



UNIVERSIDAD MICHOCANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO

FACULTAD DE QUIMICOFARMACOBIOLOGÍA

*“BIOADSORCIÓN DE TARTRAZINA POR SEMILLA DE GUAYABA
MODIFICADA CON HIERRO”*

T E S I S

PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
QUIMICOFARMACOBIOLOGO

PRESENTA:
LIZETH ANTONIO DURÁN

ASESOR:
D.I. RAÚL CORTÉS MARTÍNEZ

MORELIA, MICHOACÁN

JUNIO 2014

AGRADECIMIENTOS

Al D.I. Raúl Cortés Martínez por el asesoramiento para realizar este trabajo, por su inspiración, su apoyo, paciencia y solidaridad.

A la D. I. Ruth Alfaro Cuevas Villanueva por su apoyo proporcionando equipo e instalaciones para los análisis realizados en el proyecto.

A la D.C. Consuelo Cortés Penagos por su apoyo proporcionando material e instalaciones para la realización de algunas determinaciones, así como a su colaboradora Tsanda Sánchez por la asesoría.

Al equipo de trabajo del laboratorio de Análisis de Alimentos de la Facultad de Químico Farmacobiología por haber prestado sus instalaciones para la realización del proyecto así como su atención y ayuda : M.C. Rosa María García Martínez, M.C. Diana Maya Cortés , Q.F.B. María Gloria Cornelio Moreno, I.B.Q. Marel Ortiz Gutiérrez.

A mis amigos incondicionales, que me han acompañado durante todo el trayecto, por su compañía, con lo que hicieron el camino mucho más ligero :Elizabeth Zetter, Jesús Meza y Astrid Guzmán.

A mi compañero de vida, una persona muy importante para mí, que ha estado ahí siempre que lo necesito, por su paciencia y amor : Hugo Alberto Sánchez.

A lo más importante, mi familia, a mis padres, Félix Antonio y Carmen Durán, los que hicieron posible este proyecto, tanto por su apoyo económico como su apoyo emocional, por permitirme hacer lo que me gusta, por su motivación y más que nada por paciencia. Y a mis hermanos : Edgar, Oscar y Félix, los cuales no pude pedir mejores.

A Dios por permitirme realizar mis sueños, por ponerme en el camino a gente maravillosa que me ha apoyado incondicionalmente.

GRACIAS

DEDICATORIA

A mi familia (Antonio Durán)

A mis padres por su amor y apoyo

A mis abuelos, por su amor y consejos

A Hugo por su ayuda, amor y paciencia

A mis amigos, por su amistad

A mis ángeles, donde quiera que estén

† Rosa Yniesta

† Susana Durán

*Tesis apoyada por:
Consejo Estatal de Ciencia, Tecnología e Innovación
del Gobierno del Estado de Michoacán.*



INDICE GENERAL

1. INTRODUCCIÓN	11
2. ANTECEDENTES.....	13
2.1 El agua	13
2.1.1 Contaminación del agua	13
2.1.2 Contaminación del agua en México.....	14
2.1.3 Contaminación de efluentes industriales	15
2.1.4 Contaminación por colorantes	16
2.2 Colorantes	17
2.2.1 Definición.....	17
2.2.2 Tipos de colorantes.....	18
2.2.3 Colorantes azoicos	21
2.2.4 Tartrazina.....	21
2.3 Tratamientos de aguas coloridas.....	23
2.3.1 Tipos de tratamientos.....	23
2.3.2 Adsorción.....	25
2.3.3 Factores que afectan de adsorción.....	27
2.3.4 Biosorción	27
2.3.5 Cinéticas de sorción.....	28
2.3.6 Factores que intervienen en el proceso de biosorción.....	29
2.3.7 pH y su influencia en la adsorción	29
2.3.8 Concentración inicial del colorante	30
2.3.9 Isotermas de sorción	30
2.3.10 Biosorbente	34
2.3.11 Caracterización de biopolímeros	35
2.3.12 Guayaba.....	36
3. HIPÓTESIS	38
4. OBJETIVOS	38
4.1 Objetivo general	38
4.2 Objetivos específicos	38

5. METODOLOGÍA	39
5.1 Obtención del biosorbente	39
5.2 Molienda y tamizado	39
5.3 Caracterización de la semilla de guayaba	40
5.3.1 Caracterización fisicoquímica de la semilla de guayaba	40
5.3.2 Espectrofotometría de infrarrojo.....	41
5.3.3 Microscopía electrónica de barrido	41
5.3.4 Determinación de hierro	41
5.4 Experimentos de biosorción	42
5.4.1 Modificación del biosorbente.....	42
5.5 Cinéticas de biosorción.....	43
5.5.1 Influencia del tamaño de partícula	43
5.5.2 Modelos cinéticos.....	44
5.6 Influencia de dosis de biosorbente	44
5.7 Influencia del pH.....	45
5.8 Isotherma de biosorción	45
6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	47
6.1 Caracterización fisicoquímica de la semilla de guayaba	47
6.2 Espectrofotometría de infrarrojo.....	47
6.3 Microscopia Electrónica de Barrido.....	52
6.4 Determinación de Fe	57
6.5 Cinética de sorción	58
6.5.1 Influencia de tamaño de partícula	58
6.5.2 Modelos Cinéticos	59
6.6 Influencia de dosis de biosorbente.....	62
6.7 Influencia de pH.....	63
6.8 Isotherma de Sorción.....	64
6.9 Ajustes a modelos de isoterma.....	64
7. CONCLUSIONES.....	67
8. RECOMENDACIONES.....	68
BIBLIOGRAFÍA	69

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Relación entre las longitudes de onda y los colores percibidos.	18
Tabla 2. Colorantes permitidos en alimentos según la CEE.	20
Tabla 3. Propiedades fisicoquímicas del Amarillo 5 o tartrazina (NMX-F-201,1976).	22
Tabla 4. Especificaciones del Amarillo 5 NMX-F-201, 1976 (DOF, 1976).	23
Tabla 5. Conformación de Fibra soluble e insoluble.	35
Tabla 6. Análisis fisicoquímicos aplicados a la semilla de guayaba	40
Tabla 7. Comparación de análisis bromatológicos de la semilla de guayaba natural y modificada con hierro	47
Tabla 8. Grupos funcionales presentes en la semilla natural.	48
Tabla 9. Grupos funcionales de la semilla de guayaba modificada con Hierro	49
Tabla 10. Grupos funcionales de la semilla modificada con Fe después del contacto con tartrazina	50
Tabla 11. Imágenes de la morfología de la semilla de guayaba bajo distintas condiciones.	53
Tabla 12. Microanálisis de elementos presentes en la semilla de guayaba.	57
Tabla 13. Contenido de hierro en la semilla de guayaba.	57
Tabla 14. Parámetros cinéticos obtenidos de los experimentos de contacto de semilla de guayaba con tartrazina	61
Tabla 15. Modelos de parámetros de Isoterma para tartrazina	65
Tabla 16. Tabla comparativa de adsorción de tartrazina con distintos materiales	66

INDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Distribución de agua salada y dulce en el planeta.	13
Ilustración 2. Estructura molecular de la Tartrazina.	21
Ilustración 3. Métodos para la remoción de colorantes.	24
Ilustración 4. Diferentes procesos de Sorción.	25
Ilustración 5. Clasificación de isothermas de acuerdo a su concavidad.	31
Ilustración 6. Clasificación de isothermas de sorción de acuerdo a lo establecido por Brunauer.	32
Ilustración 7. Gráfico que representa la producción de guayaba en México clasificada por los principales estados productores.	37
Ilustración 8. Proceso de eliminación de pulpa de la semilla de guayaba.	39
Ilustración 9. Molienda de la semilla de guayaba.	39
Ilustración 10. Tamizado de la semilla de guayaba.	40
Ilustración 11. Espectrómetro de UV-Vis S2100 UV UNICO.	42
Ilustración 12. Modificación de la semilla de guayaba con FeCl_3	43
Ilustración 13. Modificación de pH de las soluciones de tartrazina.	45
Ilustración 14. Diagrama de bloques de parte experimental.	46
Ilustración 15. Gráfica de infrarrojo de semilla natural.	48
Ilustración 16. Gráfica de infrarrojo de semilla modificada con Hierro.	49
Ilustración 17. Gráfica de infrarrojo de semilla de guayaba modificada con Fe después del contacto con tartrazina.	50
Ilustración 18. Gráfica del espectro de IR de la semilla antes y después del contacto con Tartrazina.	51
Ilustración 19. Semilla natural entera vista con el microscopio electrónico de barrido	52
Ilustración 20. Mapeo de los elementos presentes en la semilla de guayaba modificada con Fe.	54
Ilustración 21. Elementos presentes en la semilla de guayaba natural ENTERA determinada en la MEB.	55
Ilustración 22. Elementos presentes en la semilla de guayaba natural triturada determinada en la MEB.	56
Ilustración 23. Elementos presentes en la semilla de guayaba modificada con Fe determinadas en la MEB.	56
Ilustración 24. Comparación de porcentaje de remoción con distintos tamaños de partícula.	58
Ilustración 25. Gráfica de modelos cinéticos para tamaño de partícula mayor 1 mm.	59
Ilustración 26. Gráfica de modelos cinéticos para tamaño de partícula 1 mm.	60
Ilustración 27. Gráfica de modelos cinéticos para tamaño de partícula menor 1 mm.	61
Ilustración 28. Gráfica para la determinación de concentración ideal de biosorbente.	62
Ilustración 29. Gráfica del comportamiento de la reacción al modificar el pH.	63
Ilustración 30. Isotherma de sorción de tartrazina en semilla de guayaba modificada con Fe.	64
Ilustración 31. Ajuste a modelos Isotérmicos.	65

RESUMEN

Con respecto a la sobreexplotación de los ecosistemas, la cuestión más importante y preocupante en la actualidad es la contaminación masiva del medio ambiente. Por lo tanto, ya que somos usuarios intensivos de tales ecosistemas, estamos obligados a crear nuevas alternativas para remediar el problema. Es por eso que el hombre moderno está tratando de hacer frente a la contaminación mediante el uso de métodos biológicos para evitar la continua destrucción de los recursos naturales.

La prevención y control de la contaminación ambiental es una de las principales responsabilidades y preocupaciones del hombre. En los últimos años, se han registrado un gran número de investigaciones para la prevención y el control de dicha contaminación (Arroyave- Rojas, 2008).

La biosorción es una de estas alternativas que consiste en la captación de compuestos por medio de una biomasa, ya sea viva o muerta, a través de mecanismos fisicoquímicos como la adsorción o el intercambio iónico en la que involucraremos una fase sólida (adsorbente) y una fase líquida (disolvente) que contenga las especies que van a ser adsorbidas (adsorbato).

Los colorantes como aditivos alimentarios están en permanente observación por sus posibles efectos sobre la salud de los consumidores. Entre ellos la tartrazina es uno de los pocos aditivos que debe declararse específicamente su presencia en la lista de ingredientes por sus posibles efectos alergénicos (Restrepo-Gallego, 2007).

Los efluentes de industrias alimentarias muchas veces coloridos, son estudiados ya que causan una problemática ambiental debido a la demanda excesiva de oxígeno que presentan. Los procesos que habitualmente se emplean para removerlos son costosos, por lo que existe una necesidad de emplear procesos alternativos, como la biosorción, ya que resulta más económico.

En el presente trabajo se utiliza semilla de guayaba como biosorbente para el tratamiento de soluciones de un colorante de grado alimenticio, la tartrazina (también conocida como Amarillo-5). Para lograr un alto porcentaje de remoción, semillas de guayaba se modificaron con cloruro férrico (FeCl_3), y se obtuvo un tiempo de equilibrio aceptable, ya que se consigue una eliminación completa dentro de 10 horas de contacto.

Cabe mencionar que al realizar la modificación de la semilla de guayaba triturada con FeCl_3 se ve favorecida considerablemente la remoción de tartrazina.

PALABRAS CLAVE: Tartrazina, biosorbente, semilla de guayaba, hierro.

ABSTRACT

With respect to the over-exploitation of the ecosystem, the most important and worrying issue at present is the massive pollution of the environment. Therefore, as we are intensive users of such ecosystem, we are obligated to create new alternatives to remediate the problem. That is why modern man is trying to deal with pollution by using of biological methods to prevent the continued destruction of natural resources.

The prevention and control of environmental pollution is one of the main responsibilities and concerns of man. In recent years, there have been a number of investigations for the prevention and control of such pollution (Arroyave - Rojas, 2008).

Biosorption is one of these alternatives. It consist by the uptake of compounds by means of a biomass, either dead or alive, through physical-chemical mechanisms such as adsorption or ion exchange which involves a solid phase (sorbent) and a liquid phase (solvent) containing the species to be adsorbed (adsorbate).

Colorants as food additives are under continuous observation for their potential effects on the health of consumers. Among them, Tartrazine is one of the few additives that must specifically declare their presence in the list of ingredients for their potential allergenic effects (Restrepo-Gallego, 2007).

Effluents from food industries are often colorful and they are studied because they cause environmental problems due to excessive oxygen demand that they show. The processes commonly used for their removal are expensive, so there is a need for using alternative processes, like biosorption, since they are economical.

In the present work, guava seeds are used as a biosorbent for treating solutions of a food grade dye, Tartrazine (also known as Yellow -5). To achieve a high percentage of removal, guava seeds were modified with ferric chloride (FeCl_3), and an acceptable equilibrium time was obtained, since a complete removal within 10 hours of the contact is achieved.

It is worth mentioning that when guava seeds were modified with ferric chloride (FeCl_3), Tartrazine removal is considerably favored.

KEYWORDS: Tartrazine, biosorbent, guava seeds, iron.

1. INTRODUCCIÓN

Para producir bienes y servicios los sistemas de producción exigen recursos naturales, y por lo tanto requiere de servicios ambientales como insumos y para la eliminación de sus residuos. La industria de la alimentación no es la excepción a este problema, la generación de residuos con tintes tiene un impacto negativo en todas las fuentes de agua en el país, la presencia del color en el agua deteriora la estética de los cuerpos de agua y genera desbalances ambientales ya que el color es un obstáculo para el paso de la luz solar en la superficie del agua, evitando la fotosíntesis de las algas en los ríos y arroyos. Cuando se evita la fotosíntesis, ya que es el primer eslabón de la cadena alimentaria, un desequilibrio general, se lleva a cabo en los ecosistemas, debido a que el zooplancton y peces de distintas especies se alimentan de algas, y la economía de las aldeas y pueblos situados a orillas del agua en el país dependen principalmente en las especies de pescado (Arroyave- Rojas, 2008).

La contaminación del agua debida a la descarga de efluentes coloreados y las fábricas de tintura son uno de los principales problemas ambientales en el mundo de hoy. Aunque los colorantes imparten colores atractivos a las fibras textiles, productos alimenticios, etc., los colores ocasionan problemas ecológicos en los ecosistemas acuáticos. Debido a su estructura molecular compleja y tamaño más grande los colorantes se consideran no oxidables por tratamientos físicos y químicos convencionales. Así, su decoloración es uno de los procesos indispensables en el tratamiento de aguas residuales (Mittal, 2007).

El método convencional de eliminación del color de los efluentes industriales implica técnicas como los tratamientos biológicos, tecnología de membrana, coagulación y oxidación. El tratamiento más común para la eliminación eficaz del colorante en la actualidad es de adsorción. La adsorción es superior a otras técnicas en términos de costes iniciales, la simplicidad del diseño, la facilidad del funcionamiento y la insensibilidad a sustancias tóxicas. Numerosos estudios se centran en la utilización de los desechos y casi todos los trabajos relacionados con las técnicas de adsorción para eliminar el color de los efluentes industriales se basan en los estudios del empleo de carbón activado. Los altos costos de carbón activado hacen que su uso sea limitado. Por lo que muchos investigadores tienen la tarea de buscar materiales alternativos, que son relativamente baratos y al mismo tiempo caracterizan razonablemente la eficacia de la adsorción. De los muchos ejemplos reportados en la literatura, se pueden mencionar los siguientes: arroz, la cáscara de maní, polvo y bagazo de caña de azúcar, aserrín de pino, cáscara de colinabo, cáscara de naranja, barro rojo, biomasa, corteza de eucalipto, semilla de soya, plumas de gallina, quitosano y quitina (Wawrzkievicz, 2008).

El colorante alimenticio y textil bajo investigación, la tartrazina (conocido de otra manera como E102 o FD & C amarillo 5) es un derivado de alquitrán de hulla que se utiliza para alimentos, cosméticos de color y otros productos; es de un color amarillo limón, se trata de un colorante azoico. Se encuentra en algunas marcas de jugo de fruta, fruta en conserva, bebidas gaseosas de color, pudines instantáneos, mezclas para pasteles, polvo para natillas, sopas, salsas, helados, hielo, caramelos, chicles, mazapán, mermelada, jalea, mostaza, yogurt y muchos alimentos de

conveniencia. Es más barato que el betacaroteno y, por lo tanto, se utiliza como una alternativa para lograr un color similar. Se utiliza la tartrazina en drogas especialmente en cápsulas medicinales, jarabes y cosméticos. La tartrazina es una “amenaza amarilla”, cuyo amplio uso en industria y su naturaleza hidrosoluble maximizan sus posibilidades de encontrarse como contaminantes en los efluentes industriales. La tartrazina tiene fama de causar hiperactividad y otros problemas de comportamiento, asma, migrañas, cáncer de tiroides, etc. Debido a su peligroso efecto sobre la salud, se evitan los alimentos y las bebidas que contienen tartrazina (Wawrzkievicz, 2008).

En el presente trabajo se evalúa la utilización de la semilla de guayaba triturada para la adsorción de Tartrazina (colorante de grado alimenticio y textil de gran uso industrial) siendo modificada con FeCl_3 utilizando un sistema tipo lote, con la finalidad de conocer su comportamiento para el tratamiento de efluentes industriales.

2. ANTECEDENTES

2.1 El agua

El agua es el elemento más importante de nuestra vida, la encontramos en todas partes, en los bosques, en las montañas, por debajo y encima de la tierra, en las plantas, en nuestro entorno e incluso en nuestro cuerpo. La necesitamos para producir los alimentos y, en general, es imprescindible para desarrollar todas las actividades humanas mediante las cuales nos reproducimos como sociedad. A pesar de que el agua es vital, sólo la vemos en el momento preciso en la que necesitamos y consumimos, o nos preocupamos por conocer o saber cómo, dónde y en qué condiciones se encuentra, no sabemos desde dónde viene. En resumen, existe un desajuste entre la demanda, en cantidad y en calidad, y las disponibilidades en un momento dado y en un lugar concreto. A pesar de que el agua es abundante en la tierra, un alto porcentaje de este líquido no es apta para el consumo humano: 97.5% es agua salada. El restante -2.5%- es agua dulce. De ésta sólo el 0.3% la puede consumir el ser humano. Finalmente, es importante destacar que la Organización Mundial de la Salud (OMS) ha advertido que el agua “es fundamental para la vida y la salud; la realización del derecho humano a disponer del agua es imprescindible para llevar una vida saludable, que respete la dignidad humana, y es un requisito para la realización de todos los demás derechos humanos” (CNA-SEMARNAT-IMTA 2003).

FUENTE: (UNESCO 1999)



Ilustración 1. Distribución de agua salada y dulce en el planeta.

2.1.1 Contaminación del agua

El agua tiene una composición precisa (H_2O) por lo que es fácil determinar cuando existen compuestos ajenos a ella. Se considera “contaminante” al exceso de materia o energía que provoque daños a los seres humanos, animales, plantas y bienes, o que perturbe negativamente las actividades que se desarrollan cerca o dentro del agua (Jiménez- Cisneros, 2001)

La contaminación de agua puede deberse a diferentes factores. Puede producirse por un acto de la naturaleza o por la actividad antropogénica; algunos tipos de contaminación pueden limpiarse siendo eliminados del agua mediante el ciclo hidrológico, con la evaporación y el desplazamiento del agua a través de las capas de la tierra (Vázquez, 2007).

Cuando el agua fluye por un lago o un arroyo, algunas sustancias contaminantes se precipitan. Los seres humanos han desarrollado varias formas para acelerar el proceso de limpieza mediante plantas para el tratamiento de aguas residuales y otras tecnologías. Pero es posible que la eliminación de desechos no sea una solución permanente. Aun cuando se remueva un contaminante, éste no desaparece. Por lo tanto, puede volver a contaminar al agua cuando reingrese al ciclo del agua (Vázquez, 2007).

El deterioro ambiental del planeta se ha dado desde la misma interacción del hombre con su entorno. Los problemas ambientales no son nuevos, sin embargo, en el último siglo y particularmente en las últimas décadas se han acrecentado, trascendiendo fronteras humanas y ecológicas. Esta problemática está interconectada y es global. El ambiente se relaciona con las actividades económicas y con las realidades socioculturales sujetas a modelos de desarrollo definido y poco sustentable (Jiménez- Cisneros, 2001).

Dar solución a los problemas implica tener un conocimiento ampliado de las causas y efectos de nuestra interacción social e individual, lo que nos sitúa en dilemas éticos que nos obligan a replantear nuestro papel en el mundo y posibilidades de supervivencia. Pero, conocer no es suficiente se deben impulsar innovaciones y acciones para revertir el daño ambiental. De hecho México enfrenta una situación preocupante en cuanto a la calidad y cantidad del agua para satisfacer las necesidades de los diferentes usuarios y permitir su desarrollo social y económico. Hacia el 2003, se calculó una disponibilidad de agua anual por habitante de 4,547 m³, lo que representa el 40% de lo que se tenía en 1950, y esto es debido a muchos factores, tales como el aumento de la población, el deterioro de ambiente, el cambio climático y su mal manejo en aprovechamiento, uso y desecho. La información de la Comisión Nacional del Agua (2004) presenta un grave deterioro de las aguas superficiales y la sobreexplotación de un buen número de los acuíferos existentes (Vázquez, 2007).

2.1.2 Contaminación del agua en México

En México la población se ha desarrollado de manera inversa a la relación con la disponibilidad de agua, 76% de la población vive donde se localiza tan solo 20% del agua dulce disponible, dando como resultado la sobre explotación de los acuíferos y las costosas transferencias de una cuenca a otra. Asimismo la falta de cultura sobre la conservación del agua y la contaminación, han causado graves impactos sociales, económicos, políticos y ambientales (Chávez-Cortes, 2007).

En la actualidad, México se encuentra en la lista de los países con una gran creciente de contaminación en los mantos acuíferos, siendo las causas principales los desechos industriales, domésticos y pecuarios. Esto causa un gran impacto debido a la falta de restricción y monitoreo de las descargas hidráulicas de estas zonas, las cuales son arrojadas hacia ríos y lagos sin tratamientos previos (Chávez-Cortes, 2007).

Aunado a ello, la distribución desigual del recurso y el crecimiento poblacional hacen que crezca la problemática. Dentro del territorio mexicano se estima que aproximadamente el 24 al 49% se encuentre clasificada dentro del rango de poco a muy contaminado y tan solo un 7% de los mantos de agua superficiales se encuentran en calidad óptima a excelente para el consumo humano (Chávez-Cortes, 2007).

Las cuencas mexicanas con mayor índice de contaminación son: El Río Coatzacoalcos (Veracruz), Río Blanco (Veracruz), Río Pánuco (sistema hidrológico conocido como Tula-Moctezuma-Pánuco), Río Atoyac (Puebla- Tlaxcala), Río Balsas (Guerrero- Michoacán) y el Río Lerma (sistema fluvial Lerma-lago Chapala-Santiago) (Vázquez, 2007).

2.1.3 Contaminación de efluentes industriales

El agua es uno de los componentes más importantes de nuestro planeta. Hoy en día, el agua se ha vuelto más escasa, debido a que nuestras demandas de agua cada vez son mayores. Este problema se ha relacionado con los niveles elevados de contaminantes, los cuales han ocasionado un gran deterioro de las fuentes de agua natural (ríos, lagos, mares, etc.) creando problemas en la salud humana como alergias, enfermedades de la piel, desorden en el sistema respiratorio, enfermedades del corazón, etc. Debido a esto, se han hecho esfuerzos para resolver el problema de la contaminación de aguas residuales y ha caído una fuerte presión sobre las industrias para reducir la emisión de contaminantes en el medio ambiente, lo cual, ha ocasionado que se desarrollen una gran variedad de métodos para el control y remoción de contaminantes.

Uno de los problemas ambientales más preocupante es la contaminación del agua. Un contaminante de agua es cualquier sustancia que altera las propiedades fisicoquímicas y biológicas del agua. Una sustancia se convierte en contaminante cuando excede una concentración o estándar aceptable (Hidalgo-Vazquez, 2010).

El problema que tratamos en el siguiente trabajo es la contaminación ambiental de las aguas residuales.

Estas pueden clasificarse de acuerdo a la fuente de donde provienen; doméstica, sanitaria, industrial, pluvial y combinada. Las aguas residuales son cada vez mayores debido al incremento de la población y a la expansión industrial especialmente de los países desarrollados. Las aguas residuales contienen una gran variedad de contaminantes. Estos contaminantes incluyen compuestos orgánicos e inorgánicos que pueden ser peligrosos para el ser humano, animales y plantas. Todo esto ha provocado una preocupación relacionada al medio ambiente y a la salud pública (Che García, 2011).

Dentro de las aguas residuales, la remoción de colorantes se ha vuelto uno de los mayores problemas en la contaminación de aguas. Esto es ocasionado porque muchas industrias utilizan colorantes para dar color a sus productos, tales como los procesos de industrias textiles, de papel, de plástico, de piel, de cosméticos, de alimentos y farmacéutica. Especialmente, la industria textil la cual consume una gran cantidad de agua y dos terceras partes de los colorantes manufacturados (Hidalgo-Vazquez, 2010).

Estos colorantes siempre están presentes en los desechos industriales. Los cuales son realizados sintéticamente y poseen una compleja estructura molecular, lo cual los hace difíciles de degradar al ser desechados. La presencia de bajas concentraciones de colorantes en los efluentes es altamente visible, además, algunos colorantes y sus productos de degradación pueden ser tóxicos y

carcinogénicos, por lo tanto, estos son una fuente importante de contaminación de agua y su tratamiento se ha convertido en un problema cada vez mayor (Che García, 2011).

2.1.4 Contaminación por colorantes

Alrededor del mundo muchas de estas empresas descargan sus aguas residuales a los cuerpos de agua sin ningún tratamiento o con tratamientos inadecuados, acción que obedece a problemas económicos, falta de responsabilidad ambiental o por incongruencias en los sistemas legislativos ambientales, y que genera daños e impactos ambientales.

Los colorantes, en especial los de origen sintético que se encuentran presentes en las aguas residuales, son responsables de muchos de los efectos nocivos para el medio ambiente, la flora y la fauna acuática. Entre los efectos más importantes están la disminución del oxígeno disuelto, la eutroficación, la formación de compuestos recalcitrantes y tóxicos para las células y la obstaculización del paso de la luz a los cuerpos de agua y su deterioro estético (Arango Ruíz, 2011).

Los colorantes representan un grupo muy importante de contaminantes del agua que aparecen en los efluentes descargados de la industria textil, cuero, alimentos, el procesamiento del papel y las industrias de fabricación de tinte. Hoy existen más de 10,000 colorantes comercialmente disponibles y las estimaciones indican que alrededor del 10-15% de los colorantes sintéticos utilizados son desechados en los flujos de residuos durante las operaciones de tratamiento. Efluentes muy coloreadas no sólo crean problemas ambientales y estéticos, también puede afectar a la vida acuática y la red alimentaria ya que la mayoría de ellos son mutagénicos y cancerígenos (Wawrzkievicz, 2008).

Debido a la producción a gran escala y la extensa aplicación, los colorantes pueden causar una contaminación considerable del medio ambiente y son un grave factor de riesgo para la salud. Según la estimación, en torno al 10-15% de los colorantes utilizados entran como residuos en el medio ambiente a través de efluentes. Por lo tanto, la eliminación de color de las aguas residuales adquiere una importancia fundamental. Los efluentes coloridos suelen tratarse mediante procesos físicos o químicos. Entre estos métodos, el proceso de adsorción es a menudo uno de los métodos más eficaces para la eliminación de colorantes (Wawrzkievicz, 2008).

Para encontrar un adsorbente eficaz e ideal, los investigadores han aprovechado muchos materiales de bajos costes y sustitutos biodegradables que se pueden obtener de fuentes naturales recursos para la eliminación de diferentes tintes de soluciones acuosas bajo diferentes condiciones de operación. El carbón activado sigue siendo el adsorbente más popular y ampliamente utilizado pero el principal problema con su uso es su costo. Una buena capacidad de sorción para colorantes se encuentran en materiales como quitina, la turba, de soya desaceitada, aserrín, pero ninguna regeneración exitosa ha sido reportada (Wawrzkievicz, 2008).

2.2 Colorantes

La adición de colorantes a los alimentos es necesaria para intensificar y estandarizar su apariencia. Los colorantes alimenticios son usados principalmente para contrarrestar pérdidas del color del alimento debido a la exposición a la luz, al aire, a condiciones extremas de temperatura, a la humedad, a variaciones estacionales o simplemente para hacerlo más atractivo a la vista de los consumidores.

La vista en un producto, permite juzgar el aspecto de un alimento en términos de su forma, textura y color. El aspecto de un alimento es la primera clave de su identificación y con frecuencia predice el grado de satisfacción o placer que se obtendrá al comerlo. El color resulta uno de los factores más importantes para la aceptación o rechazo de los alimentos. Las variaciones en la intensidad de color pueden sugestionar al consumidor, dándole la idea de que el alimento estuvo sujeto a un proceso mal controlado o ha perdido su frescura.

Las primeras civilizaciones usaban colorantes naturales extraídos de plantas, animales y minerales, como Carmina, henna, óxidos de hierro y azafrán para teñir ropa, pintar las pieles y fabricar objetos religiosos y recreativos. A principios del siglo XX, fueron sintetizados un gran número de colorantes para ser adicionados en alimentos; sin embargo, hasta mediados de este siglo se comienza a regular su uso, debido a que muchos de ellos contenían plomo, cobre y arsénico y representan riesgos muy significativos para la salud.

Ante los colorantes sintetizados químicamente, los naturales tienen algunas desventajas, como: la estabilidad, intensidad de color, entre otros. Sin embargo, a finales del siglo XX, el mercado ha sufrido un cambio que muestra una fuerte tendencia hacia el consumo de productos de origen natural.

Entre las razones que justifican esta preferencia están, principalmente, el cambio en el perfil del consumidor el cual desde finales de la década de los 80 prefiere el uso de productos naturales por considerarlos como símbolo de inocuidad y como productos que aumentan la expectativa de vida o mejoran su calidad, cubriendo de esta manera los sectores salud, alimentación e higiene.

2.2.1 Definición

Un colorante es una sustancia capaz de absorber determinadas longitudes de onda del espectro visible, por lo que puede impartir color a otro material al cual se adicione. Los colorantes tienen una infinidad de aplicaciones y los productos alimenticios no son la excepción. Normalmente, el consumidor asocia los alimentos con colores específicos (Wawrzekiewicz, 2008).

Según la resolución del Ministerio de Salud de Colombia se entiende por colorante aquella "sustancia o mezcla de sustancias capaz de conferir o intensificar el color de los alimentos", entendiendo por color aquella parte de la energía radiante que se percibe mediante la estimulación de la retina ocular (longitudes de onda entre 380 y 780 nm)² (Wawrzekiewicz, 2008).

En la Tabla 1 se observan los diferentes colores que el ojo humano percibe y el rango de longitud de onda en que absorben la luz (Wawrzekiewicz, 2008).

Tabla 1. Relación entre las longitudes de onda y los colores percibidos.

Color	Longitud de onda
Rojo	~ 625-740 nm
Naranja	~ 590-625 nm
Amarillo	~ 565-590 nm
Verde	~ 520-565 nm
Cian	~ 500-520 nm
Azul	~ 450-500 nm
Añil	~ 430-450 nm
Violeta	~ 380-430 nm

FUENTE: Wawrzekiewicz, 2008.

Los colorantes y pigmentos se utilizan en una gran variedad de industrias para teñir: pintura, tinta, plásticos, textiles, ceras y parafinas, cosméticos, alimentos, entre otros. Los primeros pigmentos conocidos fueron los minerales naturales, dentro de estos están los óxidos de hierro, los cuales han sido usados desde épocas prehistóricas (Alzate Tamayo, 2011).

Además de los minerales, otros de origen animal, como el caso del pigmento rojo de la cochinilla, comenzó a ser producido por los nativos del Perú para ser usado como tinte para textiles desde por lo menos el año 700. La explotación de este pigmento tuvo mucho auge desde la invasión española a tierras americanas. Luego de que en 1856 fuera desarrollado el primer colorante sintético de anilina se sentaron las bases para el desarrollo de cientos de tintes y pigmentos sintéticos. De esta forma se lograron obtener alternativas de coloración de más bajo costo y mejores poderes de tinción, empleando química orgánica, con lo que la extracción de pigmentos a partir de fuentes naturales, se vio un poco rezagada (Alzate Tamayo, 2011).

2.2.2 Tipos de colorantes

Entre las *sustancias orgánicas* encontramos compuestos coloreados que presentan grupos llamados *cromóforos* responsables de darles esta propiedad.

Entre ellos podemos mencionar: (Flores, 2013).

- Grupo azo
- Grupo nitroso
- Grupo nitro
- Grupo tio

Ellos se encuentran usualmente unidos a anillos aromáticos tales como el benceno, antraceno, etc. Las moléculas coloreadas intensifican su color o lo modifican en presencia de ciertos grupos llamados *auxocromos*: (Flores, 2013).

- Grupo amino primaria
- Grupo amino secundario
- Grupo amino
- Grupo metoxi
- Grupo hidroxilo
- Grupo de halógenos

Debe notarse que todos los grupos que influyen en el color contienen átomos electronegativos, dobles enlaces o anillos aromáticos. Todos ellos atraen densidad electrónica, indicando que el color está asociado con compuestos que tienen una alta distribución de electrones localizados.

No todas las sustancias coloreadas pueden utilizarse como colorantes. Se entiende por colorante a aquellas sustancias que, a partir de una solución o de una mezcla de partículas, son capaces de unirse fuertemente a un material determinado (sea fibra textil, papel, piel, etc.).

Se puede distinguir dos tipos de colorantes: los orgánicos y los minerales o inorgánicos. Estos últimos se transportan sobre la superficie en forma de partículas finamente esparcidas conjuntamente con sustancias de unión o pegamentos. En oposición a éstos, los colorantes orgánicos se disuelven homogéneamente con el material a teñir (Flores, 2013).

Los pigmentos, en especial los inorgánicos, son los principales componentes de los sistemas de revestimientos, son partículas finas, a menudo mezclas complejas, en los que el metal de transición es la parte principal de la molécula.

El color de un determinado pigmento corresponde a la facultad que tiene para reflejar ciertas longitudes de onda, tal como lo mencionamos anteriormente, además, hay que tener en cuenta su finura o grado de molienda ya que de ellos depende su poder colorante.

Los pigmentos pueden ser clasificados en naturales y sintéticos, de acuerdo a su origen, dividiéndose a su vez cada uno de éstos en grupos orgánicos e inorgánicos, los primeros se obtienen a partir de rocas blandas, o de depósitos existentes en la naturaleza, tales como arcilla, como ejemplo podemos mencionar al dióxido de titanio (TiO_2), el cual es un pigmento que se obtiene fundamentalmente a partir de un mineral negro conocido como ilmenita (Flores, 2013).

En el mercado se encuentran aproximadamente 100,000 colorantes que difieren en su composición, propiedades físicas y químicas. La clasificación de los colorantes puede ser de acuerdo a dos principios diferentes: Estructura o composición química y método de aplicación.

La primera clasificación la adoptan los químicos prácticos, los cuales utilizan términos como azo, antraquinona y ftalocianina. La segunda clasificación la utilizan los usuarios de colorantes o tecnólogos. Quienes se refieren a estos como reactivos, dispersos, básicos, etc.

La clasificación más apropiada es por su estructura química. La primera, es fácil identificar a los colorantes pertenecientes a un grupo con propiedades características, por ejemplo, azo colorantes (fuerte, buenas propiedades, costo razonable) y los colorantes antraquinona (débiles, costosos). Segundo, existe un número razonable de grupos químicos (cerca de una docena).

La clasificación por método de aplicación es la que adopta el Colour Index. Porque las fibras textiles más importantes son el algodón y el poliéster, y los colorantes más importantes son aquellos que se usan para teñir estas dos fibras, incluyendo las mezclas de algodón-poliéster. (Che García, 2011)

A nivel internacional, tanto la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) como la Administración de Drogas y Alimentos de los Estados Unidos (FDA) y la Comunidad Económica Europea (CEE) han determinado listados de aditivos para alimentos entre los que consideran los colorantes; la más utilizada es la denominada lista E de aditivos, en la Tabla 2 se relacionan los colorantes permitidos de acuerdo a ello (Wawrzekiewicz, 2008).

Tabla 2. Colorantes permitidos en alimentos según la CEE.

Número CEE	Nombre
E 100	Curcumina
E 101	i) Riboflavina ii) Riboflavina-5'-fosfato
E 102	Tartrazina
E 104	Amarillo de quinoleína
E 110	Amarillo ocaso (sunset) Amarillo naranjado S
E 120	Cochinilla, ácido carminico, carmines
E 122	Azorrubina, carmiosina
E 123	Amaranto
E 124	Ponceau 4R, rojo cochinilla A
E 127	Eritrosina
E 128	Rojo 2G
E 129	Rojo allura AC
E 131	Azul patente V
E 132	Indigotina, carmin indigo
E 133	Azul brillante FCF
E 140	Clorofilas y clorofilinas i) Clorofilas ii) Clorofilinas
E 141	Complejos cúpricos de clorofilas y clorofilinas i) Complejos cúpricos de clorofilas ii) Complejos cúpricos de clorofilinas
E 142	Verde S
E 150a	Caramelo natural
E 150b	Caramelo de sulfito cáustico
E 150c	Caramelo amónico
E 150d	Caramelo de sulfito amónico
E 151	Negro brillante BN, negro PN
E 153	Carbón vegetal
E 154	Marrón FK
E 155	Marrón HT
E 160a	Carotenos i) Mezcla de carotenos ii) Betacaroteno
E 160b	Anato, bixina, norbixina
E 160c	Extracto de pimentón, capsantina, capsorrubina
E 160d	Licopeno
E 160e	Beta-apo-8'-carotenal (C30)
E 160f	Éster etílico del ácido beta-apo-8'-caroténico (C30)
E 161b	Luteína
E 161g	Cantaxantina
E 162	Rojo de remolacha, betanina
E 163	Antocianinas
E 170	Carbonato de calcio
E 171	Dióxido de titanio
E 172	Óxidos e hidróxidos de hierro
E 173	Aluminio
E 174	Oro
E 175	Plata
E 180	Litolubina BK

FUENTE: Wawrzekiewicz, 2008

2.2.3 Colorantes azoicos

Los colorantes azoicos son colorantes sintéticos que constituyen el grupo más extenso de colorantes orgánicos disponibles en el mercado y adicionalmente, el más contaminante para el ambiente, estimándose que durante su producción y uso son descargados al ambiente entre el 10 y 15%.

Los colorantes azoicos se caracterizan por tener uno o varios grupos azo $-N=N-$ que pueden estar unidos a otros grupos de fenilo o naftaleno, y contener iones como cloruro ($-Cl$), nitro ($-NO_2$), metilo (CH_3), amino (NH_2), hidroxilo ($-OH$) y carboxilo ($-COOH$). Con frecuencia, se encuentra el grupo sulfónico ($-SO_3H$) caso en el cual los colorantes son llamados colorantes azo sulfonatados (Arango Ruíz, 2012).

Uno de los colorantes sintéticos más conocido es la tartrazina, ampliamente usada como aditivo para alimentos; se encuentra en bebidas deportivas, bebidas energizantes, bebidas alcohólicas, vinos, sopas instantáneas, gelatinas, helados, confites, cereales, tortas, postres, mermeladas, mostaza, salsas, entre otros. También se encuentra como aditivo en concentrados para aves con la finalidad de dar mayor coloración amarilla a la yema de sus huevos, lo cual les da una apariencia más nutricional (Arango Ruíz, 2012).

2.2.4 Tartrazina

La tartrazina es un colorante azoico con un grupo sulfónico, polar y altamente soluble en agua, con un peso molecular de 534.36 g/mol^4 (Restrepo Gallego, 2007).

La tartrazina (E-102) es un colorante amarillo artificial de fórmula molecular $C_{16}H_9N_4Na_3O_9S_2$, su masa molar es 534.4 kg/mol . Pertenece al grupo de los colorantes azoicos, caracterizados por la presencia del grupo azo ($-N=N-$) unido a anillos aromáticos. Se presenta en forma de polvo brillante, de color amarillo-naranja, es inoloro, higroscópico, estable en ácidos, soluble en agua y poco soluble en etanol. En condiciones alcalinas adquiere una coloración rojiza. La Ilustración 2 representa la estructura molecular de la tartrazina, cuyo nombre IUPAC es: ácido 4,5-dihidro-5-oxo-1-(4-sulfofenil)-4-[(4-sulfofenil)azol]-1-H-pirazol-3-carboxílico, sal trisódica (Restrepo Gallego, 2007).

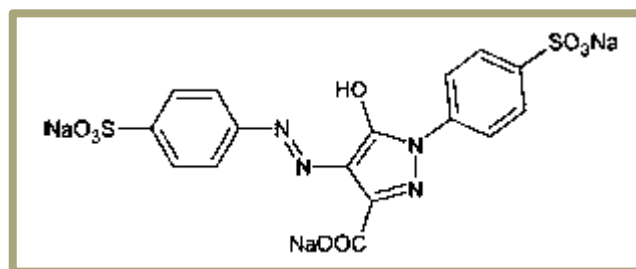


Ilustración 2. Estructura molecular de la Tartrazina.

Existen discusiones contradictorias de algunos estudios respecto a la asociación positiva, especialmente en individuos con sensibilidad cruzada a la aspirina, como para afirmar que la tartrazina

causa exacerbaciones del asma; la tartrazina también se ha considerado como sustancia alergénica, carcinogénica y mutanogénica (Arango Ruíz, 2011).

Dados los presuntos efectos tóxicos de la tartrazina y las consecuencias ambientales por los efectos nocivos sobre el recurso hídrico y sobre la biota, se hace prioritario desarrollar investigaciones tendientes a desarrollar tecnologías eficientes en el tratamiento de aguas residuales con contenidos de tartrazina (Arango Ruíz, 2011).

La tartrazina le confiere a los alimentos y bebidas un tono amarillo, más o menos anaranjado, dependiendo de la cantidad añadida, adicionalmente se emplea para obtener colores verdes al mezclarlo con colorantes azules.

Es ampliamente utilizado desde 1916 y por ser uno de los colorantes más empleados su utilización se realiza en más de sesenta países del mundo, incluyendo Estados Unidos y la Unión Europea (Arango Ruíz, 2011).

La tartrazina también es usada en la industria cosmética, en productos como jabones, cosméticos, shampoo, productos para uso capilar, sanitizantes para manos y tintas para tatuajes. Adicionalmente, en productos farmacéuticos como vitaminas, antiácidos y en las cápsulas para medicamentos (Arango Ruíz, 2011). De esta forma, se observa que este colorante es un producto sintético de un espectro amplio de utilización, en investigaciones recientes se ha tratado de generar productos sustitutos para dicho colorante buscando reducir su consumo, debido a que éste se ha ido desfavoreciendo por algunos posibles efectos secundarios en su consumo, para lo cual se recomienda a los titulares de productos clasificados como alimentos, cosméticos o medicamentos que contengan tartrazina que deben proceder a modificar el registro sanitario, y deben incluir la expresión en el empaque *“Contiene tartrazina que puede producir reacciones alérgicas, tipo de angioedema, asma, urticaria y shock anafiláctico”*, lo anterior teniendo en cuenta las disposiciones expuestas por la sala especializada en medicamentos y productos biológicos de la comisión revisora dentro del concepto emitido en el acta No. 1 de 20075 (Arroyave Rojas, 2008).

La ingesta diaria admisible (IDA) se encuentra en 7.5 miligramos por kilogramo de peso corporal (Restrepo Gallego, 2007).

Dicho colorante parece causar las reacciones más alérgicas y / o la intolerancia de todos los colorantes azoicos, especialmente entre aquellos con intolerancia a la aspirina y asmáticos. La sensibilidad tartrazina se manifiesta principalmente por la urticaria. Otras reacciones pueden incluir cefalea, visión borrosa, picor (Wawrzekiewicz, 2008).

En la Tabla 3 se presenta, de acuerdo a la NMX-F-201,1976 (DOF, 1976), las propiedades fisicoquímicas del colorante Amarillo- 5 o tartrazina (Rojas Sánchez, 2012).

Tabla 3. Propiedades fisicoquímicas del Amarillo 5 o tartrazina (NMX-F-201,1976).

NOMBRE FD&C	COLOR index	FAMILIA QUÍMICA	ESTABILIDAD			SOLUBILIDAD (g/100 ml) a 25 °C			
			Luz	Oxidación	Calor	Agua	Glicerina	Propanol	Etanol
Amarillo No. 5	19140	Pirazolona	5*	3*	5*	20	18	7	12

*El número 5 representa el grado más alto de estabilidad.

En la Tabla 4 se presentan las especificaciones de calidad que debe cumplir un colorante orgánico-sintético, específicamente el amarillo No. 5 o tartrazina (Rojas Sánchez, 2012).

Tabla 4. Especificaciones del Amarillo 5 NMX-F-201, 1976 (DOF, 1976).

ESPECIFICACIONES	AMARILLO No. 5 o TARTRAZINA
Concentración (Base seca) en %	85 mínimo
Plomo (Pb) en ppm	10 máximo
Arsénico (As ₂ O ₃) en ppm	1.4 máximo
Material Volátil (135°) en %	10 máximo
Material insoluble en H ₂ O en %	0.5 máximo
Extractos Etéreos en %	0.3 máximo
Óxidos mixtos en %	1.0 máximo
Metales Pesados (como Pb)	Trazas
Colorantes subsidiarios en %	3.0 máximo
Acido p-Sulfónico de la fenilhidracina en %	0.1 máximo
Cloruros y sulfatos de sodio en %	5.0 máximo

2.3 Tratamientos de aguas coloridas

Por lo general, resulta bastante difícil tratar los efluentes textiles debido a que las industrias producen aguas residuales multicomponentes. Las aguas residuales coloridas contienen una gran cantidad de sólidos suspendidos, una alta demanda química de oxígeno y el pH es fluctuante, lo cual hace que sean difíciles de tratar. Además, el colorante contenido en los efluentes puede variar diariamente e incluso cada hora, estas variaciones oscilan entre 10 y 200 mg L⁻¹ (Doble y Kumar, 2005).

Cientos de pequeñas industrias textiles se enfrentan al cierre, ya que el tratamiento de sus efluentes no es económico. Actualmente, organismos gubernamentales, organismos no gubernamentales y también el público en general se están involucrando cada vez más en las cuestiones ambientales. Hoy en día, existen muchas maneras para tratar los efluentes textiles. El método de tratamiento depende del tamaño de la industria, del tipo de residuos y del grado de tratamiento necesario.

2.3.1 Tipos de tratamientos

La investigación de tratamientos eficaces y prácticos para la remoción de colorantes en las aguas residuales ha generado un creciente interés en los últimos años. En la Ilustración 3 se resumen las principales tecnologías utilizadas para la eliminación de estos contaminantes. Varios autores reportan las características y aplicaciones de las tecnologías desarrolladas más importantes. La mayoría de estos autores las dividen en las principales categorías: métodos biológicos, químicos y físicos.

FUENTE: Rojas Sanchez, 2012.

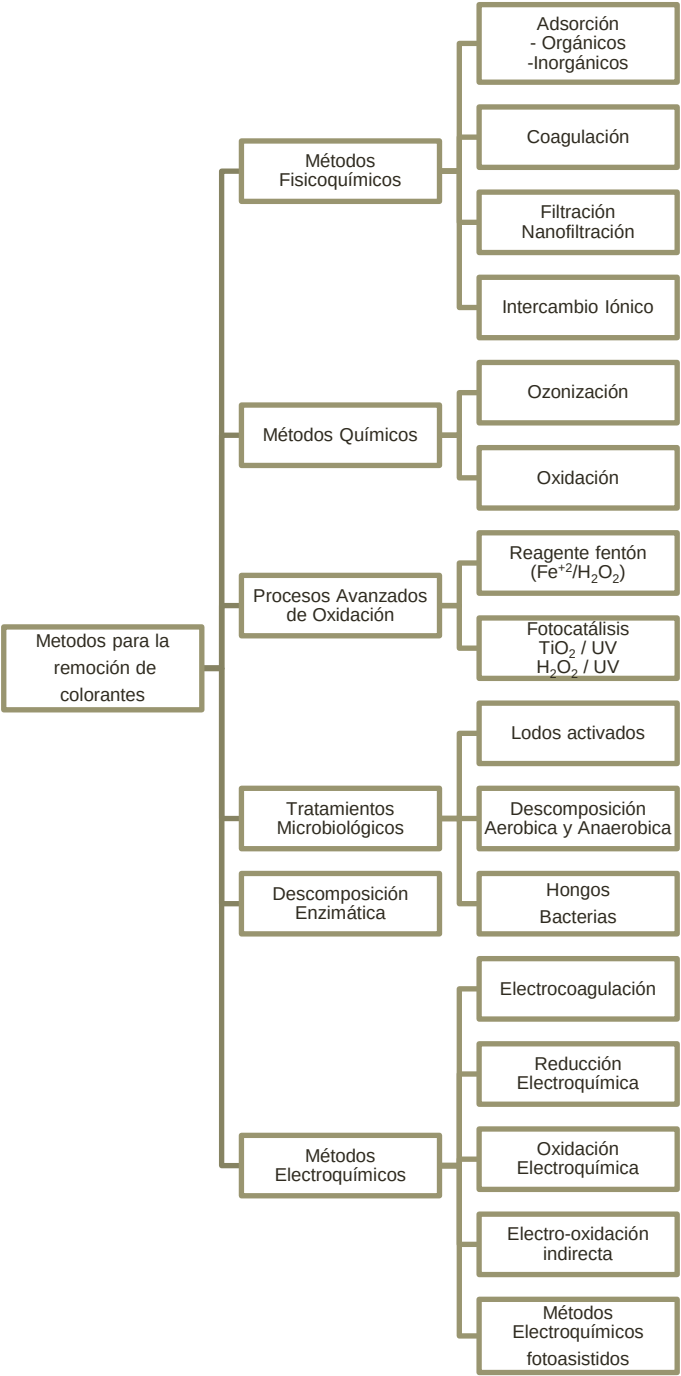


Ilustración 3. Métodos para la remoción de colorantes.

Métodos físicos

Existen diferentes métodos físicos que se emplean para la remoción de contaminantes como los procesos de filtración de membrana (nano-filtración, osmosis inversa, electrodialisis) y las técnicas de adsorción. Los principales inconvenientes de los procesos de membrana son la vida limitada debido a la contaminación de las membranas y los altos costos de reemplazo de membranas que se necesitan incluir en el análisis de viabilidad económica. Los procesos de adsorción son uno de los mejores métodos para la remoción de contaminantes en las aguas residuales, debido a su adecuado diseño los procesos de adsorción producen una alta calidad de agua después del tratamiento. Este proceso ofrece una alternativa para el tratamiento de aguas contaminadas, especialmente si el material adsorbente es barato y no necesita un tratamiento especial después de su aplicación.

La adsorción es un proceso de separación bien conocido y es un método eficaz para la descontaminación del agua. Aunque el carbón activado es un adsorbente eficiente, sus costos de operación son altos.

En la actualidad se está explotando el campo de mantenimiento ambiental con estudios que se han enfocado en adsorbentes alternativos, dentro de estos adsorbentes alternativos se encuentran las arcillas, tales como la bentonita, la montmorillonita, sepiolita y Zeolita se utilizan como adsorbentes que efectivamente podrían tratar aguas residuales (Che García, 2011).

2.3.2 Adsorción

Adsorción es, en un concepto general, un proceso de remoción por adherencia de las impurezas de la sustancia en la superficie (poros o superficie interna) del sorbente. En la absorción, por el contrario, las moléculas o átomos penetran casi uniformemente entre la otra fase constituyendo una solución, lo cual vemos plasmado en la Ilustración 4 (Ho, et al, 2002).

FUENTE: Appelo and Postma, 1993

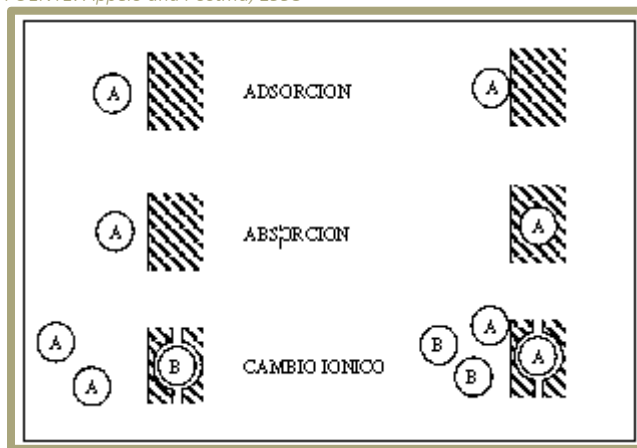


Ilustración 4. Diferentes procesos de Sorción.

La adsorción es un fenómeno superficial que involucra la acumulación o concentración de sustancias en una superficie o interfase. El compuesto que se adsorbe se le llama adsorbato y la fase donde ocurre la adsorción se conoce como adsorbente.

Basándose en el grado de atracción entre el adsorbente y el adsorbato, el proceso de adsorción se puede clasificar en dos tipos:

- Adsorción física o fisorción
- Adsorción química o quimisorción

La adsorción física suele ser resultado de fuerzas de Van der Waals, con lo que por naturaleza al ser la unión bastante débil puede ser reversible ya que puede romperse por cambios en parámetros como la temperatura, presión o concentración. La adsorción física puede ser de dos tipos: adsorción monocapa y adsorción multicapa.

La adsorción química es el resultado de la interacción química entre una molécula de adsorbato y la superficie del adsorbente, esto hace que este tipo de adsorción sea irreversible. Este último tipo de adsorción es de gran interés en catálisis, pero raramente se usa para separaciones.

La mayor parte de los adsorbentes son materiales altamente porosos y la adsorción tiene lugar fundamentalmente en el interior de las partículas sobre las paredes de los poros. La mayoría de los adsorbentes industriales poseen una estructura muy compleja que consiste en diferentes formas y tamaños de poro.

De acuerdo con la IUPAC la porosidad se clasifica en tres grupos: la microporos que constan de un diámetro menor a 2 nm; los mesoporos constan de un diámetro entre 2 y 50 nm; y los macroporos con un diámetro mayor a 50 nm.

Existen varios tipos de adsorbentes que tienen orígenes químicos, biológicos o naturales los cuales han mostrado ser efectivos para remover los contaminantes de las aguas residuales. Los procesos de adsorción tiene muchas ventajas como:

- Bajo costo del adsorbente.
- Fácil disponibilidad del adsorbente.
- Bajos costos de operación.
- Facilidad de operación en comparación con otros procesos.
- Re-uso del adsorbente después de ser regenerado.
- Habilidad para remover contaminantes complejos que generalmente nos son posibles con otros métodos.
- No ocasiona daño al ambiente.

Debido a su fácil operación, el proceso de adsorción se ha usado ampliamente para el tratamiento de aguas residuales. Los estudios de adsorción se llevan a cabo en su mayoría en una escala batch y se estudian diferentes parámetros (concentración inicial del adsorbato, temperatura, dosis del adsorbente, tamaño de partícula, pH de la solución) que afectan el proceso de adsorción.

2.3.3 Factores que afectan de adsorción

Los factores que afectan a la adsorción a nivel industrial pueden clasificarse en tres grupos:

- Factores de capacidad
- Factores cinéticos
- Factores hidrodinámicos

Los factores de capacidad son aquellos que determinan la distribución de equilibrio de los solutos adsorbidos entre la fase líquida y sólida. Esta influencia vendrá representada por la isoterma de adsorción. Los factores cinéticos son aquellos que gobiernan la velocidad de transferencia de soluto de una fase a otra. Finalmente, los factores hidrodinámicos pueden deberse al tipo de flujo del fluido o a sus propiedades que afectaran al tiempo de residencia y por tanto, al proceso de adsorción (Che García, 2011) .

En cualquier proceso químico las distintas fases o especies presentes en el, pueden presentar estados de equilibrio. De igual modo ocurre en el caso de la adsorción. Es por eso que cualquier proceso de adsorción puede caracterizarse mediante la curva de equilibrio correspondiente. La cual vendrá dada para condiciones concretas de presión y temperatura, por lo que en ocasiones se denomina “Isoterma de adsorción”. La eficacia del proceso depende del equilibrio sólido-fluido, de ahí que sea imprescindible para la caracterización y modelado del proceso (Che García, 2011) .

2.3.4 Biosorción

La biosorción es un proceso de separación que consiste en la remoción de contaminantes por la biomasa a través de fenómenos físicos como adsorción, intercambio iónico o procesos metabólicos, por lo que puede ser un método preciso y selectivo, que requiere de pocos minutos de tratamiento. (López Leal, 2009)

Involucra una fase sólida (sorbente) y una fase líquida (solvente, que es normalmente el agua) que contiene las especies disueltas que van a ser adsorbidas (sorbato) .Debido a la gran afinidad del sorbente por las especies del sorbato, este último es atraído hacia el sólido y enlazado por diferentes mecanismos. Este proceso continua hasta que se establece un equilibrio entre el sorbato disuelto y el sorbato enlazado al sólido (Valencia-Leal, 2008).

Cuando el material ha sido retenido por el biosorbente se retira de la suspensión mediante un sistema de separación solido-líquido (decantación, flotación, filtración, centrifugación); este proceso de separación da como resultado un flujo de agua clara purificada y el biosorbente cargado del contaminante, el cual puede ser regenerado mediante una serie de operaciones de desorción, incinerado o apropiadamente depositado, dependiendo de factores como: costo del biosorbente, operaciones de desorción, valor económico del material recuperado y su toxicidad, etc. (Tenorio-Rivas, 2006).

Este mecanismo es favorecido por el alto grado de porosidad del sorbente y el tamaño preciso más pequeño que la parte superficial. La diferencia del peso molecular o la polaridad hace que unas

moléculas se adhieran con más facilidad que otras, lo cual le da el carácter selectivo (Tenorio-Rivas, 2006).

2.3.5 Cinéticas de sorción

La adsorción de una molécula específica depende de la cinética de sorción; es decir, de la velocidad de la reacción en función del tiempo, en la que una molécula específica pasa de la fase líquida a la fase sólida. Por ello, la cinética de biosorción es gobernada por las leyes de transferencia de masas (Inga Manchola, 2012).

Dentro de la adsorción existen 2 mecanismos de acción:

Fisisorción: Es causada principalmente por las fuerzas de Van der Waals que se presentan entre las moléculas del adsorbato y los átomos que componen la superficie del adsorbente. (Rojas Sánchez, 2012), por ello se le conoce como la biosorción “ideal”. Estos adsorbentes se caracterizan principalmente por las propiedades de su superficie, como el área superficial y la polaridad. Este proceso puede ser rápido o lento dependiendo de la naturaleza de adsorbente, la temperatura y el adsorbato (Tenorio-Rivas, 2006). Su efecto llega a ser reversible (Inga Manchola, 2012).

La fisisorción se produce en multicapas. Sobre una capa de gas fisisorbida puede adsorberse otra. La ΔH_{ads} para la primera capa viene determinada por las fuerzas entre adsorbente y adsorbato, mientras que la ΔH_{ads} para las capas siguientes depende de las interacciones Adsorbato-Adsorbato Y, por tanto, es similar a la entalpía de condensación (Tuñón, 2008).

Quimisorción: En ella el adsorbato sufre una interacción química con el biosorbente, esta incluye forzosamente un intercambio iónico, coordinación, quelatación e involucra altas energías entre el biosorbente y el biosorbato; por lo cual se le conoce como biosorción activa (Rojas Sánchez, 2012). Esta reacción llega a ser casi siempre irreversible por que intervienen las fuerzas de naturaleza covalente (Inga Manchola, 2012).

En este caso las moléculas de gas se mantienen unidas a la superficie formando un enlace químico fuerte. La quimisorción implica la rotura y formación de enlaces, por lo que la molécula quimisorbida no mantiene la misma estructura electrónica (enlaces) (Tuñón, 2008). Siempre van a intervenir simultáneamente los 2 fenómenos, pero la fisisorción va a ser el mecanismo preponderante (Inga Manchola, 2012).

Para el proceso de adsorción se han propuesto diferentes mecanismos que explican la retención del sorbato en diferentes partes del biosorbente:

Complejación o quelatación: En este método el sorbato se une a las paredes celulares, específicamente en los sitios activos mediante enlaces químicos.

Adsorción física: Aquí están incluidos los fenómenos que se asocian a las fuerzas de Van der Waals. En este caso la adsorción suele ser rápida y reversible.

Intercambio iónico: Este proceso es propio de los iones metálicos divalentes que se intercambian con los iones propios de los polisacáridos presentes en la biomasa. Este proceso también es rápido y reversible.

Precipitación: Este mecanismo se refiere a la formación de un complejo en la pared celular que después será hidrolizado (Tenorio-Rivas, 2006).

2.3.6 Factores que intervienen en el proceso de biosorción.

El proceso de biosorción se ve afectada por distintos factores que pueden favorecerla o limitarla (Rojas Sánchez, 2012).

Factores internos: Dentro del sistema adsorbato-adsorbente podrían afectar parámetros como la composición química del adsorbato que determina el mecanismo de la biosorción, la cantidad y la concentración de ambos (Rojas Sánchez, 2012).

Factores externos: Entre ellos se puede mencionar un tratamiento previo, el tiempo de contacto, el sistema de contacto (continuo o discontinuo). El discontinuo se ve afectado por la velocidad de agitación y el continuo o por columnas por el caudal del agua a tratar, la temperatura del medio, la composición de la solución problema y además que el adsorbato puede tener más contaminantes que interfieran en la adsorción (Rojas Sánchez, 2012).

Este proceso depende de la temperatura, la naturaleza química del sólido y la concentración de la especie a adsorber (Tenorio-Rivas, 2006).

Dentro de los factores de interés se encuentra el efecto del pH. Dado que el proceso de biosorción es análogo a un proceso de intercambio iónico, el pH de la solución acuosa tiene un efecto significativo en la remoción. Otros parámetros que afectan la biosorción son: temperatura, concentración de la biomasa, concentración del contaminante, efecto de los cationes, de los aniones y por pre tratamiento (López Leal, 2009).

2.3.7 pH y su influencia en la adsorción

El pH es uno de los factores que más influye en el proceso de adsorción, debido a que modifica la química de las soluciones utilizadas. Cuando una solución tiene una condición ácida existe un exceso de hidrogeniones los cuales compiten por el sitio de unión del biosorbente (Inga Manchola, 2012).

Este efecto de interacción de grupos, se hace mucho más evidente cuando se trata de soluciones metálicas, ya que la competencia entre iones es mucho más fuerte, y existe una interferencia por la competencia para unirse al sitio activo (Inga Manchola, 2012).

La solubilidad de algunos contaminantes como los metales traza en las aguas superficiales está controlada predominantemente por el pH, por el tipo de concentración de los ligandos en los cuales el metal puede adsorberse, y por el estado de oxidación de los componentes minerales (ambiente redox del sistema). La temperatura, el tiempo de equilibrio, la concentración de metal y la presencia de otros iones en disolución son factores que influyen también en el proceso de bioadsorción (Valencia-Leal, 2008).

2.3.8 Concentración inicial del colorante

Para conocer la efectividad de un material utilizado como sorbente, debemos conocer su concentración máxima del contaminante, es decir, la capacidad máxima que tienen el material para adsorber, ya que el adsorbente no muestran la misma capacidad al estar en contacto con concentraciones diferentes de adsorbatos (Valencia-Leal, 2008).

Cada material establece distinto comportamiento para lograr el equilibrio de acuerdo a la cantidad disponible de material que se desea remover. Se ha reportado que la biosorción de un contaminante es más alta cuando se presenta una solución a concentraciones más bajas, lo que podemos relacionar a que la adsorción sucede en la superficie externa del biosorbente; por ello, cuando la concentración del colorante aumenta, el porcentaje de remoción disminuye (Valencia-Leal, 2008).

2.3.9 Isotermas de sorción

La forma más usual de representar el equilibrio de sorción es expresando la cantidad de soluto adsorbido por unidad de peso de adsorbente (q_e) como función de la concentración de soluto remanente en la solución en el equilibrio (C_e) a una temperatura fija. Esto se conoce como isoterma de adsorción. Comúnmente, la cantidad de soluto adsorbido se incrementa al aumentar la concentración de la solución, aunque no en proporción directa (Cortés-Martínez, 2007).

Un isoterma describe principalmente la cantidad de adsorbato adherido sobre la superficie del sólido, en función a la cantidad inicial o de la concentración en equilibrio del mismo, siempre se presenta a temperatura constante, representando uno o más de los fenómenos de captación en multicapas y condensación en poros o capilares (Rojas Sánchez, 2012).

Siendo las isotermas ecuaciones, se entiende que existe una posición de equilibrio de adsorción, con relación de la cantidad de soluto adsorbida por unidad de adsorbente, con la concentración residual del adsorbato (Merchan Castellanos, 2009).

Los isotermas se han clasificado de acuerdo a su concavidad en favorables y desfavorables; los isotermas favorables son los que se presentan cóncavos hacia abajo (Ilustración 5) y los más representativos son los de Langmuir y Freundlich (Merchan Castellanos, 2009).

FUENTE: Merchan Castellanos, 2009

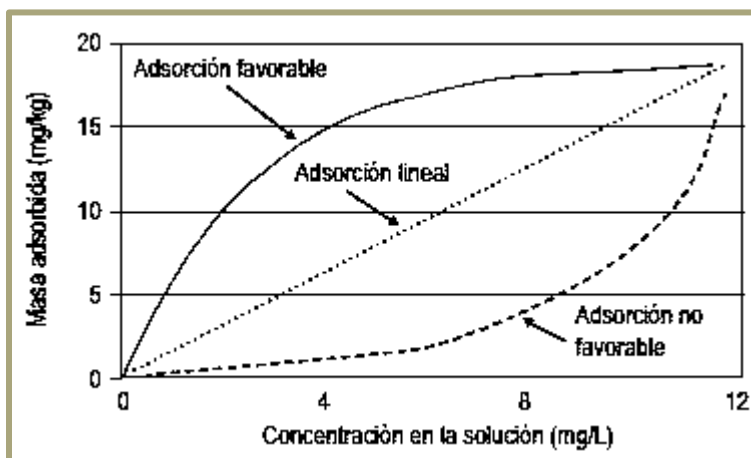


Ilustración 5. Clasificación de isothermas de acuerdo a su concavidad.

De acuerdo con Brunauer *et al.* (1938) las isothermas de adsorción se pueden clasificar atendiendo a seis tipos (Ilustración 6):

- Tipo I: Denominada isoterma de Langmuir, corresponde a una adsorción en monocapa. Es cóncava hacia el eje de abscisas y la cantidad adsorbida se aproxima a un valor constante al aumentar la concentración. Es la isoterma característica de un proceso únicamente de quimisorción. El límite de adsorción está determinado, en mayor extensión, por el volumen accesible frente al tamaño de poro. Corresponde a sólidos microporosos.
- Tipo II: Representa una adsorción física en monocapa y multicapa sin restricciones. El punto B indica el valor de presión para el cual el recubrimiento de la monocapa se ha completado, indicando el principio de adsorción por multicapa. Se trata de sólidos no porosos o macroporosos.
- Tipo III: Es convexa hacia el eje de abscisas para todo el intervalo de presión relativa. Este tipo de isoterma se presenta en materiales macroporosos o no porosos cuando existe poca afinidad entre el adsorbato y el adsorbente. Se trata también de una adsorción física en multicapas.
- Tipo IV: Corresponde a adsorción en multicapas en materiales adsorbentes mesoporosos, presenta un ciclo de histéresis, asociado con la condensación capilar y un valor límite en la cantidad adsorbida para el intervalo superior de presión relativa. La parte inicial de la isoterma se atribuye a la adsorción en monocapa, puesto que coincide con la primera región de la isoterma de tipo II.
- Tipo V: Se obtiene para materiales mesoporosos, pues presenta un ciclo de histéresis, cuando existe poca afinidad entre el adsorbato y el adsorbente. Es muy poco frecuente.

- Tipo VI: Representa la adsorción escalonada en multicapa sobre una superficie uniforme no porosa. Cada uno de los escalones que presenta corresponde a una capa adsorbida (Valencia-Leal, 2008).

FUENTE: Brunauer et al., 1938

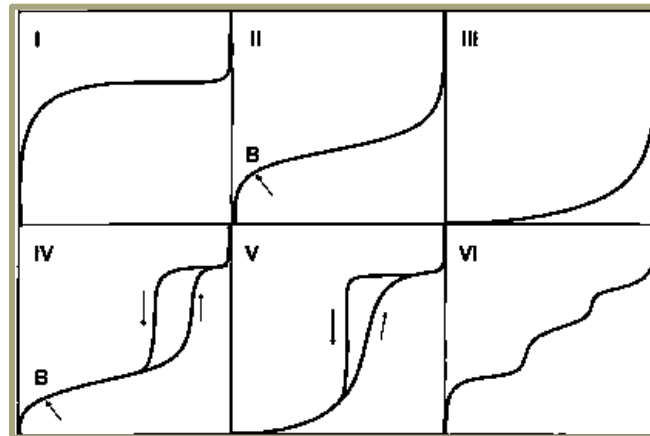


Ilustración 6. Clasificación de isothermas de sorción de acuerdo a lo establecido por Brunauer.

Se seleccionó este tipo de modelos ya que con ellos se puede obtener una concentración relativamente elevada de adsorbato en el adsorbente para una baja concentración de adsorbato en el fluido.

Los modelos de isoterma más conocidos y ampliamente utilizados son (Inga Manchola, 2012):

- Isoterma de Langmuir
- Isoterma de Freundlich

Los dos modelos de isothermas de adsorción más extensamente utilizados para la recuperación de un único componente, son los correspondientes a las ecuaciones de *Langmuir* y *Freundlich*. Ambos modelos describen una amplia gama de equilibrios de adsorción y permiten una interpretación física sencilla de cómo se producen las interrelaciones entre una sustancia adsorbida (sorbato) y una fase que adsorbe (adsorbente) (Valencia-Leal, 2008).

ISOTERMA DE LANGMUIR

El modelo de Langmuir describe cuantitativamente el depósito de una gran capa de moléculas sobre una superficie adsorbente como una función de la concentración del material adsorbido en el líquido con el que está en contacto. La adsorción se produce solamente en determinados lugares y no tiene una interacción entre las moléculas retenidas (Valencia-Leal, 2008).

Las consideraciones básicas del modelo de *Langmuir* son:

- 1) Las moléculas son adsorbidas en sitios definidos en la superficie del adsorbente
- 2) Cada sitio puede acomodar solamente a una molécula (monocapa)
- 3) El área de cada sitio es una cantidad fija determinada solamente por la geometría de la superficie
- 4) La energía de adsorción es la misma en todos los sitios.

Además, las moléculas adsorbidas no pueden migrar a través de la superficie o interactuar con moléculas vecinas (Cortés Martínez, 2007).

La ecuación no lineal que se presenta para este modelo es la siguiente:

$$q_e = \frac{q_m K_a C_e}{1 + K_a C_e}$$

Dónde:

q_e = concentración de soluto adsorbido por unidad en peso de adsorbente (mg/g).

q_m = Tasa máxima de retención del adsorbato (mg/g)

K_a = Constante en equilibrio (mg/g)(L/mg)

C_e = concentración de soluto en el equilibrio (mg/L).

ISOTERMA DE FREUNDLICH

Es uno de las primeras ecuaciones empíricas utilizadas para describir los equilibrios de adsorción, y es válida en superficies heterogéneas planas que consta de sitios potenciales de adsorción diferentes y supone que cada uno adsorbe una sola molécula.

Llega a ser muy utilizada cuando se adsorben hidrocarburos sobre carbón activado (Merchan Castellanos, 2009).

Es el modelo más ampliamente utilizado como modelo de isoterma no lineal. Relaciona la concentración de un soluto en la superficie de un adsorbente, con la concentración del soluto en el líquido con el que está en contacto. Es un modelo riguroso para los casos desorción en superficies heterogéneas (Valencia-Leal, 2008).

La ecuación de *Freundlich* es una expresión empírica que implica la heterogeneidad de la superficie y la distribución exponencial de los sitios de adsorción y sus energías (Cortés Martínez, 2007). Para dicha isoterma la ecuación no lineal es la siguiente:

$$q_e = K_F C_e^{1/n}$$

q_e = concentración de soluto adsorbido por peso de adsorbente (mg/g).

C_e = concentración de soluto en el equilibrio (mg/L).

K_F = constante de Freundlich en equilibrio (mg/g)(L/mg).

$1/n$ = constante que representa el grado de heterogeneidad de la superficie, valores por encima de 1 muestran interacciones débiles adsorbato–adsorbente, y valores menores que 1 representan interacciones más fuerte adsorbato–adsorbente. Un valor igual a 1, asume un comportamiento tipo Langmuir. (n) se relaciona con la afinidad entre el adsorbato y el adsorbente

ISOTERMA DE LANGMUIR- FREUNDLICH

Este modelo describe una adsorción fuerte sobre superficies heterogéneas. A bajas concentraciones del adsorbato se reduce la isoterma de Freundlich, mientras que a bajas

concentraciones del adsorbato se predice una capacidad de adsorción en monocapas característica de la isoterma de Langmuir (Rojas Sánchez, 2012).

La ecuación no lineal para el modelo de Langmuir- Freundlich es la siguiente:

$$q_e = \frac{(K_{lf} C_e^{1/n})}{(1 + a_{lf} C_e^{1/n})}$$

K_{lf} = constante de equilibrio (mg/g)(L/mg).

C_e = concentración de soluto en el equilibrio (mg/L).

$1/n$ = constante que representa el grado de heterogeneidad de la superficie, valores por encima de 1 muestran interacciones débiles adsorbato–adsorbente, y valores menores que 1 representan interacciones más fuerte adsorbato–adsorbente. Un valor igual a 1, asume un comportamiento tipo Langmuir. (n) se relaciona con la afinidad entre el adsorbato y el adsorbente.

A_{lf} =Velocidad de adsorción inicial (mg/g h).

2.3.10 Biosorbente

Los polímeros de origen biológico (biopolímeros) son las moléculas más utilizadas para el proceso de biosorción, se caracterizan por ser moléculas de alto peso molecular, gran tamaño y forma alargada bien definida, formando parte de las paredes celulares de células animales y vegetales; estas a su vez son las responsables de la capacidad del biosorbente de la biomasa (Rojas Sánchez, 2012).

Se ha demostrado que los residuos lignocelulósicos tienen capacidades de adsorción comparables a otros adsorbentes naturales tienen la ventaja de poseer un costo bajo, amplia disponibilidad, procesos operacionales simples y el hecho de que su uso les provee un valor agregado a materiales que de otra forma serían considerados como desechos (Rojas Sánchez, 2012).

Entre los residuos lignocelulósicos se incluyen: residuos de madera (aserrín, residuos de la industria papelera) y residuos agrícolas (bagazo de caña, salvado de trigo y residuos de maíz, entre otros). (Valencia-Leal, 2008).

El biopolímero más abundante en la naturaleza conocido hasta ahora es la celulosa, la cual se puede encontrar en una gran variedad de plantas. Su unidad monomérica es la glucosa (Rojas Sánchez, 2012).

La capacidad y características de sorción de los componentes biológicos se derivan de sus compuestos poliméricos, los cuales son componentes de la fibra dietética (en orden aproximado de abundancia) (Rojas Sánchez, 2012):

- Celulosa
- Hemicelulosa
- Lignina.

2.3.11 Caracterización de biopolímeros

FIBRA DIETÉTICA

La fibra dietética se puede definir como los contribuyentes no digeribles que se encuentran en la pared celular de los vegetales, ya que llega a ser resistente a la hidrólisis por enzimas intestinales humanas. Este concepto engloba a los componentes de la pared celular como la celulosa, hemicelulosa y lignina en primer lugar, y a otros polisacáridos como gomas, mucilagos, oligosacáridos, pectinas y celulosas modificadas (Gil, 2010).

Se encuentra conformada por la Fibra soluble y Fibra insoluble, que a su vez están determinadas por otros componentes (Tabla 5) y la suma de ambas da como resultado la Fibra Dietética Total. Esta clasificación se hace de acuerdo a la solubilidad en agua de sus componentes (Rojas Sánchez, 2012).

Tabla 5. Conformación de Fibra soluble e insoluble.

FIBRA SOLUBLE	FIBRA INSOLUBLE
Pectinas	Hemicelulosa
Beta glucanos	Celulosa
Gomas	Lignina
Inulina	Almidón resistente
Mucilagos	Compuestos fenólicos (taninos)
Agentes quelantes (fitatos)	Estructuras lipídicas (ceras, suberinas, cutinas)

FUENTE: Rojas Sánchez, 2012

CELULOSA

La celulosa es un polisacárido lineal formado por unidades de D-glucosa (hasta 10,000) unidas por un enlace beta-1,4. La disposición de su estructura es lineal o fibrosa en las que se establecen numerosos puentes de hidrogeno formando grupos hidroxilo con las moléculas de glucosa. Esto explica el carácter de insolubilidad en el agua y la rigidez necesaria de un tejido vegetal (Gil, 2010).

Es el compuesto más abundante de la pared celular de la planta (Gil, 2010), proporcionando hasta un 33% de todo el material vegetal (Rojas Sánchez, 2012).

HEMICELULOSA

Son polímeros más pequeños que la celulosa (50- 2,000), formado por diversos tipos de azúcares y con estructura ramificada, diferenciándolos de la celulosa por el tamaño de molécula y en el tipo de monómeros (la celulosa solo es glucosa y la hemicelulosa es glucosa con otros tipos de azúcares) (Gil, 2010).

Se encuentra asociada a la celulosa en la pared celular y ambas forman parte de la cubierta externa (salvado) (Gil, 2010).

LIGNINA

Son macromoléculas con elevado peso molecular que resulta de la unión de varios alcoholes fenilpropílicos (cumarílico, coniferílico y sinapílico). Es un polímero amorfo característico de las ligninas y es el polímero natural más complejo en relación a su estructura y heterogeneidad (Gil, 2010). Desempeña un papel importante en el transporte de agua a la planta, nutrientes y metabolitos. Proporciona rigidez a la pared celular y actúa como puente de unión, formando un material resistente a los impactos, las compresiones y flexiones. También permite a los tejidos resistir a los ataques de microorganismos, impidiendo la penetración de las enzimas destructivas a la pared celular.

No se trata de un polisacárido, pero se le considera dentro de la fibra dietética ya que está unida a la hemicelulosa de la pared celular y colabora con algunas propiedades fisiológicas.

Son polímeros insolubles en ácidos y álcalis fuertes, no se digieren ni se absorben. Tienen como propiedad una interesante capacidad de adherirse a los ácidos biliares y otros componentes orgánicos (colesterol) retrasando o disminuyendo su absorción en el intestino delgado (Gil, 2010).

2.3.12 Guayaba

La guayaba (*Psidium guajava* L.) es una especie originaria de la zona tropical y subtropical de amplia distribución y demanda en América Latina con un amplio grupo de variedades distribuidas en todos los climas (Yam Tzec, 2010).

La guayaba es una de las frutas con mayor contenido vitamínico, además de 16 vitaminas posee minerales como calcio, fósforo y hierro. En Colombia la guayaba se comercializa en fresco e industrializada constituyéndose en toda una industria que representa ganancia para los fruticultores (Andrade, 2009).

Está clasificada como uno de los frutos más conocidos y estimados en la mayor parte del mundo. La producción mundial de guayaba es de alrededor de 1.2 millones de toneladas, la India y Pakistán aportan el 50%, México produce el 25% y el resto lo aportan otros países como Colombia, Egipto y Brasil (Yam Tzec, 2010).

En México la producción de guayaba es del orden de las 300 mil toneladas anuales; destacando por su aportación los Estados de: Michoacán 37%, Aguascalientes 35%, Zacatecas 21% y el 7% restante, lo aportan el Estado de México, Jalisco y Querétaro (Ilustración 7). Siendo el valor de la producción del orden de los 1200 millones de pesos. (México, Gaceta del senado, 2007) .La producción nacional de guayaba durante los últimos cinco años ha sido del orden de las 192 mil toneladas anuales en promedio (Yam Tzec, 2010).

FUENTE: Gaceta del Senado de la Republica, 2007

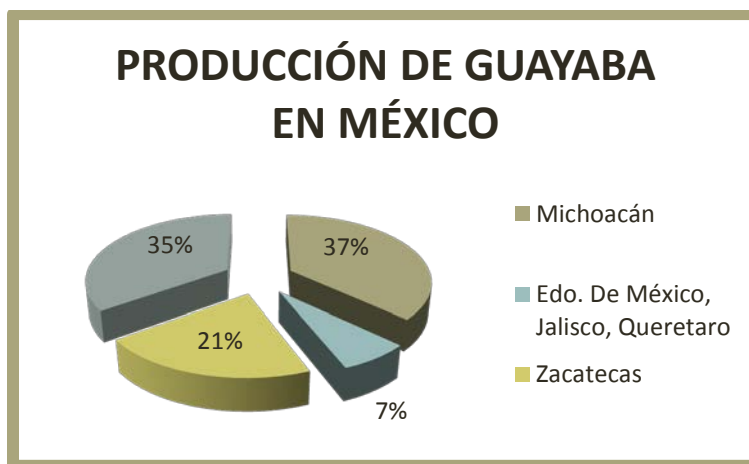


Ilustración 7. Gráfico que representa la producción de guayaba en México clasificada por los principales estados productores.

El consumo per cápita es de 2.3 kilogramos. Cabe señalar que la disponibilidad del producto en el mercado es casi todo el año, la producción se concentra en los meses de agosto a marzo, siendo los meses de mayo y junio los de menor oferta. La mayoría de las familias lo consumen en fresco como fruta de mesa o para refrescos caseros. Esto significa que cerca del 87% de la producción nacional se consume directamente en fresco, de los cuales el 65% se concentra en la central de abastos de México, 20% en la de Guadalajara, 10% en Monterrey y el 5% restante en otros centros (Yam Tzec ,2010).

La buena calidad de frutos de guayaba es aquella que presenta un buen aspecto general del producto, con leves defectos tales como raspaduras, rozaduras, costras, manchas o quemaduras de sol, siempre y cuando no afecten la calidad y la conservación y que cumple con un proceso de selección riguroso (NMX-FF-040-SCFI-2002).

El fruto es ovalado, carnosos con semillas en la pulpa, diámetro de 4 a 8 cm y un peso que en dependencia de la variedad oscila entre 50 y 500 gramos, y un pH de 4,1-5,4, con una densidad promedio de 1,88 g/cm³. Es un fruto amarillo y la pulpa de color blanco, crema o rosa, y cuyo tiempo de producción desde la floración hasta la cosecha va de 100-150 días. Los frutos amarillos son cosechados para el consumo nacional, mientras que los de color verde intenso son cosechados para exportar. Normalmente la cosecha es de manera manual, depositándolos en cartones corrugados o en bolsas que no evitan por completo los daños (Yam Tzec, 2010).

Tienen potencial para la elaboración de pectinas y aceites con sus semillas. El potencial industrial deriva de sus aptitudes para pulpas, puré, polvo para reconstituir como néctar, mermeladas, jaleas y dulce. El jugo de guayaba se utiliza principalmente en jugos y néctares, también existe demanda en la industria de alimentos para bebés (Yam Tzec, 2010).

3. HIPÓTESIS

La semilla de guayaba modificada con Hierro (Fe) tiene la capacidad de adsorber tartrazina de soluciones acuosas.

4. OBJETIVOS

4.1 Objetivo general

Evaluar la capacidad de remoción de la tartrazina, un colorante de grado alimenticio, en una solución acuosa utilizando como biosorbente la semilla de guayaba modificada con sales de Hierro aplicada en un sistema tipo lote (batch).

4.2 Objetivos específicos

- o Determinar el comportamiento de la cinética de adsorción y las condiciones de equilibrio de los diferentes sistemas adsorbato-biosorbente bajo estudio en operaciones tipo lote.
- o Evaluar los posibles efectos que se presentan al hacer algunas variaciones en el proceso como pH y concentración del biosorbente.
- o Determinar la caracterización del biosorbente antes y después de la modificación así como después del proceso de biosorción del colorante

5. METODOLOGÍA

5.1 Obtención del biosorbente

La semilla de guayaba fue donada por la empresa Productora y Comercializadora de nopal “La Mesa” la cual en una de sus líneas de producción realiza mermeladas y ates de guayaba y por lo tanto en este proceso no se utiliza la semilla de guayaba, lo cual permite utilizar lo que es considerado como un producto de desecho y en este proyecto es utilizada como biorremediador. A este residuo solo se le eliminó la pulpa que pudo haberse quedado adherida a la semilla lavándose a través de un tamiz y enjuagando un poco con agua potable (Ilustración 8).



Ilustración 8. Proceso de eliminación de pulpa de la semilla de guayaba.

Se realizó un lavado final con agua destilada para tener la seguridad de que fue eliminada la pulpa por completo y se secó en estufa a 100°C durante 3 horas aproximadamente sobre papel aluminio.

5.2 Molienda y tamizado

La molienda de la semilla de guayaba se llevó a cabo con un triturador que consta de un mecanismo de engranaje (Ilustración 9) debido a la gran dureza de la semilla, lo cual lo hace más complicado manualmente. El material debe estar completamente seco para lograr la desintegración del grano esperada.



Ilustración 9. Molienda de la semilla de guayaba.

El tamizado se realizó con mallas como las que se muestran en la Ilustración 10 las cuales nos permitieron obtener varios tamaños de partículas con la finalidad de compararlas y obtener así la más adecuada.



Ilustración 10. Tamizado de la semilla de guayaba.

5.3 Caracterización de la semilla de guayaba

La caracterización del biosorbente se realiza con la finalidad de definir los componentes y analizar cuáles son los que le confieren las propiedades para considerarse material adsorbente.

Es sabido que las reacciones de retención de colorantes son favorecidas en presencias de algunos biopolímeros como la pectina, celulosa, hemicelulosa, lignina, etc. Por lo que la caracterización juega un papel importante para conocer cuál de los componentes antes mencionados son los responsables de estas características.

5.3.1 Caracterización fisicoquímica de la semilla de guayaba

Se determinó la presencia de los biopolímeros con un análisis fisicoquímico que se resumen en la Tabla 6:

Tabla 6. Análisis fisicoquímicos aplicados a la semilla de guayaba

Determinación	Método	Bibliografía
Humedad	AACC (2000)	(Marín 2011)
Cenizas	AACC (2000)	(Marín 2011)
Fibra Dietética Total	Enzimático de Prosky	(Prosky et al., 1998)
Fibra soluble	Enzimático de Prosky	(Prosky et al., 1998)
Fibra insoluble	Enzimático de Prosky	(Prosky et al., 1998)
Celulosa	Van Soest (1963)	(Marín 2011)
Hemicelulosa	Van Soest (1963)	(Marín 2011)
Lignina	Van Soest (1963)	(Marín 2011)
Pectina	Carré y Haynes	(Kira et al., 2002)
Carbohidratos Totales	Calculado por diferencia	---
Proteínas totales	AACC (2000)	(Aguilar, 2010)

5.3.2 Espectrofotometría de infrarrojo

Con la espectrofotometría de infrarrojo se determinan algunas propiedades internas del compuesto a analizar cualitativamente como su composición química, impurezas, interacción entre los sustituyentes, grupos funcionales, etc.

Es importante para un análisis cuantitativo debido a su selectividad con la que podemos analizar una mezcla compleja realizando una preparación previa de la muestra. Este estudio se realizó al biosorbente natural y después de la modificación con FeCl_3 , así como antes y después del contacto con tartrazina, siguiendo el procedimiento descrito a continuación:

- a. Preparación de biosorbente. Para lo cual se hizo un ensayo de contacto poniendo en un tubo Falcon 10 ml de solución de tartrazina 20 mg/l con 0.5 g de semilla modificada y triturada con una solución de FeCl_3 0.1 M durante 5 horas en agitación constante. Se filtró la solución y secó la semilla a 100°C durante 3 horas, procediendo a moler la semilla hasta lograr un polvo.
- b. Preparación de pastillas para el análisis de espectrofotometría de infrarrojo. Pesar 0.02 g de muestra + 0.3 g de KBr y se comprimen con una fuerza de 3 toneladas durante 1 min.

5.3.3 Microscopía electrónica de barrido

La microscopía electrónica de barrido (MEB) proporciona algunos datos para lograr una caracterización completa del biosorbente, determinando principalmente su morfología superficial. El equipo utilizado para esta determinación es JMS-6400 Marca: JEOL, que cuenta con un detector de microanálisis marca Bruker modelo X FLASH 4010 MEB.

Ya que la semilla de guayaba es un material no conductor por lo que requiere de un tratamiento anterior a la MEB que consiste en adherir las semillas a una pequeña pastilla de carbón y posteriormente darle un baño de cobre, logrando así que los electrones emitidos del microscopio puedan ser aterrizados en la muestra de semilla.

5.3.4 Determinación de hierro

La determinación de Hierro se realiza para comprobar la retención de moléculas de Fe en la semilla de guayaba con la finalidad de valorar la participación del Fe en la remoción del colorante.

Para la cuantificación del hierro se llevó a cabo una digestión de la siguiente manera:

1. Pesar 1 gr de muestra en un vaso de precipitados de 125 ml.
2. Adicionar 8 ml de ácido nítrico (HNO_3) ultra puro.
3. Agregar 2 ml de solución de peróxido de hidrogeno (H_2O_2) al 33% a la solución ácida.
4. Tapar el vaso con un vidrio de reloj y poner en digestión a 50°C durante 24 horas.
5. Filtrar el producto de la digestión y aforar la fase líquida a 100 ml con agua destilada.
6. Analizar la muestra en el Espectrofotómetro de absorción atómica (EAA) marca Perkin Elmer modelo AANALYST 200.

5.4 Experimentos de biosorción

La medición del colorante se realizó en un espectrofotómetro de UV- vis a 426 nm, modelo S2100 UV UNICO (Ilustración 11), utilizando para las mediciones celdas de cuarzo. En el cual se realizaron experimentos tipo lote en soluciones de tartrazina, haciendo variaciones en parámetros como pH, concentración de biosorbente, tiempo de contacto y concentración de las soluciones para obtener las condiciones óptimas para llegar al equilibrio del sistema. Con estos resultados se obtienen, ajustando los resultados experimentales a los distintos modelos matemáticos, las constantes cinéticas y el equilibrio del proceso.

En el caso del colorante tartrazina se trabajó a una longitud de onda de 426 nm en el espectro de UV-vis, ya que a esta longitud de onda nuestro colorante presenta su mayor absorbancia de acuerdo a lo reportado por Hernandez, (2010); Torres, (2005); Arroyave-Garcés, (2009).



Ilustración 11. Espectrómetro de UV-Vis S2100 UV UNICO.

5.4.1 Modificación del biosorbente

La modificación del biosorbente se lleva a cabo con la finalidad de otorgarle un mayor grado de retención y así lograr la remoción del colorante. Para ello se realizó el siguiente procedimiento:

- 1.-Se pesó 10 g del biosorbente previamente triturada (menor 1 mm, 1 mm y mayor 1 mm)
- 2.-Se adicionó 250 ml de solución de FeCl_3 0.1 M
- 3.- Se llevó a agitación durante 24 horas en una parrilla magnética (Ilustración 12).
- 4.- Se filtró el biosorbente y lavó perfectamente la semilla con agua destilada hasta que el líquido de desecho salió limpio.
- 5.-Se secó en estufa por 3 horas a 100°C moviendo periódicamente para garantizar que la semilla quede seca uniformemente.



Ilustración 12. Modificación de la semilla de guayaba con FeCl_3 .

5.5 Cinéticas de biosorción

Las cinéticas de Biosorción se realizaron con la finalidad de conocer las condiciones óptimas para la remoción de la tartrazina.

Se realizaron distintas cinéticas para poder llegar al equilibrio del sistema, variando el tamaño de partícula.

Se trabajó en un sistema tipo lote, en tubos Falcon, con un volumen de 10 ml de solución de tartrazina, ya que este volumen es adecuado para las necesidades del espectro y todos los ensayos se realizaron por triplicado.

Los contactos se realizaron con semilla de guayaba triturada y tamizada y se tomaron lecturas en el espectro de UV-Vis desde los 5 minutos hasta los 420 minutos y con ello determinar el tamaño de partícula más adecuado de acuerdo a los parámetros de los modelos cinéticos a los cuales se ajustaron.

5.5.1 Influencia del tamaño de partícula

Posterior a la trituración se realizó un tamizado con el cual se obtuvieron 3 diferentes tamaños de partículas: menor 1 mm, 1 mm y mayor a 1 mm.

Cada uno de los tamaños se modificó por separado con la finalidad de hacer distintos contactos y llegar al tamaño ideal de acuerdo a las necesidades que demanda el proyecto.

Se realizaron contactos con una solución de 20 mg/L de tartrazina adicionando 0.5 g de semilla modificada de los distintos tamaños de partícula durante 5 horas realizando mediciones periódicas para conocer el comportamiento de la remoción del colorante.

5.5.2 Modelos cinéticos

MODELO DE LAGERGREN

La ecuación de primer orden de Lagergren, la cual se basa principalmente en la capacidad de adsorción del sólido, donde cada ion se le asigna un sitio de adsorción del material adsorbente. Para este modelo cinético se utilizó la siguiente ecuación no lineal:

$$q_t = q_e (1 - e^{-kt})$$

q_t = Capacidad de Adsorción en cualquier momento (mg/g)

q_e = Capacidad de adsorción en equilibrio

k = Constante de Lagergren de la velocidad de adsorción (L/h)

MODELO DE ELOVICH

El modelo de Elovich se utiliza para determinar la cinética de quimisorción de gases sobre sólidos, pero también se utiliza para describir la adsorción de contaminantes en soluciones acuosas. La ecuación no lineal descrita por este modelo es la siguiente:

$$q_t = \left[\left(\frac{1}{b} \right) \log ab \right] + \left[\left(\frac{1}{b} \right) \log \left(t + \frac{1}{a} b \right) \right]$$

q_t = Capacidad de adsorción en cualquier momento (mg/g)

a = Velocidad de adsorción inicial (mg/g h)

b = Constante de desorción durante cualquier experimento (g/mg)

MODELO PSEUDO SEGUNDO ORDEN

Este modelo fue desarrollado por Ho y McKay y dado a conocer en 1999, para describir el comportamiento de reacciones químicas de sorción entre el suelo y metales. En él se supone que el adsorbato se adsorbe en dos sitios activos del adsorbente (Valencia-Leal, 2008). Para dicho modelo de cinética se presenta la siguiente ecuación no lineal:

$$q_t = \frac{2 k_2 t / q_e^2}{1 + 2 k q_e t}$$

q_t = Capacidad de adsorción en cualquier momento (mg/g)

q_e = Capacidad de adsorción en equilibrio (mg/g)

k_2 = Constante de velocidad de adsorción en Pseudo segundo orden

5.6 Influencia de dosis de biosorbente

Para conocer la dosis óptima de biosorbente se realizaron varios contactos con distintas cantidades de biosorbente en cada una, las cuales presentan un rango de 0.05 g a 0.4 g de semilla de guayaba triturada de 1 mm de diámetro y que fue modificada con Fe.

Los contactos se realizaron en 10 ml de una solución de tartrazina a 20 mg/L durante 5 horas seguido por la determinación por UV-Vis de la concentración del colorante.

5.7 Influencia del pH

Para determinar si el pH juega un papel importante en las determinaciones que se realizaron, y ya conociendo los parámetros más adecuados para la remoción del colorante, se realizó un ensayo en el cual se hizo una variación del pH.

Se prepararon distintas soluciones de tartrazina 20 mg/l con intervalos de pH de 1 a 10 (modificando con HCl 1% y NaOH 1N), adicionando 0.5 g de semilla en agitación constante durante 5 horas. Se filtró el biosorbente y se procede a leer en el espectrofotómetro UV-Vis para conocer la remoción de cada solución.

Cabe mencionar que se realizó la determinación de pH de cada solución antes y después del contacto con el biosorbente (Ilustración 13).



Ilustración 13. Modificación de pH de las soluciones de tartrazina.

5.8 Isotherma de biosorción

El isoterma de biosorción se realiza con la finalidad de conocer la capacidad máxima que tiene el biosorbente de remover nuestro colorante por lo cual, se tomaron todos los parámetros que consideramos adecuados y se realizó un ensayo con distintas concentraciones en las soluciones de tartrazina para conocer el comportamiento en una saturación de dicho compuesto.

El intervalo de concentraciones de las soluciones del colorante van desde 10 mg/L hasta 300 mg/L, con una cantidad de 0.5 g de semilla modificada con FeCl_3 en 10 ml de solución de el colorante. Se llevó a agitación durante el tiempo óptimo de equilibrio del sistema (5 horas), se separa el sobrenadante y se leyó en el espectrofotómetro a 426 nm. Se realizaron diluciones a algunas muestras que lo requirieron para conocer la concentración real.

En la Ilustración 14 se presenta el diagrama de flujo del procedimiento que se llevó a cabo durante el proyecto.

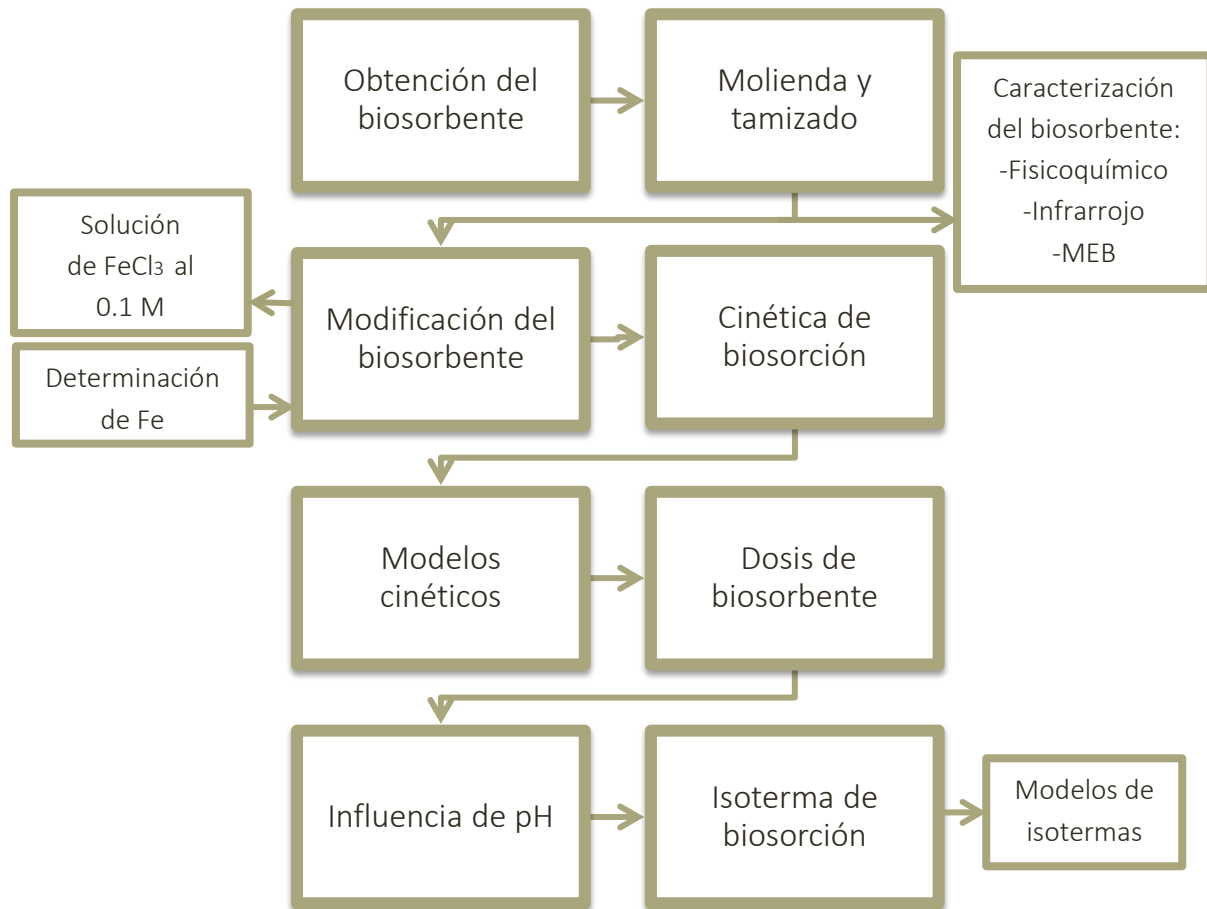


Ilustración 14. Diagrama de bloques de parte experimental.

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1 Caracterización fisicoquímica de la semilla de guayaba

En la Tabla 7 se observa la comparación de la caracterización fisicoquímica consultada en Vasco Mendoza et al ,(2005); Miretzky y Fernandez Cirelli , (2010) ;Sánchez Sánchez ,(2013), así como la realizada con la semilla de guayaba modificada con Fe en el proyecto.

Tabla 7.Comparación de análisis bromatológicos de la semilla de guayaba natural y modificada con hierro

COMPONENTES	SEMILLA NATURAL	SEMILLA NATURAL <i>FUENTE: Sánchez Sánchez,(2013).</i>	SEMILLA MODIFICADA CON Fe
CENIZAS	0.5 a 1.5%*	0.3907%	0.3179%
PROTEÍNA	6 a 9%*	0.0192%	0.0228%
FIBRA DIETÉTICA TOTAL:	80 a 90%*	--	24.5%
-Fibra Soluble:	--	--	13.67%
*Pectina	--	1.3295%	4.6398%
-Fibra Insoluble	--	--	10.83%
*Celulosa	28% ⁺	--	10%
*Hemicelulosa	15.5% ⁺	12.96%	10%
*Lignina	41.7% ⁺	69.7863%	68.5%
EXTRACTO ETÉREO	8 a 11%*	3.7774%	2.8013%
EXTRACTO LIBRE DE NITRÓGENO	--	0.4327%	72.3593%

-- No determinado

*FUENTE: Vasco-Mendoza et al , 2005

⁺FUENTE: Miretzky y Fernandez Cirelli , 2010

Se observa que la principal variación que se encuentra en los resultados es la referente a la fibra dietética, en donde se observa una diferencia grande de la semilla natural en comparación a la modificada con Fe, pero al contrario se observa un aumento de extracto libre de nitrógeno, principalmente carbohidratos en la semilla modificada con Fe, lo cual se puede sugerir que existe una hidrólisis de la fibra de la semilla natural a carbohidratos mucho más simples en la semilla modificada con Fe posiblemente por los tratamientos a los que ha sido sometido para dicha modificación.

6.2 Espectrofotometría de infrarrojo

A continuación se presentan los espectro de infrarrojo (IR) para la semilla de guayaba natural, modificada y modificada después del contacto con el colorante, con la finalidad de comparar los grupos funcionales presentes en cada muestra durante los procesos a los que fue sometida la semilla de guayaba durante el procedimiento.

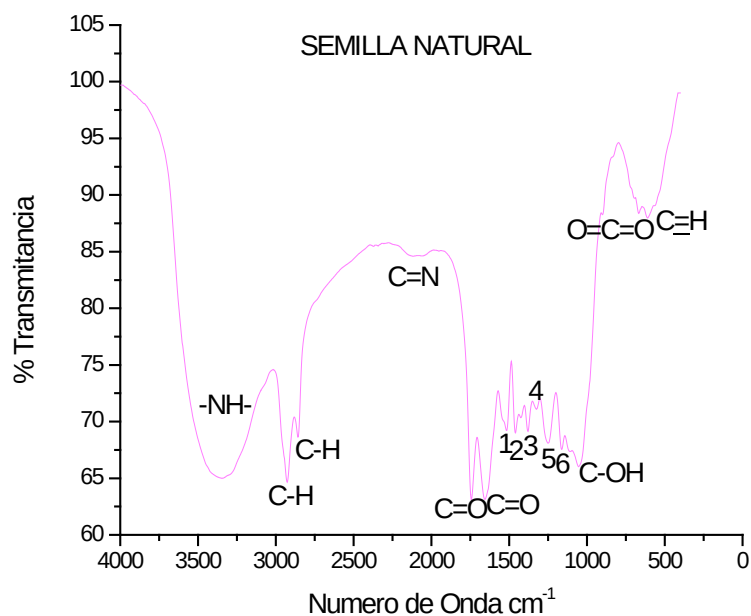


Ilustración 15. Gráfica de infrarrojo de semilla natural.

En la Ilustración 15 se observa el espectro de la semilla de guayaba natural indicando los grupos funcionales presentes en la muestra de acuerdo a la interpretación realizada y especificando el tipo de enlace así como rango en la Tabla 8.

Tabla 8. Grupos funcionales presentes en la semilla natural.

SEMILLA DE GUAYABA NATURAL					
N°	N° Onda cm^{-1}	Enlace	Tipo de Enlace	Enlace específico	Rango cm^{-1}
	611	$\text{-C}\equiv\text{CH}$	Acetileno	Terminal	600-700
	667	$\text{O}=\text{C}=\text{O}$		Bioxido de carbono	667.3
	1054	C-OH	Alcohol	Primario	1075-1025
6	1162	C-O	Alcohol	Primario	1150-1200
5	1249	C-OH	Alcohol	Fenoles	1250-1150
4	1324	-NH_3	Azida		1340-1180
3	1380	C-H	Alquilo	Metilo	1380
2	1460	C-H	Alquilo	Metilo	1460
1	1517	-NH-	Amina	Secundaria	1580-1490
	1655	C=O	Cetona-Aldehído	Ciclo de 5 miembros	1780-1640
	1742	C=O	Cetona-Aldehído	Ciclo de 5 miembros	1780-1640
	2122	C=N	Isonitrilos ($\text{R-N}\equiv\text{C-S}$)		2140-1990
	2856	C-H	Alquilo	Metilo	2850
	2926	C-H	Alquilo	Metilo	2925
	3345	-NH-	Amina	Secundaria	3350-3310

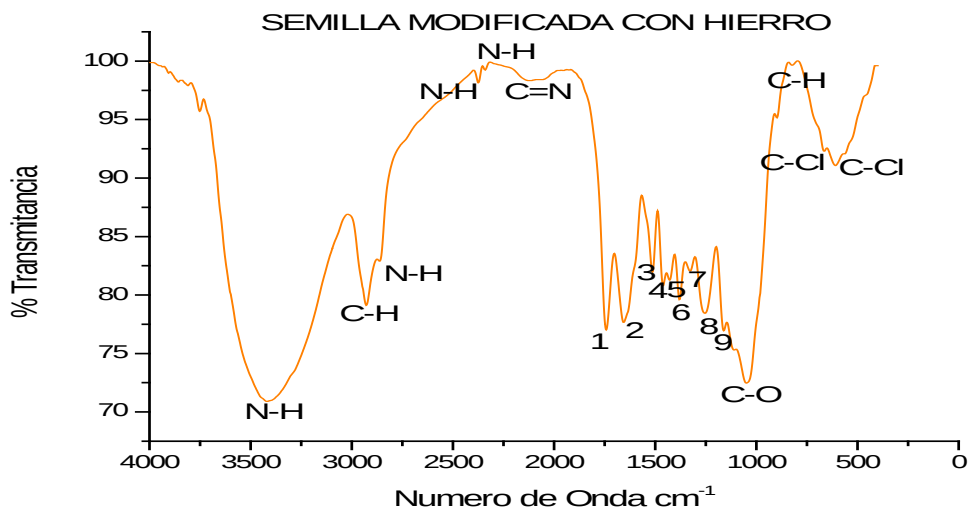


Ilustración 16. Gráfica de infrarrojo de semilla modificada con Hierro.

Tabla 9. Grupos funcionales de la semilla de guayaba modificada con Hierro

SEMILLA DE GUAYABA MODIFICADA CON HIERRO					
N°	N° Onda cm^{-1}	Enlace	Tipo de Enlace	Enlace específico	Rango cm^{-1}
	606	C-Cl	Cloro-alcano		540-760
	666	C-Cl	Cloro-alcano		540-760
	823	C-H	Vinilo	Alqueno trisustituido	800-840
	1047	C-O	Alcoholes	Primarios	1050 $\pm$ 10
9	1161	C-O	Alcohol	Terciario	1150-1200
8	1254	C-O	Ácido Carboxílico		1250-1300
7	1328	O-H	Alcoholes, fenoles		1500-1300
6	1380	O-H	Alcoholes, fenoles		1500-1300
5	1429	O-H	Alcoholes, fenoles		1500-1300
4	1461	O-H	Alcoholes, fenoles		1500-1300
3	1515			Aromáticos	1520
2	1656	C=O	Derivados de ácidos carboxílicos	Amidas	1670-1640 (asociadas)
1	1741	C=O	Derivados de ácidos carboxílicos	Esteres y lactonas	1750-1735
	2123	C=N	Isonitrilos (R-N=C=S)		2140-1990
	2340	N-H	Iones amonio		2400-3200
	2373	N-H	Iones amonio		2400-3200
	2863	N-H	Iones amonio		2400-3200
	2925	C-H	Alquilo	Metileno	2925
	3400	N-H	Aminas	Aminas Secundarias	3400

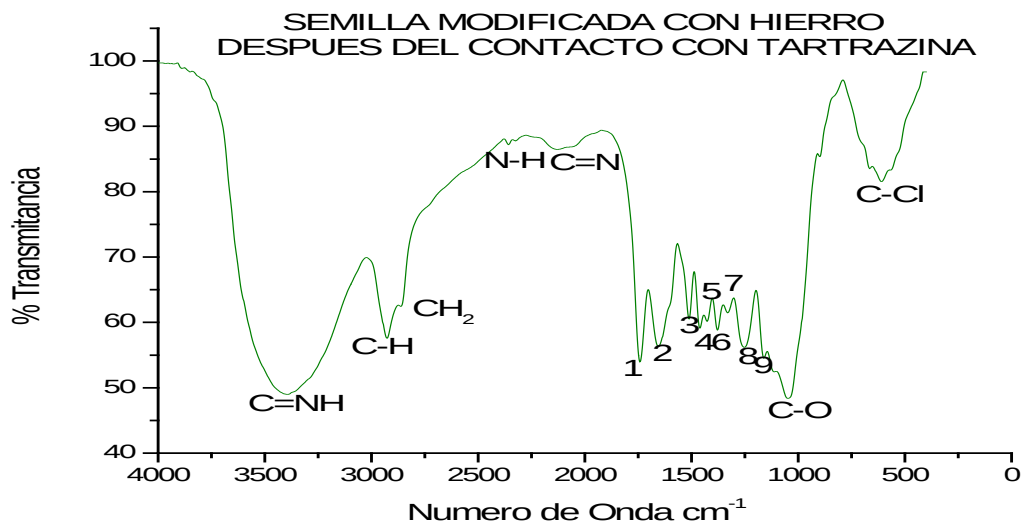


Ilustración 17. Gráfica de infrarrojo de semilla de guayaba modificada con Fe después del contacto con tartrazina.

Tabla 10. Grupos funcionales de la semilla modificada con Fe después del contacto con tartrazina

SEMILLA DE GUAYABA MODIFICADA CON Fe DESPUES DEL CONTACTO CON TARTRAZINA					
N°	N° Onda cm^{-1}	Enlace	Tipo de Enlace	Enlace específico	Rango cm^{-1}
	609	C-Cl	Cloroalcanos		540-760
	1046	C-O	Alcoholes	Primarios	1050±10
9	1160	C-O	Alcoholes	Terciarios	1150-1200
8	1252	C-O	Ácidos carboxílicos		1250-1300
7	1331	-C≡C-	Acetileno Central		1335-1325
6	1380	C-H	Alquilo	Metilo	1380
5	1427	O-H	Alcoholes, fenoles		1500-1300
4	1461	O-H	Alcoholes, fenoles		1500-1300
3	1512	-NH-	Amina	Secundaria	1580-1490
2	1655	C=O	Derivados de ácidos carboxílicos	Amidas	1670-1640 (amidas asociadas)
1	1741	C=O	Derivados de Ácidos carboxílicos	Esteres y lactonas	1750-1735
	2128	C=C	C=C	Alquino terminal	2100-2140
	2357	N-H	Iones amonio		2400-3200
	2863	-CH₂-	Alcanos		2865-2845
	2925	C-H	Alquilo	Metileno	2925
	3393	C=NH	Amina	Secundaria	3400-3300

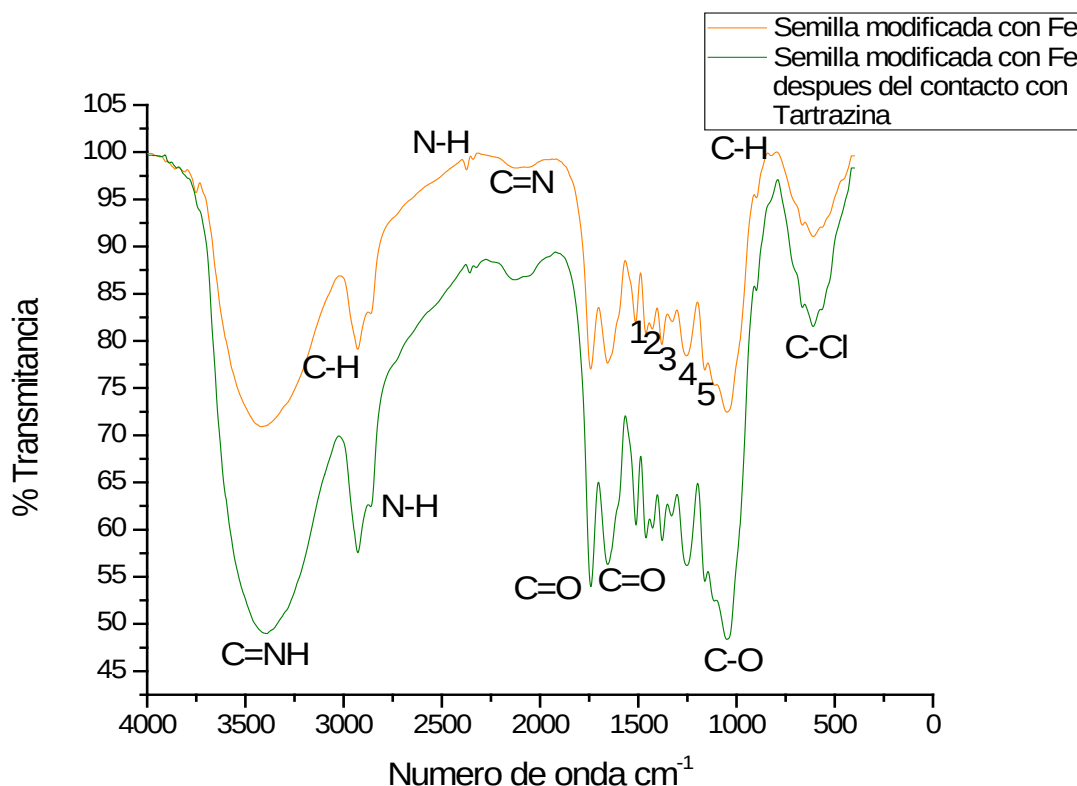


Ilustración 18. Gráfica del espectro de IR de la semilla antes y después del contacto con Tartrazina.

En la Ilustración 18 se observan que la diferencia de los espectros IR de la semilla de guayaba antes y después del contacto con tartrazina, donde lo más destacable es la diferencia de transmitancia entre las 2 curvas, lo cual nos indica según lo dicho por Aguirre Gutiérrez (2008) que existe una mayor presencia de grupos funcionales en la semilla de guayaba después del contacto con tartrazina ya que se encuentran los mismos picos en las dos muestras con distinta transmitancia.

Aguirre Gutiérrez (2008) cita que entre mayor sea la transmitancia disminuye la concentración de los grupos funcionales en la muestra, lo que puede deberse a la adición de las moléculas de colorante a la semilla la cual no está cambiando su estructura química sino solo experimenta la adsorción de la molécula del colorante, del cual está siendo cuantificado sus grupos funcionales también.

6.3 Microscopia Electrónica de Barrido

Con la finalidad de entender el mecanismo de biosorción de la semilla de guayaba, se hizo una microscopia electrónica de barrido la cual consta en tomar imágenes profundas sobre una de las partículas con la cual se trabajaron los contactos con la finalidad de conocer su morfología y así comprender si la estructura de los poros ayuda o dificulta la adsorción de nuestro colorante así como conocer si existe algún daño en el tejido por la modificación de la semilla.

Para realizar una comparación completa se realizó la observación de 3 distintas muestras de semilla: la primera se trata de semilla de guayaba entera la cual podemos observar en la Ilustración 19 donde se nota que existe una superficie lisa con unas pequeñas ranuras que se encuentran de manera normal en la semilla. Esta observación se realiza con la finalidad de conocer si hay algún cambio en cuanto a la morfología estructural antes y después de la trituration.

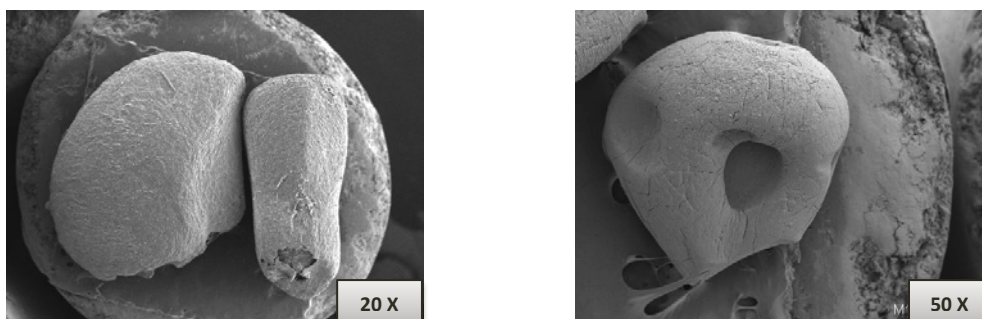
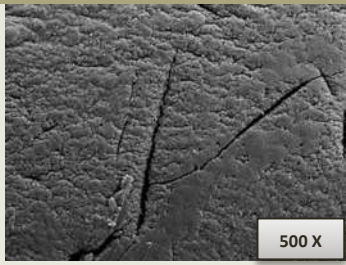
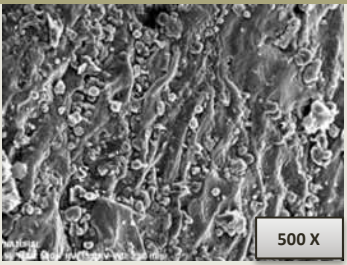
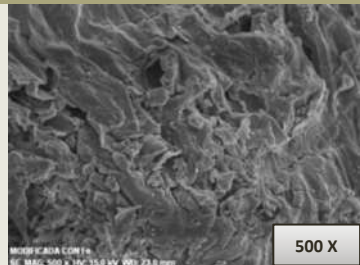
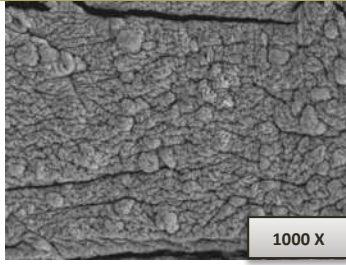
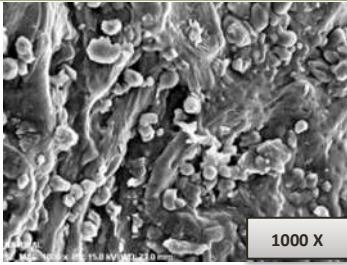
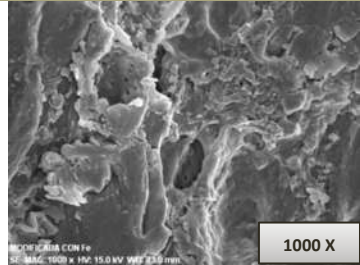
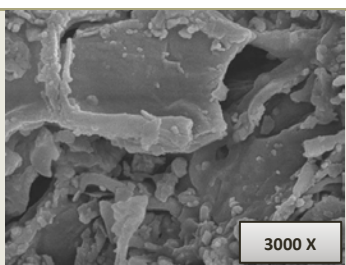
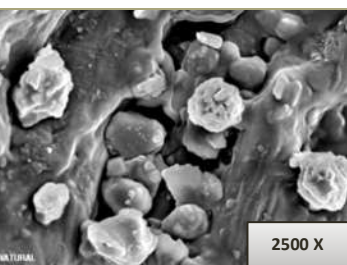
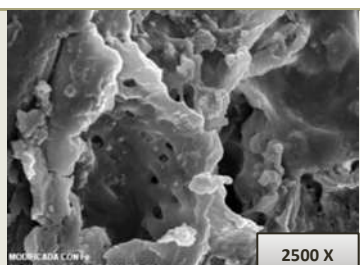
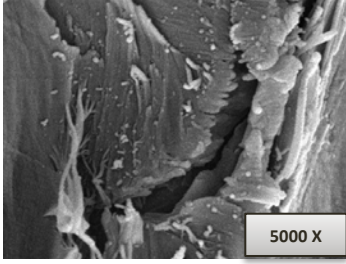
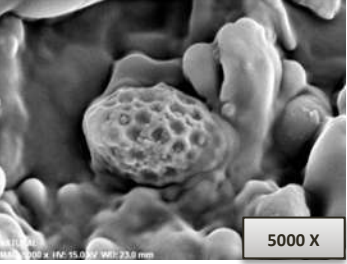
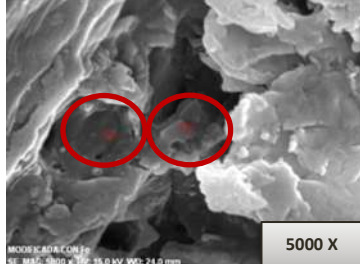


Ilustración 19. Semilla natural entera vista con el microscopio electrónico de barrido

A continuación en la Tabla 11 se realiza una comparación morfológica de acuerdo a las imágenes del microscopio electrónico de barrido con diferentes resoluciones para conocer el daño que se pudiera estar ocasionando tanto con la molienda como con la modificación de la semilla.

Tabla 11. Imágenes de la morfología de la semilla de guayaba bajo distintas condiciones.

SEMILLA ENTERA NATURAL	SEMILLA TRITURADA NATURAL	SEMILLA TRITURADA MODIFICADA CON Fe
		
		
		
		

En las imágenes se puede observar un cambio bastante notable en cuanto a la estructura de la semilla de guayaba, ya que cuando la semilla aun esta entera la superficie tiende a ser lisa y con un patrón secuencial y definido. En cambio en las imágenes de la semilla de guayaba triturada natural se observa cómo la superficie presenta una ruptura, teniendo una apariencia mucho más irregular y por último la semilla de guayaba modificada con Fe que también ha sido sometida a un proceso de trituración, tiene una estructura muy semejante a la de la semilla natural triturada.

Cabe mencionar que en la imagen de la semilla modificada con Fe con una resolución de 5000X y gracias a un mapeo anterior que se realizó, se pueden visualizar y puntualizar la presencia de las moléculas de Fe, las cuales nos indica la presencia de este compuesto en la estructura de la semilla (círculos rojos).

La ilustración 20 muestra el mapeo de elementos al que fue sometida la semilla de guayaba triturada y modificada con Fe, en el cual se localizan las moléculas de carbono (verde), oxígeno (azul) y Hierro (rojo), que fueron proporcionadas por el microscopio electrónico de barrido. Las manchas coloridas indican la presencia de los elementos que están indicados en cada imagen, en la cual se observa que existe una abundancia de oxígeno, seguida por el carbono y por último se muestra la presencia de Hierro en cantidades menores proveniente de la solución con la cual se modificó la semilla.

Por último se muestra la imagen en donde se observa la distribución de cada uno de los elementos en la superficie de la semilla analizada obtenida mediante la microscopia electrónica de barrido.

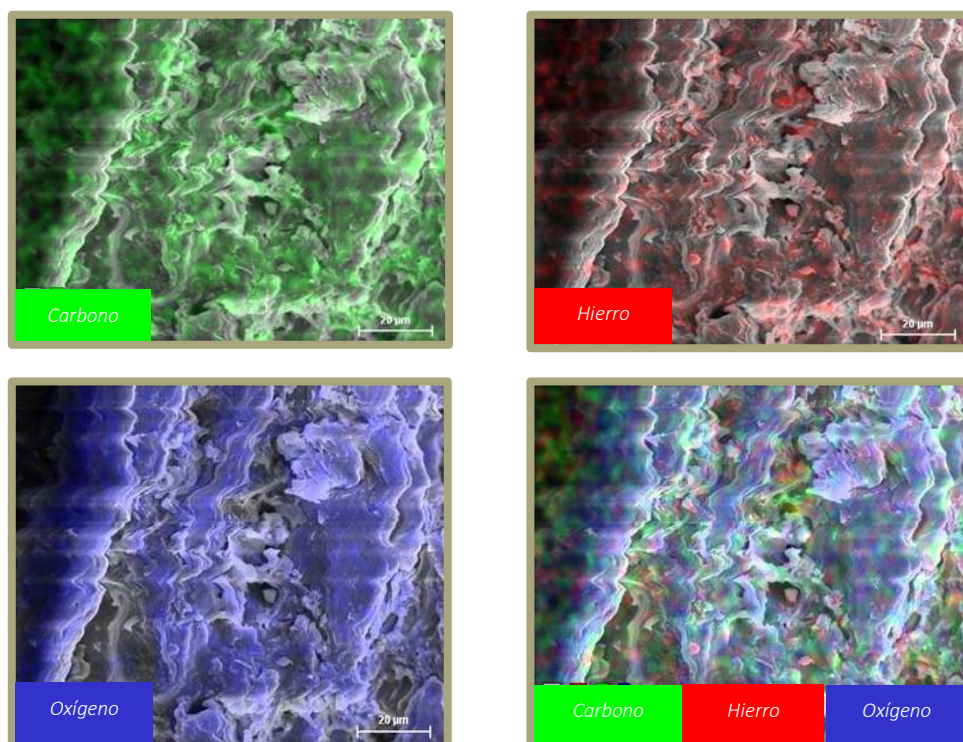


Ilustración 20. Mapeo de los elementos presentes en la semilla de guayaba modificada con Fe.

Con el análisis realizado por MEB se conocer también la presencia de los elementos contenidos en la muestra por medio de una gráfica del microanálisis la cual analiza cuantitativamente los elementos que se observaron en las imágenes anteriores.

En la Ilustración 21 se observa la gráfica de microanálisis de la semilla de guayaba entera, de la cual le mayor porcentaje es de oxígeno seguido por el carbono y en menor proporción el calcio y sodio.

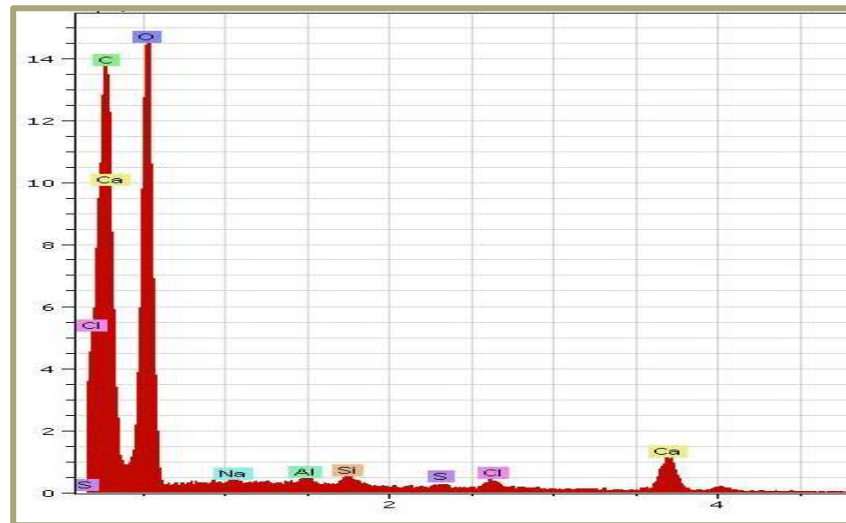


Ilustración 21. Elementos presentes en la semilla de guayaba natural ENTERA determinada en la MEB.

En la Ilustración 22 se muestra la gráfica de microanálisis de la semilla de guayaba natural pero que ya ha pasado por un proceso de molienda y tamizado con la finalidad de verificar si existe alguna diferencia significativa en cuanto a cantidad o presencia de elementos.

Se observa que hay una presencia abundante de cobre el cual se utilizó en la modificación de la semilla para el análisis de MEB ya que la semilla de guayaba no es conductora de electrones por lo que se necesita la presencia de este elemento para lograr el análisis. Se observa también que está presente el oxígeno en mayor cantidad seguido de calcio, fósforo y en menor proporción potasio.

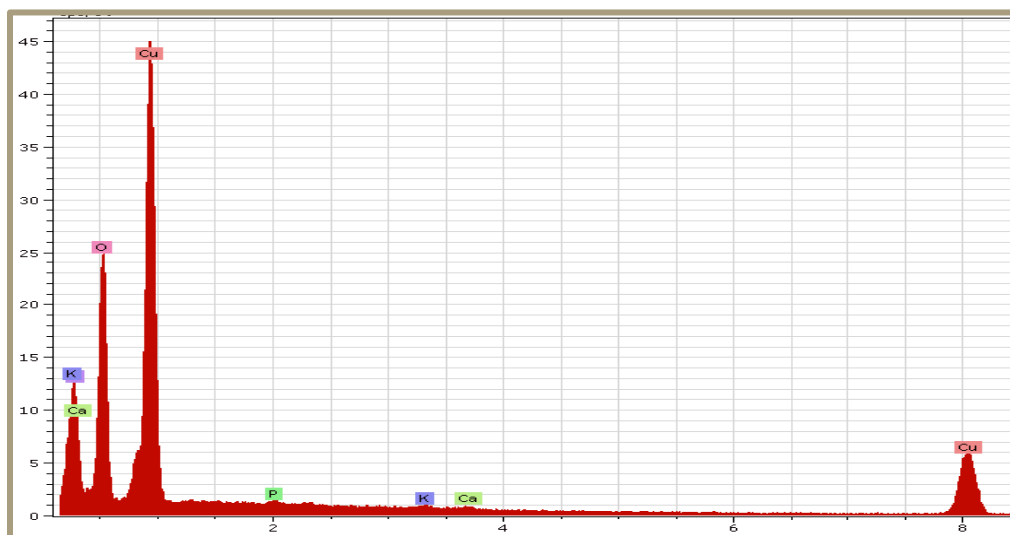


Ilustración 22. Elementos presentes en la semilla de guayaba natural triturada determinada en la MEB.

En la Ilustración 23 se observa el microanálisis de los elementos presentes de la semilla de guayaba triturada y modificada con hierro, en el que se encuentra de nueva cuenta el cobre como parte del procedimiento de acondicionamiento de la semilla para el análisis, el oxígeno, carbono, potasio, y lo más importante, se observa la presencia de dos elementos que nos indican que se llevó a cabo una adición de grupos provenientes de la modificación de la semilla de guayaba, el cloro y el hierro.

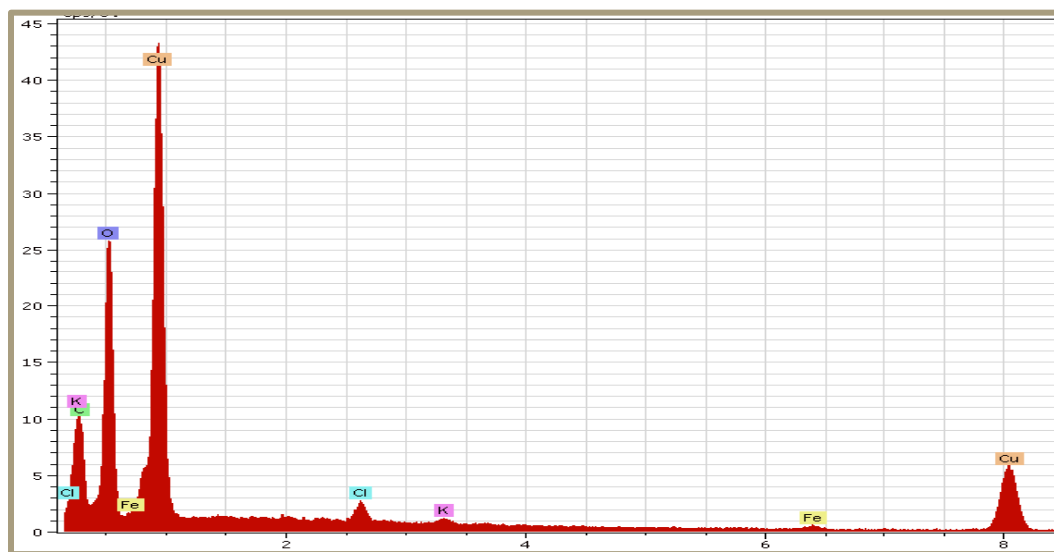


Ilustración 23. Elementos presentes en la semilla de guayaba modificada con Fe determinadas en la MEB.

En la Tabla 12 se observa el porcentaje de los distintos elementos de la semilla de guayaba obtenidos por un microanálisis de MEB, el cual sostiene la afirmación de las imágenes del mapeo y las gráficas de microanálisis donde nos dice que el elemento más abundante de la semilla es el oxígeno, y se confirma la presencia del cloro y el hierro provenientes de la modificación realizada con la solución de Cloruro Férrico.

Tabla 12. Microanálisis de elementos presentes en la semilla de guayaba.

ELEMENTO	SEMILLA NATURAL ENTERA	SEMILLA NATURAL TRITURADA	SEMILLA MODIFICADA CON Fe TRITURADA
OXIGENO	76.94%	99.32%	97.16%
CALCIO	12.77%	0.37%	--
FOSFORO	--	0.15%	--
POTASIO	--	0.16%	0.55%
CLORO	2.27%	--	1.1%
HIERRO	--	--	1.19%
SODIO	2.71%	--	--
SILICIO	2.22%	--	--
ALUMINIO	1.88%	--	--
AZUFRE	1.21%	--	--

Realizando un análisis a los datos de la Tabla 12 se encuentra que existe la posibilidad de que el calcio puede ser sustituido por el hierro al realizarse la modificación de la semilla de guayaba ya que el calcio está presente en la semilla de guayaba entera y triturada natural, pero desaparece al realizar la modificación con Fe. Para ello se sugiere realizar un trabajo analítico posterior para afirmar o rechazar esta suposición.

6.4 Determinación de Fe

Se realiza la determinación de Fe para cuantificar la adherencia de dicha molécula a la superficie de la semilla de guayaba.

Tabla 13. Contenido de hierro en la semilla de guayaba.

Semilla modificada con FeCl_3	Mg Fe/ kg semilla
Solución 0.1 M	1333mg Fe/ kg semilla

Con esta determinación se afirma que en cada kilogramo de biosorbente (semilla de guayaba) se logra adicionar 1333 mg de Hierro, al ponerse en contacto con una solución 0.1 M (Tabla 13).

6.5 Cinética de sorción

6.5.1 Influencia de tamaño de partícula

El tamaño de partícula juega un papel importante en la remoción de la tartrazina, por lo cual se montaron ensayos para determinar el tamaño más apropiado de acuerdo a las necesidades de la reacción.

Se trabajaron 3 distintos tamaños de partícula (menor a 1mm, 1 mm y mayor a 1mm), las cuales se acondicionaron con cloruro férrico 0.1 M arrojando el siguiente comportamiento.

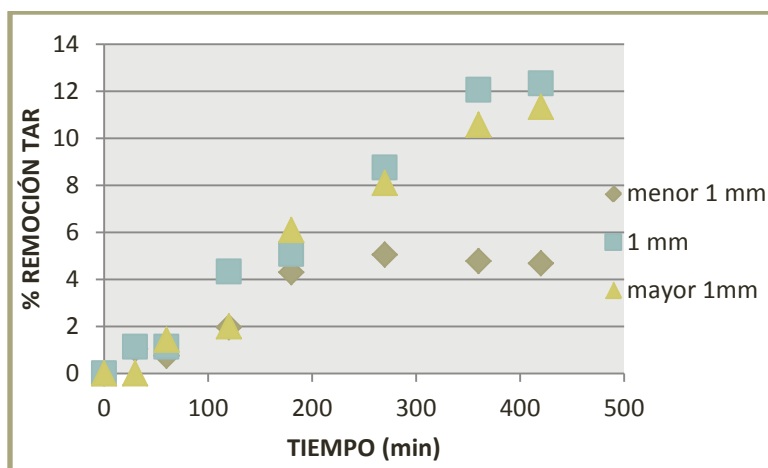


Ilustración 24. Comparación de porcentaje de remoción con distintos tamaños de partícula.

Se observa en la Ilustración 24 la diferencia que existe entre la remoción con semilla mayor a 1 mm y 1 mm, pero pensando en las aplicaciones futuras del proyecto, se utiliza la de 1 mm ya que es el tamaño de partícula más apropiado para ser utilizado en las columnas de adsorción ya que no se trata de partículas finas que pueden impedir el paso del líquido sobre la columna, pero tampoco son lo suficientemente grandes como para que dejen escapar fluido entre sus partículas y no se logre la remoción del colorante por esa razón.

6.5.2 Modelos Cinéticos

A continuación se muestran las gráficas donde se ajustan los datos experimentales a los modelos cinéticos de Lagergren, Pseudo segundo orden y Elovich.

En la Ilustración 25 se muestra el ajuste a los modelos cinéticos que se realizaron a la semilla de guayaba que tiene un diámetro mayor a 1 mm, para la que se ajustó mejor el modelo de pseudo segundo orden de acuerdo al coeficiente de correlación (R) que arrojaron los datos experimentales.

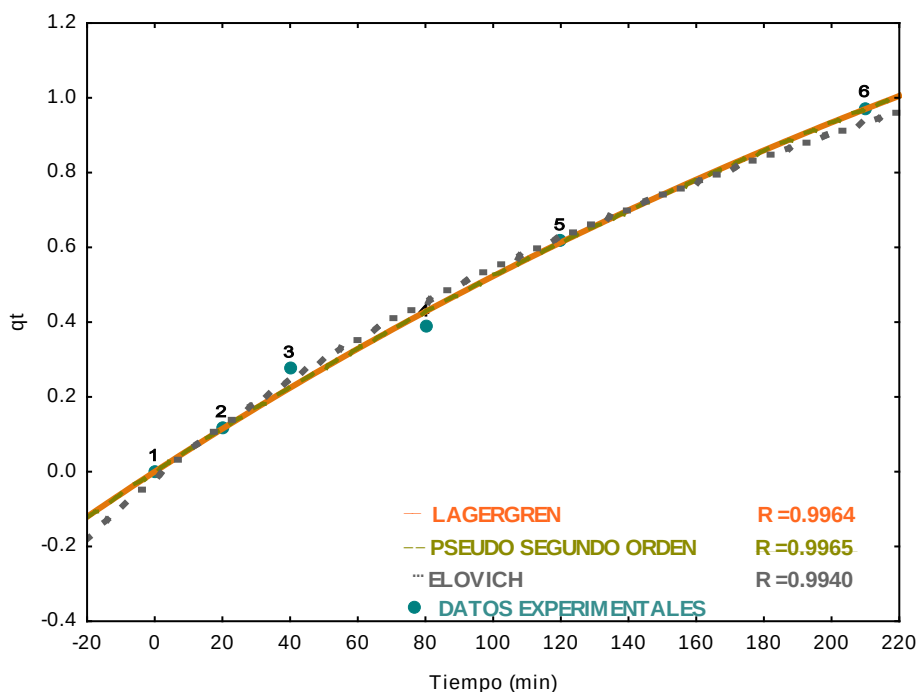


Ilustración 25. Gráfica de modelos cinéticos para tamaño de partícula mayor 1 mm.

En la Ilustración 26 se presenta la gráfica del ajuste a los modelos cinéticos de la semilla de guayaba de 1 mm de diámetro para la cual funciona mejor la ecuación de Lagergren, basándose en únicamente en R .

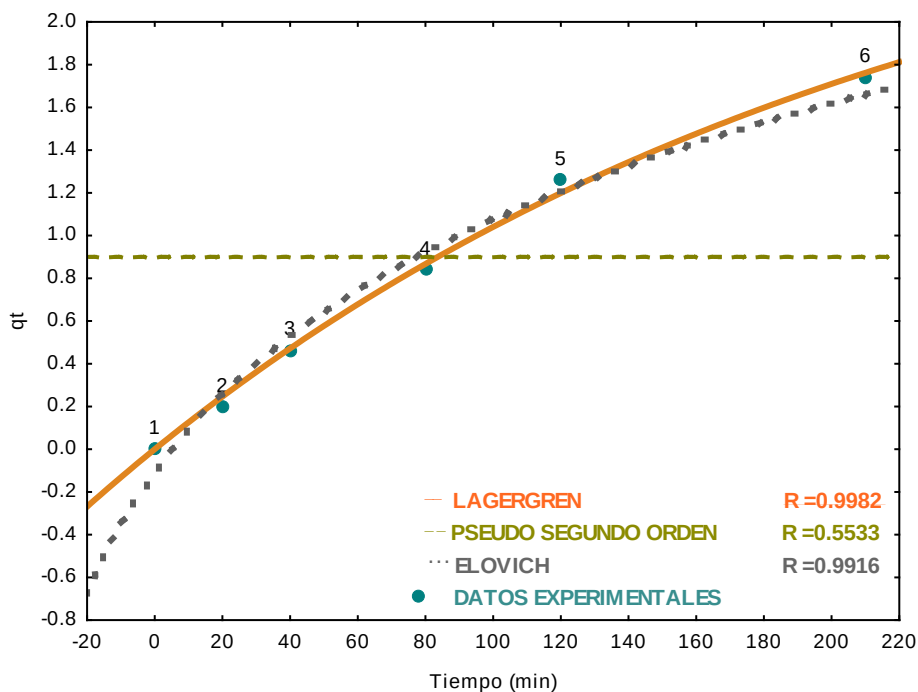


Ilustración 26. Gráfica de modelos cinéticos para tamaño de partícula 1 mm.

Para determinar cuál es el modelo que se ajusta a cada cinética se realizan los ajustes matemáticos a los modelos en los cuales también se toman en cuenta las constantes obtenidas así como el R que se calculó en las gráficas.

En la Ilustración 27 se observa la gráfica donde comparan los modelos cinéticos con los datos experimentales los cuales indican que el modelo de Lagergren es el que mejor se ajusta de acuerdo al coeficiente de correlación (R).

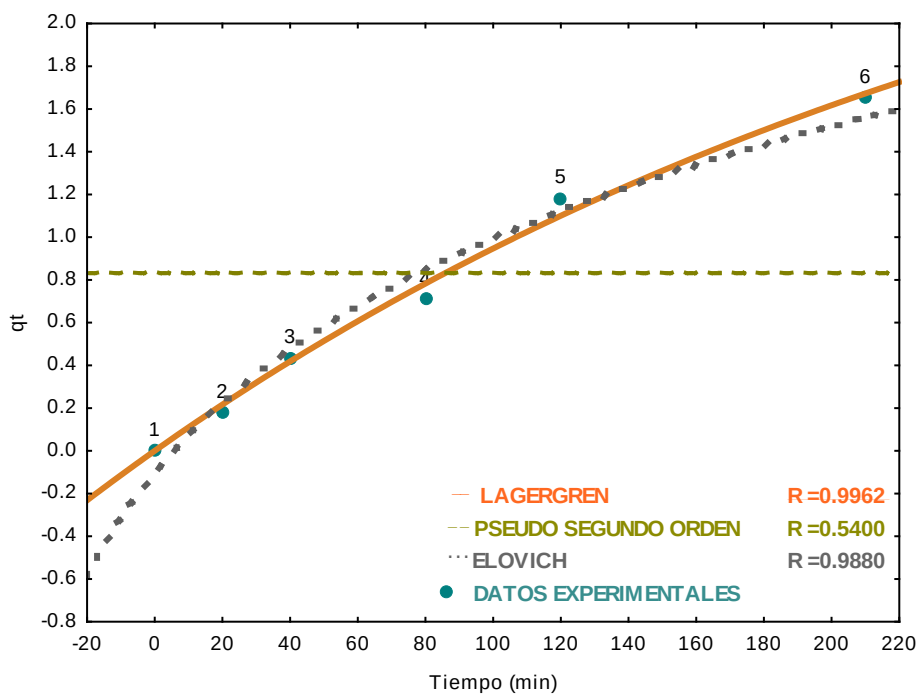


Ilustración 27. Gráfica de modelos cinéticos para tamaño de partícula menor 1 mm.

A continuación se presenta en la Tabla 14 las constantes que se fueron calculadas mediante el software Origin Pro 8, para lo cual se utilizaron las ecuaciones no lineales de cada modelo

Tabla 14. Parámetros cinéticos obtenidos de los experimentos de contacto de semilla de guayaba con tartrazina

MODELO DE PARAMETROS CINÉTICOS		CONDICIONES DE CINÉTICA			
		TAMAÑO DE PARTÍCULA			
		MENOR mm	1 mm	MAYOR mm	1 mm
LAGERGREN	k	0.0034	0.0044	0.0024	
	q_e	3.2424	2.9185	2.4447	
	R	0.9962	0.9982	0.9954	
PSEUDO SEGUNDO ORDEN	K_2	-12710.2	-14507.5	0.0001	
	q_e	0.8	0.9	4.3384	
	R	0.54	0.5533	0.9965	
ELOVICH	b	0.9519	0.9498	0.9914	
	a	0.0175	0.0197	0.0074	
	R	0.988	0.9916	0.994	

El parámetro más importante a considerar es, en el caso de Lagergren k , Pseudo segundo orden k_2 , y en Elovich a el cual indica la velocidad de la reacción para alcanzar el equilibrio.

Se considera tanto dicho parámetro como el coeficiente de correlación (R) para determinar a qué modelo cinético se va a apegar la adsorción; como se observa en la Tabla 14, los valores de R son

los mayores en el modelo de Lagergren y por consiguiente se compara el valor de k en Lagergren y k_2 en Pseudo segundo orden, de la cual es un poco mayor en la semilla con diámetro de 1 mm.

En la Ilustración 24 se observa que la semilla de guayaba mayor a 1 mm y la de 1 mm tienen una diferencia insignificante en cuanto a porcentaje de remoción se refiere, para lo cual se analizan los parámetros cinéticos (Tabla 14) y se observa que la semilla de 1 mm de diámetro tiene mejor velocidad de reacción para llegar al equilibrio, como coeficiente de correlación, por lo que se determinó que es la más apropiada para trabajar en los contactos posteriores.

Cabe mencionar que esta diferencia de velocidades de reacción con el objetivo de llegar al equilibrio del sistema, podría cambiar al hacer algunas variaciones en la concentración inicial del colorante, pero como las cinéticas de adsorción se realizaron a una misma concentración inicial, por ello se elige 1 mm de diámetro como el tamaño ideal para la remoción.

6.6 Influencia de dosis de biosorbente

Al hacer una variación en la cantidad de biosorbente se obtendrá la cantidad adecuada de semilla para cada contacto, y con ello explotar por completo al biosorbente para aumentar el rendimiento del mismo.

Para obtener la cantidad adecuada de biosorbente se realizó un ensayo donde variamos la cantidad de biosorbente desde 0.1 g hasta 0.7 g en condiciones de solución 10 ml tartrazina a 20 mg/l expresando los resultados en la siguiente gráfica:

Al final del contacto de 5 h se observó el comportamiento reportado en la Ilustración 28 donde se observa claramente el ascenso de remoción conforme se aumenta la dosis de biosorbente, llegando a un 100% con aproximadamente 0.5 g de semilla. Después de esta cantidad se observa que el comportamiento de la remoción ya no presenta cambios significativos, y lo cual indica que la cantidad de biosorbente que se utilizó en todos los contactos posteriores será de 0.5 g por cada 10 ml de solución de tartrazina durante 5 h.

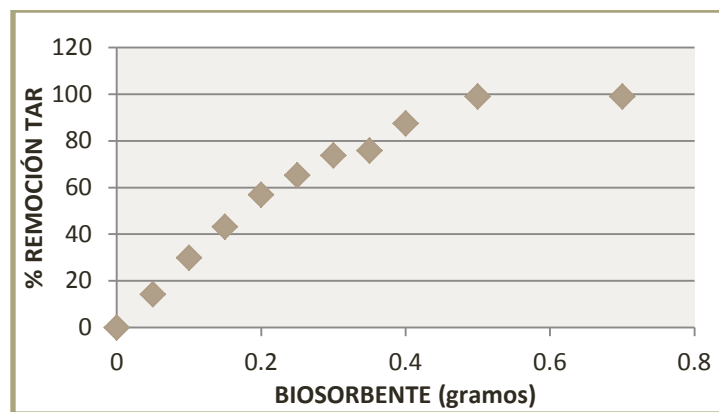


Ilustración 28. Gráfica para la determinación de concentración ideal de biosorbente.

6.7 Influencia de pH

Para observar la influencia del pH de las soluciones se hizo un ensayo donde modificamos los valores de cada solución de colorante con la finalidad de conocer las condiciones adecuadas del sistema, que al ser aplicado, se necesita conocer si las muestras se podrán tratar tal cual están o necesariamente se tendría que hacer la modificación del pH para lograr la remoción completa del colorante.

En Ilustración 29 se muestran los resultados de las concentraciones después de un contacto de 5 horas con 0.5 gr de biosorbente y 10 ml de tartrazina 20 mg/L, siendo modificado el pH de cada solución en un rango de 1 a 10.

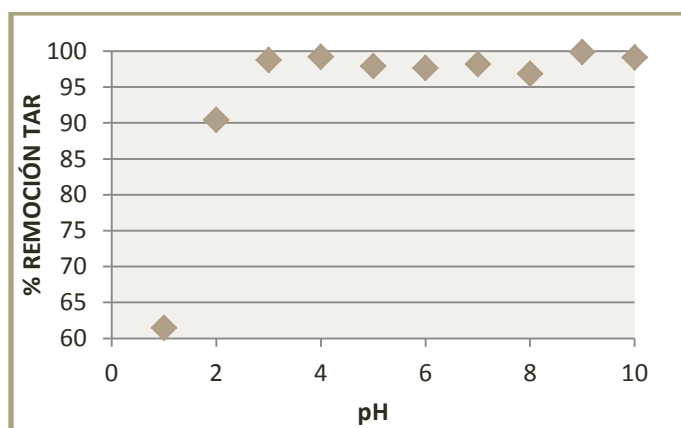


Ilustración 29. Gráfica del comportamiento de la reacción al modificar el pH.

En este caso el pH tiene un rango amplio para lograr una remoción completa del biosorbente como se observa en la Ilustración 30, la adsorción de tartrazina (TAR) que se encontró a pH 1 y 2 fue baja probablemente por la protonación del adsorbente y del adsorbato debido a las condiciones del medio.

Según lo descrito por Wan (2010) cuando el pH es bajo, la superficie del adsorbente será cargada positivamente. Los grupos aniónicos de la molécula de tartrazina ($R-SO_3^-$) se sentirán atraídos por la carga positiva de la superficie adsorbente. Sin embargo, la repulsión entre los grupos $R-SO_3^-$ y la superficie del adsorbente aumentaría a medida que el pH aumenta, por lo tanto la adsorción en el equilibrio sería disminuida especialmente a $pH > 7$. Este fenómeno se observa manera inversa en los datos experimentales presentados en la Ilustración 30, lo cual podría deberse a la modificación del biosorbente con $FeCl_3$.

La tartrazina también contiene grupos hidroxilo ($-OH$), carboxilato ($-COO^-$) y azo ($-N=N-$); por lo tanto, en la unión de tartrazina sobre la superficie del adsorbente no se pueden descartar las uniones dadas por puentes de hidrogeno y por fuerzas de Van Der Waals, tal como sugiere Wawrzkievicz (2009).

Tomando en cuenta que el pH inicial de la solución de colorante ronda entre 6.7 y 7, podrá trabajarse sin ninguna modificación de dicho parámetro.

Hablando de un uso posterior para realizar la remoción de colorante en una mezcla real de aguas residuales se verificará el pH de la solución a analizar para que se encuentre dentro del rango que presenta mayor remoción y si está por debajo, se elegirá el parámetro más cercano para evitar el uso excesivo de recursos para la modificación.

6.8 Isoterma de Sorción

En la Ilustración 30 se puede observar que cuando se presenta una concentración de tartrazina (TAR) en la solución inicial, hay una remoción total para una concentración de 10 a 80 mg/L, C_e (concentración de colorante que se queda en el líquido) es 0, lo cual indica que todo el colorante emigra a la superficie de la semilla de guayaba modificada con hierro (SGMH) y a partir de una concentración de colorante de 100 hasta 300 mg/L existe el incremento de la concentración de colorante que se queda en el líquido.

Pero, a diferencia de ello, cuando se aumenta la concentración inicial del colorante, se observa la saturación del biosorbente, por lo que ya no existe una remoción exponencial.

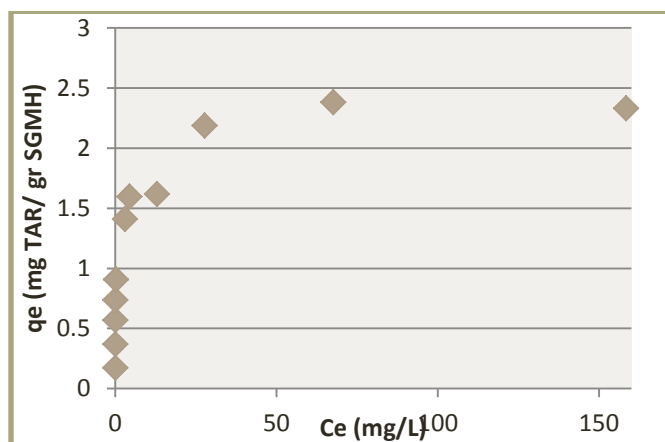


Ilustración 30. Isoterma de sorción de tartrazina en semilla de guayaba modificada con Fe.

6.9 Ajustes a modelos de isoterma

En la Ilustración 31 se observa que existe un apego de los datos experimentales al modelo empírico de Freundlich en comparación a los otros dos modelos analizados tomando en cuenta solamente el coeficiente de correlación.

Posteriormente se empleó la fórmula no lineal para cada modelo para conocer los parámetros de cada uno y así conocer a cuál existe un ajuste más apegado.

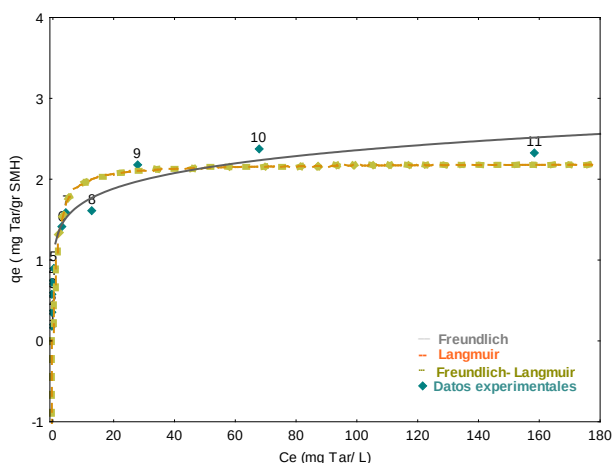


Ilustración 31. Ajuste a modelos Isotérmicos.

En la Tabla 15 se observan los resultados arrojados de las ecuaciones no lineales con las que se sometieron los datos experimentales, para lo cual se utilizó el software Origin Pro 8.

Tabla 15. Modelos de parámetros de Isoterma para tartrazina

COLORANTE	MODELOS DE PARÁMETROS DE ISOTERMAS									
	FREUNDLICH			LANGMUIR			FREUNDLICH-LANGMUIR			
	k_f	n	R	Q_m	K_a	R	k_{fl}	N	Alf	R
Tartrazina	1.24	7.16	0.9034	2.19	0.8033	0.8586	850.59	458.37	387.23	0.8586

En el modelo de Langmuir Q_m es la capacidad de adsorción del colorante (mg TAR/ g BIOSORBENTE)

En el modelo de Freundlich n es la constante que representa el grado de heterogeneidad de la superficie, valores por encima de 1 muestran interacciones débiles adsorbato–adsorbente, y valores menores que 1 representan interacciones más fuerte adsorbato–adsorbente. Un valor igual a 1, asume un comportamiento tipo Langmuir.

En análisis de isoterma del sistema analizado se apega a las condiciones de Freundlich lo cual indica que se trata de una superficie heterogénea plana que contiene sitios potenciales de adsorción diferentes y supone que cada uno adsorbe una sola molécula según lo reportado por Cortés Martínez (2007).

A continuación se presenta en la Tabla 16 una serie de datos que comparan el poder biosorbente de algunos materiales orgánicos utilizados con la finalidad de remover la tartrazina.

Tabla 16. Tabla comparativa de adsorción de tartrazina con distintos materiales

MATERIAL	CAPACIDAD DE ADSORCIÓN (mg TAR/ g BIOSORBENTE)	REFERENCIA
<i>Semilla de guayaba modificada con Hierro</i>	2.19	Este trabajo
Residuos de cascara de limón	0.877	Rojas, 2012
Residuos de cascara de limón acondicionada con FeCl ₃	1.22	Rojas, 2012
Carbón activado	121.3	Monser and Adhoum, 2008
Zeolita Modificada con hierro	0.443	Hernández, 2010
Zeolita acondicionada con hierro	1.006 ± 0.094	Alcántara, 2010
Zeolita sódica modificada con HDTMA- Br	1.0501	Torres, 2005
Residuos de Soya	24.6	Mittal et al, 2006
Cenizas	12.6	Mittal et al, 2006
Carbón activado de la Pirolisis de lodos residuales	14	Torres, 2007

En la Tabla 16 se observa que la semilla de guayaba triturada y modificada con Fe se encuentra muy bien posicionada en comparación a los reportados por otros autores, ya que llega a tener mejor rendimiento que la cáscara de limón natural y modificado con hierro, así como también lo reportado en 2 trabajos sobre la zeolita modificada con hierro.

7. CONCLUSIONES

- La semilla de guayaba puede ser aplicada para la remoción de colorantes de soluciones acuosas como la tartrazina ya que presenta una capacidad mucho mayor de remoción que otros biosorbentes, la cual se ve beneficiada al modificar la semilla con Cloruro Férrico y siendo aplicada en un sistema tipo lote (Batch).
- El tiempo que tarda en llegar a el equilibrio de la reacción es de 5 h con lo que al ponerse en comparación con otros biosorbentes, es muy bueno en cuanto al tiempo de equilibrio.
- En cuanto al comportamiento de la sorción a distintos pH se determinó que hay un amplio rango en el cual se ve beneficiada, ya que es estable a pH de 3 a 10 por lo que no tendrá que realizarse una modificación de la solución.
- La concentración de biosorbente necesaria para llegar a la remoción total del colorante es relativamente baja en comparación a otros biosorbentes utilizados para la remoción de tartrazina, por lo que la coloca dentro de los materiales aptos para remoción de colorantes.
- Los modelos cinéticos a los que fueron calculados los distintos tamaños de partícula nos determinan que el tamaño ideal para llevar a cabo la remoción es de 1 mm ya que registra un coeficiente de correlación de 0.9982 para el modelo de Lagergren.
- La isoterma de sorción a la que se apegó el sistema es la de Freundlich, que nos determina que se trata de una superficie heterogénea.

8. RECOMENDACIONES

Con la finalidad de mejorar el sistema que se utiliza en el proyecto, se sugieren algunas recomendaciones a aplicar posteriormente.

- Realizar dentro de los parámetros que se analizaron, la variación de temperaturas ya que es bien sabido que la adsorción se favorece al incrementar la temperatura, por lo que podría verse beneficiada al modificar la temperatura de remoción.
- Realizar un análisis más detallado para conocer cuál es el mecanismo de intercambio de elementos que se sugiere en este trabajo, en donde observamos que en el microanálisis elemental de MEB, se observa la presencia del calcio y cuando la semilla es modificada, este elemento ya no es detectable en el análisis.
- Realizar una variación en la concentración de la solución con la que se modifica el biosorbente, ya que una buena propuesta es bajarla de Fe, obteniendo los mismos resultados o subirla para acelerar la velocidad de reacción del sistema.

BIBLIOGRAFÍA

- Alzate Tamayo L. M., Jimenez Cartagena C., Londoño Londoño J., (2011).** Aprovechamiento de residuos agroindustriales para mejorar la calidad sensorial y nutricional de productos avícolas. *Revista* Vol.6, No.1 - 108•127
- Andrade (2009).** Fabián A., Ortega Q., Everaldo J., Montes M., Ramiro Torres G., Omar A. Pérez S., Mónica Castro N., Luz A. Gutiérrez S. Caracterización fisicoquímica y reológica de la pulpa de guayaba (*Psidium guajava* L.) variedades Híbrido de Klom Sali, Puerto Rico, D14 y RedD. *Vitae* vol.16 No.1 Medellín pag 13-18
- Arango Ruíz A., (2011).** Remoción del colorante azoico amaranato de soluciones acuosas mediante electrocoagulación. Pp 58-77
- Arroyave-Garcés,(2009).** Empleo del reactivo de Fenton para la degradación del colorante Tartrazina. *Revista Lasallista de Investigación* Vol. 6 No. 1 ,pp 27-34
- Arroyave-Rojas J.A., Garcés Giraldo L.F., Arango Ruiz A.J., Agudelo López C.M. (2008).** La Tartrazina, un colorante de la industria agroalimentaria, degradado mediante procesos de oxidación avanzada. *Revista Lasallista de Investigación*, Vol.5, núm.1, pp. 20-27.
- Arroyave Rojas J.A., Garcés Giraldo L.F., Arango Ruiz A.J., Agudelo López C.M.(2008)** Removal of tartrazine from aqueous solutions by strongly basic polystyrene anion Exchange resins. *Revista Lasallista De Investigación*, Vol. 5, Núm. 2, pp. 6-12
- Brunauer, S., P.H, E., (1938).** Adsorption of gases in multimolecular Layers. *Journal of the American Chemical Society*, 60: 309–319.
- Chavez-Cortes, M.M. (2007).** Usos y abusos del recurso agua. *Ciencias* 085: 30-36.
- Che García G. (2011)** Remoción De Un Colorante De Los Efluentes de la Industria Textil mediante Adsorción en una Zeolita Natural. Tesis que para obtener el grado de Maestro en Ciencias (Ingeniería Química). Universidad Autónoma Metropolitana. Mexico.
- Cortés Martínez R. (2007)** Efecto de la modificación de una Zeolita natural Mexicana en la sorción de cadmio y 4-Clorofenol, tesis para obtener el grado de Doctor en Ingeniería con énfasis en Ciencias del Agua Toluca, Estado de México
- DOF (2002).** NMX-FF-040-SCFI-2002. Productos Alimenticios No Industrializados Para Consumo Humano - Fruta Fresca - Guayaba (*Psidiumguajaval.*) – Especificaciones (Cancela A La Nmx-Ff-040-1993-Scfi

DOF (1976). NMX-F-201-1976. Alimentos, colorante Organico Sintetico Amarillo No. 5 Tartrazina. Normas Mexicanas. Direccion General de Normas.

Flores E., C Roque, R Ochoa (2013). Química del Color. Revista de Química Vol. 9. N° 2 , pp 99-109

Gil A. (2010). Bases fisiológicas y Bioquimicas de la Nutricion. Tratado de nutrición. 2° edición Editorial Medica Panamericana Capitulo 9 Pag 235- 240

Hernandez, (2010). Sorcion del cadmio en soluciones acuosas con una zeolita saturada con Tartrazina. Tesis para obtener el título de Ingeniero Quimico, Instituto Tecnológico de Toluca, Edo. De México.

Hidalgo-Vazquez, A.R. (2010). *Biosorción de plomo y cadmio mediante el aprovechamiento de residuos de madera (aserrín de pino) y extractos de algas marinas (alginato de calcio)*. Tesis de licenciatura, Facultad de Biología, Universidad Michoacana de San Nicolas de Hidalgo.

Ho Y.S., C.T. Huang y H.W. Huang (2002). Equilibrium sorption isotherm for metal ion son tree fern. Process Biochemistry.

Inga Manchola P.A. (2012) Estudios isotérmicos de biosorción de cadmio, cromo, plomo y zinc en soluciones acuosas empleando el pinzote (raquis) de plátano (musa paradisiaca L.) Universidad Politécnica Salesiana, Sede Quito.

Jiménez Cisneros, (2001). Contaminación Ambiental en México. Editorial LIMUSA, México. Pp 33-42

López Leal M.A. (2009). Aprovechamiento de los Residuos del Procesamiento de La Madera (Aserrín de Pino) para Tratamiento de aguas contaminadas con Arsénico. Tesis para obtener el Título Profesional de Bióloga .Universidad Michoacana De San Nicolás De Hidalgo, Facultad De Biología

Merchan Castellanos D. F. Salgado Castro I. K. (2009)Elaboración de un módulo computacional de diseño y simulación de columnas de adsorción para ASPEN HYSYS. Trabajo para optar por el título de Ingeniero Químico Universidad Industrial de Santander Bucaramanga.

Mittal A., Kurup L., Mittal J.(2007). Freundlich and Langmuir adsorption isotherms and kinetics for the removal of Tartrazine from aqueous solutions using hen feathers. *Journal of Hazardous Materials* 146, pp 243–248. India.

Restrepo Gallego M. (2007). Photo degradation of the tartrazine dye by means of photofenton, using an ultra violet light lamp. *Revista Lasallista de Investigación*, Vol.4, Núm.1, pp 35-39

- Rojas Sanchez M.L. (2012).** Bioadsorcion de colorantes de grado alimenticio con cascara de limón acondicionada con cloruro férrico. Tesis para obtener el título de Quimicofarmacobiologo, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. México.
- Sanchez Sánchez (2013).** Cortés-Martínez R., Alfaro-Cuevas-Villanueva R. Fluoride Removal from Aqueous Solutions by Mechanically Modified Guava Seeds. *International Journal of Sciences: Basic and Applied Research (IJSBAR)* (2013) Volume 11, No 1, pp 159-172. Facultad de Químico Farmacobiología, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Morelia, Michoacán, México.
- Tenorio-Rivas G. (2006).** Caracterización de la biosorción de cromo con hueso de aceituna. Tesis Doctoral. Facultad de Ciencias, Departamento de Ingeniería Química, Universidad de Granada. pp309, 292, 26 . España
- Torres, (2005).** Evaluación de las propiedades adsorbentes de una roca zeolita modificada para la remoción de colorantes azoicos como contaminantes del agua. Tesis para obtener el título de Químico Farmacéutico Biólogo, UAEM. Toluca, Edo. De México, México.
- Tuñón, (2008).** Apuntes de Química Física Avanzada. Departamento de Química Física Universidad de Valencia
- Valencia-Leal, (2008).** Aprovechamiento de los residuos de guayaba (*Psidium guajava*) para la disminución de los niveles de fluoruro en agua. Tesis para obtener el título de Químico Farmacobiólogo, Facultad de Químico Farmacobiología, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, México.
- Vazquez del Mercado R. , Ibarrondo Franco E., Uribe Visoso R., Larios de Anda G., Garcia Rios G. (2007).** ¡Encaucemos el agua! Curriculum y guía de actividades para maestros. Mexico IMTA, Octava reimpresión 2007
- Wan (2010),** Noorul Farhana Md Ariff; Megat Ahmad Kamal Megat Hanafiah. Preparation, Characterization, and Environmental Application of Crosslinked Chitosan-Coated Bentonite for Tartrazine Adsorption from Aqueous Solutions. *Revista Científica Water Air Soil Pollut.* Pag.225-236
- Wawrzekiewicz M., Zbigniew Hubicki Z. (2008) .** Removal of tartrazine from aqueous solutions by strongly basic polystyrene anion exchange resins. *Revista Journal of Hazardous Materials* pp 502-509
- YamTzec J.A., Villaseñor Perea C.A., Romantchik Kriuchkova E., Soto Escobar M., Peña Peralta M.A. (2010).** Una revisión sobre la importancia del fruto de Guayaba (*Psidium guajava L.*) y sus

principales características en la postcosecha. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, Vol.19 Núm.4 pp 74-82 Universidad Autónoma Chapingo, Departamento de Ingeniería Mecánica Agrícola, Chapingo, Texcoco, México.