



---

---

# **BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA**

**COLEGIO DE INGENIERÍA QUÍMICA**

**DEGRADACIÓN DE BISFENOL A UTILIZANDO CENIZA DEL ÁRBOL  
DE CHALAHUITE (INGA VERA WILLD) EN CHICONTLA EN EL  
ESTADO DE PUEBLA, SOPORTADO EN  $\text{TIO}_2$ .**

## **TESIS PROFESIONAL**

**ENERO 2023**

PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

**LICENCIATURA EN INGENIERÍA QUÍMICA**

PRESENTA:

**EMMANUEL RODRÍGUEZ CARBALLO**

ASESOR DE TESIS:

**Dr. FORTINO BAÑUELOS ROMERO**

---

---

# ÍNDICE

<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	5
<b>CAPÍTULO I</b> .....	6
<b>2. ANTECEDENTES</b> .....	6
2.1 Contaminación del Agua.....	6
2.1.1 Contaminación del agua por derivados fenólicos .....	6
2.2 El bisfenol A contenido en los Tickets de compra como contaminante del agua. 7	
Propiedades físicas y químicas .....	7
2.2.1 Usos del Bisfenol A.....	7
2.2.2 Efectos de la toxicidad del bisfenol A en la salud humana .....	8
2.2.3 Legislación Ambiental .....	8
2.3 Métodos de tratamientos .....	9
Incineración .....	9
2.3.1 Procesos de oxidación avanzada. ....	9
2.3.2 Fotocatálisis.....	12
2.3.3 El Dióxido de titanio (TiO <sub>2</sub> ) características generales.....	14
2.4 Cenizas .....	17
2.5 El árbol de Chalahuite .....	19
2.6 El árbol de Grado (Crotón draco).....	20
2.7 Relación entre la ceniza, la fotocatálisis del TiO <sub>2</sub> y el Bisfenol A. ....	22
2.8 Estudios sobre la aplicación de cenizas de cocina en el tratamiento de aguas residuales.....	23
2.9 Espectrometría de reflectancia difusa UV-Vis.....	24
2.10 La Ley de Beer .....	25
<b>CAPÍTULO II</b> .....	26
<b>3. METODOLOGÍA</b> .....	26
3.1 Preparación de los fotocatalizadores de TiO <sub>2</sub> .....	26
3.2 Preparación de la ceniza .....	27
3.3 Preparación de fotocatalizador de TiO <sub>2</sub> con 5 y 10% de ceniza del árbol de Chalahuite. ....	27

3.4 Preparación de la muestra de Bisfenol A.....	28
3.5 Optimización del sistema fotocatalítico.....	28
3.6 Actividad fotocatalítica.....	29
3.7 Espectroscopia de absorción Ultravioleta-Visible.....	30
<b>CAPÍTULO III.....</b>	<b>31</b>
<b>4. RESULTADOS Y DISCUSIONES.....</b>	<b>31</b>
4.1 Degradación de Fenol en presencia de cenizas del árbol de chalahuite.....	31
4.2 Degradación de agua contaminada del Rio Necaxa en presencia de cenizas del árbol de chalahuite.....	32
4.3 Degradación de Fenol en presencia de cenizas del árbol de grado.....	33
4.4 Bisfenol A (BFA).....	34
4.5 Adsorción de Bisfenol A en la ceniza del árbol de Chalahuite.....	35
4.6 Degradación del BFA en presencia de 10 %cenizas del árbol de chalahuite soportado en TiO <sub>2</sub> + oxígeno + radiación ultravioleta.....	36
4.7 Degradación del BFA en presencia de 5 %cenizas del árbol de chalahuite soportado en TiO <sub>2</sub> .....	37
4.8 Degradación del BFA en presencia del 100% de ceniza del árbol de chalahuite.....	38
4.9 Degradación del BFA en presencia de TiO <sub>2</sub> .....	39
4.10 Espectros.....	40
<b>5. CONCLUSIONES.....</b>	<b>42</b>
<b>6. BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>43</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Catalizadores preparados.....	28
Tabla 2. Resultados de energía de cada material.....	41

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Estructura química del BPA.....	7
Figura 2.2 Tikets de compra.....	8
Figura 2.3 Principio de la fotocatalisis en un material semiconductor. ....	13
Figura 2.4 Dióxido de Titano comercial .....	14
Figura 2.5 Estructura cristalina de las diferentes fases del TiO <sub>2</sub> . ....	15
Figura 2.6 Mineral de rutilo y brookita como se encuentran en la naturaleza.....	15
Figura 2.7 Representación de un semiconductor de TiO <sub>2</sub> y sus reacciones al ser iluminado con luz. ....	16
Figura 2.8 Utilización de las cenizas volantes en diferentes sectores.....	17
Figura 2.9 Cenizas producidas a partir de la combustión de leña de árbol de Chalahuite.....	18
Figura 2.10 Árbol Inga Vera Willd.....	19
Figura 2.11 Brasero tradicional en Chicontla utilizando leña de árbol de Chalahuite. ...	20
Figura 2.12 Árbol Croton draco. ....	21
Figura 2.13 Brasero tradicional en Chicontla utilizando leña de árbol de grado. ....	22
Figura 2.14 Términos y símbolos utilizados en las medidas de la absorción. ....	25
Figura 3.1 Oxido de TiO <sub>2</sub> marca Sigma Aldrich .....	26
Figura 3.2 Cenizas producidas a partir de la combustión del árbol de Chalahuite. ....	27
Figura 3.3 Reactor optimizado para la fotocatalisis .....	28
Figura 3.4 Recirculador de agua para mantener constante la temperatura a 25 °C en el reactor.....	29
Figura 3.5 Filtro Whatman de 0.45 micras.....	29
Figura 3.6 Espectrofotómetro UV-Vis modelo 2450 Shimadzu con esfera de integración. ....	30
Figura 4.4 Espectro de absorción de la degradación del fenol, utilizando ceniza del árbol de chalahuite. ....	31
Figura 4.8 Adsorción del BFA en la ceniza del árbol de Chalahuite.....	35

# 1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad el campo de la remediación de las aguas residuales, enfrenta el desafío para emplear métodos eficientes y materiales innovadores que puedan ser utilizados en la degradación de diferentes contaminantes. En las últimas décadas, la fotocatalisis heterogénea se ha consolidado como una de las mejores alternativas para la degradación de contaminantes tóxicos y no biodegradables presentes en las aguas residuales. Sin embargo, se siguen buscando nuevos materiales que sean eficientes como fotocatalizadores.

Algunos estudios han demostrado que las cenizas volantes que se producen en las centrales térmicas, o las cenizas que se generan a partir de la combustión de la leña en los hogares, debido a su composición química es posible utilizarlos en los tratamientos de aguas.

Con base a lo mencionado anteriormente, se realiza este trabajo de investigación en el que se lleva a cabo pruebas de absorción y la aplicación de la ceniza de árbol de Chalahuite (Inga Vera Willd) la cual se obtiene de las cocinas en la comunidad de Chicontla, Puebla, soportado en  $\text{TiO}_2$  en presencia de  $\text{O}_2$  atmosférico y radiación UV como fuente de energía en la degradación del Bisfenol A.

Si bien, se encontró que la ceniza de Chalahuite no es posible eliminar todo tipo de contaminantes, si es capaz de degradar el BFA, por lo que contribuye con nuevas metodologías accesibles para toda la comunidad y poder eliminar este contaminante de las aguas residuales.

---

---

# CAPÍTULO I

## 2. ANTECEDENTES

### 2.1 Contaminación del Agua

Uno de los grandes problemas que más nos afecta y cada vez va en aumento es la contaminación de los medios acuáticos por compuestos orgánicos e inorgánicos, disueltos o dispersos en el agua provenientes de descargas domésticas, agrícolas o industriales, lo que genera un gran impacto en los ecosistemas.

Las industrias textiles, alimenticia, de cosméticos, etc. son las principales en descargar grandes volúmenes de aguas residuales con concentraciones altas de colorantes, lo que representa un serio problema, ya que, al ser moléculas complejas, la degradación suele ser lenta y en algunos casos difíciles de llevar a cabo [1].

#### 2.1.1 Contaminación del agua por derivados fenólicos

El origen del fenol en el medio ambiente puede generarse de dos formas, tanto industrial como natural; esto provoca que sea un químico muy común.

Los fenoles son clasificados como sustancias peligrosas y son uno de los contaminantes que provoca mayor impacto ambiental aun en concentraciones bajas, además de ser una sustancia muy toxica para los seres humanos pudiendo causar efectos severos a la salud [2].

En los últimos años se han generado diversos trabajos de investigación enfocados hacia la degradación de contaminantes fenólicos ya que su presencia en los mantos acuíferos ha ido en aumento lo que representa un gran problema ambiental.

## 2.2 El bisfenol A contenido en los Tickets de compra como contaminante del agua.

### 2.2.1 Propiedades físicas y químicas

El Bisfenol A (BPA; abreviación por sus siglas en inglés) es un compuesto químico orgánico derivado del petróleo con una estructura molecular formada a partir de dos grupos funcionales fenol.

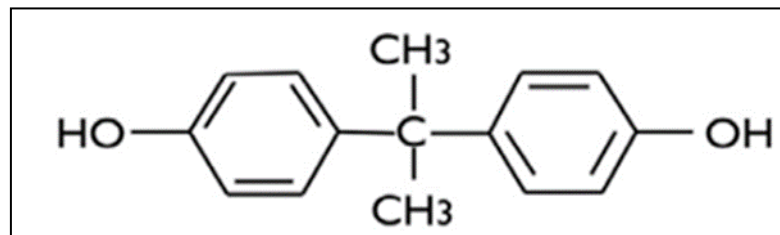


Figura 2.1 Estructura química del BPA

El BPA forma parte de un grupo de compuestos denominados disruptores endocrinos (DE) los cuales poseen propiedades con capacidad de alterar el equilibrio hormonal y causar efectos adversos para la salud de los individuos expuestos a este químico a partir de concentraciones muy bajas [3][4].

### 2.2.2 Usos del Bisfenol A

Este compuesto es de los más utilizados en la industria de polímeros, resinas epóxicas y policarbonatos; por esta razón es muy común encontrarlo en diversos objetos que manejamos en la vida cotidiana ya que es un químico con el que mayormente están fabricados muchos objetos de plásticos, además de que también se emplea en el recubrimiento interior de las latas de conserva y en la tinta de los recibos térmicos de compra entre otras cosas [4].



Figura 2.2 Tickets de compra.

## 2.2.3 Efectos de la toxicidad del bisfenol A en la salud humana

De acuerdo con las investigaciones que se han realizado acerca de los efectos que causa el BPA en el organismo de animales, se ha comprobado que tiene un comportamiento similar a las hormonas, además de que sus efectos podrían presentarse mucho tiempo después del momento de exposición. Sin embargo, la European Food Safety Authority (EFSA) ha emitido un diagnóstico científico en el que descarta que el BPA represente algún riesgo para la salud de las personas de todas las edades ya que la exposición que se tienen a este químico está muy por debajo del nivel estimado de exposición segura, conocido como ingesta diaria tolerable (IDT) [5].

## 2.2.4 Legislación Ambiental

En la actualidad no existe un control legislativo en cuanto al bisfenol A (BFA) presente en el medio ambiente, sin embargo, existen especificaciones límites de migración de bisfenol A para alimentos enlatados.

## **2.3 Métodos de tratamientos**

### **2.3.1 Incineración**

Este método al igual que la deshidratación son de los más utilizados para el tratamiento de lodos siendo la principal función reducir el volumen de la materia orgánica. La aplicación del proceso de incineración a resultado eficiente en cuanto a la reducción de peso y el volumen de los residuos, además de reducir su potencial contaminante que estos emiten, por esta razón se le considera una buena opción para reemplazar los vertederos a cielo abierto; sin embargo, se ven reflejados algunas desventajas como la generación de gases de efecto invernadero y costos elevados de operación [6].

### **2.3.2 Procesos de oxidación avanzada.**

Los Procesos o Tecnologías Avanzados de Oxidación (PAOs, TAOs) son métodos de tratamiento que se basan en procesos fisicoquímicos capaces de transformar la estructura química de los contaminantes, y no solo cambiarlas de fase como sucede en algunos métodos convencionales.

La mayoría de los PAOs son eficientes en la aplicación de la remediación y detoxificación de las aguas residuales. Por lo regular se consideran como un pretratamiento antes de un tratamiento biológico para contaminantes resistentes a la biodegradación o como proceso de postratamiento para efectuar una mejor limpieza de las aguas antes de su descarga. Debido a las grandes ventajas que estos métodos han tenido en comparación de los métodos convencionales se están consolidando como la opción más eficaz en el tratamiento de cuerpos de aguas contaminados por sustancias recalcitrantes o tóxicas [7].

Entre los PAOs se incluyen, entre otros, la fotocatalisis homogénea y heterogénea en presencia de radiación solar ultravioleta (UV) o radiación visible.

Los PAOs son un grupo de tecnologías basadas en procesos de destrucción de los contaminantes por medio de radicales hidroxilos ( $\bullet\text{OH}$ ). Poseen un alto potencial de oxidación que les permite oxidar o degradar casi la totalidad del contaminante transformándolo en compuestos más biodegradables e incluso llegar hasta la mineralización o formación de  $\text{CO}_2$ . Actualmente, están siendo implementadas en América del Norte, Europa y Japón. Los PAOs abarcan procesos como ozono/luz UV,  $\text{H}_2\text{O}_2$ /luz UV, ultrasonido, fotocátalisis heterogénea y homogénea, y tratamientos electroquímicos [8].

Los PAOs presentan varias ventajas, entre las más importantes es cuando se consigue la destrucción completa del contaminante, dándose la mineralización casi completa en la mayoría de las sustancias orgánicas hasta dióxido de carbono e iones, a diferencia de las técnicas convencionales que no son capaces de oxidar completamente la materia orgánica [9]. El proceso puede combinarse con otros (como el tratamiento biológico). Transforman químicamente la sustancia contaminante, ya que ésta es sometida a una fuerte oxidación química y no a un mero proceso de cambio de fase (arrastre, adsorción, etc.) [10]. Capacidad de tratamiento de contaminantes presentes en muy baja contaminación [11].

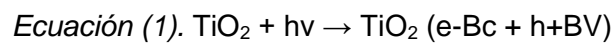
Los procesos fotoquímicos de descontaminación de agua se basan en la acción de la radiación solar sobre un fotocatalizador, es decir, un sistema sensible a los fotones y que una vez foto-estimulado puede catalizar una reacción química, en este caso la degradación de sustancias contaminantes. Entre los sistemas fotoquímicos, los sistemas que combinan luz ultravioleta (UV), óxido de titanio ( $\text{TiO}_2$ ) y peróxido de hidrógeno ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ), así como también los que incluyen UV, hierro (III) y  $\text{H}_2\text{O}_2$ , son considerados entre los más satisfactorios para la remediación de aguas contaminadas. Estos sistemas son comúnmente conocidos como fotocátalisis heterogénea y reacción foto-Fenton, respectivamente. Un amplio número de aplicaciones ha sido reportado para diferentes compuestos usando estos sistemas [12] [13], cuyo principio es el mismo: la producción de la especie  $\bullet\text{OH}$ , el cual es un poderoso agente oxidante que supera en capacidad a otros más conocidos como el ozono, el hipoclorito, el peróxido de hidrógeno o el cloro.

El mecanismo por medio del cual se efectúa la oxidación es cuando un semiconductor es excitado con luz de alta energía se originan pares electrón–hueco

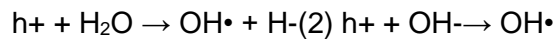
cuya vida media está en el intervalo de nanosegundos. Estos pares pueden llevar a cabo varios procesos.

Migrar a la superficie y reaccionar con especies adsorbidas generando procesos de oxidación y de reducción con los huecos y electrones respectivamente

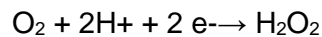
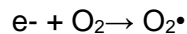
Al iluminar a un semiconductor (por ejemplo,  $\text{TiO}_2$ ) con luz ultravioleta con energía igual o superior a su band gap, origina transiciones electrónicas a la banda de conducción y huecos positivos en la banda de valencia (par electrón-hueco).



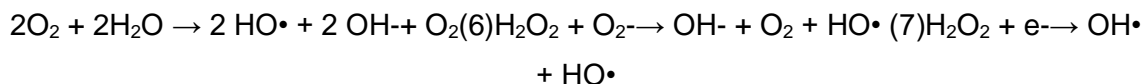
En la superficie del  $\text{TiO}_2$ , los huecos reaccionan con el  $\text{H}_2\text{O}$  adsorbida como con grupos  $\text{OH}^-$  para formar radicales hidroxilos ( $\text{OH}\cdot$ )



Por su parte, los electrones en exceso de la banda de conducción reaccionan con el oxígeno molecular que actúa como aceptor de electrones para formar radicales superóxido y peróxido de hidrógeno:



Tanto el radical superóxido como el peróxido de hidrógeno generan más radicales hidroxilos mediante las siguientes reacciones:



Finalmente, los radicales hidroxilos generados, son capaces de atacar y oxidar los compuestos orgánicos presentes.

### 2.3.3 Fotocatálisis

De acuerdo con el Glosario de términos utilizados en fotocatalisis y catálisis por radiación (recomendaciones IUPAC 2011), la fotocatalisis es uno de los procesos de oxidación avanzada que se define como “cambio en la velocidad de una reacción química o su inicio bajo la acción de radiación ultravioleta, visible o infrarroja en la presencia de una sustancia, el fotocatalizador, que absorbe la luz y participa en la transformación química de los socios de reacción” y el fotocatalizador se define como una “sustancia capaz de producir, por absorción de radiación ultravioleta, visible o infrarroja, transformaciones químicas de los socios de reacción, viniendo repetidamente con ellos a interacciones químicas intermedias y regenerando su composición química después de cada ciclo de dichas interacciones”.

A grandes rasgos la fotocatalisis imita el proceso de fotosíntesis de las plantas, transformando la energía solar en energía química para desarrollar diferentes procesos. En el proceso fotocatalítico ocurren tanto reacciones de oxidación como de reducción.

En la figura 2.3 se puede apreciar cómo es que ocurre el proceso de la fotocatalisis, el cual inicia con la generación de un par de electrón-hueco en las partículas del semiconductor, y esto sucede cuando en la banda de valencia llena de electrones (VB) es excitado por fotorradiación, es decir, un fotón con energía  $E=h\nu$ , que iguala o supera la energía del salto de banda del semiconductor,  $E_g$ , influye sobre éste, lo que provoca que un electrón,  $e^-$ , salte de la banda de valencia hacia la banda de conducción (CB), que está separada por una banda prohibida, dejando un agujero positivo en la VB. Estos electrones y huecos positivos impulsan la reducción y

oxidación, respectivamente, de los compuestos adsorbidos en la superficie de un fotocatalizador [14].

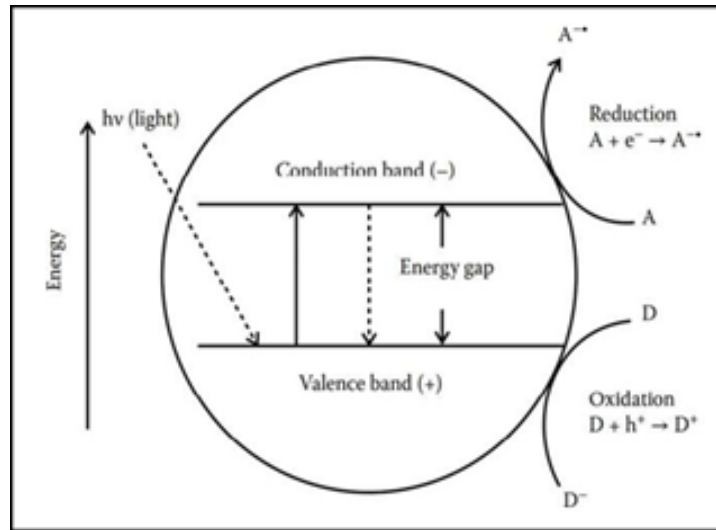


Figura 2.3 Principio de la fotocatalisis en un material semiconductor.

Como se menciona anteriormente, en el proceso fotocatalítico se puede llevar a cabo dos tipos de reacciones, lo que permite su aplicación para la oxidación de compuestos orgánicos y reducción de iones inorgánicos como reducción de otros compuestos orgánicos.

Existen 2 tipos de fotocatalisis, las cuales son la fotocatalisis homogénea y heterogénea y la principal diferencia entre estas dos se debe a la fase en las que se lleva a cabo el proceso, es decir, en la fotocatalisis homogénea, tanto los reactivos como los fotocatalizadores se encuentran en la misma fase, por otro lado, en la fotocatalisis heterogénea se utiliza un catalizador en una fase diferente de los reactivos [15].

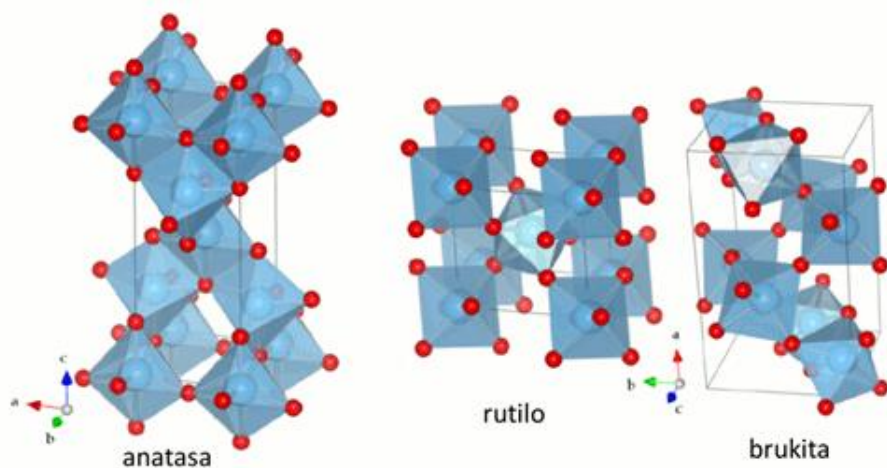
### 2.3.4 El Dióxido de titanio (TiO<sub>2</sub>) características generales.

En la última década, diversos estudios sobre la fotocatalisis de TiO<sub>2</sub> han demostrado que es uno de los fotocatalizadores por excelencia debido a su estabilidad química, no toxicidad y bajo costo; por estas características que este material posee, la fotocatalisis heterogénea de TiO<sub>2</sub> se ha expandido muy rápidamente. En la Figura 2.4 se puede observar el aspecto físico que tiene el TiO<sub>2</sub> comercial.



*Figura 2.4 Dióxido de Titanio comercial*

El TiO<sub>2</sub> se encuentra principalmente en la naturaleza como los siguientes minerales: rutilo, anatasa y brookita; las cuales se pueden apreciar su estructura cristalina de cada fase en la figura 2.5. Entre estas tres fases, la fase de rutilo es la más estable, mientras que las otras dos fases son las metaestables, es decir a temperaturas elevadas pueden transformarse irreversiblemente en la fase de rutilo [16].



*Figura 2.5 Estructura cristalina de las diferentes fases del TiO<sub>2</sub>.*

En base a las diferentes características de las tres fases de TiO<sub>2</sub>, han sido ampliamente utilizadas en diferentes campos. La figura 2.6 muestra el aspecto físico que tienen los minerales rutilo y brookita.

Actualmente, el gran interés en la fotocatalisis de TiO<sub>2</sub> todavía se concentra en las aplicaciones de conversión de energía solar (es decir, división fotocatalítica de H<sub>2</sub>O, degradación de desechos industriales y conversión de biomasa), que se llevan a cabo principalmente con las fases de rutilo y anatasa.



*Figura 2.6 Mineral de rutilo y brookita como se encuentran en la naturaleza.*

Por otro lado, el  $\text{TiO}_2$  tiene como desventaja su gran banda prohibida; las bandas prohibidas de los materiales de anatasa y rutilo a granel son de 3,20 y 3,02 eV (lo que corresponde a 384 y 410 nm), es decir solo puede absorber  $\approx 5\%$  del espectro solar. Sin embargo, el  $\text{TiO}_2$  sirve como un buen fotocatalizador semiconductor prototípico para investigar los pasos elementales y los procesos de transferencia de carga/energía de la fotocatalisis, lo cual es muy beneficioso para la caracterización de nuevos procesos fotocatalíticos y el desarrollo de nuevos fotocatalizadores (ver figura 2.7).

En comparación con el rutilo, la anatasa tiene un área de superficie mayor, lo que resulta en sitios más activos. Además, la banda prohibida más grande de la anatasa hace que tenga una capacidad redox ligeramente más alta que el rutilo, lo que hace ser más activa que el rutilo [17].

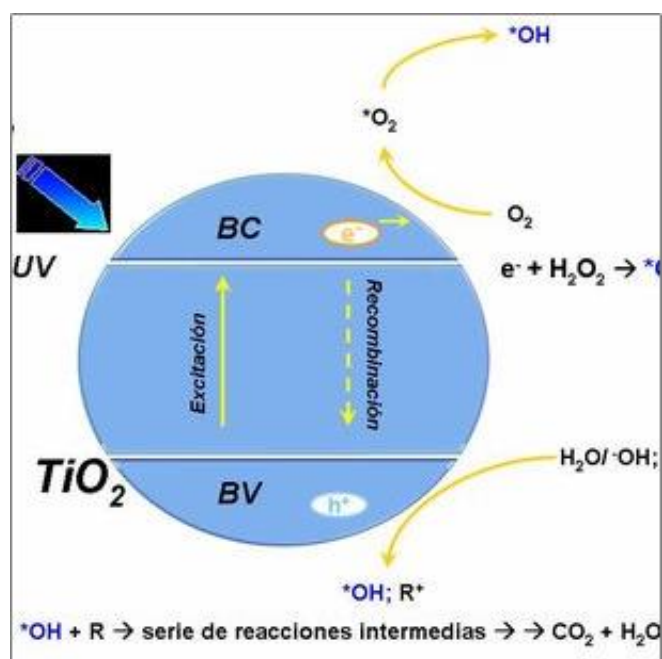


Figura 2.7 Representación de un semiconductor de  $\text{TiO}_2$  y sus reacciones al ser iluminado con luz.

## 2.4 Cenizas

La ceniza volante son residuos sólidos pulverizados generados como subproducto de la combustión del carbón, que es considerado como un contaminante ambiental. Además de las C.V., en la combustión del carbón se producen las cenizas del hogar, las cuales son residuos sólidos procedentes de la combustión de carbón pulverizado y su tamaño es superior al de las cenizas volantes. La composición química de las cenizas volantes como las del hogar depende del tipo de carbón y de la temperatura de combustión; la presencia de metales pesados como mercurio, cadmio, cobre, cromo, plomo, etc., provoca la toxicidad de las cenizas [18].

Sin embargo, en las últimas décadas se han estudiado las propiedades que poseen estas cenizas para darles una aplicación y como resultado se encontró que son efectivas en la producción de cemento y para la eliminación de diversos contaminantes ya que es un gran adsorbente que resulta ser prometedor en el tratamiento de aguas residuales. Además, con el desarrollo de la ciencia y la tecnología se está potenciando las aplicaciones industriales que pueden tener las cenizas volantes, las cuales se muestran en la figura 2.8, como fertilizante en agricultura, construcción de ladrillos, producción de cerámica y zeolitas, adsorbente de gases entre otras.

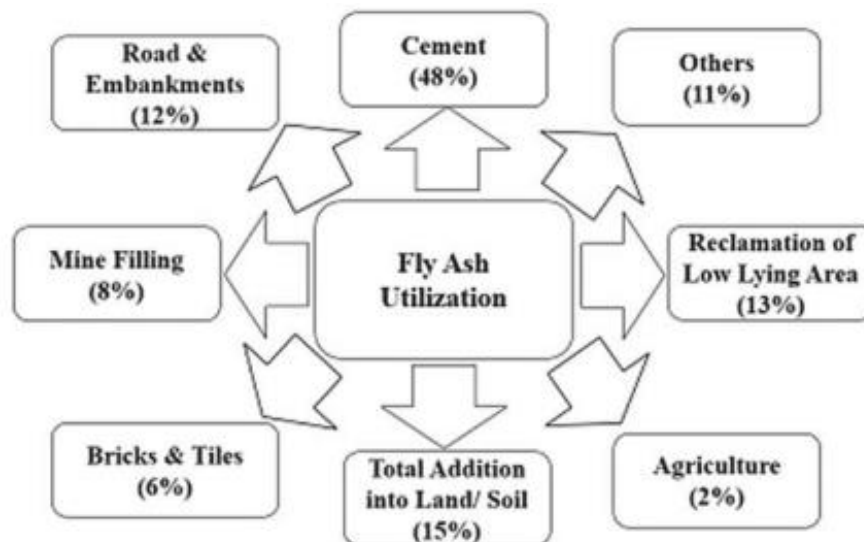


Figura 2.8 Utilización de las cenizas volantes en diferentes sectores.

Las centrales térmicas son una de las fuentes principales que generan grandes cantidades de cenizas volantes, por otro lado, en diversas comunidades rurales aún se siguen utilizando cocinas de leña en la que se producen cenizas como se muestra en la figura 2.9 y algunas de las preocupaciones que se tienen son: la contaminación del aire, contaminación del agua, manejo y disposición efectiva de las cenizas.

Las cenizas volantes tienen una composición química y físicas determinadas debido al tipo de procedencia del carbón y el tipo de proceso de combustión, teniendo diversos metales que pueden llegar a diferentes corrientes de agua, se han identificado diversos elementos en las cenizas volantes como son: Calcio, aluminio, bromo, cobre, hierro, níquel, estroncio, magnesio, manganeso, vanadio, plomo, estaño cinc, mercurio, boro, titanio, arsénico, además solamente ocasionan riesgo toxicológico los metales pesados.

Actualmente la aplicación de las cenizas volantes como alternativa en el tratamiento de aguas residuales resulta ser económico y eficaz. Se suelen utilizar como fotocatalizadores o como material de soporte para un fotocatalizador, así como también en el método de adsorción para la eliminación de metales tóxicos, materia orgánica como compuestos fenólicos y pesticidas, eliminación de colorantes entre otros contaminantes [19].



*Figura 2.9 Cenizas producidas a partir de la combustión de leña de árbol de Chalahuite.*

Las cenizas contienen algunos fotoactivos como  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$  y  $\text{TiO}_2$  en pequeñas cantidades, por esta razón se ha demostrado que son eficientes como fotocatalizadores únicos o combinados con otros materiales fotocatalíticos.

## 2.5 El árbol de Chalahuite

El árbol de Chalahuite como comúnmente es conocido en el estado de Hidalgo, Puebla, Veracruz, Querétaro es uno de los árboles pertenecientes a la familia de las leguminosas de nombre científico *Inga Vera Willd*, es una de las especies que más abundan en algunos de los estados del país de México como son Tamaulipas, Puebla, Veracruz, Oaxaca, Querétaro y Chiapas.

Su distribución abunda en climas tropicales como subtropicales, además, crecen en una gran variedad de tipos de suelo y a elevaciones de hasta 1,000 m sobre el nivel del mar, por estas características que posee se encuentra relacionada con una gran variedad de especies forestales. Debido a la posición geográfica en la que se encuentra la comunidad de Chicontla, específicamente en la sierra norte del estado de Puebla, cuenta con una gran distribución de este árbol por lo que es bastante cada encontrarlo en cada rincón de la región.



*Figura 2.10* Árbol *Inga Vera Willd*

Los árboles pueden llegar a medir hasta 30 cm de diámetro a la altura del pecho y alcanzar una altura de hasta 20 m (figura 2.10); uno de los usos primarios que tiene es proporcionar sombra a las plantas de café, de igual forma es utilizado para obtener madera y emplearla en las construcciones rurales, vigas y además es considerado como una excelente leña la cual es muy común encontrarlo en los hogares que se encuentran en la región tal y como se muestra en la figura 2.11 [20][21].



*Figura 2.11 Braseiro tradicional en Chicontla utilizando leña de árbol de Chalahuite.*

## **2.6 El árbol de Grado (Crotón draco)**

El nombre científico del árbol de sangre de grado es *Crotón draco* y proviene de la familia Euphorbiaceae que se caracterizan por producir un exudado color rojo, el cual es llamado látex y su aspecto se asemeja al de la sangre, de ahí el nombre común por el que se le conoce. Estos árboles pueden alcanzar una altura de hasta 20 m y crecen en regiones tropicales y subtropicales (ver figura 2.12); dentro del territorio mexicano se pueden encontrar en los estados de Hidalgo, San Luis Potosí, Puebla, Veracruz, y Tabasco.



*Figura 2.12 Árbol Croton draco.*

Algunos de las aplicaciones que se le da a este árbol es para uso medicinal ya que por sus propiedades que posee su corteza ha ayudado para el tratamiento de varios padecimientos como gastritis, diarreas crónicas, como cicatrizante, quemaduras entre otras cosas, y la resina que produce se utiliza como colorante para barnices y mármoles [22][23].

En la zona de la sierra norte de Puebla el uso más común que se le da es para la obtención de pulpa para papel y como leña, ya que para muchos es considerado como de los mejores recursos al igual que el chalahuite para la utilización en la cocina, debido a que abunda en la zona y al quemarse esta no produce mucho humo y al mismo tiempo suele ser duradero durante su combustión (ver figura 2.13).



*Figura 2.13 Brasero tradicional en Chicontla utilizando leña de árbol de grado.*

## **2.7 Relación entre la ceniza, la fotocátalisis del $\text{TiO}_2$ y el Bisfenol A.**

El tratamiento de aguas residuales sigue siendo una de las prioridades de diversos centros de investigación alrededor del mundo en el que se desarrollan alternativas para poder llevar a cabo la remediación de las aguas contaminadas y que en la actualidad es más común encontrar presencia de compuestos químicos como el Bisfenol A, lo que ha generado una mayor preocupación debido a su toxicidad. Algunos de los tratamientos no son lo suficientemente efectivos para la degradación del BFA o resultan ser muy costosos, por lo que se sigue trabajando en mejorar estos procesos.

En los últimos años se ha logrado comprobar que la fotocátalisis es una excelente opción para la degradación de diversos tipos de contaminantes presentes en las aguas residuales y esto depende del fotocatalizador que se emplea, siendo el  $\text{TiO}_2$  el fotocatalizador más utilizado debido a las características que tiene y a su eficiencia de reacción con compuestos químicos como el BFA.

La obtención del dióxido de Titanio es un proceso costoso, es por eso que se buscan alternativas que reduzcan su costo o mejoren su eficiencia en la degradación de contaminantes. Por otro lado, se han comenzado a estudiar los efectos que tienen las cenizas volantes en el tratamiento de aguas residuales y ha generado buenos resultados debido a sus propiedades de adsorción y además, la obtención de estas cenizas no representaría costos elevados, ya que son desechos que se consideran como un contaminante ambiental que se producen en grandes cantidades en centrales térmicas y en cocinas rurales como consecuencia de la combustión de la leña, mismas que aún se siguen utilizando en varias comunidades de nuestro País.

Con base a los argumentos mencionados anteriormente, en este proyecto de investigación se pretende estudiar los efectos que tendría utilizar la ceniza de la leña del árbol de Chalahuite que se obtienen en las cocinas rurales soportado en  $TiO_2$  para la degradación el Bisfenol A.

## **2.8 Estudios sobre la aplicación de cenizas de cocina en el tratamiento de aguas residuales.**

Hay varios artículos de investigación publicados que abordan la utilización de cenizas volantes como adsorbente de bajo costo para el tratamiento de aguas residuales, pero la mayoría de los artículos solo se enfocan en la eliminación de metales pesados o tintes orgánicos. Solo unos pocos artículos destacaron la eliminación de otros compuestos orgánicos como pesticidas y productos farmacéuticos. Además, mencionan las ventajas de las cenizas y otros adsorbentes como zeolitas y geopolímeros derivados de cenizas volantes como adsorbentes de bajo costo para la eliminación de una amplia gama de contaminantes, incluidos tintes, metales pesados, pesticidas y compuestos farmacéuticos.

Sin embargo, hasta el día de hoy no se han encontrado investigaciones sobre el uso de las cenizas de árbol Inga Vera Willd, conocido comúnmente como Chalahuite para la degradación de contaminantes como el Bisfenol A.

## 2.9 Espectrometría de reflectancia difusa UV-Vis

Las propiedades más inmediatamente observables en las dispersiones de partículas metálicas y semiconductoras son las ópticas (colores) que tienen un gran valor tecnológico. Estas propiedades son frecuentemente elucidadas a través de la espectroscopia de absorción óptica en la región UV-VIS [24][25], la cual es una técnica donde se realiza la medición e interpretación del cambio en la radiación electromagnética absorbida o emitida por las partículas.

El efecto físico de la absorción de la luz por las nanopartículas metálicas es la oscilación coherente de los electrones de la banda de conducción en respuesta a la interacción con el campo electromagnético. Ésta es conocida como resonancia de plasmones de superficie RPS (surface plasmon resonance) y es de hecho un efecto de tamaño, porque está ausente tanto en los átomos individuales como en los materiales en bulto. La presencia de esta banda en la región visible del espectro es responsable de los atractivos colores de las soluciones coloidales de algunas partículas metálicas.

Así, para nanopartículas metálicas o semiconductoras, la espectroscopia UV-Vis es la herramienta indispensable para iniciar su caracterización.

La espectroscopía ultravioleta-visible nos permitirá determinar los espectros de absorción aplicando la metodología de Kubelka-Munk para muestras sólidas con el fin de calcular los valores de energía de banda prohibida ( $E_g$ ) de materiales puros o modificados. Esta energía determinará la región del espectro electromagnético en donde es activado el fotocatalizador para llevar a cabo las reacciones de óxido-reducción.

La técnica también se utilizará para monitorear las bandas características de los contaminantes que se absorban en esta región y observar la evolución de estas conforme pasa el tiempo al ser sometidas a una fuente de radiación. Adicionalmente esta técnica nos proporciona una herramienta para seguir la evolución del crecimiento de partículas metálicas sintetizadas por técnicas como puede ser coloidal (al monitorear el plasmón superficial de las mismas), para su posterior impregnación en los soportes tradicionales o modificadas.

El equipo que se utilizará para estas mediciones es un Espectrofotómetro UV-Vis modelo UV-vis-2450 Shimadzu contiene una esfera de integración con soporte para materiales sólidos, líquidos, coloides, películas semitransparentes.

## 2.10 La Ley de Beer

La ley de Beer es una relación empírica que relaciona la luz absorbida con las propiedades del material por el cual está atravesando. Esta relación demuestra que la absorbancia depende del tipo de sustancia por la que atraviesa la luz, la distancia que recorre la luz y la concentración de la sustancia.

$$A = -\log T = \log \frac{P_0}{P} = \epsilon bc$$

Término y símbolo*	Definición	Nombre y símbolo alternativo
Potencia radiante $P, P_0$	Energía (en ergios) de la radiación que incide en el detector, por $\text{cm}^2$ y por segundo	Intensidad de la radiación $I, I_0$
Absorbancia $A$	$\log \frac{P_0}{P}$	Densidad óptica $D$ ; extinción $E$
Transmitancia $T$	$\frac{P}{P_0}$	Transmisión $T$
Camino óptico de la radiación† $b$	—	$l, d$
Absortividad† $a$	$\frac{A}{bc}$	Coefficiente de extinción $k$
Absortividad molar‡ $\epsilon$	$\frac{A}{bc}$	Coefficiente de extinción molar

Figura 2.14 Términos y símbolos utilizados en las medidas de la absorción.

Cuando un rayo de luz monocromática pasa a través de un medio absorbente su intensidad disminuye exponencialmente a medida que la longitud del medio absorbente aumenta.

---

---

## CAPÍTULO II

### 3. METODOLOGÍA

#### 3.1 Preparación de los fotocatalizadores de $\text{TiO}_2$ .

Se prepara por el método de impregnación húmeda el  $\text{TiO}_2$  comercial de la marca Sigma Aldrich (peso molecular: 81.39 g/mol), se utiliza en la preparación de fotocatalizadores con impurezas de cenizas.



*Figura 3.1 Oxido de  $\text{TiO}_2$  marca Sigma Aldrich*

La síntesis de los fotocatalizadores dopados se realizo de la siguiente manera:

1. En una balanza digital marca Shimadzu, se pesan 5 g de  $\text{TiO}_2$  y se colocan en un vaso de precipitado.
2. Se adiciona agua hasta cubrir el soporte de  $\text{TiO}_2$  en agitación constante
3. Se evapora el agua a  $80^\circ\text{C}$  en una parrilla eléctrica con agitación.
4. Se calcina la muestra en un horno de la marca Thermo scientific a  $500^\circ\text{C}$

### 3.2 Preparación de la ceniza

La ceniza del árbol de Chalahuite se filtra para eliminar impurezas mediante una malla metálica (figura 3.2).



*Figura 3.2 Cenizas producidas a partir de la combustión del árbol de Chalahuite.*

Posteriormente en una mufla Thermo scientific se calcina a 500°C.

### 3.3 Preparación de fotocatalizador de TiO<sub>2</sub> con 5 y 10% de ceniza del árbol de Chalahuite.

1. En una balanza digital, se pesan 4.75 g de TiO<sub>2</sub> y se colocan en un vaso de precipitado.
2. Se adiciona agua hasta cubrir el soporte de TiO<sub>2</sub>, en agitación constante
3. Se adiciona lentamente el 5% en peso de ceniza del árbol de chalahuite (0.25 g).
4. Se evapora el agua a 80°C en una parrilla eléctrica con agitación.
5. Se calcina la muestra en un horno de la marca Thermo scientific a 500°C
6. Se repite el proceso para la preparación de la muestra de 10% de ceniza (0.5g) en TiO<sub>2</sub> (tabla 1).

Tabla 1. Catalizadores preparados.

Catalizador
Ceniza del árbol de Chalahuite
5% Ceniza/TiO <sub>2</sub>
10% Ceniza/TiO <sub>2</sub>

### 3.4 Preparación de la muestra de Bisfenol A

En un matraz de un litro se colocó 1 gr de tikets y 500 mL de Agua, se mantuvo durante 24 horas, posteriormente se quitaron los tikets y se ajustó la concentración de la muestra a 50 ppm.

### 3.5 Optimización del sistema fotocatalítico.

La optimización del reactor se realizó, introduciendo un flujo constante de 40 mL/min de aire, mediante una bomba de aire de pecera, la agitación se mantuvo constante, se irradió con una lámpara Ultravioleta tipo lápiz que emite radiación en 254 nm. Se introdujo 1g de fotocatalizador. Se mantuvo la reacción a 25 °C mediante un recirculador, como se muestra en las figuras 3.3 y 3.4.

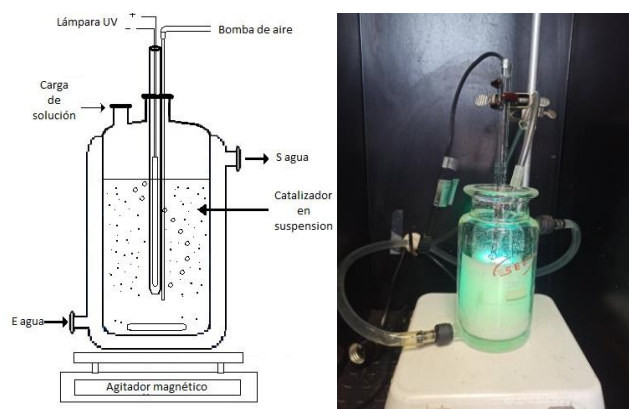


Figura 3.3 Reactor optimizado para la fotocatalisis



*Figura 3.4 Recirculador de agua para mantener constante la temperatura a 25 °C en el reactor.*

### **3.6 Actividad fotocatalítica.**

La actividad fotocatalítica se evalúa mediante el seguimiento de degradación del Bisfenol A de la siguiente manera:

1. Se mide la adsorción (ADS) del bisfenol A en oscuridad durante 1 h.
2. Se mide la actividad fotocatalítica al inicio (hora cero), posteriormente se realiza la medición cada hora.
3. Las muestras se filtran mediante un filtro marca Whatman de 0.45 micras (figura 3.5)
4. La actividad fotocatalítica se miden en un espectrofotómetro UV-Vis.



*Figura 3.5 Filtro Whatman de 0.45 micras.*

### 3.7 Espectroscopia de absorción Ultravioleta-Visible.

Mediante la extrapolación de la sección lineal del espectro de reflectancia difusa con respecto al eje X es posible calcular los valores de energía de banda prohibida determinando la región del espectro electromagnético que activa al fotocatalizador. La técnica UV-Vis se emplea dar seguimiento a la evolución de las reacciones de Oxido reducción de contaminantes para su degradación.

En este trabajo de investigación se utiliza un Espectrofotómetro UV-Vis modelo 2450 Shimadzu equipado con una esfera de integración ISR-2200 (figura 3.6).



*Figura 3.6 Espectrofotómetro UV-Vis modelo 2450 Shimadzu con esfera de integración.*

---

---

## CAPÍTULO III

### 4. RESULTADOS Y DISCUSIONES

#### 4.1 Degradación de Fenol en presencia de cenizas del árbol de chalahuite

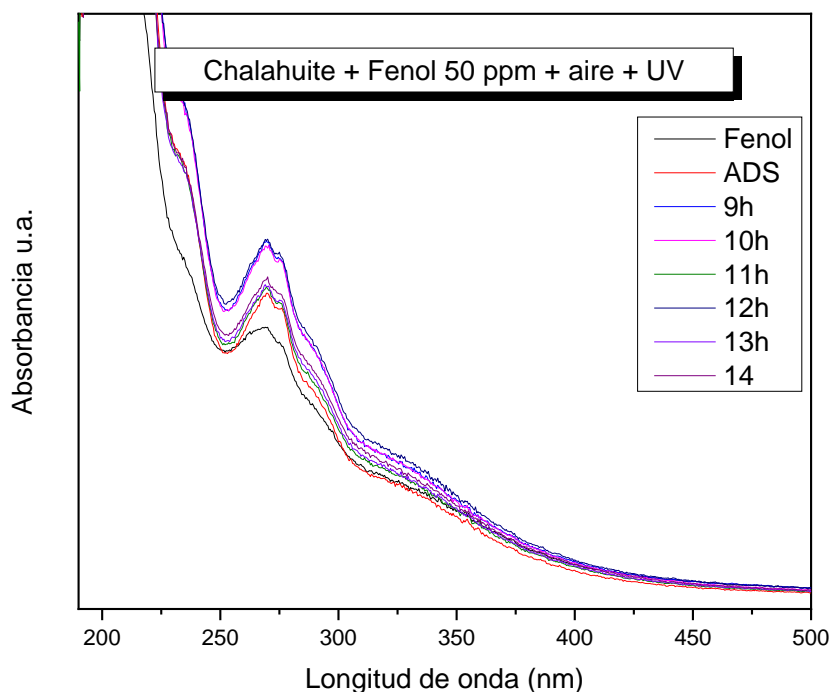


Figura 4.4 Espectro de absorción de la degradación del fenol, utilizando ceniza del árbol de chalahuite.

Con el objetivo de eliminar contaminantes emergentes presentes en agua residual, se realiza una serie de experimentos para determinar la posible absorción o eliminación de fenol utilizando ceniza del árbol de Chalahuite.

Para desarrollar este proceso se utiliza fenol con una concentración de 50 ppm en las condiciones del reactor optimizado, el resultado se muestra en la figura 4.4. Observándose que la ceniza del árbol de chalahuite elimina una pequeña parte del fenol transformándolos en subproductos de degradación, estos subproductos ocasionan que el máximo en 269 nm se incrementa la intensidad de absorción hasta llegar a 14 horas y se estabiliza, es decir no cambia la reacción, es debido a la presencia de subproductos y estos no son degradados por la ceniza del árbol de chalahuite.

## 4.2 Degradación de agua contaminada del Rio Necaxa en presencia de cenizas del árbol de chalahuite

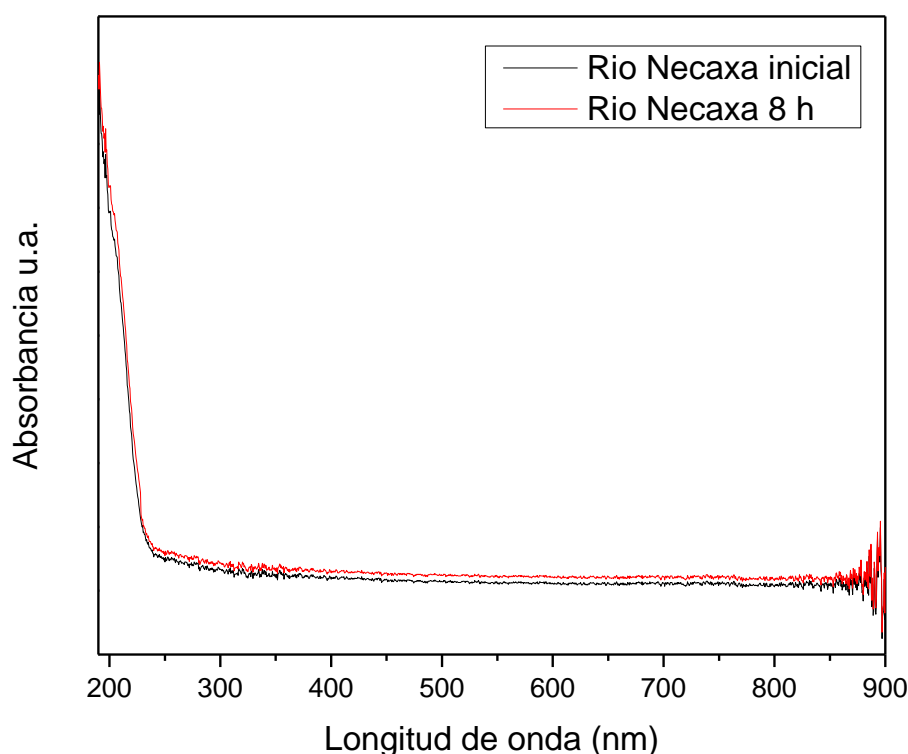


Figura 4.5 espectro de absorción del agua del río Necaxa antes y después de 14 horas de reacción.

En un primer intento de aplicar la ceniza de los árboles en la sierra norte de Puebla, en la remediación del agua del Rio Necaxa, se utilizaron 200 mL de agua del Rio Necaxa y 1 g de ceniza del árbol de Chalahuite, 40 mL/min de aire atmosférico como fuente oxidante, se mantuvo la temperatura en 25 °C durante toda la reacción utilizando un recirculador y en presencia de radiación UV como fuente de energía, sin embargo, no se observó cambio en la gráfica 4.5 después de 14 h de reacción, indicando que no fue posible descontaminar el Agua del Rio Necaxa por el método fotocatalítico.

### 4.3 Degradación de Fenol en presencia de cenizas del árbol de grado

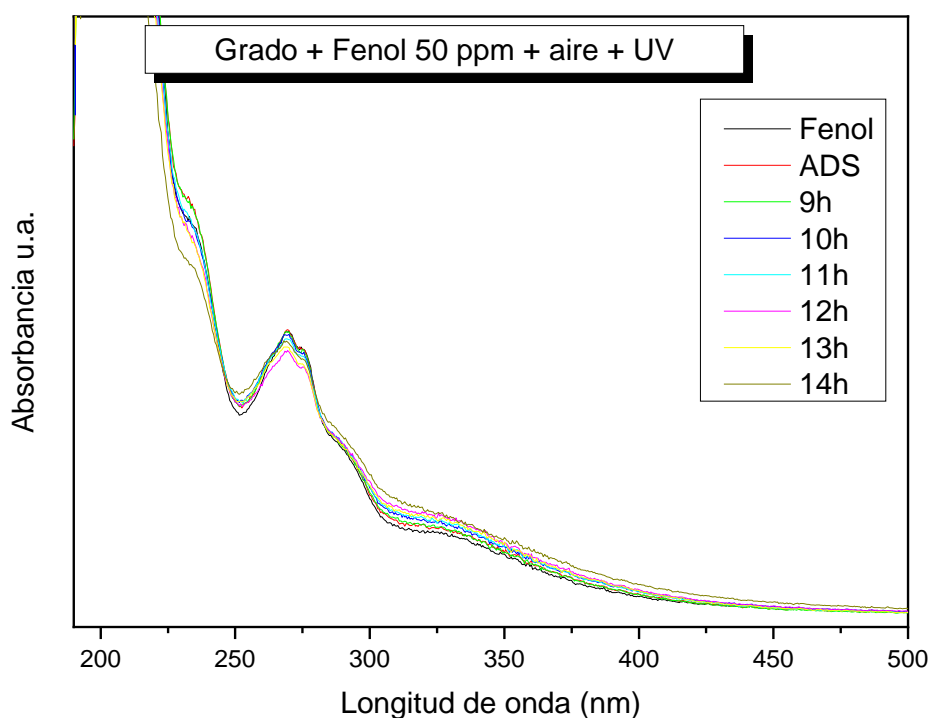
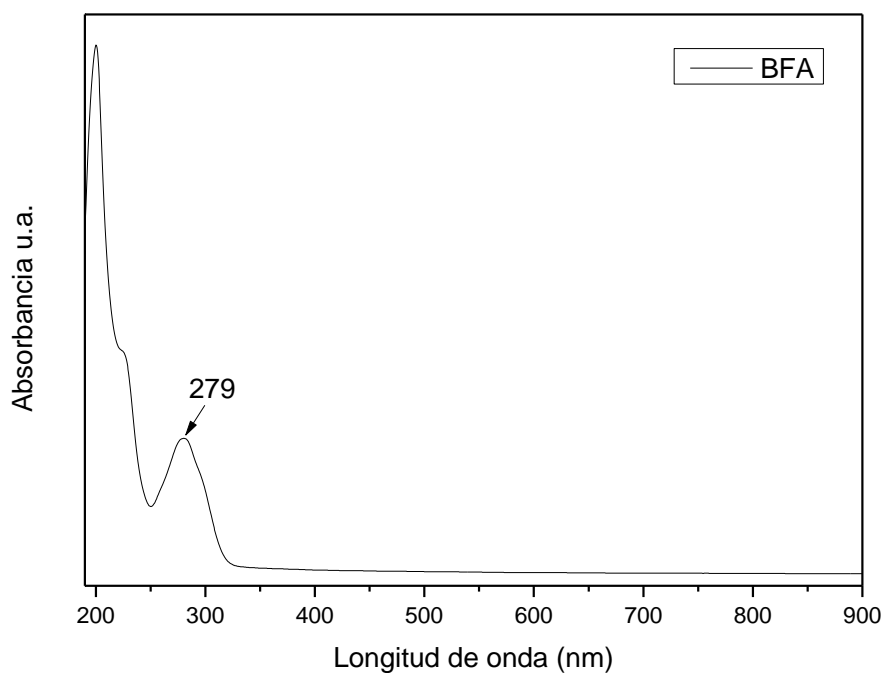


Figura 4.6 espectros de absorción de la ceniza del árbol de grado en 50 ppm de fenol.

Para la absorción o eliminación del Fenol se utiliza ceniza del árbol de Grado y fenol a una concentración de 50 ppm.

El resultado se muestra en la figura 4.6 después de 14 horas de reacción, se observa que no se lleva a cabo adsorción o degradación debido a que el máximo de absorción en 269 nm como se observa en el espectro de la figura 4.6, después de 14 horas de reacción, los espectros se mantienen sin cambio, se puede decir que no es posible absorber ni eliminar el Fenol.

#### 4.4 Bisfenol A (BFA)



*Figura 4.7 espectro característico del Bisfenol A, con una concentración de 50 ppm.*

El bisfenol A se caracteriza por la banda características en 279 nm como se muestra en la figura 4.7.

## 4.5 Adsorción de Bisfenol A en la ceniza del árbol de Chalahuite

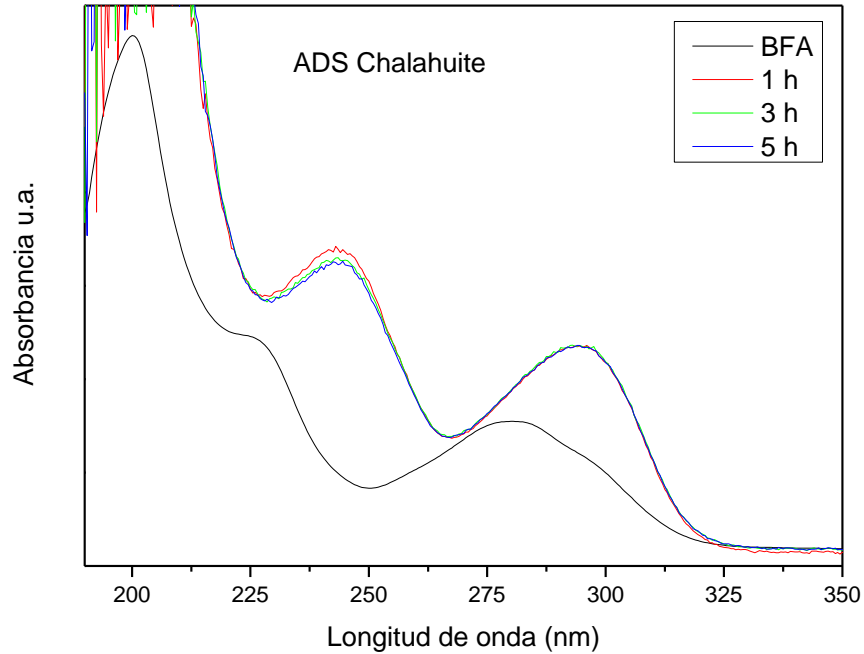


Figura 4.8 Adsorción del BFA en la ceniza del árbol de Chalahuite.

Existe un desplazamiento hacia el rojo, efecto conocido como batocrómico es debido a la modificación de varios efectos en la molécula del bisfenol A, pudiendo ser el cambio de acidez. Y el efecto hacia la parte superior puede deberse a efecto de adsorción y desorción en equilibrio en el tiempo.

## 4.6 Degradación del BFA en presencia de 10 % cenizas del árbol de chalahuite soportado en $\text{TiO}_2$ + oxígeno + radiación ultravioleta

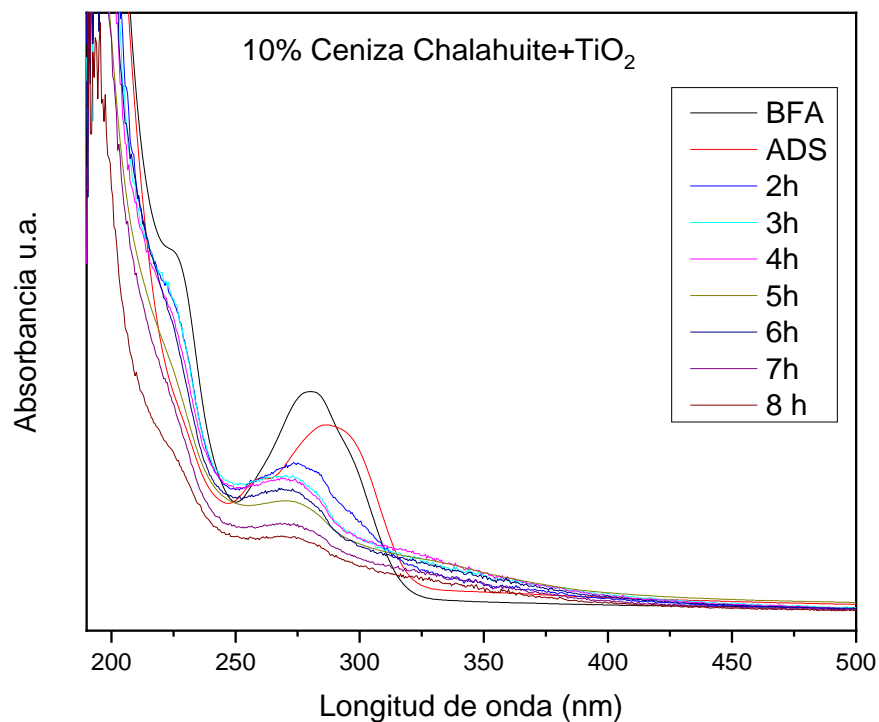
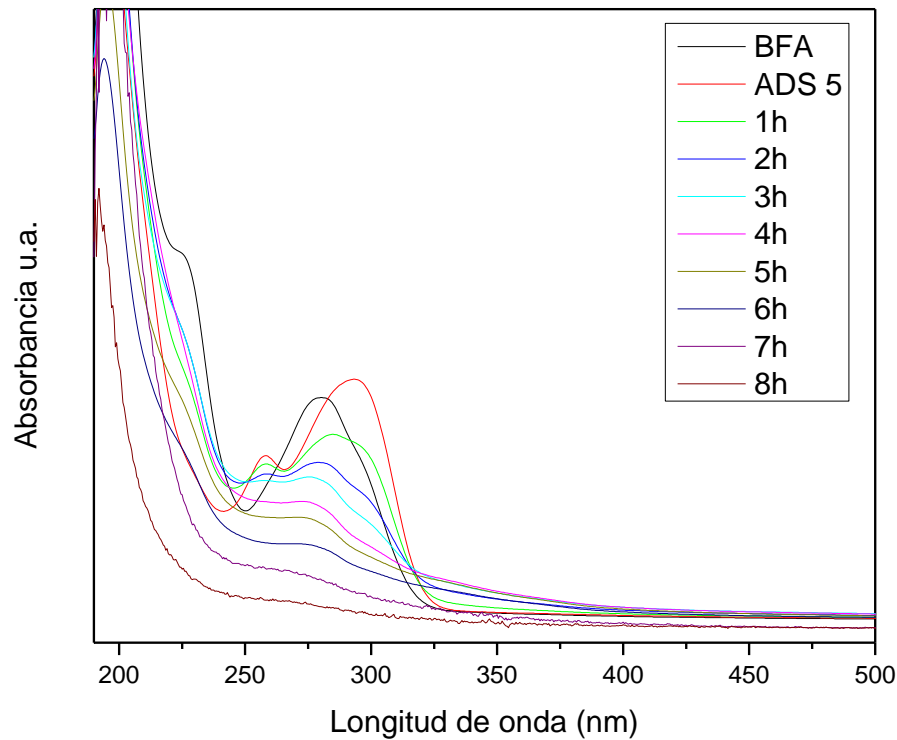


Figura 4.9 Degradación del BFA utilizando como fotocatalizador 10 % de ceniza del árbol de chalahuite soportados en  $\text{TiO}_2$ .

La degradación del BFA mediante un fotocatalizador que contiene 10 % de ceniza del árbol de chalahuite soportado en  $\text{TiO}_2$ , como se observa en la figura 4.9, se observa que durante el proceso de adsorción se tiene un corrimiento batocrómico, puede ser debido al cambio que sufre la molécula como se explicó anteriormente, sin embargo, a las 2 horas de reacción inicia la degradación del BFA. A las 8 horas tenemos aproximadamente 90 % de degradación.

## 4.7 Degradación del BFA en presencia de 5 %cenizas del árbol de chalahuite soportado en TiO<sub>2</sub>



*Figura 4.10 5% ceniza del árbol de chalahuite en tio2*

La figura 4.10 muestra que después de 1 hora de reacción, se puede ver un corrimiento de la banda del BFA hacia la derecha es debido a la formación de subproductos durante la degradación, a las 8 horas observamos que el BFA se ha degradado por completo.

## 4.8 Degradación del BFA en presencia del 100% de ceniza del árbol de chalahuite.

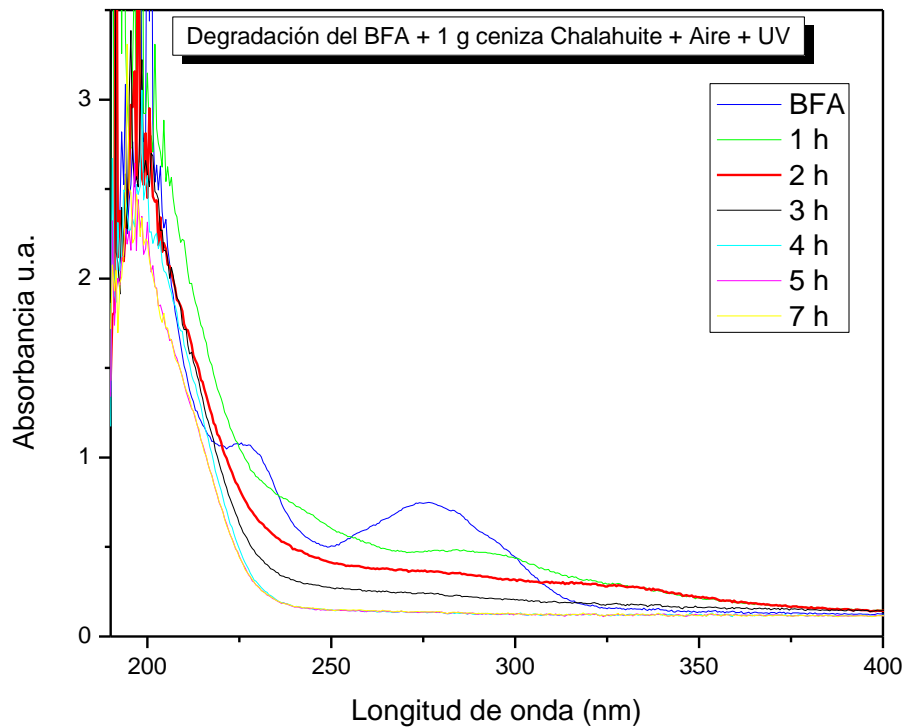


Figura 4.11 Degradación de BFA utilizando 100% de ceniza del árbol de chalahuite.

Para la degradación del Bisfenol A se utiliza 100% de ceniza del árbol de Chalahuite a una concentración de 50 ppm del BFA.

Después de 7 horas de reacción, como se observa en la figura 4.11, la degradación del BFA se lleva a cabo en 5 h, esto se puede observar debido a que el máximo de absorción en 269 nm disminuye, desde la primer hora, también se observa un corrimiento a mayores longitud de onda esto es debido a la formación de subproductos, los cuales van siendo degradados, a partir de la segunda, después de 5 horas de reacción fotocatalítica, el bisfenol A, como los subproductos que se forman durante el proceso de degradación, son eliminados.

## 4.9 Degradación del BFA en presencia de $\text{TiO}_2$

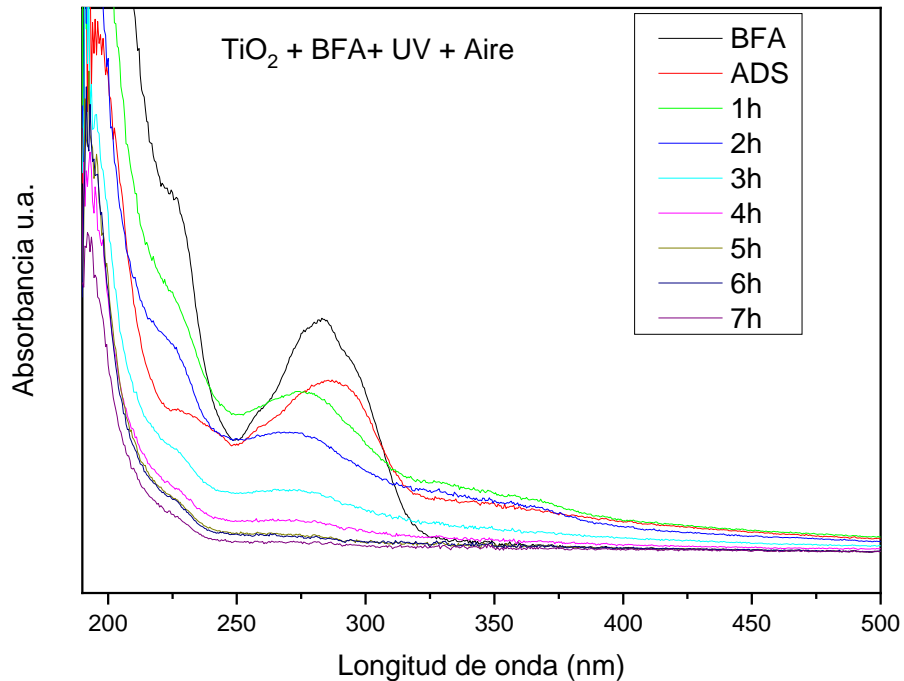
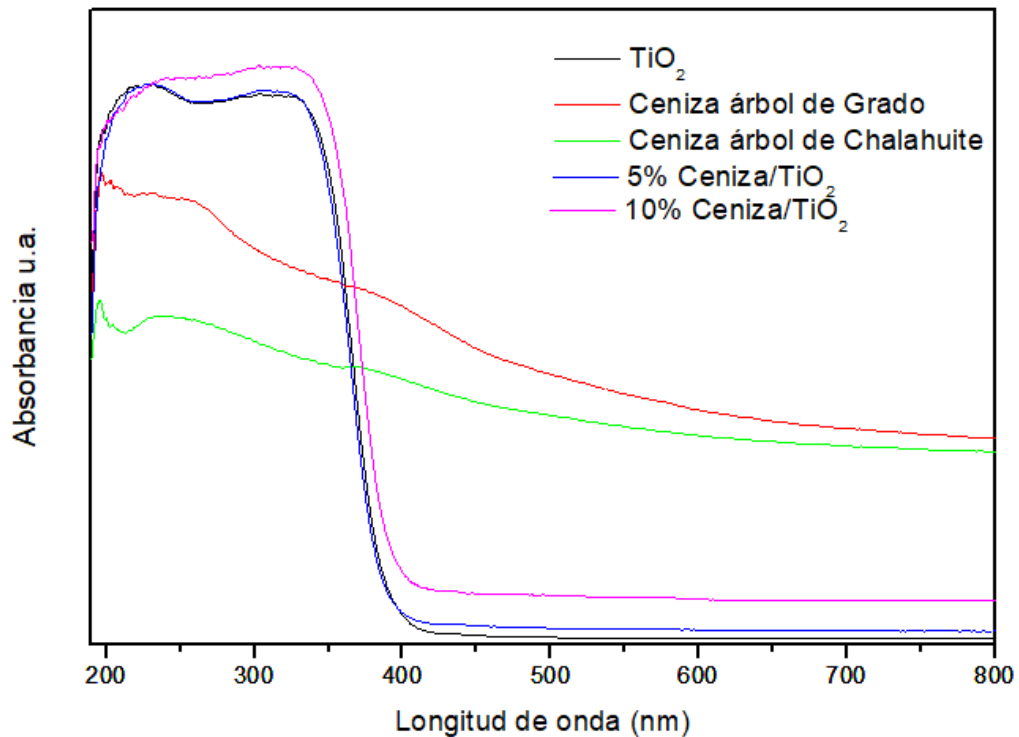


Figura 4.12 degradación del BFA en presencia del  $\text{TiO}_2$ .

La degradación del BFA en presencia del  $\text{TiO}_2$  se observa la adsorción del BFA en  $\text{TiO}_2$  y el corrimiento del pico de adsorción hacia la derecha, como ya se mencionó anteriormente. Sin embargo, después de las 5 horas de reacción se puede observar el efecto debido solamente al semiconductor de  $\text{TiO}_2$ , que es capaz de degradar completamente a la molécula de BFA.

## 4.10 Espectros



*Figura 4.13 espectros de absorción de los catalizadores y cenizas utilizados en este trabajo.*

Se observa los bordes de absorción del  $\text{TiO}_2$  se encuentran en la región ultravioleta y el catalizador de 10% Ceniza del árbol de chalahuite soportado en  $\text{TiO}_2$  se ve desplazado hacia el visible, esto se puede explicar debido a las presencia de metales en estado oxidado presentes en la ceniza del árbol de chalahuite y del árbol de grado, se puede ver que el contenido de los óxidos presentes en la ceniza de los dos árboles es diferente, esto se puede explicar debido a que los árboles como las plantas están constituidos por diferentes metales, por tal razón sus cenizas presentan diferentes tipos de óxidos tal como se observa en la figura 4.13.

Con los valores de la longitud de onda que se obtienen a partir de la gráfica 4.13 se aplica la Ecuación de Planck para conocer la energía que se requiere para la activación de los diferentes materiales.

$$E = h * f$$

Donde:

*E*: Energía

*h*: Constante de Planck

*f*: Frecuencia =  $C/\lambda$

*C*: Velocidad de la luz

$\lambda$ : Longitud de onda

Tabla 2. Resultados de energía de cada material.

<i>Material</i>	$\lambda$ [nm]	<i>E</i> [eV]
<b><i>TiO<sub>2</sub></i></b>	387.68	3.20
<b><i>5% ceniza/TiO<sub>2</sub></i></b>	386.5	3.21
<b><i>10% ceniza/TiO<sub>2</sub></i></b>	393.6	3.15

La tabla 2 muestra los resultados obtenidos a partir de la Ecuación de Planck y en el que podemos observar que al tener una concentración mayor de ceniza de Chalahuite se requiere menor energía. Por esta razón en las gráficas anteriores se muestra que al utilizar solo la ceniza de Chalahuite la degradación del BFA se lleva a cabo en menor tiempo.

## 5. CONCLUSIONES.

1. La ceniza del árbol de Chalahuite no presenta propiedades adsorbentes importantes.
2. La presencia del semiconductor de  $\text{TiO}_2$  presenta una buena actividad para el catalizador 5 % de ceniza del árbol de chalahuite.
3. La ceniza del árbol de chalahuite presenta una mejor actividad fotocatalítica, debido a que tiene la presencia de algún tipo de óxido metálico que favorece la degradación del BFA.
4. La ceniza del árbol de chalahuite, además, de ser utilizada como fertilizante y otras aplicaciones, se recomienda ampliamente su uso ya que es un excelente degradador del Bisfenol A y podría utilizarse para descontaminar otros tipos de contaminantes emergentes.
5. La ceniza del árbol de grado nos indica que según la procedencia de la ceniza tendremos diferentes contenidos de óxidos, debido a la constitución propia de cada árbol o planta.

## 6. BIBLIOGRAFIA

- [1] Roldán, L. F. (2020). Descontaminación del agua: Qué es, Métodos e Importancia. Recuperado de: <https://www.ecologiaverde.com/descontaminacion-del-agua-que-es-y-metodos-2610.html>
- [2] Nair, C. I., Jayachandran, K., & Shashidhar, S. (2008). Biodegradation of phenol. *African Journal of Biotechnology*, 7(25). DOI: <https://doi.org/10.4314/ajb.v7i25.59706>
- [3] Garcia J., Gallego, C. y Font G. (2015). Toxicidad del Bisfenol. *Revista de Toxicología*, vol. 32, núm. 2, pp. 144-160. Recuperado de: <https://www.redalyc.org/>
- [4] Gómez, L. F., & Sarria, V. M. (2009). Fotodegradación heterogénea de bisfenol A en agua con dióxido de titanio. *Quimica nova*, 32(5), 1164–1169. DOI: <https://doi.org/10.1590/s0100-40422009000500015>
- [5] Ejecutivo, D., & Operativa, G. (s/f). Bisfenol A. European Food Safety Authority. Recuperado de: <https://www.efsa.europa.eu/es/topics/topic/bisphenol>
- [6] Domenech X., Wilson F. y Litter M. (2000). Procesos avanzados de oxidación para la eliminación de contaminantes. Recuperado de: <https://www.academia.edu/14116027/>
- [7] Chiva S., Berglanga J., Martínez R. y Climent J. (2017). Procesos de oxidación avanzada en el proceso integral del agua. DOI: <http://dx.doi.org/10.6035/UJI.FACSA.2017.1>
- [8] Height M.J., Pratsinis S.E., Mekasuwandumrong O., Prasertdam P., Ag-ZnO catalysts for UVphotodegradation of methylene blue, *Appl. Catal. B: Environ.* 63 (2006) 305–312 (3/31).
- [9] George S., Pokhrel S., J Z. i, Henderson B.L., Xia T., L. Li, et al., (2011). Role of Fe doping in tuning the band gap of TiO<sub>2</sub> for photo-oxidation induced cytotoxicity paradigm, *J. Am. Chem. Soc.* 133 11270–11278 (07/01).
- [10] Subramanian V., Wolf E., Kamat P.V. (2001). Semiconductor–metal composite nanostructures. To what extent do metal nanoparticles improve the photocatalytic activity of TiO<sub>2</sub> films? *J. Phys. Chem. B* 105,11439–11446.

- [11] Kochuveedu S.T., Jang Y.H., Kim. D.H. (2013). A study on the mechanism for the interaction of light with noble metal-metal oxide semiconductor nanostructures for various photophysical applications, *Chem. Soc. Rev.* 42, 8467–8493
- [12] Wang Q., Geng B., Wang S.. ZnO/Au (2009). Hybrid nanoarchitectures: Wet-chemical synthesis and structurally enhanced photocatalytic performance. *Sci. Technol*, 8968 – 8973
- [13] Pawar R.C., Kang S., Park J.H., Kim J.H., Ahn S. y Lee C.S. (2017). Evaluation of a multi-dimensional hybrid photocatalyst for enrichment of H<sub>2</sub> evolution and elimination of dye/non-dye pollutants. *Catal. Sci. Technol.*, pp. 2579-2590
- [14] Augugliaro V., Palmisano G., Palmisano L. y Soria J. (2019). Heterogeneous Photocatalysis and Catalysis: An Overview of Their Distinctive Features. *Heterogeneous Photocatalysis*. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-64015-4.00001-8>
- [15] Pinos V. (13 de septiembre 2019). Cápsula | ¿Sabes qué es y para qué sirve la catálisis?. UCUENCA EN LÍNEA. Recuperado de: <https://www.ucuenca.edu.ec/component/content/article/233-espanol/investigacion/blog-de-ciencia/1289-quimica?Itemid=437>
- [16] Rodriguez J., Candal R., Solis J., Estrada W., y Blesa M. (2005). El fotocatalizador: síntesis, propiedades y limitaciones. Recuperado de: <https://www.virtualpro.co/biblioteca/el-fotocatalizador-sintesis-propiedades-y-limitaciones>
- [17] Al-Rasheed, R. A. (2005). 'Water treatment by heterogeneous photocatalysis an overview', paper presented to the 4th SWCC Acquired Experience Sumposium, Jeddah. Recuperado de: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.552.942&rep=rep1&type=pdf>
- [18] Garcia Valcarce, A. (1988). Cenizas volantes. *Revista de Edificación*, Vol. 3: 23-26 doi: 10.15581/020.3.35110
- [19] Vishal G., Ahmaruzzaman M. (2021). Tailored fly ash materials: A recent progress of their properties and applications for remediation of organic and inorganic contaminants from water. *Journal of Water Process Engineering*, 41 DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101910>

- [20] *Chalahuite*. (s/f). Verarboles.com. Recuperado de: <https://www.verarboles.com/Chalahuite/chalahuite.html>
- [21] *Inga vera* Willd. in GBIF Secretariat (2022). GBIF Backbone Taxonomy. DOI: <https://doi.org/10.15468/39omei> accessed via GBIF.org
- [22] Ramirez G. (2003). Sangre de drago (*Croton lechleri* Muell. Arg). Recuperado de: <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/4956317.pdf>
- [23] Pro natura veracruz. (2021). Sangregado / *Croton draco*. Recuperado de: [https://revivemx.org/Fototeca/Arboles/Croton\\_draco/8\\_Fichas\\_de\\_venta/Sangregado\\_v2.pdf](https://revivemx.org/Fototeca/Arboles/Croton_draco/8_Fichas_de_venta/Sangregado_v2.pdf)
- [24] Bönnemann, W. Brijoux, K. Siepen, J. Hormes, R. Franke, J. Pollmann and Rothe, (1997). *Appl. Organometal. Chem.*, 11, 783.
- [25] Y. Yu-Ying, C. Ser-Sing, L. Chien-Liang and C. R. Chris Wang, (1997). *J. Phys. Chem. B*, 101, 6661.