL COLORANTE POR EL SISTEMA

Tipo colorante	Concentración inicial (ppm)	Concentración final (ppm)	Porcentaje de remoción (%)
Ciclo 1			
Naranja A-1	40±1.3	36.6±0.9	81.5
Amarillo	40±0.9	36.9±1.2	82.3
Rojo 57	40±1.1	36.8±1.2	81.9
Ciclo 2			
Naranja A-1	40±1.1	36.5±1.0	81.2
Amarillo	40±1.2	36.7±0.9	81.8
Rojo 57	40±0.8	36.6±1.1	81.5
Ciclo 3			
Naranja A-1	40±1.2	36.1±1.5	80.2
Amarillo	40±0.9	36.1±1.1	80.3
Rojo 57	40±1.2	36.1±1.3	80.2

A continuación, se muestra el sistema



REFERENCIAS:

- Al-Ghouti M.A., Salamh J.Li.Y, Al-Laqtah N., Walker G., Ahmad M.N.M. Adsorption mechanisms of removing heavy metals and dyes from aqueous solution using date pits solid adsorbent. *Journal of Hazardous Materials*. 176(1):510-520, 2010.
- Ajay Kumar y Chee Huei Lee. Synthesis and Biomedical Applications of Graphene: Present and Future Trends, *Advances in Graphene Science*, Dr. M. Aliofkhaezrai (Ed.), InTech, DOI: 10.5772/55728, 2013.
- Arroyo L. Ma P. E. y Cárcamo S. Ma. L. La evolución histórica e importancia económica del sector textil y del vestido en México. *Economía y Sociedad* 14(25); 51-68, 2010.
- Berlin A., Balakshin, M. Industrial lignins: analysis, properties, and applications. In V. K. Gupta, M. G. Tuohy, C. P. Kubicek, & J. F. Saddler (Eds.), *Bioenergy Research: Advances and Applications* pp. 315-336, 2014
- Bermeo G.M., Tinoco G.O. Remoción de colorantes de efluente sintético de industria textil aplicando tecnología avanzada. *Revista Industrial Data*. 19(2):91-95, 2016.
- Brañez S.M., Gutiérrez R., Pérez R., Uribe C., Valle P. Contaminación de ambientes acuáticos generados por la industria textil. *Revista Perú*. 23(26):129-144, 2018.
- Bunch, J. S. Mechanical and electrical properties of graphene sheets (Doctoral dissertation, Cornell University), 2008.
- Carvalho Cardoso J., Garcia Bessegato G., Boldrini Zanoni M. Efficiency comparison of ozonation, photolysis, photocatalysis and photoelectrocatalysis methods in real textile wastewater decolorization. *Water Research*. 98:39-46, 2016.
- Castells X.E. Los retos sostenibilistas del sector textil. Terrassa. Universidad Politécnica de Cataluña.
- Castro Peña L. y Durán Herrera J.E. Degradación y decoloración de agua contaminada con colorantes textiles mediante procesos de oxidación avanzada. 27:40-50, 2014
- Cervantes F.J. Reducción de colorantes azo por distintos grupos microbianos en consorcios anaerobios. *Biotecnología*. 12(3):6-20, 2008.
- Chandanshive V.V., Rame N.R., Gholave A.R., Patil A.M. Jeon B.H., Govindwar S.P. Efficient decolorization and detoxification of textile industry effluent by *Salvinia molesta* in lagoon treatment. *Environmental Research*. 150:88-96, 2016
- Chung, K. T. The significance of azo-reduction in the mutagenesis and carcinogenesis of azo dyes. *Mutat Res*. 114(3):269-81, 1983.
- Chung D.D.L. Review Graphite. 7:1475-1489, 2002.
- Coello F.D., Vacecala G.C., Tubón U.G., Cid P.D., Tavolaro E., Martino G., Caputi L.SI., Tavolaro A. Removal od acridine Orange from water by

graphene oxide. International Conferences and Exhibition on Nanotechnologies and Organic Electronics. 1646:38-45, 2015.

- Cuevas-Orjuela J.C., Hornaza-Anaguano A., Merino-Restrepo A. Sugarcane bagasse and its potential use for the textile effluent treatment. DYNA. 84(203): 291-297, 2017.
- Gao R., Shen X., Wang L. Adsorption of basic magenta on graphene oxide-modified sugarcane bagasse. Bioresources. 14(4):8100-8113, 2019.
- Garzón R. Diferentes clases químicas por hongos y bacterias inmovilizados sobre fibra de agave tequila webber var. Tesis, Facultad d Ciencias, Pontificia Universidad Javeriana, 2009.
- Grande D., Pineda A., Arredondo J., Pérez-Gil F., Domínguez P. El procesamiento de residuos orgánicos como alternativa para la producción de alimentos de consumo animal, CIEMAD, 2000.
- Hansora D. P., Shimpi N. G., Mishra, S. Graphite to Graphene via Graphene Oxide: An Overview on Synthesis, Properties, and Applications. 67:2855–2868, 2015.
- Hassaan, M. A. Advanced oxidation processes of some organic pollutants in fresh and seawater, PhD, A Thesis, Faculty of Science, Port Said University, 180 P., 2016.
- Hassaan, M. A., El Nemr, A., and Madkour, F. F. Application of Ozonation and UV assisted Ozonation for Decolorization of Direct Yellow 50 in Sea water, The Pharmaceutical and Chemical Journal. 3(3):131-138, 2016.
- Health and Safety Executive, HSE. Dyes and chemicals in textile finishing: An introduction. Dyeing and Finishing Information Sheet No 1- HSE information sheet, 2016
- Hernández R.Y. y Galindo S.R.V. La industria textil en el Estado de México, retos y perspectivas. Espacios Públicos. 9(17):422-435, 2006.
- Hornik M., Sunovska A., Partelova D., Pipiska M. Continuous sorption of synthetic dyes on dried biomass of microalga *Chlorella pyrenoidosa*. Chemical Papers 67:254-264, 2013.
- Mitrogiannis D., Markou G., Celekli A., Bozkurt H. Biosorption of methylene blue onto *Arthrospira platensis* biomass: Kinetic, equilibrium and thermodynamic studies. Journal Environmental Chemistry Engineering. 3:670-680, 2015.
- Nese, T., Sivri, N. and Toroz, I. Pollutants of textile industry wastewater and assessment of its discharge limits by water quality standards. Turkish J. 7: 97-103, 2007.
- Oliveira N.G.F., Rodríguez B.C.G., Bezerra A.C.M., Gomes G.M., alvarez M.S.M. Graphene-based materials production and application in textile wastewater treatment: color removal and phytotoxicity using *Lactuca sativa* as bioindicator. Journal Environmental Science and Health. 55(1): 97-106, 2020.

- Pinto E. ¿Qué son las Ftalocianinas?, Millennium Nucleus, 2015. Advanced Oxidation Processes for Wastewater Treatment: State of the Art. Water, Air, Soil, & Pollut. 205:187, 2010
- Savin, I. and Butnaru, R. Wastewater characteristics in textile finishing mills. Environmental Engineering and Management Journal, 7(6): 859-864, 2008.
- Swaminathan S., Muthumanickam A., Imayathamizhan N.M. An effective removal of methylene blue dye using polyacrylonitrile yarn waste/graphene oxide nanofibrous composite.
- Sifontes M. C., Domine M. E. Lignina, estructura y aplicaciones: métodos de despolimerización para la obtención de derivados aromáticos de interés industrial. *Avances en Ciencias e Ingeniería*, 4(4), 15-46, 2013.
- Van Wyk J.P. Biotechnology and the utilization of biowaste as a resource for bioproduct development. Trends Biotechnol. 19(5): 172-177, 2001.
- Vera Muñoz G. y Vera Muñoz Ma.A.M. The technological path of the Mexican textile industry. *Frontera Norte*. 25(50):155-186, 2012.
- NOM-127-SSA1-1994. (1994). Salud ambiental. Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización. Diario Oficial de la Federación.
- NOM-003-SEMARNAT-1997. (1997). Especificaciones de los límites permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos de agua y en el suelo. Diario Oficial de la Federación.
- NOM-001-SEMARNAT-1996. (1996). Que establece los límites permisibles de concentración de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los cuerpos receptores de agua. Diario Oficial de la Federación.
-