



FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS

EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DEL CARBÓN ACTIVADO Y DE LA ZEOLITA
COMO CATALIZADORES DE UN PROCESO
DE OXIDACIÓN AVANZADA (POA)

Autora

Paola Maribel Gavilanes Salazar

Año
2019



FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS

EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DEL CARBÓN ACTIVADO Y DE LA ZEOLITA
COMO CATALIZADORES DE UN PROCESO DE OXIDACIÓN AVANZADA
(POA)

Trabajo de Titulación presentado en conformidad con los requisitos
establecidos para optar por el título de Ingeniero Ambiental en Prevención y
Remediación

Profesora Guía

MSc. Viviana Pavlova Sigcha Terán

Autora

Paola Maribel Gavilanes Salazar

Año

2019

DECLARACIÓN DE PROFESOR GUÍA

“Declaro haber dirigido el trabajo, Evaluación del potencial del carbón activado y de la zeolita como catalizadores de un proceso de oxidación avanzada (POA), a través de reuniones periódicas con la estudiante Paola Maribel Gavilanes Salazar, en el semestre 2019-20, orientando sus conocimientos y competencias para un eficiente desarrollo del tema escogido y dando cumplimiento a todas las disposiciones vigentes que regulan los Trabajos de Titulación”:

Viviana Pavlova Sigcha Terán
Máster en Gestión Integral del Agua
CI: 172221616-3

DECLARACIÓN DE PROFESOR CORRECTOR

“Declaro haber revisado este trabajo, Evaluación del potencial del carbón activado y de la zeolita como catalizadores de un proceso de oxidación avanzada (POA), de Paola Maribel Gavilanes Salazar, en el semestre 2019-20, dando cumplimiento a todas las disposiciones vigentes que regulan los Trabajos de Titulación”.

Miguel Ángel Gualoto Oñate
Master of Science en Biología
CI: 1707429351

DECLARACIÓN DE AUTORÍA DEL ESTUDIANTE

“Declaro que este trabajo es original, de mi autoría, que se han citado las fuentes correspondientes y que en su ejecución se respetaron las disposiciones legales que protegen los derechos de autor vigentes”.

Paola Maribel Gavilanes Salazar
CI: 172216344-9

AGRADECIMIENTOS

A mi tutora guía, Pavlova Sigcha, por ser una guía primordial durante todo este trayecto, quien me ha brindado conocimientos, apoyo y confianza.

A mi corrector, Miguel Gualoto, por compartirme sus enseñanzas profesionales.

A mis amigos, Verónica Mena, Carmita y Carlos Endara por todo su apoyo, paciencia, enseñanzas y amistad.

DEDICATORIA

A mi madre, Irene Salazar, por ser una persona ejemplar, que con su amor y lucha diaria me ha permitido culminar mis estudios y cumplir este sueño universitario. A mis hermanas y sobrino, Gabriela, Verónica y Nicolás, por darme todo el cariño y apoyo incondicional cada día. A mi mejor amiga, Yajaira Acosta, quien ha sido mi cómplice y mano derecha, compartiendo conmigo los mejores momentos, brindándome todo su apoyo y confianza para dar lo mejor de mí.

RESUMEN

La generación de lixiviados en rellenos sanitarios es un problema que en la actualidad enfrentan todos los países a nivel mundial. La ausencia de control y adecuados tratamientos perjudica directamente a los ecosistemas y la salud humana. En el Ecuador, el 38% de los GADs cuentan con rellenos sanitarios y el 9.7% con botaderos a cielo abierto, en los cuales no se ejecuta ningún tratamiento a los lixiviados (INEC, 2014). Las características de los lixiviados dependen de factores como: la composición de los desechos, edad del relleno o botadero, diseño y operación del lugar, solubilidad del material depositado y tratamientos aplicados. Los lixiviados pueden presentar elevadas concentraciones de compuestos tóxicos orgánicos e inorgánicos o incluso microbiológicos (Contreras, 2006). El desarrollo de nuevas tecnologías depurativas, para el tratamiento de lixiviados que potencien las ya existentes, que permitan el cumplimiento de los límites establecidos en las legislaciones nacionales vigentes es una de las preocupaciones de los investigadores (Carvajal, 2014). Algunas investigaciones citadas en este estudio mencionan que, el carbón activado y la zeolita son materiales potenciales para la reducción de carga contaminante y han sido utilizados en varios procesos de lixiviados y agua. Estos materiales modificados por acción del calor y el uso de ácidos son usados como catalizadores y adaptarlos a diferentes necesidades (Dafinov, 2012). El desarrollo de estos nuevos procesos es conocido como procesos de oxidación avanzada (POAs), en donde se emplea combinaciones de un agente oxidante como el peróxido de hidrógeno al 50%, con catalizadores de carbón activado, zeolita y radiación UV, que eliminan los contaminantes presentes en el agua. Los mejores resultados se han obtenido con carbón activado, en calidad de catalizador y peróxido de hidrógeno (H_2O_2 al 50%) (Vicent, 2017). El presente estudio, se enfoca en la oxidación avanzada de los lixiviados, para mejorar sus parámetros cualitativos, tales como: color, DQO, turbidez, empleando carbón activado y zeolita como catalizadores.

Palabras clave: Carbón activado, zeolita, catalizadores, procesos de oxidación avanzada (POAs).

ABSTRACT

The generation of leachates in sanitary landfills is a problem that currently face all countries worldwide. The absence of control and adequate treatments directly harms ecosystems and human health. In Ecuador, 38% of GADs have sanitary landfills and 9.7% open dumps, in which no treatment is applied to leachates (INEC, 2014). The characteristics of the leachate depend on factors such as: the composition of the waste, age of the landfill or dump, design and operation of the site, solubility of the deposited material and applied treatments. Leachates can present high concentrations of toxic organic and inorganic or even microbiological compounds (Contreras, 2006). The development of new depurative technologies, for the treatment of leachates that enhance existing ones, that allow compliance with the limits established in the current national legislations is one of the concerns of the researchers (Carvajal, 2014). Some research cited in this study mention that activated carbon and zeolite are potential materials for the reduction of pollutant load and have been used in several leachate and water processes. These materials modified by the action of heat and the use of acids are used as catalysts and adapted to different needs (Dafinov, 2012). The development of these new processes is known as advanced oxidation processes (POAs), where combinations of an oxidizing agent such as 50% hydrogen peroxide are used, with catalysts activated carbon, zeolite and UV radiation, which remove contaminants present in the water. The best results have been obtained with activated carbon, as a catalyst and hydrogen peroxide (50% H₂O₂) (Vicent, 2017). The present study focuses on the advanced oxidation of leachates, to improve their qualitative parameters, such as: color, COD, turbidity, using activated carbon and zeolite as catalysts.

Key words: Activated carbon, zeolite, catalysts, advanced oxidation processes (POAs).

ÍNDICE

1. CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN.	1
1.1. Antecedentes.	1
1.2. Objetivos.	4
1.2.1. Objetivo General.	4
1.2.2. Objetivos específicos.	4
1.3. Alcance.	4
1.4. Justificación.	5
2. CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO.	6
2.1. Disposición final de residuos sólidos en el Ecuador.	6
2.1.1. Rellenos sanitarios.	6
2.1.2. Botaderos a cielo abierto.	7
2.1.3. Problemática ambiental de los botaderos a cielo abierto.	7
2.2. Contaminación por lixiviados.	7
2.2.1. Caracterización de los lixiviados.	8
2.3. Tratamientos para depuración de lixiviados.	9
2.3.1. Tratamientos Convencionales.	9
2.3.2. Tratamientos No Convencionales.	10
2.4. Procesos de oxidación avanzada (POAs).	11
2.4.1. Fundamento químico.	11
2.4.2. Medios oxidantes.	12
2.4.3. Potencial de oxidación de distintas especies químicas.	13
2.5. Proceso de oxidación avanzada: UV/H ₂ O ₂	15
2.5.1. Principio de Oxidación.	15
2.5.2. Carbón Activado.	16
2.5.2.1. Características generales del Carbón Activado.	16
2.5.2.2. Carbón Activado como catalizador de un POA.	17
2.5.3. Zeolita.	18
2.5.3.1. Características generales de la Zeolita.	19

2.5.3.2. Zeolita como catalizador de un POA.....	20
2.5.4. Ventajas de aplicación de POAs Fotoquímicos.....	21
2.6. Activación termoquímica de los materiales.....	22
2.6.1. Tratamiento Físico.....	22
2.6.2. Tratamiento Químico.....	23
3. CAPÍTULO III. METODOLOGÍA.....	24
3.1. Diagrama general del plan experimental.....	24
3.2. Caracterización inicial de la muestra.....	25
3.3. Activación de los catalizadores.....	25
3.3.1. Lavado del carbón activado y zeolita.....	25
3.3.2. Activación física.....	26
3.3.3. Activación química.....	26
3.4. Proceso de tratamiento experimental.....	28
3.4.1. Diseño de experimentos.....	28
3.5. Medición de parámetros básicos.....	29
3.5.1. Medición del potencial de óxido reducción.....	29
3.5.2. pH y temperatura.....	29
3.6. Caracterización de variables respuesta.....	30
3.6.1. DQO.....	30
3.6.2. Color.....	30
3.6.3. Turbidez.....	30
3.6.4. Corrida de absorbancia.....	31
3.7. Tratamiento de optimización.....	31
3.7.1. Diseño de experimentos con el catalizador efectivo.....	31
3.7.1.1. Optimización de Dosis.....	31
4. CAPÍTULO IV. RESULTADOS.....	33
4.1. Análisis Descriptivo.....	33
4.1.1. Experimentación a dosis baja.....	34
4.1.1.1. Ensayos con catalizador de carbón activado.....	34
4.1.1.2. Ensayos con carbón activado lavado.....	36

4.1.1.3. Ensayos con catalizador de zeolita.	38
4.1.1.4. Ensayos con zeolita lavada.	39
4.2. Experimentación a dosis media.	41
4.2.1. Ensayos con catalizador de carbón activado.	41
4.2.2. Ensayos con carbón activado lavado.	42
4.2.3. Ensayos con catalizador de zeolita.	43
4.2.4. Ensayos con zeolita lavada.	44
4.3. Experimentación a dosis alta.	45
4.3.1. Ensayos con catalizador de carbón activado.	45
4.3.2. Ensayos con carbón activado lavado.	46
4.3.3. Ensayos con catalizador de zeolita.	47
4.3.4. Ensayos con zeolita lavada.	48
4.4. Experimentación a dosis baja en variable DQO (mg/L O ₂).	50
4.4.1. Ensayos con carbón activado.	50
4.4.2. Ensayos con zeolita.	51
4.5. Experimentación a dosis media en variable DQO (mg/L O ₂).	51
4.5.1. Ensayos con carbón activado.	51
4.6. Experimentación a dosis alta en variable DQO (mg/L O ₂).	52
4.6.1. Ensayos con carbón activado.	52
5. CAPÍTULO V. ANÁLISIS DE RESULTADOS.	59
5.1. Dosis, subtratamientos y variables respuesta.	59
5.2. Dosis, subtratamientos y color.	63
5.3. Dosis, subtratamientos y turbidez.	66
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.	73
6.1. Conclusiones.	73
6.2. Recomendaciones.	75
REFERENCIAS.	77
ANEXOS.	88

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Clasificación General del Lixiviado por edad.	9
Tabla 2 Potencial de oxidación en las diferentes especies químicas.....	13
Tabla 3 Clasificación de los procesos de oxidación avanzada (POAs).....	14
Tabla 4 Diseño experimental del estudio con los catalizadores.....	28
Tabla 5 Optimización dosis de peróxido de hidrógeno y catalizador efectivo. ...	32
Tabla 6 Caracterización inicial de la muestra de lixiviados del botadero de Naranjito.	33
Tabla 7 Límites de descarga a un cuerpo de agua dulce.	34
Tabla 8 Valores obtenidos a dosis baja con catalizador de carbón activado (1 hora).	35
Tabla 9 Valores obtenidos a dosis baja con catalizador de carbón activado (24 horas).	35
Tabla 10 Valores obtenidos a dosis baja con carbón activado lavado (1 hora).	36
Tabla 11 Valores obtenidos a dosis baja con carbón activado lavado (24 horas).	36
Tabla 12 Valores obtenidos a dosis baja con catalizador de zeolita (1 hora).	38
Tabla 13 Valores obtenidos a dosis baja con catalizador de zeolita (24 horas).	38
Tabla 14 Valores obtenidos a dosis baja con zeolita lavada (1 hora).	39
Tabla 15 Valores obtenidos a dosis baja con zeolita lavada (24 horas).	39
Tabla 16 Valores obtenidos a dosis media con catalizador de carbón activado.	41
Tabla 17 Valores obtenidos a dosis media con carbón activado lavado.	42
Tabla 18 Valores obtenidos a dosis media con catalizador de zeolita.	43
Tabla 19 Valores obtenidos a dosis media con zeolita lavada.....	44
Tabla 20 Valores obtenidos a dosis alta con catalizador de carbón activado. ...	45
Tabla 21 Valores obtenidos a dosis alta con carbón activado lavado.	46
Tabla 22 Valores obtenidos a dosis alta con catalizador de zeolita.	47
Tabla 23 Valores obtenidos a dosis alta con zeolita lavada.....	48

Tabla 24 Resultados de la variable respuesta DQO con carbón activado en dosis baja.	50
Tabla 25 Resultados de la variable respuesta DQO con zeolita en dosis baja.	51
Tabla 26 Resultados de la variable respuesta DQO con carbón activado en dosis media.	51
Tabla 27 Resultados de la variable respuesta DQO con zeolita en dosis media.	52
Tabla 28 Resultados de la variable respuesta DQO con carbón activado en dosis alta.	52
Tabla 29 Resultados de la variable respuesta DQO con zeolita en dosis alta.	53
Tabla 30 Caracterización final de la muestra de lixiviados.	54
Tabla 31 Proceso de optimización en variables color y turbidez.	57
Tabla 32 Proceso de optimización en variables DQO.	58
Tabla 33 Análisis de varianza en variables respuesta.	60
Tabla 34 Resumen de procesamiento de casos con catalizadores a diferentes dosis.	62
Tabla 35 Análisis de varianza en color.	64
Tabla 36 Resumen de procesamiento de datos a diferentes dosis para remoción de color.	65
Tabla 37 Análisis de varianza en turbidez.	67

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1.</i> Composición de los lixiviados.....	2
<i>Figura 2.</i> Tamaño de poros presente en la estructura básica del carbón activado.	17
<i>Figura 3.</i> Unidad estructural básica de una zeolita con átomos de oxígeno y de silicio en el tetraedro.....	20
<i>Figura 4.</i> Diagrama general del plan experimental.	24
<i>Figura 5.</i> Remoción del polvo presente en el carbón activado y zeolita mediante el uso de agua destilada.....	25
<i>Figura 6.</i> Activación física del carbón activado y zeolita.	26
<i>Figura 7.</i> Activación química del carbón activado y zeolita.	27
<i>Figura 8.</i> Proceso de obtención de la Demanda Química de Oxígeno (DQO).	30
<i>Figura 9.</i> Corrida de absorbancia inicial de la muestra de lixiviados.....	33
<i>Figura 10.</i> Experimentación a dosis baja con carbón activado.	37
<i>Figura 11.</i> Experimentación a dosis baja con zeolita.....	40
<i>Figura 12.</i> Variación de remoción a dosis baja con catalizador de carbón activado y zeolita.	40
<i>Figura 13.</i> Valores obtenidos con ambos catalizadores analizados.....	44
<i>Figura 14.</i> Valores obtenidos en color y turbidez a dosis alta con ambos catalizadores analizados.	49
<i>Figura 15.</i> Resultados de la corrida de absorbancia en la muestra inicial, muestra final efectiva, agua destilada y agua ultra pura.	55
<i>Figura 16.</i> Resultados de la corrida de absorbancia en la muestra inicial de lixiviados y agua ultra pura.	56
<i>Figura 17.</i> Resultados de la corrida de absorbancia en la muestra final efectiva y agua ultra pura.	56
<i>Figura 18.</i> Análisis del uso de catalizadores a diferentes dosis.	63
<i>Figura 19.</i> Análisis del uso de catalizadores a diferentes dosis para remoción de color.....	65

<i>Figura 20.</i> Subtratamientos de catalizador de carbón activado y zeolita en la remoción de color.....	66
<i>Figura 21.</i> Subtratamiento de catalizadores de carbón activado y zeolita a diferentes dosis.....	69
<i>Figura 22.</i> Dosis alta, media y baja con catalizadores.....	70
<i>Figura 23.</i> Remoción de turbidez en los catalizadores de análisis.....	70
<i>Figura 24.</i> Remoción de DQO a distintas dosis con el uso de catalizadores.	71

1. CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN.

1.1. Antecedentes.

El inadecuado manejo de residuos sólidos a escala mundial es uno de los principales problemas a nivel mundial. Las principales causas son el rápido crecimiento demográfico con asentamientos poblacionales en zonas sin planificación territorial, el desarrollo y crecimiento industrial, los cambios en el consumo de bienes, servicios y productos acordes a los diferentes estilos de vida, sumados al inadecuado manejo de residuos sólidos a escala mundial; son los principales problemas que afrontan las ciudades a nivel mundial (Shahmoradi, 2013). En países de Latinoamérica la generación de residuos es en promedio 0.64 Kg/hab/día; mientras que, en los países desarrollados es de 0.92 Kg/hab/día (Espinoza, 2010). Estos datos muestran la relación entre el nivel de desarrollo, la generación de residuos y el crecimiento poblacional.

Actualmente, la generación de RSU en países latinoamericanos sobrepasa las capacidades de manejo locales. A escala global, cada año, se generan alrededor de 1,3 millones de toneladas, se estima que para el año 2025 se incrementará hasta 2,2 millones de toneladas/año. De esta forma, la generación per cápita aumentará entre 1,2 a 1,4 Kg/hab/día, con efectos negativos sobre el ambiente y salud pública (Hoorweg, 2012). En tal virtud, los rellenos sanitarios deben ser ubicados en los límites o alejados de cada ciudad (Ruiz, 2013).

En el Ecuador, el 38% de los Gobiernos Autónomos Descentralizados Municipales cuentan con Rellenos Sanitarios y el 9.7% con botaderos a cielo abierto ubicados en diferentes ciudades del país (INEC, 2014). Los lixiviados son efluentes líquidos contaminantes, que se producen durante la descomposición y fermentación de la materia orgánica, debido a la propia humedad del residuo sólido y al agua lluvia que se filtra entre los residuos y arrastra material biológico y compuestos químicos (Espinoza, 2016), que al ser

liberados sin control, afectan a cuerpos de agua y suelos por infiltración (Corena, 2008).

Los lixiviados dependen de ciertos factores como la composición de los desechos, edad del relleno o botadero, diseño y operación del lugar, solubilidad del material depositado y tratamientos aplicados, que incrementan la cantidad o modifican la composición de lixiviados (Contreras, 2006).

En la composición de los lixiviados, participan compuestos tóxicos orgánicos e inorgánicos (metales pesados), microorganismos; el grado de contaminación se evalúa a través de los parámetros como la Demanda Química de Oxígeno (DQO). En la figura 1, se muestra la composición tipo de los lixiviados.

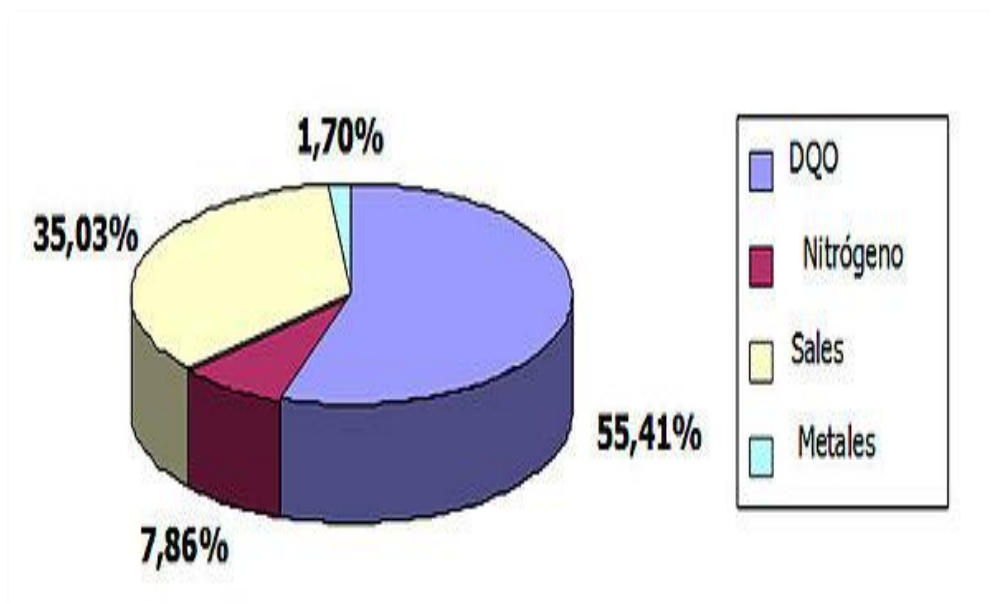


Figura 1. Composición de los lixiviados. Este apartado muestra en porcentajes la composición de los lixiviados. Tomado de (Contreras, 2006).

La ausencia del control y tratamientos de lixiviados en el país ha llegado a perjudicar de manera directa a los ecosistemas y salud humana (GMI, 2011). Algunos tratamientos que cuenta el país para líquidos lixiviados son: por membranas birreactoras, sistemas de ósmosis inversa y tratamientos fisicoquímicos. Sin embargo, existen nuevos tratamientos depurativos de

lixiviados que pueden clasificarse en tratamientos convencionales y tratamientos no convencionales (Procesos de oxidación avanzada).

Los procesos de oxidación avanzada (POAs), utilizan la combinación de un agente oxidante con un catalizador y radiación UV, que producen la mineralización a dióxido de carbono (CO_2), agua (H_2O), sales o ácidos inorgánicos (Pelayo, 2018).

El carbón activado y la zeolita son materiales potenciales para la reducción de carga contaminante y han sido utilizados en varios procesos. Las nuevas tecnologías de estos materiales consisten en la modificación mediante calor y el uso de ácidos, con el fin de aprovecharlos como catalizadores y adaptarlos a diferentes necesidades (Rodríguez, 2014).

Los catalizadores como la zeolita y el carbón activado son modificados con ácidos como: Hidróxido de Sodio (NaOH), Ácido Fosfórico (H_3PO_4) y Ácido Nítrico (HNO_3). Otro mecanismo es el calor a temperaturas entre los 500°C - 900°C (Tzvetkov, 2016). La oxidación catalítica con peróxido de hidrógeno (H_2O_2) permite mineralizar sustancias orgánicas en condiciones normales debido a su alto poder oxidante de radicales $\text{OH}\cdot$. Esta oxidación resulta ser ideal para el tratamiento de sustancias con alta toxicidad, biorrecalcitrantes o efluentes de alta carga contaminante (Dafinov, 2012), por esta razón, es importante el desarrollo de nuevas tecnologías depurativas, con el fin de potenciar las ya existentes (Carvajal, 2014).

Esta investigación, propone dar a conocer un proceso depurativo para el tratamiento de lixiviados mediante un POA y el uso de carbón activado y zeolita como catalizadores; de esta forma, potenciar la dosis del catalizador más efectivo y obtener su dosis efectiva mediante la reducción parámetros de: DQO, color, turbidez y absorbancia, siendo esto, un factor clave para su implementación en los diferentes puntos de disposición final del país.

1.2. Objetivos.

1.2.1. Objetivo General.

Evaluar el potencial de los catalizadores: Carbón Activado y Zeolita mediante procesos de oxidación avanzada para el tratamiento de lixiviados.

1.2.2. Objetivos específicos.

- Comparar la eficiencia de ambos catalizadores en función a la remoción de DQO, color y turbidez en la muestra de lixiviados.
- Evaluar la dosis efectiva de catalizador y oxidante (peróxido de hidrógeno al 50%) en los tratamientos.

1.3. Alcance.

El presente trabajo de titulación propone evaluar de forma experimental la eliminación de color en una muestra de lixiviado pre-tratado biológicamente, proveniente del botadero de Naranjito en San José de Chimbo, provincia de Bolívar; mediante la aplicación de un proceso de oxidación avanzada (POA), en base al uso de catalizadores (carbón activado y zeolita) y un medio oxidante (H_2O_2 al 50%).

Este estudio contempla dos tipos de tratamiento, el primero, con la activación fisicoquímica de ambos catalizadores mediante la adición de calor y ácido nítrico; y, el segundo, únicamente con el lavado y activación física de los catalizadores mediante la adición de calor. Se realizarán varias pruebas con ambos catalizadores activados termoquímicamente y se efectuará el análisis de distintas variables de respuesta, como: DQO, corrida de absorbancia, turbidez y color. Se comparará la eficiencia de cada uno de los tratamientos, de esta manera se podrá elegir el catalizador más efectivo para optimizar su dosis.

1.4. Justificación.

Los botaderos de basura a cielo abierto del país almacenan elevadas cantidades de residuos sólidos urbanos y, por ende, generan grandes cantidades de lixiviados, cuya liberación sin tratamiento, produce graves problemas ambientales. que, sin un adecuado tratamiento, generan riesgo al ambiente y la salud de las personas. Por lo tanto, los lixiviados deben contar con un adecuado tratamiento para reducir la carga contaminante. De esta manera, es esencial el uso de tecnologías que aceleren su capacidad de reacción y aporten de manera efectiva al medio ambiente.

La implementación de este tratamiento en lixiviados reducirá la contaminación del recurso suelo y del agua a través de la descarga que se genera en los rellenos sanitarios del país, proporcionando una nueva alternativa que aporte al medio ambiente y mejore la calidad del recurso mediante este proceso efectivo de depuración.

2. CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO.

2.1. Disposición final de residuos sólidos en el Ecuador.

En el Ecuador la disposición final de residuos es principalmente direccionada a rellenos sanitarios, botaderos a cielo abierto, ríos o incineradoras. En el país se produce por semana 58.829 toneladas de residuos sólidos, de los cuales el 20% son destinados a rellenos sanitarios y el 80% a botaderos a cielo abierto. La mayoría de estos puntos de disposición final carecen de mantenimiento y control de emisiones, que con el tiempo generan graves impactos al ambiente (Solíz, 2015).

Los botaderos a cielo abierto son el principal causante de contaminación en las matrices ambientales: aire, suelo y agua; debido a la emisión de biogás que contiene gases de efecto invernadero (CO_2 y CH_4 , NH_3 , H_2S y mercaptanos), generación de lixiviados (Ministerio de medio ambiente, 2013).

Adicionalmente, la falta de control en botaderos a cielo abierto genera plagas y vectores de transmisión de enfermedades, como afección de vías respiratorias por incineración de residuos, olores desagradables procedentes de los residuos en degradación. Los vertidos incontrolados o a cielo abierto tienen altos impactos ambientales, socioculturales y económicos (GreenPeace, 2013).

2.1.1. Rellenos sanitarios.

Un relleno sanitario es una estructura segura de ingeniería, que confina todo tipo de residuos que llega a este punto de disposición final. Los residuos son compactados, las emisiones gaseosas y efluentes líquidos (lixiviados) son controlados, para el efecto, cuenta con programas de monitoreo ambiental y planes de contingencia en caso de un mal funcionamiento (Noguera, 2010).

En el Ecuador, el 52% de los municipios realizan recolección diferenciada de residuos de origen hospitalario. El 24% de estos, se dispone en celdas

emergentes para su tratamiento; mientras que, el porcentaje restante se depositan en rellenos sanitarios o botaderos a cielo abierto. Los rellenos sanitarios cuentan con celdas especializadas para la disposición de residuos hospitalarios, en tanto que, los botaderos a cielo abierto, quebradas o ríos; carecen de estas celdas y, se disponen mezclados con los residuos comunes, siendo ésta, una de las principales causas de su impacto ambiental (Solíz, 2015).

2.1.2. Botaderos a cielo abierto.

Los botaderos son lugares en donde se disponen los residuos sólidos sin ningún control ni separación previa de los residuos; los residuos no son compactados ni cubiertos diariamente, razón por la que, generan malos olores, emisión de gases de efecto invernadero y lixiviados altamente contaminantes (CEPIS, 2004).

2.1.3. Problemática ambiental de los botaderos a cielo abierto.

Uno de los problemas relacionados con la presencia de botaderos a cielo abierto es el deterioro del paisaje debido, que disminuye sensiblemente la plusvalía de las tierras y propiedades cercanas a los vertederos (SEDESOL, 2009).

Otro problema, es el deterioro de la salud pública, en especial de la población que habita cerca a botaderos y aquellas personas que se dedican a la gestión de residuos sólidos, las enfermedades más frecuentes son: tifoidea, dengue, diarrea, malaria, cólera, leptospirosis, entre otras transmitidas por ratas, moscas, mosquitos, cucarachas (Maldonado, 2012).

2.2. Contaminación por lixiviados.

Los líquidos lixiviados generan efectos negativos al medio ambiente, de los cuales son percibidos a lo largo de los años. Los lixiviados tienen la capacidad de arrastrar todo tipo de sustancia nociva, conformado por más de 180

compuestos, siendo los más representativos los compuestos tóxicos y cancerígenos, estos generan la pérdida de nutrientes en las capas del suelo y afectan al recurso hídrico a través del arrastre de sustancias contaminantes (Massone, 2004).

En la salud de las personas, causa enfermedades relacionadas con: leptospirosis, laringitis, faringitis y cólera. Cada vez, las reservas de agua dulce son menores, y la poca disponible presentan niveles significativos de contaminación (WHO, 2018).

Los tratamientos que se aplican en aguas subterráneas por contaminación de lixiviados son altamente costosos y puede presentar cierto nivel de afectación a la comunidad que dependen de este recurso (ONU, 2017).

El recurso suelo también presenta afectación directa por la generación de lixiviados, los cuales se filtran a través del suelo afectando su productividad y disminuyendo la microfauna del área (lombrices, hongos, bacterias, entre otros). Esto genera, la pérdida de la productividad de este recurso e incrementa la desertificación del suelo. Además, la presencia de lixiviados evita la recuperación de la flora en el área de afectación e incrementa la presencia de vectores (MINAM, 2015).

2.2.1. Caracterización de los lixiviados.

La calidad de los lixiviados varía con el tiempo, al igual que el tipo de relleno sanitario o botadero. Las altas concentraciones en parámetros de pH, DQO y compuestos orgánicos forman parte de un lixiviado joven; por lo tanto, las bajas concentraciones de esos parámetros pertenecen a lixiviados viejos. Como se observa en la siguiente tabla, la relación DBO/DQO para un lixiviado joven la cual es considerado alto, lo y representa alta biodegradabilidad de materia orgánica, por el contrario, un lixiviado viejo es poco biodegradable (Torres, 2014).

Tabla 1
Clasificación General del Lixiviado por edad.

	Joven	Intermedio	Viejo
Edad (años)	<5	5-10	>10
pH	6.5	6.5-7.5	>7.5
DQO (mg/L O ₂)	>10000	4000-10000	<4000
DBO ₅ /DQO	>0.3	0.1-0.3	<0.1
Metales Pesados	Bajo - Medio	-	Bajo

Nota. Clasificación de los líquidos lixiviados por su edad. Adaptado de (Torres, 2014).

2.3. Tratamientos para depuración de lixiviados.

Los tratamientos de lixiviados pueden clasificarse en función del nivel de tratamiento y del tipo de contaminante a remover. Los tratamientos se clasifican en convencionales y no convencionales.

2.3.1. Tratamientos Convencionales.

Procesos Biológicos: Este tipo de tratamientos de lixiviados son frecuentemente utilizados para la remoción de materia orgánica. En investigaciones realizadas en los últimos años se ha demostrado que estos procesos son efectivos cuando el lixiviado es considerado joven, el cual presenta altas concentraciones de ácidos grasos volátiles y su relación DBO₅/DQO es mayor a 0.4, siendo altamente biodegradables (López, 2014).

Tratamiento Anaerobio: Este tratamiento es considerado un proceso simple en donde se cumple con el mismo proceso depurativo mencionado anteriormente,

en donde las bacterias son capaces de degradar sustancias en ausencia de oxígeno; de esta manera, la cantidad de lodos generados al final del tratamiento son menores. En la implementación de este tratamiento las cantidades de amonio y minerales disueltos deben ser removidos para evitar problemas de para los microorganismos. Trabajos realizados con reactores anaerobios, con pH de 5,7 permitieron alcanzar una eficiencia de remoción DQO superior al 89% (Torres, 2005).

Sistemas Naturales: Los sistemas naturales, lagunas y humedales artificiales, son considerados también como alternativas para el tratamiento de lixiviados. Estos procesos cuentan con la ventaja de ser procesos simples en su operación, que incluyen, niveles de tratamiento como: pretratamiento, tratamiento primario, secundario hasta un terciario en caso de ser necesario. Estos sistemas se han iniciado en Estados Unidos, países de Europa y recientemente en países de Sudamérica. La desventaja de estos sistemas es la gran cantidad de espacio requerido para su operación (Torres, 2005).

2.3.2. Tratamientos No Convencionales.

Los tratamientos no convencionales o también conocidos como procesos de oxidación avanzada (POAs) son ideales para el tratamiento de efluentes líquidos que no pueden ser tratados por tecnologías convencionales. Estos procesos tienen como objetivo eliminar compuestos poco biodegradables y permitir la reducción o eliminación completa de contaminantes presentes en el agua (Michel, 2014). Los POAs se basan en procesos fisicoquímicos con capacidad de generar cambios en la estructura química de los contaminantes y generar radicales hidroxilo ($\text{HO}\cdot$) altamente reactivos, con capacidad de acelerar las reacciones de oxidación. Estos radicales pueden ser generados en poca cantidad por el agua propia o de forma masiva a partir del peróxido de hidrógeno gracias a la intervención de catalizadores e implementación de radiación ultravioleta (Vicent, 2017).

2.4. Procesos de oxidación avanzada (POAs).

Estos procesos se enfocan en el tratamiento de contaminantes presentes en el agua, debido a su eficiente remoción de carga contaminante (López, 2014).

Los principales propósitos de la aplicación de POAs (Martínez, 2008) son:

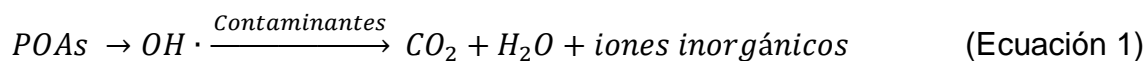
- Mineralización de los contaminantes, especialmente orgánicos y recalcitrantes.
- Degradación de contaminantes orgánicos en compuestos más biodegradables y menos tóxicos.
- Eliminación de color.
- Desinfección.
- Eliminación de olor.

Los procesos de oxidación avanzada han sido considerados como procesos verdes o “*Green Proceses*”, siendo estos procesos afines a los principios de sostenibilidad y amigables con el ambiente. Esto, debido a que: no generan subproductos, son capaces de alcanzar su mineralización completa, utilizan reactivos químicos inocuos, son procesos catalizados, permiten el uso de fuentes de energía renovables (luz solar), se puede realizar en temperatura y presión ambiente (Muñoz, 2016).

2.4.1. Fundamento químico.

Los procesos de oxidación avanzada son capaces de producir cambios a la estructura química de los contaminantes, mediante la generación de radicales hidroxilo ($\text{HO}\cdot$) a partir de oxígeno, peróxido de hidrógeno y el uso de catalizadores (Bes Monge, 2018).

Lo anteriormente mencionado se presenta en la siguiente reacción:



El radical hidroxilo presenta alta efectividad para oxidar la materia orgánica, hasta lograr su mineralización completa en tiempos de reacción muy cortos (Almecija, 2010). La versatilidad de estos procesos de oxidación avanzada se debe a que existen distintas formas de producir radicales hidroxilo y puede elegirse cual utilizar dependiendo de cada agua residual. Según López (2001), uno de los métodos más destacados es del peróxido de hidrógeno y radiación ultravioleta (H_2O_2/UV).

De esta manera, la generación de radicales hidroxilo, se puede acelerar por la combinación con agentes oxidantes, radiación UV y el uso de catalizadores; además, de tomar en cuenta los factores influyentes en el proceso como pH, tiempo de reacción, presión y temperatura ambiente (Valero, 2017).

2.4.2. Medios oxidantes.

El medio oxidante es una especie de radical conocida como hidroxilo ($HO\cdot$) con alta capacidad oxidativa; por esta razón, puede eliminar compuestos orgánicos e inorgánicos consiguiendo como resultado la disminución del DQO y niveles de toxicidad del agua residual (Román, 2010).

El peróxido de hidrógeno (H_2O_2), es utilizado como medio oxidante en los POAs, debido a que es un reactivo químico seguro, abundante y sencillo de utilizarlo. Además, es altamente oxidante y presenta una buena fuente de radicales libres. También, es utilizado como aditivo ecológico gracias a la descomposición única en agua y oxígeno. Sin embargo, existen procesos en los que se requiere el aumento significativo de propiedades oxidantes, siendo necesaria la combinación con otro medio oxidante o, a través de la combinación con catalizadores para incrementar su eficiencia (Martínez, 2014).

2.4.3. Potencial de oxidación de distintas especies químicas.

Es una medida de la capacidad de una sustancia química para enlazar a un electrón, que se mide en mV. De esta manera, para que ocurra una reacción de oxido-reducción, tiene que existir un elemento que ceda electrones (se oxida) y otro elemento que acepte estos electrones (se reduce) (Terán, 2016).

La eficiencia de estos procesos es reflejada por la participación del radical hidroxilo, los cuales proporciona velocidades de oxidación superiores en relación con otros métodos de oxidación (Tabla 2). El radical hidroxilo tiene la capacidad de atacar a los compuestos orgánicos presentes y reaccionar 109 veces más rápido que otros oxidantes comunes (Clemente, 2008).

Tabla 2

Potencial de oxidación en las diferentes especies químicas.

Especies	Potencial de oxidación E° (V, 25°C)
Flúor (F)	3,03
Oxígeno atómico (O ₂)	2,42
Ozono (O ₃)	2,07
Peróxido de Hidrógeno (H ₂ O ₂)	1,78
Radical perhidroxilo (HO ₂)	1,70
Permanganato (MnO ₄ ⁻)	1,68
Cloro (Cl ₂)	1,36
Bromo (Br ₂)	1,09

Nota. Potencial de oxidación para las distintas especies. Tomado de (Terán, 2016).

2.4.4. Clasificación de los POAs.

Los POAs, se divide en dos grupos: fotoquímicos y no fotoquímicos (García, 2013). Los procesos fotoquímicos, se diferencian de los no fotoquímicos gracias a la generación de radicales hidroxilo ($\text{HO}\cdot$) por medios fotoquímicos; es decir, mediante el uso de luz solar, luz blanca, luz UV y otras formas de energía, presentando de esta manera alta efectividad de oxidación de materia orgánica (Terán, 2016).

Los métodos fotoquímicos se dividen en UV/Peróxido de Hidrógeno (H_2O_2), Foto-Fenton, Fotocatálisis Heterogénea, entre otras (Pelayo, 2018). La tabla 3 muestra la clasificación de los procesos de tratamiento:

Tabla 3
Clasificación de los procesos de oxidación avanzada (POAs).

Procesos No Fotoquímicos	Procesos Fotoquímicos
Ozonización en medio alcalino.	UV/periodato.
Ozonización con Peróxido de Hidrógeno ($\text{O}_3/\text{H}_2\text{O}_2$).	Ferrioxalato y otros complejos de Fe (III).
Procesos Fenton ($\text{Fe}_{2+}/\text{H}_2\text{O}_2$) y relacionados.	Fotólisis del agua en el ultravioleta al vacío (UVV).
Oxidación electroquímica.	UV/Peróxido de Hidrógeno (H_2O_2).
Radiólisis y y tratamiento con haces de electrones.	UV/ O_3 .
Plasma no térmico.	Foto-Fenton y relacionadas.
Descarga electrohidráulica Ultrasonido.	Fotocatálisis heterogénea.

Nota. Clasificación de los POAs. Tomado de (Pelayo, 2018).

2.5. Proceso de oxidación avanzada: UV/H₂O₂.

La variedad de los procesos de oxidación avanzada ha permitido utilizar distintas formas de producción de radicales hidroxilos. Para acelerar la generación de radicales hidroxilo, se puede combinarlos con medios oxidantes como: Ozono (O₃), Peróxido de Hidrógeno (H₂O₂), radiación UV, sales de Hierro (Fe (II); Fe (III)) y catalizadores (Fernández, 2007).

El método UV/H₂O₂ es uno de los procesos de oxidación avanzada utilizados con éxito en reducción de contaminantes presentes en aguas y efluentes industriales (Gogate, 2004). Este proceso implica la formación de radicales hidroxilo a través de la fotólisis del peróxido de hidrógeno (H₂O₂) por acción de la radiación ultravioleta (Aleboyeh, 2003).

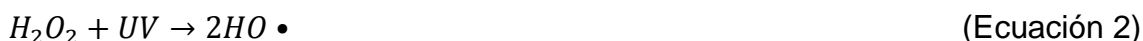
La eficiencia de la decoloración aumenta al incrementar la dosis de peróxido de hidrógeno, que, al alcanzar su pico más alto, empieza luego a descender. Cuando existe suficiente cantidad de H₂O₂ en la solución, este empieza a competir con el color para reaccionar con los radicales hidroxilo. Por lo tanto, los OH• generados en su estructura química que en conjunto con el peróxido de hidrógeno reduce el color en el agua superando el 82% de eficacia (Amer, 2008).

Esta tecnología ha demostrado alta efectividad, en los últimos años, su uso se ha difundido combinado con nuevos catalizadores, que han mejorado la reacción y garantizado los procesos depurativos (Miklos, 2018).

2.5.1. Principio de Oxidación.

Como se mencionó anteriormente, en este proceso de oxidación avanzada los radicales hidroxilo, se forman por fotólisis del peróxido de hidrógeno; donde ocurre la ruptura homolítica del enlace O-O, por acción de la luz ultravioleta y la consecuente formación de radicales hidroxilo (Schrank, 2007). Esto se ilustra

mediante la siguiente reacción:



El radical $OH \bullet$ puede atacar al peróxido de hidrógeno como se indica en las siguientes ecuaciones:



La fotólisis de peróxido de hidrógeno se realiza en su mayoría, con lámparas de vapor de mercurio de baja o media presión (Pera-Titus, 2004). Por este conjunto de reacciones, el proceso es considerado efectivo en la reducción de contaminantes presentes en agua y efluentes industriales (Ripoll, 2008).

2.5.2. Carbón Activado.

El carbón activado al igual que otros tipos de carbón, forman parte del grupo de materiales carbonosos cuya estructura y propiedades, son similares al grafito (Quijano, 2013). Las primeras aplicaciones del carbón activado conocidas fueron la mitigación de olores, uso en máscaras en calidad de filtros, para evitar la inhalación de metales. En varios países, se ha utilizado como agente de decoloración a nivel industrial, depuración de gases, aplicaciones médicas, como catalizador para la eliminación de contaminantes y potabilización del recurso hídrico (Reinoso, 2007).

2.5.2.1. Características generales del Carbón Activado.

El carbón activado es un material poroso que se forma a partir de materias

carbonáceas como: cocos carbonizados, carbón de leña o semillas de frutas. En su mayoría, estas son pirolizadas mediante procesos de activación física y química (Shalaby, 2006). Una de las características del carbón activado, es su carácter hidrofóbico, afín con adsorbentes no polares como las sustancias orgánicas (Van Deventer, 2003). Un parámetro importante en el diseño de sistemas para la eliminación de contaminantes es la adecuada selección del carbón activo, tomando en cuenta su diferencia de tamaños de poros (Núñez, 2016). Los poros con tamaño menor o igual a 2 nm., son llamados microporos (fenómeno de adsorción en mayor medida), los de tamaño intermedio entre 2 y 50 nm., son denominados mesoporos, y los que superan tamaños de 50 nm., son llamados macroporos. El carbón activado, se puede clasificar en dos tipos, granular y polvo, dependiendo del tamaño del grano (grano grueso o grano fino) (IUPAC, 2019).

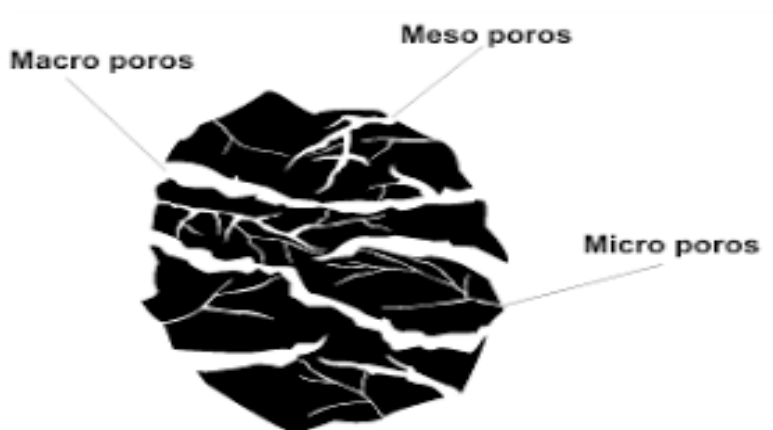


Figura 2. Tamaño de poros presente en la estructura básica del carbón activado. Este apartado muestra los distintos tamaños de poros del material de carbón activado. Tomado de (Serp, 2009).

2.5.2.2. Carbón Activado como catalizador de un POA.

El uso del carbón activado como catalizador se basa en su estructura altamente porosa y su área superficial (Serp, 2009). Este material presenta propiedades únicas y versátiles ideales para ser empleado como catalizador

(Carvalho, 2016). Sus principales ventajas son:

- Resistencia a medios ácidos y básicos.
- Estabilidad térmica en ausencia de aire.
- Estructura porosa para diferentes aplicaciones.
- Química superficial modificable.

En la actualidad, el carbón activado ha sido empleado como soporte catalítico en distintas reacciones medioambientales para la reducción de nitratos, oxidación húmeda, oxidación total de COVs y como catalizador en donde se considera un material eficaz en remoción (Abdelouahab, 2015).

El uso del carbón activado como catalizador se sustenta en su estructura altamente porosa y grande área superficial (Serp, 2009). En un estudio realizado por Grey (2017), menciona que la presencia de color en el recurso hídrico afecta directamente al ambiente; por lo tanto, se debería implementar técnicas de tratamiento que empleen carbón activado como catalizador, con el fin de eliminar o reducir su intensidad.

El carbón activado presenta ventajas competitivas ante otros sistemas de tratamientos fisicoquímicos para la remoción de color y otros contaminantes que se encuentran presentes en los lixiviados provenientes de botaderos de basura (Benavides, 2004).

2.5.3. Zeolita.

Las zeolitas, son sólidos cristalinos microporosos compuestos por tetraedros (Si, AlO_4), que se expanden en tres dimensiones, permitiendo el almacenamiento de moléculas o iones necesarios para procesos de adsorción (Terol, 2015). Este material, es de gran importancia para la industria química debido a su poder de intercambio catiónico, generalmente es utilizado para el ablandamiento del agua y como tamiz molecular para la separación de moléculas de diferentes tamaños y formas (Rodas, 2016).

La fórmula estequiométrica genérica de las zeolitas es:



Donde:

M: catión de compensación

n: valencia de este catión

w: número de moléculas de agua

(x;y): número de tetraedros por celda unidad.

2.5.3.1. Características generales de la Zeolita.

Este material comprende un grupo de aluminosilicatos cristalinos con poros definidos o denominados canales, los cuales presentan una estructura cristalina con cavidades similares a las de una jaula. Estas cavidades, contienen cationes metálicos intercambiables (Na⁺, K⁺, entre otros) y pueden almacenar diferentes tipos de moléculas con distintos tamaños (Wu, 2012).

Las zeolitas se denominan cationes intercambiables por lo que presentan fácil movilidad y pueden ser reemplazados por otros cationes, de esa manera, son utilizados como materiales de intercambio catiónico (Smart, 2005). La zeolita al deshidratarse desarrolla una estructura porosa con diámetros de poro entre 3 y 10 °A (angstroms), que forman cavidades habitadas por iones de mayor tamaño, permitiendo la deshidratación y el intercambio entre cationes (Auerbach, 2003).

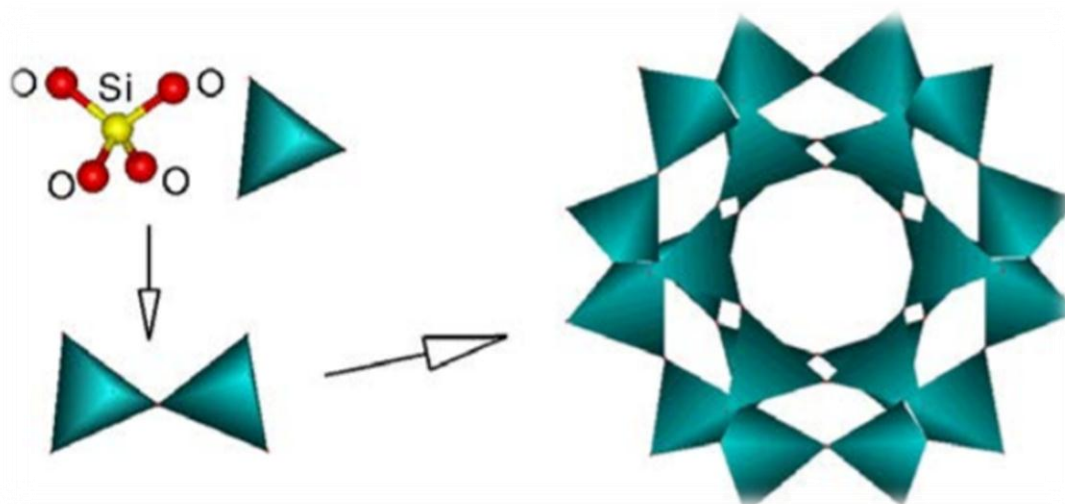


Figura 3. Unidad estructural básica de una zeolita con átomos de oxígeno y de silicio en el tetraedro. Este apartado muestra la estructura básica del material de zeolita. Tomado de (Mustelier, 2014).

2.5.3.2. Zeolita como catalizador de un POA.

Investigaciones recientes, han implementado el uso de catalizadores a base de zeolita gracias a su amplia variedad de reacciones de aplicación industrial. Actualmente, 56 zeolitas son de origen natural, pero se han sintetizado más de 150 estructuras para la aplicación como nuevos catalizadores (Ballesteros, 2013).

Las zeolitas, son utilizadas como absorbentes de contaminantes del agua, el 60% de zeolitas sintéticas, se utilizan para el ablandamiento del agua por intercambio iónico; y el 40% restante, como catalizadores y absorbentes (Xu, 2007). Según Corma (2010), a través de su artículo sobre: catálisis con zeolitas desde el laboratorio a su aplicación industrial, menciona que es posible el uso de este material como catalizadores a través de las cavidades presentes en su estructura y poder de encapsulamiento de macromoléculas. De esta forma, estas estructuras podrán ser preparadas con menor electronegatividad y cationes de compensación alcalinos.

La actividad catalítica de la zeolita se encuentra determinada por ciertos factores como su estructura, tipo, tamaño, relación Si/Al, entre otros. La preparación (síntesis) de zeolita, presenta grandes ventajas en su uso, siendo su producción muy atractiva en la actualidad (Van Santen, 2006).

La zeolita es un material de gran eficiencia para la remoción de contaminantes presentes en el agua, su capacidad de remoción de color supera el 50%. El uso más extendido de las zeolitas, en distintos campos, es como catalizadores en varios procesos químicos (Vargas, 2015). Para este material, es importante realizar un tratamiento con ácido que potencia la eficiencia en el desarrollo de poros y posterior un lavado del material para remover el ácido restante, con el fin de evitar todo tipo de bloqueo en los nuevos poros y aprovechar este material en su máxima capacidad de remoción de color y de contaminantes presentes en el agua (Grau, 2016).

La zeolita presenta mayor afinidad con diferentes iones y cationes que permiten el intercambio catiónico. Por esta razón, este material es utilizado frecuentemente en el tratamiento de lixiviados, debido a que presenta eficiencia de remoción de color, amonio y metales pesados (Díaz, 2018).

2.5.4. Ventajas de aplicación de POAs Fotoquímicos.

Estos procesos fotoquímicos pueden ser utilizados como pretratamiento de aguas residuales o, para acelerar el proceso de degradación en componentes no biodegradables. Por esta razón, se presentan varias ventajas en la elección de este tipo de tratamiento (Terán, 2016):

- En su gran mayoría se logran la mineralización del contaminante.
- No genera subproductos.
- Es un proceso útil para contaminantes refractarios que no han sido eliminados totalmente en otros tratamientos (resistentes).

- Aumenta la velocidad de reacción con presencia de luz.
- Ideal para el tratamiento de contaminantes a bajas concentraciones.
- Mejora la calidad organoléptica del agua tratada.
- Consumo de menor cantidad de energía en comparación con la incineración.
- Eliminación y reducción de efectos negativos en la salud de las personas.

2.6. Activación termoquímica de los materiales.

El proceso de activación consiste en dos fases: activación o tratamiento físico en donde los materiales son sometidos a elevadas temperaturas; y, activación o tratamiento químico, el cual requiere someter el material activado físicamente en un medio ácido (HNO_3) para su completa activación. Estas dos fases son necesarias para que los materiales actúen como catalizadores y potenciar su capacidad de absorción para la remoción de contaminantes.

2.6.1. Tratamiento Físico.

En esta primera fase de activación, se logra la deshidratación y la desvolatilización de forma controlada al someter los materiales a elevadas temperaturas. La activación, dependiendo del material y equipo a utilizar se realiza a temperaturas entre (180°C a 800°C). Por lo tanto, en esta fase se forman nuevos poros que inducen al desarrollo de una estructura microporosa (Mui, 2004).

Las ventajas que presenta este proceso (Mora, 2004) son:

- Eliminación de hidrocarburos retenidos.
- Eliminación de productos volátiles.
- Alta capacidad de adsorber otras sustancias.
- Incremento del tamaño de poros.

Una de las desventajas presentes en este tipo de procesos es la generación de quemado por temperaturas no adecuadas para el material y tiempos altos de reacción, evitando la formación de poros.

2.6.2. Tratamiento Químico.

En esta segunda fase, la activación química consiste en la reacción entre el sólido y un agente químico, en donde la concentración de los reactivos, la temperatura y el tiempo de activación determinan la extensión de reacción. Al finalizar este proceso es necesario realizar un lavado con agua destilada de los materiales para eliminar los restos de agente activante (Sabio, 2004). Los agentes químicos mayormente utilizados en este proceso de activación química son: $ZnCl_2$, H_3PO_4 , $AlCl_3$, $MgCl_2$, HNO_3 , KOH y $NaOH$ (Rodenas, 2004).

Las ventajas que presenta este proceso (Kadlec, 2004), son:

- Los agentes químicos actúan como fuertes deshidratantes permitiendo la combinación de hidrógeno con el oxígeno para formar agua.
- La mayor parte de estos compuestos se transforman en compuestos de carbono.
- Los poros quedan libres.
- Alta capacidad absorbente.
- Producto final con amplia área superficial.
- El rendimiento es mayor que el método de activación física (poros de mayor tamaño).

La desventaja es el requerimiento de una etapa previa de lavado de materiales con el fin de remover cantidades de polvo (Teng, 1998).

3. CAPÍTULO III. METODOLOGÍA.

3.1. Diagrama general del plan experimental.

La figura 4 presenta un resumen de cada punto a tratar en este capítulo, de esta manera lograr el cumplimiento de los objetivos planteados en este estudio.

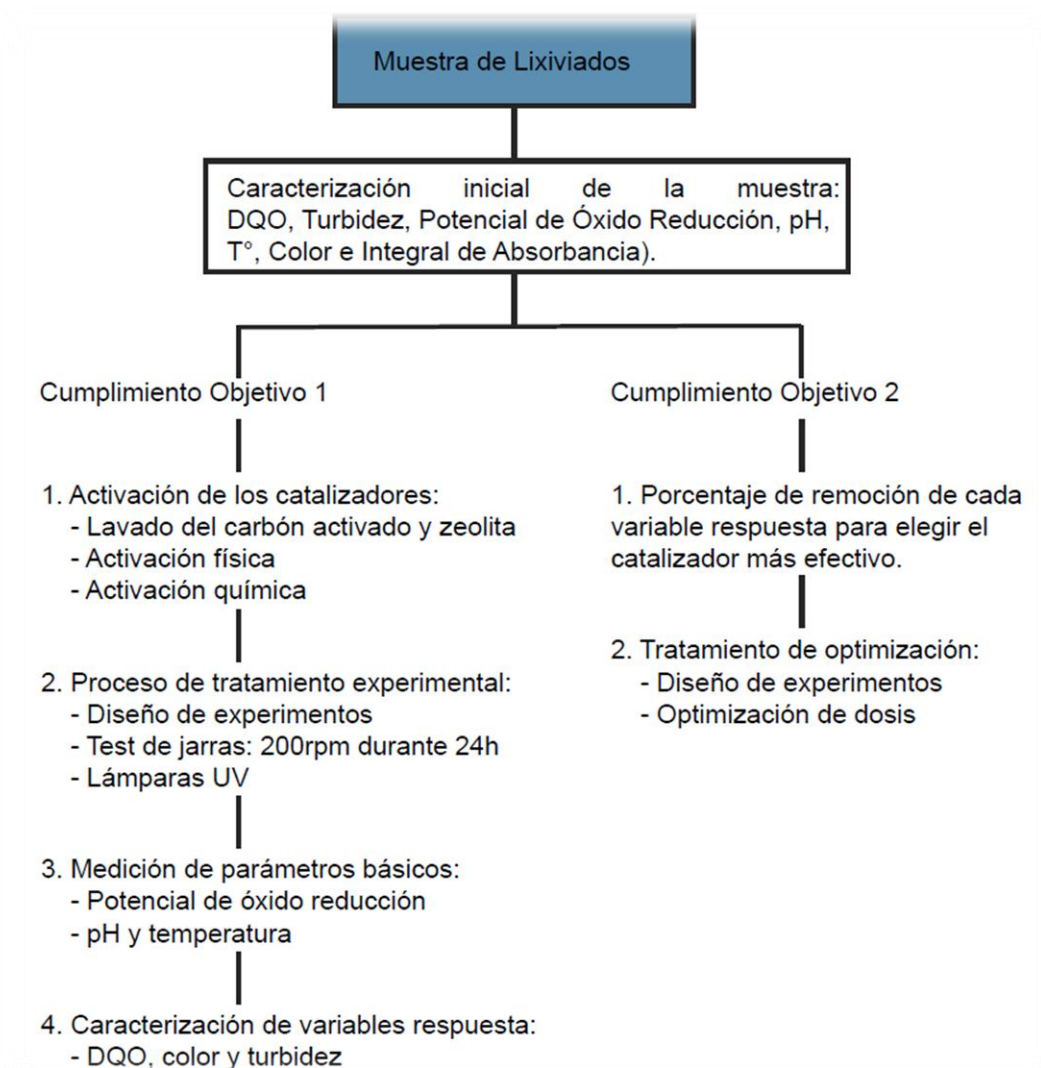


Figura 4. Diagrama general del plan experimental. Este apartado muestra el diagrama general de estudio. Adaptado de (Banchón, 2018).

3.2. Caracterización inicial de la muestra.

Se analizaron parámetros básicos en la muestra de lixiviados, como: temperatura, pH, potencial de óxido reducción (ORP) y corrida de absorbancia. Además, se analizó variables respuesta como: DQO, color y turbidez.

3.3. Activación de los catalizadores.

La activación de los catalizadores conlleva 3 pasos importantes: primero, el lavado de los materiales para remover todo el polvo presente en el carbón activado y zeolita; segundo, la activación física mediante la adición de calor; y, tercero, activación química a través de la adición de un agente químico (ácido nítrico).

3.3.1. Lavado del carbón activado y zeolita.

El lavado de los materiales es primordial para reducir la presencia de polvo en los materiales, se realizó con agua destilada, tamices de plástico y un par de guantes de nitrilo. Los materiales se lavaron por separado, durante 5 horas refregando con fuerza, para remover el polvo presente en los materiales. El secado del carbón activado y zeolita se realizó en papel absorbente.



Figura 5. Remoción del polvo presente en el carbón activado y zeolita mediante el uso de agua destilada. Este apartado muestra el lavado de los materiales.

3.3.2. Activación física.

Para iniciar este proceso, se pesó 100 gramos de carbón activado y 100 gramos de zeolita en la balanza analítica; después, se colocaron los materiales en dos crisoles diferentes. Se sometieron los materiales a elevadas temperaturas en la mufla durante 3 horas (carbón activado: 180°C y zeolita: 515°C). Se dejó enfriar las muestras durante 12 horas para poder manipularlas y continuar efectivamente con la siguiente activación.



Figura 6. Activación física del carbón activado y zeolita. Este apartado muestra el proceso de activación física del carbón activado y zeolita con el uso de materiales de laboratorio.

3.3.3. Activación química.

Para cumplir con la activación química los materiales deben ser sometidos a un medio ácido. Para el efecto, se colocó los materiales en ácido nítrico (HNO_3 al 69% de pureza), aplicando la siguiente ecuación:

$$M = \frac{m}{PM \cdot V_L} \quad (\text{Ecuación 9})$$

Resolución:

$$m = \frac{5 \text{ mol}}{L} * \frac{63 \text{ g}}{\text{mol}} * 2 L$$

$$m = 630 \text{ g HNO}_3 * \frac{100 \text{ g HNO}_3}{69 \text{ g HNO}_3} * \frac{1 \text{ mL}}{1.41 \text{ g}}$$

$$m = 647.55 \text{ mL HNO}_3$$

El ácido fue manipulado al interior de una sorbona, se usó equipos de protección personal (mandil, mascarilla y guantes de nitrilo) y se colocó los 647.55 ml de HNO₃ en un balón de vidrio de 2 Litros, y se aforó con agua destilada. Después, en dos vasos de precipitación se colocaron 600 ml de HNO₃, en cada uno y se añadió carbón y zeolita activados físicamente. Se colocó parafilm en cada vaso de precipitación para conservar la mezcla y se dejó actuar durante 12 horas en la cabina de extracción de ácidos.

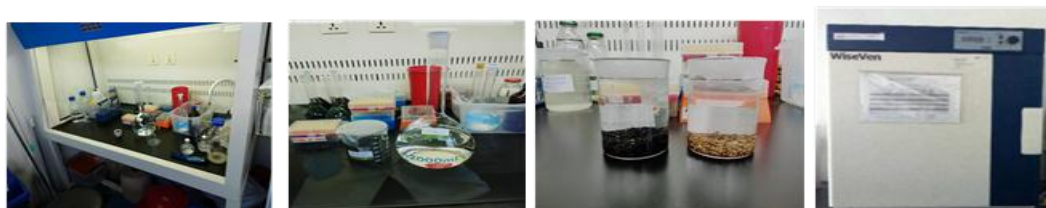


Figura 7. Activación química del carbón activado y zeolita. Este apartado muestra el proceso de activación química con el uso de ácido nítrico al 69% de pureza.

Después del tiempo transcurrido, se utilizaron dos tamices de plástico para separar al carbón activado y zeolita del ácido nítrico. Se lavó a cada material con abundante agua destilada para liberar en su totalidad el agente químico presente. Finalmente, para completar su activación se colocó al carbón activado y zeolita en dos crisoles diferentes dentro de la estufa a 100°C durante 12 h, de esta manera, se obtuvo carbón activado y zeolita activados termoquímicamente que actuaron como catalizadores en este estudio.

3.4. Proceso de tratamiento experimental.

Los catalizadores de carbón activado y zeolita fueron colocados en diferentes vasos de precipitación, se utilizó el test de jarras a 200 rpm durante 1 h y con lámparas UV; posterior, se dejó actuar durante 24 horas únicamente con el uso de lámparas UV (sin mezcla), de esta manera, lograr el aumento de velocidad de reacción y optimizar el proceso.

3.4.1. Diseño de experimentos.

En este diseño experimental se realizó un diseño factorial con el programa SPSS Statistics, donde se analizó los efectos de los factores en las variables analizadas (color, turbidez y DQO); de esta manera, se realizó un diseño 3x2 con 3 repeticiones por cada tratamiento. En este proceso, el medio oxidante que reaccionó con ambos catalizadores fue el peróxido de hidrógeno (H_2O_2 al 50%). Se siguió la metodología establecida por Banchón (2019), el consta de 3 tratamientos y sus respectivos blancos; además, se variaron las cantidades de los catalizadores de carbón activado y zeolita (g), y también el volumen de peróxido de hidrógeno al 50% por cada tratamiento como se observa en la siguiente tabla.

Tabla 4

Diseño experimental del estudio con los catalizadores.

Oxidación Avanzada con catalizadores				Variables Respuestas			
Tratamientos		Carbón Activado (g)	Zeolita (g)	Peróxido de Hidrógeno 50% (mL)	Turbidez (NTU)	Color (PtCo:)	DQO (mg/L)
Blanco (Lixiviado UV)	1	0	0	0			
	+	0	0	0			
		0	0	0			
Blanco (Lixiviado UV+ H_2O_2)	2	0	0	4			
	+	0	0	8			
		0	0	12			
Tratamiento 1 (2 g Catalizador ; 4 mL H_2O_2 al 50%)							
Tratamiento 1 (T1)		2	0	4			
		2	0	4			
		2	0	4			
		0	2	4			
		0	2	4			
		0	2	4			

Tratamiento 2 (5 g Catalizador ; 8 mL H ₂ O ₂ al 50%)						
Tratamiento 2 (T2)	5	0	8			
	5	0	8			
	5	0	8			
	0	5	8			
	0	5	8			
	0	5	8			
Tratamiento 3 (10 g Catalizador ; 12 mL H ₂ O ₂ al 50%)						
Tratamiento 3 (T3)	10	0	12			
	10	0	12			
	10	0	12			
	0	10	12			
	0	10	12			
	0	10	12			

Nota. Diseño experimental con el uso de los catalizadores.

3.5. Medición de parámetros básicos.

3.5.1. Medición del potencial de óxido reducción.

Se midió el potencial de óxido reducción de la muestra con el potenciómetro marca HANNA Instruments, modelo HL 2550, que permite cuantificar el intercambio de electrones que identifican la presencia de sustancias oxidantes o reductoras. Si el potencial de óxido reducción es positivo, indica que se ha producido una oxidación, y negativa cuando se ha producido una reducción. El valor obtenido se expresa como mV Rel.

3.5.2. pH y temperatura.

En la medición de pH y temperatura se utilizó el equipo pH-metro de mesa marca BOECO Germany, modelo BT-675. Para medir el pH se lavó el electrodo con agua destilada y luego se secó cuidadosamente con papel. Después, se introdujo el electrodo en la muestra de lixiviados. Este equipo cuenta con una pantalla digital en donde se obtuvo valores de pH y temperatura (°C). Es importante esperar unos minutos en la medición hasta que el valor se estabilice por completo. Al finalizar su uso, se lava nuevamente el electrodo con agua destilada y se seca con papel.

3.6. Caracterización de variables respuesta.

3.6.1. DQO.

Para medir la demanda química de oxígeno (DQO) se realizó mediante un kit de marca Lovibond. Se colocó en un tubo del kit de test DQO (1500 mg/l) y se añadió 2 ml de la muestra de lixiviados con el uso de micropipeta. Se agitó verticalmente 3 veces para lograr su completa homogenización. Después, se colocó a 148°C el tubo de DQO en un bloque digestor, marca Macherey-Nagel durante 2 horas. Al finalizar, se dejó enfriar el tubo durante 1 hora. Luego, se colocó el espectrofotómetro NANOCOLOR, modelo UV/VIS II a 620 nm., por medio del método 029 para medir la demanda química de oxígeno en un rango de lectura de 100 a 1500 mg/L O₂, como se observa a continuación.

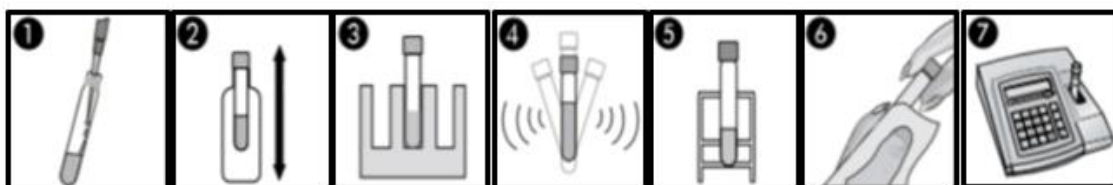


Figura 8. Proceso de obtención de la Demanda Química de Oxígeno (DQO). Este apartado muestra los pasos para el análisis para de DQO.

3.6.2. Color.

Para medir el color se colocó en un tubo de ensayo la muestra y con el equipo espectrofotómetro NANOCOLOR, modelo UV/VIS II y se procedió a medir el color en unidades de platino (Pt-Co:).

3.6.3. Turbidez.

Se midió la turbidez de cada muestra con el equipo espectrofotómetro NANOCOLOR, modelo UV/VIS II, en donde se obtuvo datos en unidades nefelométricas de turbidez (NTU). Se utilizó agua destilada en otro tubo de ensayo como valor cero.

3.6.4. Corrida de absorbancia.

Para determinar la corrida de absorbancia se utilizó el equipo espectrofotómetro NANOCOLOR, modelo UV/VIS II, en donde se analizó agua ultra pura (cero), agua muestra de lixiviados y agua obtenida del mejor experimento con catalizador (carbón activado), de esta manera se pudo comparar el comportamiento de los contaminantes a través de un haz de luz en una longitud de onda de 200 a 900 nm del agua ultra pura, agua de lixiviados y agua de la mejor muestra obtenida con catalizador.

3.7. Tratamiento de optimización.

Se determinó los porcentajes de remoción de cada variable respuesta mediante la ecuación planteada por (Gutiérrez, 2014).

$$\text{Remoción (\%)} = \frac{(\text{Concentración entrada} - \text{Concentración salida})}{\text{Concentración entrada}} \times 100 \quad (\text{Ecuación 10})$$

Finalmente, se eligió el catalizador más efectivo que obtuvo los mejores resultados de remoción siendo el carbón activado; además, se procedió analizar la influencia de distintas dosis de peróxido de hidrógeno al 50% para la optimización de su dosis en un segundo experimento.

3.7.1. Diseño de experimentos con el catalizador efectivo.

3.7.1.1. Optimización de Dosis.

En un segundo diseño de experimentos se analizó la influencia de distintas dosis del peróxido de hidrógeno al 50% en conjunto con la cantidad efectiva de catalizador de carbón activado obtenido en el primer diseño experimental. Según Martínez (2008) en su estudio menciona que, la cantidad de agente oxidante (peróxido de hidrógeno) es una variable determinante en la determinación de la eficiencia del proceso. De esta manera, es importante

determinar la dosis óptima de peróxido de hidrógeno (H_2O_2). La presencia de peróxido de hidrógeno en altas concentraciones provoca su reacción con radicales hidroxilo, pero a su vez, disminuye la cantidad de concentraciones de radicales disponibles en el medio de reacción.

Con el fin de conocer la influencia de dosis de peróxido de hidrógeno (H_2O_2 al 50%) y determinar la concentración óptima se analizó: seis diferentes concentraciones de peróxido de hidrógeno con la cantidad de catalizador efectivo de carbón activado como se observa en la siguiente tabla.

Tabla 5

Optimización dosis de peróxido de hidrógeno y catalizador efectivo.

Optimización			Variables Respuestas		
Catalizador Carbón Activado	Cantidad (g)	Peróxido de Hidrógeno 50% (mL)	Turbidez (NTU)	Color (Pt- Co:)	DQO (mg/L)
CA1	10	5			
CA2	10	10			
CA3	10	15			
CA4	10	20			
CA5	10	25			
CA6	10	30			

Nota. Datos propuestos para el proceso de optimización de dosis.

4. CAPÍTULO IV. RESULTADOS.

4.1. Análisis Descriptivo.

El proceso empieza con la caracterización inicial de la muestra de lixiviados, en donde, se obtuvo resultados de temperatura, pH, potencial de óxido reducción (ORP), corrida de absorbancia y variables respuesta como: DQO, color y turbidez.

Tabla 6

Caracterización inicial de la muestra de lixiviados del botadero de Naranjito.

Caracterización Inicial (Muestra de Lixiviados)	Valor	Unidades
Conductividad	3.12	µs/cm
pH	8.5	upH
Temperatura	4	°C
Potencial Óxido Reducción (ORP)	127	mV Rel
Color	>600	Unidades Pt-Co:
DQO	272	mg/L O ₂
Turbidez	387,6	NTU

Nota. Datos obtenidos de la caracterización inicial de la muestra.

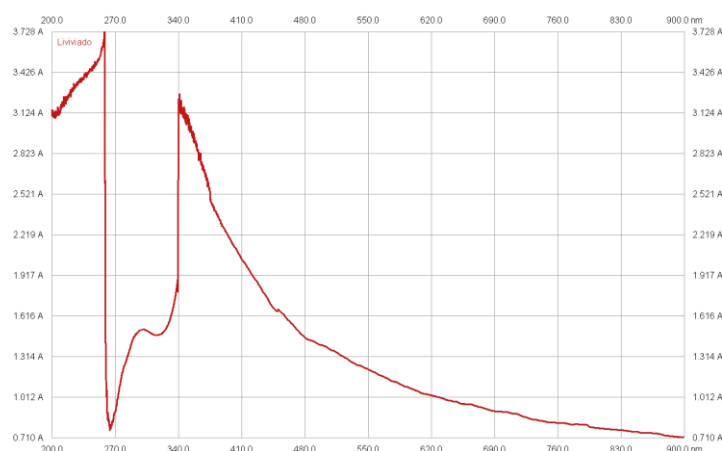


Figura 9. Corrida de absorbancia inicial de la muestra de lixiviados.

En la siguiente tabla se observan los límites máximos permisibles según el Anexo 1 del Libro VI del Texto Unificado de Legislación Ambiental Secundaria del Ministerio de Ambiente (TULSMA), en donde se observa los límites de descarga a un cuerpo de agua dulce (AM 097-A Tabla 9).

Tabla 7

Límites de descarga a un cuerpo de agua dulce.

Parámetros	Expresado como	Unidad	Límite máximo permisible
Demanda Química de Oxígeno	DQO	mg/L	200
Temperatura	°C	-	Condición normal \pm 3
Potencial de Hidrógeno	pH	-	6 - 9

Nota. Límites máximos permisibles para descargas a un cuerpo de agua dulce.

De esta manera, al comparar la caracterización inicial de la muestra de lixiviados se evidencia el incumplimiento de la normativa ambiental vigente para descargas a cuerpos de agua dulce, debido a que los lixiviados generados en el botadero de Naranjito no cuentan con ningún tipo de tratamiento ni control previo a su descarga.

4.1.1. Experimentación a dosis baja.

4.1.1.1. Ensayos con catalizador de carbón activado.

Las pruebas experimentales durante la primera hora generaron los siguientes resultados:

Tabla 8

Valores obtenidos a dosis baja con catalizador de carbón activado (1 hora).

Dosis	Subtratamientos	Color Pt-Co:	Turbidez (NTU)
Baja	Catalizador	578	65
Baja	Catalizador	582	65.5
Baja	Catalizador	579	64.2
Promedio		579.7	64.9
% de Remoción		3%	83%

Nota. Datos obtenidos a dosis baja de catalizador de carbón activado.

Según los datos de la tabla 8, el porcentaje de reducción del color fue de 3%. Por cuanto varió de 600 hasta un valor promedio de 579,7. Para la otra variable, del valor inicial de la muestra de 387.6 NTU, se obtuvo una media de 64,9 NTU, para un 83% de descenso de la turbidez. Esto indica que, a bajas dosis de catalizador de carbón activado y medio oxidante al 50% no es óptimo para lograr una efectiva reducción de color.

Es importante considerar un tiempo de reposo (sin mezcla) en donde el catalizador y el medio oxidante actúen de manera efectiva y aumenten la velocidad de reacción en conjunto con el uso de las lámparas UV. Por esta razón, se decidió tomar una segunda muestra del mismo experimento 24 horas después.

Tabla 9

Valores obtenidos a dosis baja con catalizador de carbón activado (24 horas).

Dosis	Subtratamientos	Color (Pt-Co:)	Turbidez (NTU)
Baja	Catalizador	414	10.1
Baja	Catalizador	420	9.5
Baja	Catalizador	415	17.6
Promedio		416.3	12.4
% de Remoción		31%	97%

Nota. Datos obtenidos a dosis baja de catalizador de carbón activado.

En una segunda toma de muestra (24 h), el porcentaje de remoción de color y turbidez incrementaron al 31% y 97% respectivamente, en comparación de 3 y

83% de la primera muestra, esto indica que, la reacción del catalizador y del medio oxidante es más efectivo después de un tiempo de reposo (sin mezcla), en donde el catalizador y el medio oxidante continúan de manera efectiva su proceso de reacción aumentando su capacidad de remoción.

4.1.1.2. Ensayos con carbón activado lavado.

Tabla 10

Valores obtenidos a dosis baja con carbón activado lavado (1 hora).

Dosis	Subtratamientos	Color (Pt-Co)	Turbidez (NTU)
Baja	Lavado	563	19.7
Baja	Lavado	563	29.3
Baja	Lavado	572	21.8
Promedio		566	23.6
% de Remoción		6%	94%

Nota. Datos obtenidos a dosis baja con carbón activado.

La remoción del color y turbidez es de 6% y 94% respectivamente. En tanto que a las 24 horas es del 26 y 96% respectivamente (tabla 11). Esto indica que, en un tiempo de 1 hora, con material de carbón activado lavado aumenta su capacidad de remoción a bajas dosis. Sin embargo, es necesario lograr un porcentaje de remoción de color mayor del 95%. De esta manera, se realizó una segunda toma de muestra 24 horas después y se obtuvo lo siguiente:

Tabla 11

Valores obtenidos a dosis baja con carbón activado lavado (24 horas).

Dosis	Subtratamientos	Color (Pt-Co)	Turbidez (NTU)
Baja	Lavado	440	13.6
Baja	Lavado	444	14.5
Baja	Lavado	440	17.8
Promedio		441.3	15.3
% de Remoción		26%	96%

Nota. Datos obtenidos a dosis baja con carbón activado.

El porcentaje de disminución del color a las 24 horas, en comparación a la primera hora es 4,3 veces superior. La turbidez mejora apenas dos puntos.

Los resultados a baja dosis tanto del catalizador de carbón activado como lavado presentan porcentajes de reducción, eso indica que el tratamiento si tiene efecto en la muestra de lixiviados.

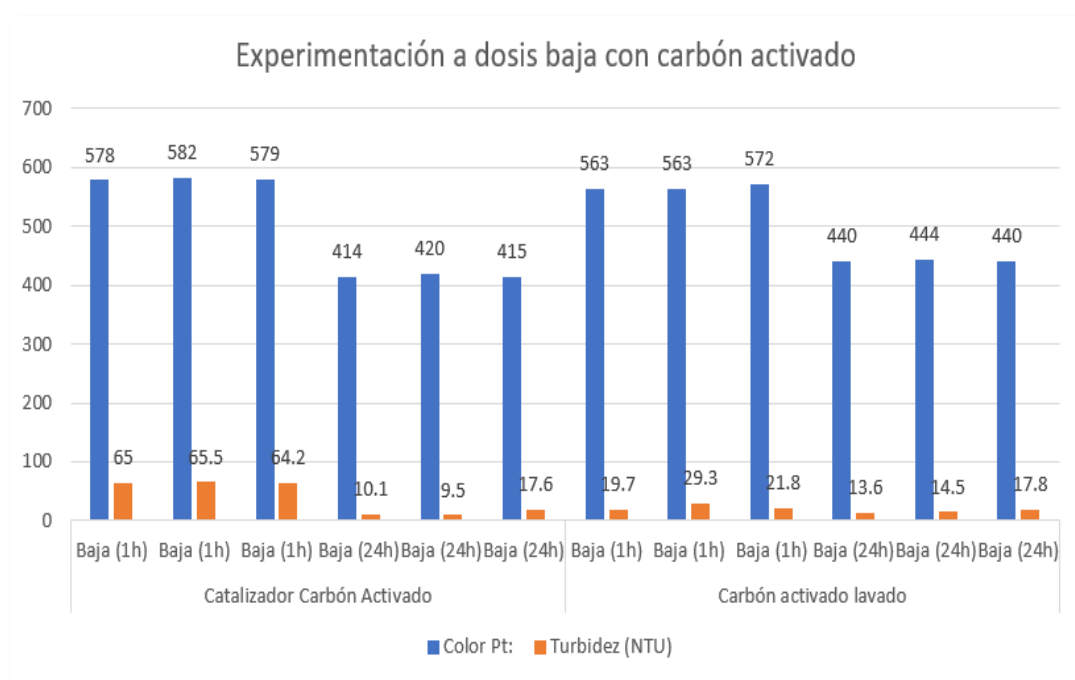


Figura 10. Experimentación a dosis baja con carbón activado.

El uso de un catalizador de carbón activado a bajas dosis con un tiempo de 24 horas presenta mejoras en la remoción de color y turbidez. Como se analiza en la figura 12, el catalizador de carbón activado logra remover el color a Pt-Co: 414 y turbidez de 9.5 NTU, logrando un 31% y 97% de remoción, respectivamente. Al comparar un catalizador de carbón activado con carbón activado lavado demuestra que, un catalizador es más efectivo en su capacidad de remoción al reaccionar con un medio oxidante, por ende, es necesario aprovechar su máximo potencial con un adecuado proceso termoquímico.

4.1.1.3. Ensayos con catalizador de zeolita.

Estos ensayos generaron los siguientes resultados:

Tabla 12

Valores obtenidos a dosis baja con catalizador de zeolita (1 hora).

Dosis	Subtratamientos	Color	
		(Pt-Co)	Turbidez (NTU)
Baja	Catalizador	559	9.8
Baja	Catalizador	563	7.5
Baja	Catalizador	559	9.3
Promedio		560.3	8.9
% de Remoción		7%	98%

Nota. Datos obtenidos a dosis baja con catalizador de zeolita.

A bajas dosis el ensayo con catalizador de zeolita, en la primera hora, muestra un porcentaje de remoción del color equivalente al 7%, en tanto que la turbidez presenta un 98% de disminución.

Tabla 13

Valores obtenidos a dosis baja con catalizador de zeolita (24 horas).

Dosis	Subtratamientos	Color	
		(Pt-Co)	Turbidez (NTU)
Baja	Catalizador	321	2.3
Baja	Catalizador	318	2.3
Baja	Catalizador	321	3.1
Promedio		320.0	2.6
% de Remoción		47%	99%

Nota. Datos obtenidos a dosis baja de catalizador de zeolita.

Los valores obtenidos a las 14 horas tanto para color como para turbidez son mejores, así para el color un 47% y para la turbidez un 99%.

En comparación con los datos iniciales de variables (color y turbidez) con el transcurso del tiempo presenta mayor remoción. Entre la primera hora, se alcanza color Pt-Co: 559, pero a diferencia de las 24 horas este alcanza Pt-Co:

318. En la variable turbidez, durante la primera hora alcanza 7.5 NTU y en 24 horas alcanza 2.3 NTU.

4.1.1.4. Ensayos con zeolita lavada.

Tabla 14

Valores obtenidos a dosis baja con zeolita lavada (1 hora).

Dosis	Subtratamientos	Color	
		(Pt-Co)	Turbidez (NTU)
Baja	Lavado	502	17.7
Baja	Lavado	502	8.2
Baja	Lavado	503	10.8
Promedio		502.3	12.2
% de Remoción		16%	97%

Nota. Datos obtenidos a dosis baja con zeolita lavada.

Con el uso de zeolita lavada a dosis baja la remoción de color alcanza un 16% y en turbidez un 97%. En la tabla 15 se ilustran los valores obtenidos a las 14 horas. Solo el valor del color incrementa del 16% hasta 39%, en tanto que la turbidez, no varía.

Tabla 15

Valores obtenidos a dosis baja con zeolita lavada (24 horas).

Dosis	Subtratamientos	Color (Pt-Co)	Turbidez (NTU)
Baja	Lavado	364	8.1
Baja	Lavado	364	13.9
Baja	Lavado	365	11.5
Promedio		364.3	11.2
% de Remoción		39%	97%

Nota. Datos obtenidos a dosis baja de zeolita lavada.

Se comprueba que a mayor tiempo de reposo (sin mezcla), más efectivo es el proceso de reacción. De esta manera, las variables de color y turbidez presentan mayor porcentaje de remoción a 24 horas con lámparas UV.

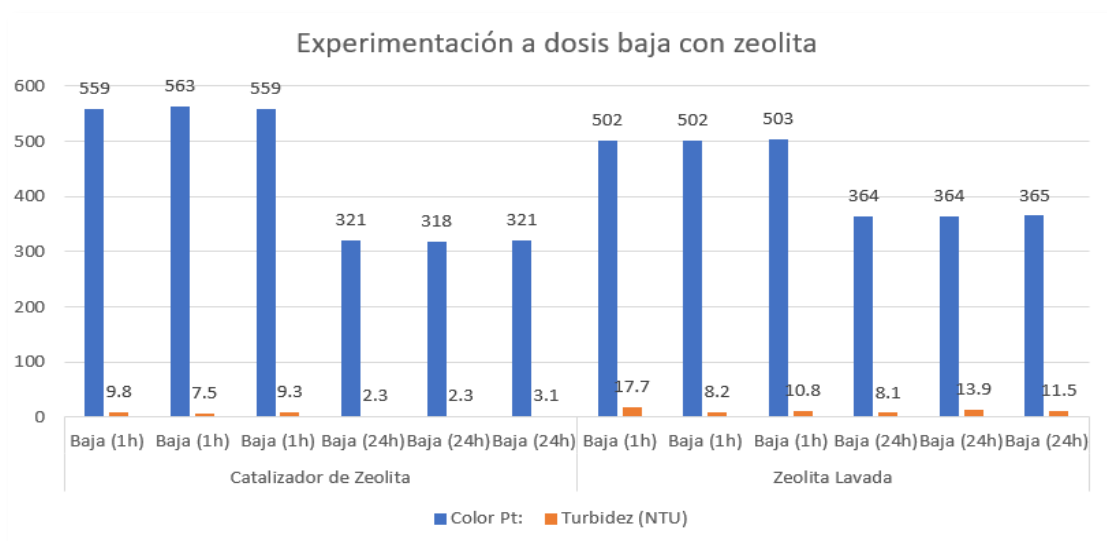


Figura 11. Experimentación a dosis baja con zeolita.

En comparación con catalizador de zeolita o lavado de zeolita a bajas dosis, predomina el catalizador debido a su mayor grado de remoción. El catalizador de zeolita después de 24 horas alcanza Pt-Co: 318 y turbidez de 2.3 NTU, siendo efectivo el uso de catalizador a estas dosis.

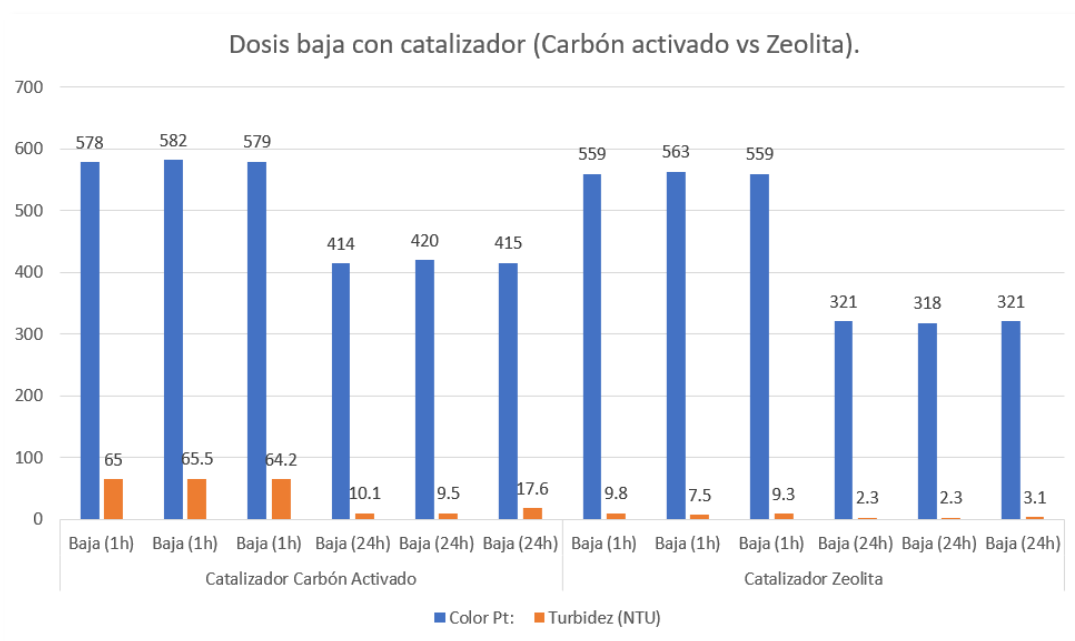


Figura 12. Variación de remoción a dosis baja con catalizador de carbón activado y zeolita.

4.2. Experimentación a dosis media.

4.2.1. Ensayos con catalizador de carbón activado.

Tabla 16

Valores obtenidos a dosis media con catalizador de carbón activado.

1 hora			
Dosis	Subtratamientos	Color (Pt-Co)	Turbidez (NTU)
Media	Catalizador	600	188.2
Media	Catalizador	578	194.7
Media	Catalizador	596	192.3
	Promedio	591.3	191.7
	% de Remoción	1%	51%
24 horas			
Dosis	Subtratamientos	Color (Pt-Co)	Turbidez (NTU)
Media	Catalizador	257	17.4
Media	Catalizador	241	18.1
Media	Catalizador	241	16
	Promedio	246.3	17.2
	% de Remoción	59%	96%

Nota. Datos obtenidos a dosis media con catalizador de carbón activado.

Como se observa en la tabla 16, durante la primera hora de reacción las variables color y turbidez alcanzan el 1% y 51% de remoción respectivamente. Sin embargo, después de 24 horas, la reducción de color incrementa a 59% y la turbidez a 96%.

El color alcanza el valor de Pt-Co: 241 y turbidez de 16 NTU en un periodo de 24 horas, siendo un tiempo adecuado para la reacción del catalizador de carbón activado y un medio oxidante.

4.2.2. Ensayos con carbón activado lavado.

Tabla 17

Valores obtenidos a dosis media con carbón activado lavado.

1 hora			
Dosis	Subtratamientos	Color (Pt-Co)	Turbidez (NTU)
Media	Lavado	512	40.2
Media	Lavado	520	46.4
Media	Lavado	516	44.4
	Promedio	516	43.7
	% de Remoción	14%	89%
24 horas			
Dosis	Subtratamientos	Color (Pt-Co)	Turbidez (NTU)
Media	Lavado	304	17.6
Media	Lavado	304	19.1
Media	Lavado	310	18.2
	Promedio	306.0	18.3
	% de Remoción	49%	95%

Nota. Datos obtenidos a dosis media con carbón activado lavado.

El porcentaje de remoción más efectivo de color y de turbidez es a las 24 horas con el 49% de color y el 95% de turbidez.

4.2.3. Ensayos con catalizador de zeolita.

Tabla 18

Valores obtenidos a dosis media con catalizador de zeolita.

1 hora			
Dosis	Subtratamientos	Color (Pt-Co)	Turbidez (NTU)
Media	Catalizador	554	38.6
Media	Catalizador	559	40.8
Media	Catalizador	560	42.3
	Promedio	557.7	40.6
	% de Remoción	7%	90%
24 horas			
Dosis	Subtratamientos	Color (Pt-Co)	Turbidez (NTU)
Media	Catalizador	288	5.4
Media	Catalizador	283	5.9
Media	Catalizador	283	6.2
	Promedio	284.7	5.8
	% de Remoción	53%	98%

Nota. Datos obtenidos a dosis media con catalizador de zeolita.

El catalizador de zeolita durante la primera hora de reacción presenta una alta eficiencia en la remoción de la variable turbidez 90% (38,6 NTU). A las 24 horas alcanza el 98% (5,4 NTU). La remoción de color a la primera hora es insignificante, apenas el 7% (554 Pt-Co), a las 24 horas este valor mejora sustancialmente hasta el 53% (283 Pt-Co).

De esta manera, el catalizador de zeolita es más efectivo en las 24 horas de experimentación con lámparas UV, lo cual, mediante radiación ultravioleta incrementa su velocidad de reacción y permite incrementar su capacidad de remover color y turbidez.

4.2.4. Ensayos con zeolita lavada.

Tabla 19

Valores obtenidos a dosis media con zeolita lavada.

1 hora			
Dosis	Subtratamientos	Color (Pt-Co)	Turbidez (NTU)
Media	Lavado	498	22.7
Media	Lavado	501	30.6
Media	Lavado	493	42.1
	Promedio	497.3	31.8
	% de Remoción	17%	92%
24 horas			
Dosis	Subtratamientos	Color (Pt-Co)	Turbidez (NTU)
Media	Lavado	310	15.6
Media	Lavado	309	15.8
Media	Lavado	308	15.6
	Promedio	309.0	15.7
	% de Remoción	49%	96%

Nota. Datos obtenidos a dosis media con zeolita lavada.

Durante la primera hora de reacción, la remoción de la turbidez alcanza el 92% (22,7 NTU) en tanto que a las 24 horas alcanza el 96% (15,6 NTU). El color varía del 17% (Pt-Co) a la primera hora hasta el 49% (Pt-Co) a las 24 horas.

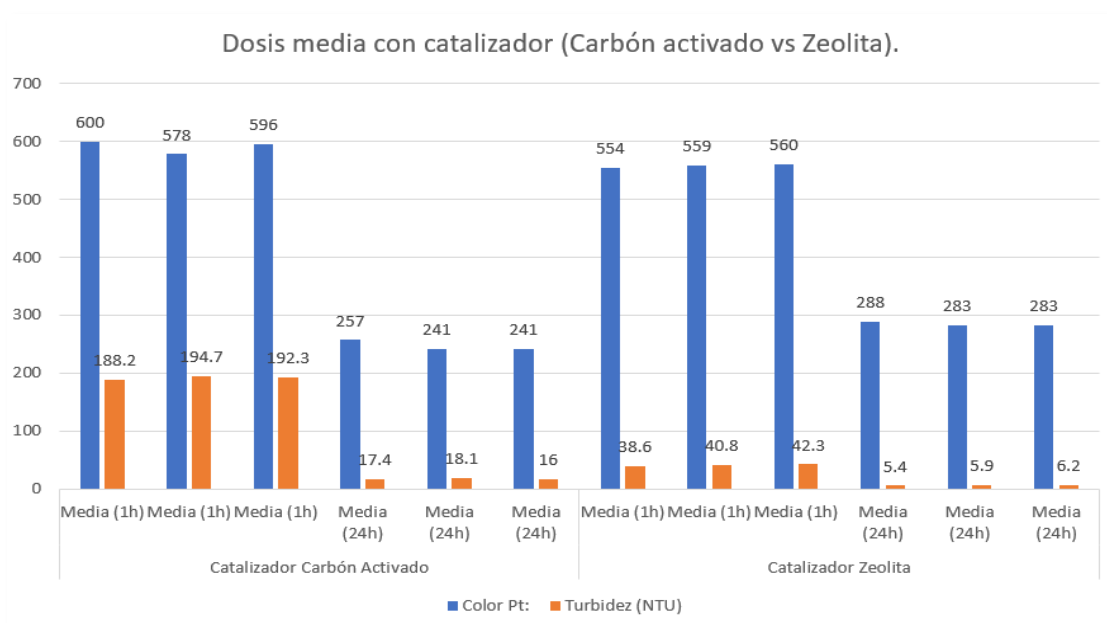


Figura 13. Valores obtenidos con ambos catalizadores analizados.

Como se puede observar, a dosis media con 5 g de catalizador (carbón activado o zeolita) y 8mL de H₂O₂ al 50% el catalizador que predomina es el carbón activado después de 24 horas de reacción; iniciando, con color en unidades de platino de Pt- Co: 600 y alcanzando al final de su proceso un Pt- Co: 241, esto indica que más del 50% fue reducido en esta variable respuesta. Por otro lado, en la variable turbidez ambos catalizadores presentan reducción alcanzando valores inferiores a 20 NTU.

4.3. Experimentación a dosis alta.

4.3.1. Ensayos con catalizador de carbón activado.

Tabla 20

Valores obtenidos a dosis alta con catalizador de carbón activado.

1 hora			
Dosis	Subtratamientos	Color (Pt-Co)	Turbidez (NTU)
Alta	Catalizador	461	260.1
Alta	Catalizador	462	188.9
Alta	Catalizador	460	215.4
	Promedio	461	221.5
	% de Remoción	23%	43%
24 horas			
Dosis	Subtratamientos	Color (Pt-Co)	Turbidez (NTU)
Alta	Catalizador	33	1.7
Alta	Catalizador	30	1.2
Alta	Catalizador	31	1.5
	Promedio	31.3	1.5
	% de Remoción	95%	100%

Nota. Datos obtenidos a dosis alta con catalizador de carbón activado.

En un tercer tratamiento, se incrementaron las dosis tanto de catalizador como del peróxido de hidrógeno al 50% (10g;12mL al 50%). Como se observa en la tabla 20, después de 24 horas de reacción se evidencia un alto porcentaje de

eficiencia en ambas variables, alcanzando un 95% de remoción en color y un 100% en turbidez. Esto indica, que en el tratamiento con dosis alta es adecuado para el catalizador de carbón activado y su poder de reacción es altamente efectivo.

El catalizador de carbón activado presenta alta eficiencia en la remoción de color y turbidez. Inicialmente, el valor obtenido de color durante la primera hora de reacción fue de Pt-Co: 461 y después de 24 horas el valor de Pt-Co: 30, superando el 90% en su remoción. Por otro lado, la variable turbidez durante la primera hora permanece en rangos de 188 y 261 NTU y después de 24 horas alcanza valores de 1.2 NTU, siendo completamente efectivo su capacidad de remoción con catalizador de carbón activado.

4.3.2. Ensayos con carbón activado lavado.

Tabla 21

Valores obtenidos a dosis alta con carbón activado lavado.

1 hora			
Dosis	Subtratamientos	Color (Pt-Co)	Turbidez (NTU)
Alta	Lavado	600	101.1
Alta	Lavado	600	121.4
Alta	Lavado	600	94.6
	Promedio	600	105.7
	% de Remoción	0%	73%
24 horas			
Dosis	Subtratamientos	Color (Pt-Co)	Turbidez (NTU)
Alta	Lavado	240	28.1
Alta	Lavado	237	26.3
Alta	Lavado	236	25.4
	Promedio	237.7	26.6
	% de Remoción	60%	93%

Nota. Datos obtenidos a dosis alta con carbón activado.

A elevadas dosis de carbón activado lavado y el medio oxidante al 50% se evidencia un porcentaje de reducción en color del 60% después de 24 horas y turbidez del 93%. Sin embargo, el color no presenta ninguna reducción durante la primera hora, por el contrario, después de 24 horas alcanza el 60% de remoción. La variable turbidez en la primera hora alcanza el 73% de remoción, pero al continuar su proceso de reacción (24 horas sin mezcla) sobrepasa el 90% de reducción. El valor inicial de color Pt-Co: 600 no indica ningún cambio durante la primera hora de reacción, por lo que, al permanecer en reposo 24 horas (sin mezcla) y lámparas UV alcanza un valor de color de Pt-Co: 236, de esta manera se remueve en más del 50%. La variable turbidez en la primera hora de reacción alcanza valores de 94.6 NTU, y 24 horas después logra un 25.4 NTU, por lo cual, su remoción es efectiva.

4.3.3. Ensayos con catalizador de zeolita.

Tabla 22

Valores obtenidos a dosis alta con catalizador de zeolita.

1 hora			
Dosis	Subtratamientos	Color (Pt-Co)	Turbidez (NTU)
Alta	Catalizador	590	112.3
Alta	Catalizador	600	120
Alta	Catalizador	598	122.5
	Promedio	596	118.3
	% de Remoción	1%	69%
24 horas			
Dosis	Subtratamientos	Color (Pt-Co)	Turbidez (NTU)
Alta	Catalizador	82	25.9
Alta	Catalizador	87	9.9
Alta	Catalizador	83	9.6
	Promedio	84	15.1
	% de Remoción	86%	96%

Nota. Datos obtenidos a dosis alta con catalizador de zeolita.

En altas dosis, el catalizador de zeolita actúa efectivamente alcanzando el 86% de remoción de color y el 96% en turbidez. De esta forma, demuestra que es un catalizador efectivo para la remoción de las variables de análisis en este tratamiento.

Después de 24 horas, el tratamiento alcanza resultados efectivos logrando color Pt- Co: 82 y turbidez 9.6 NTU. De esta forma, se evidencia una efectiva reacción con el catalizador de zeolita. Sin embargo, el carbón activado como catalizador sigue superando al catalizador de zeolita en porcentajes de remoción en ambas variables.

4.3.4. Ensayos con zeolita lavada.

Tabla 23

Valores obtenidos a dosis alta con zeolita lavada.

1 hora			
Dosis	Subtratamientos	Color (Pt-Co)	Turbidez (NTU)
Alta	Lavado	590	187.4
Alta	Lavado	600	195
Alta	Lavado	590	180.1
	Promedio	593.3	187.5
	% de Remoción	1%	52%
24 horas			
Dosis	Subtratamientos	Color (Pt-Co)	Turbidez (NTU)
Alta	Lavado	320	17.3
Alta	Lavado	318	18
Alta	Lavado	321	17.3
	Promedio	319.7	17.5
	% de Remoción	47%	95%

Nota. Datos obtenidos a dosis alta con zeolita.

Los porcentajes de remoción con zeolita lavada en color fue del 47% y 95% en turbidez. Sin embargo, la variable turbidez supera el 50% en la primera hora de análisis e incrementa satisfactoriamente 24 horas después. En color, durante la

primera hora logra solo el 1% de remoción, pero al finalizar el proceso alcanza un 47% que no se considera despreciable, al contrario, si genera remoción ya es un proceso funcional.

Durante la primera hora de análisis el color no genera reducción considerable, permanece únicamente en rangos de Pt-Co: 590 a 600. Sin embargo, después de 24 horas alcanza valores de Pt-Co: 318 generando cambios en su reducción. En la variable turbidez, los valores iniciales en la primera hora de análisis se encontraron en rangos de 180 y 195 NTU, pero después de 24 horas alcanzan valores de 17.3 NTU logrando un proceso de remoción efectivo.

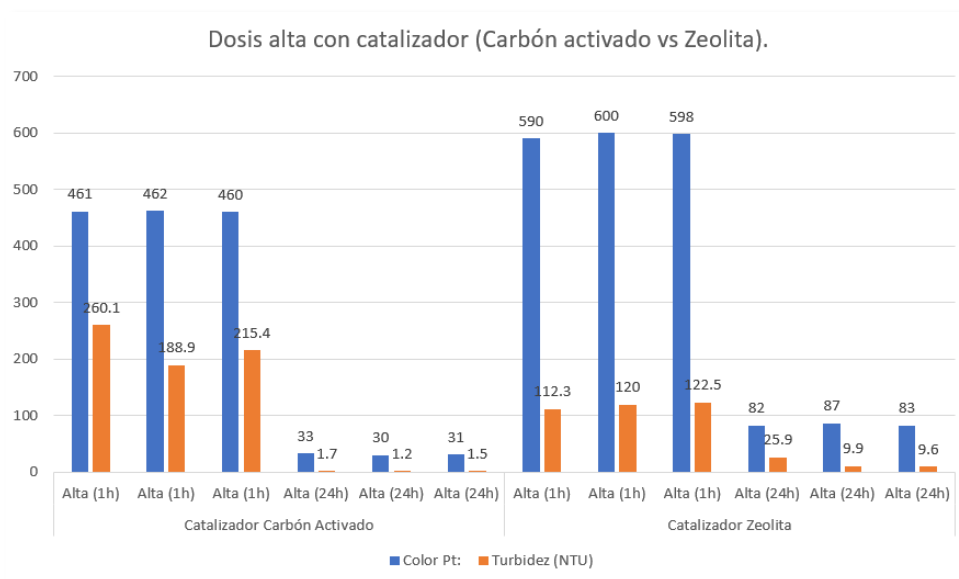


Figura 14. Valores obtenidos en color y turbidez a dosis alta con ambos catalizadores analizados.

En el tercer tratamiento realizado con altas dosis, el catalizador más efectivo al finalizar la experimentación de 24 horas fue el catalizador de carbón activado alcanzando la reducción de color a Pt-Co: 30 y en turbidez 1.2 NTU, esto indica, que es un catalizador efectivo para la remoción de las variables de estudio. Sin embargo, el catalizador de zeolita logra también reducciones efectivas alcanzando Pt-Co: 82 y turbidez de 9.6 NTU, considerado un catalizador adecuado en altas dosis.

De esta manera, se puede verificar que los catalizadores tanto de carbón activado como de zeolita son más efectivos que los tratamientos lavados. Por esta razón, los catalizadores obtuvieron los mejores resultados tanto en remoción de color como de turbidez en comparación con el resto de los tratamientos realizados en este estudio. Finalmente, se procedió analizar la última variable respuesta DQO (mg/L O₂) en cada uno de los tratamientos a diferentes dosis con sus respectivas réplicas.

4.4. Experimentación a dosis baja en variable DQO (mg/L O₂).

4.4.1. Ensayos con carbón activado.

Tabla 24

Resultados de la variable respuesta DQO con carbón activado en dosis baja.

Dosis	Subtratamientos	DQO (mg/L O₂)
Baja	Catalizador Carbón Activado	249
Baja	Catalizador Carbón Activado	249
Baja	Catalizador Carbón Activado	249
	% de Remoción	8%
Baja	Carbón Activado Lavado	260
Baja	Carbón Activado Lavado	260
Baja	Carbón Activado Lavado	260
	% de Remoción	4%

Nota. Datos obtenidos a dosis baja con carbón activado.

4.4.2. Ensayos con zeolita.

Tabla 25

Resultados de la variable respuesta DQO con zeolita en dosis baja.

Dosis	Subtratamientos	DQO (mg/L O ₂)
Baja	Catalizador Zeolita	260
Baja	Catalizador Zeolita	260
Baja	Catalizador Zeolita	260
	% de Remoción	4%
Baja	Zeolita Lavado	267
Baja	Zeolita Lavado	267
Baja	Zeolita Lavado	267
	% de Remoción	2%

Nota. Datos obtenidos a dosis baja con zeolita.

En el tratamiento a dosis bajas con catalizador y lavado de carbón activado y zeolita, los resultados en la variable DQO; no presentan mayor significancia, ni tampoco cumple con la normativa establecida en límites permisibles en descargas a cuerpos de agua dulce. El tratamiento que presenta mayor remoción DQO en bajas dosis es el catalizador de carbón activado con un valor de 249 mg/L O₂ logrando un 8% de remoción.

4.5. Experimentación a dosis media en variable DQO (mg/L O₂).

4.5.1. Ensayos con carbón activado.

Tabla 26

Resultados de la variable respuesta DQO con carbón activado en dosis media.

Dosis	Subtratamientos	DQO (mg/L O ₂)
Media	Catalizador Carbón Activado	237
Media	Catalizador Carbón Activado	237
Media	Catalizador Carbón Activado	237
	% de Remoción	13%
Media	Carbón Activado Lavado	241
Media	Carbón Activado Lavado	241
Media	Carbón Activado Lavado	241
	% de Remoción	11%

Nota. Datos obtenidos a dosis media con carbón activado.

4.5.1.2. Ensayos con zeolita.

Tabla 27

Resultados de la variable respuesta DQO con zeolita en dosis media.

Dosis	Subtratamientos	DQO (mg/L O ₂)
Media	Catalizador Zeolita	249
Media	Catalizador Zeolita	249
Media	Catalizador Zeolita	249
	% de Remoción	8%
Media	Zeolita Lavado	255
Media	Zeolita Lavado	255
Media	Zeolita Lavado	255
	% de Remoción	6%

Nota. Datos obtenidos a dosis media con zeolita.

En el tratamiento a dosis media con catalizador y lavado de carbón activado y zeolita los resultados en la variable DQO presentan cierta significancia, pero ningún tratamiento cumple con la normativa establecida para límites permisibles en descargas a cuerpos de agua dulce. El tratamiento a dosis media que presenta mayor remoción DQO es el catalizador de carbón activado con un valor de 237 mg/L O₂ logrando un 13% de remoción.

4.6. Experimentación a dosis alta en variable DQO (mg/L O₂).

4.6.1. Ensayos con carbón activado.

Tabla 28

Resultados de la variable respuesta DQO con carbón activado en dosis alta.

Dosis	Subtratamientos	DQO (mg/L O ₂)
Alta	Catalizador Carbón Activado	<100
Alta	Catalizador Carbón Activado	<100
Alta	Catalizador Carbón Activado	<100
	% de Remoción	63%
Alta	Carbón Activado Lavado	233
Alta	Carbón Activado Lavado	233
Alta	Carbón Activado Lavado	233
	% de Remoción	14%

Nota. Datos obtenidos a dosis alta con carbón activado.

4.6.1.2. Ensayos con zeolita.

Tabla 29

Resultados de la variable respuesta DQO con zeolita en dosis alta.

Dosis	Subtratamientos	DQO (mg/L O₂)
Alta	Catalizador Zeolita	190
Alta	Catalizador Zeolita	190
Alta	Catalizador Zeolita	190
	% de Remoción	30%
Alta	Zeolita Lavado	236
Alta	Zeolita Lavado	236
Alta	Zeolita Lavado	236
	% de Remoción	13%

Nota. Datos obtenidos a dosis alta con zeolita.

En el tratamiento a dosis alta con catalizador y lavado de carbón activado y zeolita los resultados en la variable DQO presentan alta significancia, y algunos tratamientos si logran cumplir con los límites permisibles en descargas a cuerpos de agua dulce en parámetros de DQO. Los tratamientos que cumplen con la normativa son los tratamientos a dosis alta en ambos catalizadores, obteniendo un DQO de 199 mg/L O₂ con un 30% de remoción en catalizador de zeolita y un DQO<100 mg/L O₂ con el 63% de remoción con catalizador de carbón activado. Por lo tanto, el carbón activado es considerado el catalizador más efectivo en la remoción de las variables respuestas de color, turbidez y DQO.

Con estos resultados, se realizó una segunda caracterización de sus parámetros fisicoquímicos y variables respuesta con el fin de identificar los cambios ocurridos durante las pruebas experimentales.

Tabla 30
Caracterización final de la muestra de lixiviados.

Caracterización Final	Valor	Unidades
Conductividad	0.02	µs/cm
pH	8.5	upH
Temperatura	4	°C
Potencial Óxido Reducción (ORP)	237.6	mV Rel
Color	30	Unidades Pt-Co:
DQO	<100	mg/L O ₂
Turbidez	1.2	NTU

Nota. Datos obtenidos de la caracterización final de la muestra de lixiviados.

Al realizar la caracterización final de la muestra con el uso de catalizadores y medio oxidante al 50% en un proceso de oxidación avanzada se cumple con los límites máximos establecidos por la normativa ecuatoriana ambiental vigente en parámetros de DQO. La variable respuesta DQO inicial fue de 272 mg/L O₂ y finalizó con un valor <100 mg/L O₂, por lo tanto, cumple con la ley y la muestra puede ser descargada a cuerpos de agua dulce sin presentar efectos negativos al medio ambiente.

Las variables color en unidades de Pt Co y turbidez NTU no forman parte de los parámetros establecidos por el TULSMA en descarga a cuerpos de agua. Por esta razón, se tomará como referencia la Tabla 1 sobre los criterios de calidad de aguas para consumo humano y doméstico, en donde establece el criterio de calidad en color Pt-Co: 75 y turbidez 100 NTU, por esta razón, el catalizador de carbón activado cumple con los criterios de calidad en ambas variables y demuestra que cumple con los criterios requeridos por la ley.

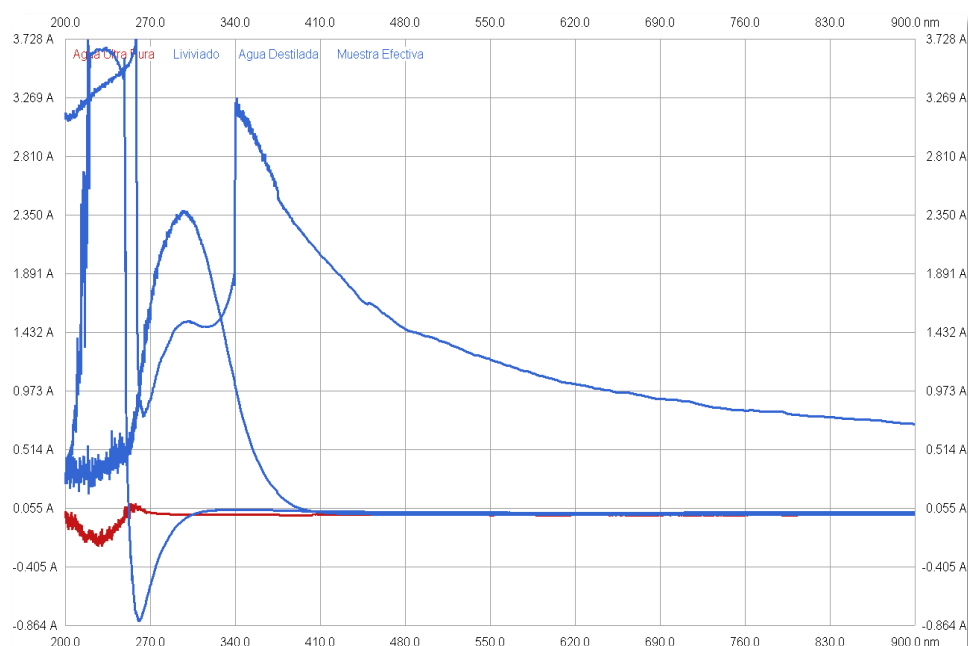


Figura 15. Resultados de la corrida de absorbancia en la muestra inicial, muestra final efectiva, agua destilada y agua ultra pura. Este apartado muestra la corrida de absorbancia en la muestra inicial de lixiviados.

Al comparar la corrida de absorbancia inicial, final efectiva, agua destilada y agua ultra pura se puede evidenciar el comportamiento que presentan los contaminantes presentes en las muestras mediante un haz de luz entre rangos 200 a 900 nm. Se analizó el agua ultra pura como blanco (color rojo), y de esta manera se identificó cual muestra presenta características similares al blanco en un rango de 200 a 900 nm.

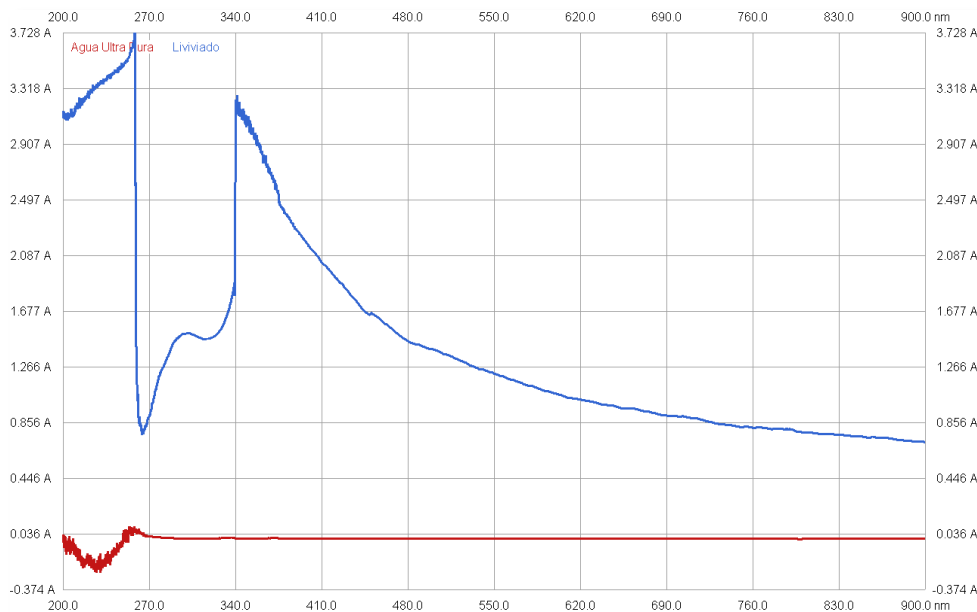


Figura 16. Resultados de la corrida de absorbancia en la muestra inicial de lixiviados y agua ultra pura. Este apartado muestra la corrida de absorbancia en las diferentes muestras.

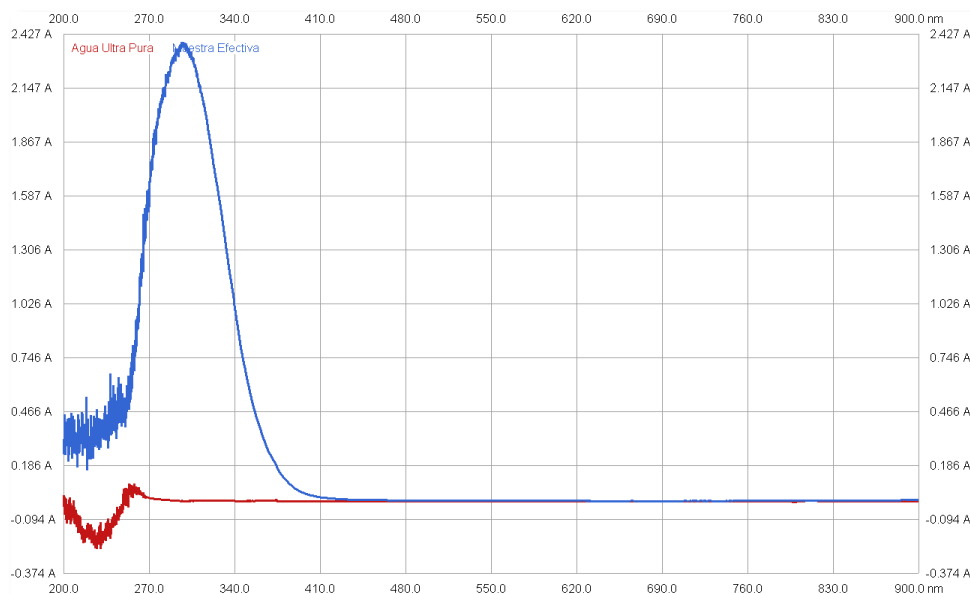


Figura 17. Resultados de la corrida de absorbancia en la muestra final efectiva y agua ultra pura. Este apartado muestra la corrida de absorbancia en la muestra final y agua ultra pura.

Como lo indican las figuras las muestras iniciales de lixiviados presentan comportamientos de contaminantes en un rango de 200 a 900nm. Por otro lado, la muestra final efectiva presenta comportamientos de contaminantes en un rango de 200 a 390nm y se vuelve constante al igual que el agua ultra pura (blanco). De esta manera, se considera efectiva la muestra final debido a que presenta similitud de rangos constantes de absorbancia (sin presencia de contaminantes) similares con el agua ultra pura, obteniendo un resultado ideal con catalizador de carbón activado.

Con los resultados obtenidos se procedió a realizar un segundo diseño de experimentos en donde se obtuvo la dosis óptima de peróxido de hidrógeno al 50% y catalizador efectivo de carbón activado (10g).

Tabla 31

Proceso de optimización en variables color y turbidez.

Proceso de Optimización (1 hora)				
Catalizador Carbón Activado	Cantidad (g)	H ₂ O ₂ 50% (mL)	Color (Pt- Co:)	Turbidez (NTU)
CA1	10	5	600	133.5
CA2	10	10	600	219.8
CA3	10	15	600	151.5
CA4	10	20	600	267
CA5	10	25	600	159.8
CA6	10	30	600	129.6
Proceso de Optimización (24 horas)				
CA1	10	5	163	1
CA2	10	10	59	1.8
CA3	10	15	28	0.4
CA4	10	20	67	2.8
CA5	10	25	90	2.2
CA6	10	30	126	2.9

Nota. Datos obtenidos en el proceso de optimización.

Como se puede observar en la tabla 31 la dosis óptima con catalizador de carbón activado es CA3 24 horas, obteniendo valores de color Pt-Co: 28 y turbidez de 0.4 NTU. De esta manera, cumple con los criterios establecidos en calidad de aguas para consumo humano y doméstico. Además, se analizó la variable respuesta DQO como indica la siguiente tabla:

Tabla 32
Proceso de optimización en variables DQO.

Proceso de Optimización	
Catalizador Carbón Activado	DQO (mg/L O ₂)
CA1	186
CA2	138
CA3	<100
CA4	140
CA5	174
CA6	179

Nota. Datos obtenidos en el proceso de optimización (DQO).

Se comprueba en este análisis de DQO que en todos los tratamientos con catalizador efectivo de carbón activado a 10g en diferentes dosis de peróxido de hidrógeno al 50% cumplen con la normativa ambiental establecida para el parámetro de DQO. Esto indica, que la cantidad de catalizador de carbón activado es adecuada a diferentes dosis del medio oxidante. Se comprueba, que el catalizador tiene un alto efecto en la reacción conjunta con el peróxido de hidrógeno en la remoción, esto ocurre, a que en su proceso de activación termoquímico fue efectivo su control de distintos factores (T°, tiempo, dosis).

5. CAPÍTULO V. ANÁLISIS DE RESULTADOS.

En este capítulo se discuten los resultados experimentales obtenidos en el tratamiento de lixiviados mediante la implementación de catalizadores y un medio oxidante al 50% como parte de un proceso de oxidación avanzada. En este estudio se utilizó un diseño factorial 3 x 2 mediante el análisis de varianza en programa SPSS Statistics con sus respectivas repeticiones en cada tratamiento.

5.1. Dosis, subtratamientos y variables respuesta.

Se procedió a realizar el análisis de varianza en los tratamientos considerando un intervalo de confianza del 95% (P-valor igual a 0.05). Para determinar la existencia de una diferencia significativa en el análisis de varianzas, se definieron las siguientes hipótesis:

Hipótesis nula ($p > 0.05$): La dosis y subtratamientos no tiene un efecto significativo en las variables respuesta.

Hipótesis alternativa ($p < 0.05$): La dosis y subtratamientos si tienen un efecto significativo en las variables respuesta.

En este análisis se determinó la significancia de dosis y subtratamientos, para identificar si contribuyen sobre las variables respuestas analizadas en cada tratamiento. De esta forma, se presenta a continuación la tabla de análisis de varianza:

Tabla 33
Análisis de varianza en variables respuesta.

Origen	Tipo III de suma de cuadrados	gl	Cuadrático promedio	F	Sig.
Modelo corregido	320575.778 ^a	5	64115.156	3306.799	.000
Interceptación	955883.556	1	955883.556	49300.585	.000
Dosis	300290.778	2	150145.389	7743.888	.000
Subtratamiento	14.222	1	14.222	.734	.040
Dosis * Subtratamiento	20270.778	2	10135.389	522.742	.000
Error	232.667	12	19.389		
Total	1276692.000	18			
Total corregido	320808.444	17			

Nota. Datos obtenidos en análisis de varianza.

a. R al cuadrado = .999 (R al cuadrado ajustada = .999)

gl= grados de libertad, Sig. = significancia.

Como se observa en la tabla 33 los valores obtenidos de significancia son menores a 0.05. De esta manera, se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa. Esto demuestra que, la dosis y subtratamientos tienen significancia en las variables respuesta. Por esta razón, los resultados obtenidos son válidos.

Los contaminantes presentes en el agua en su mayoría son altamente tóxicos y generan un peligro para la estabilidad de los ecosistemas acuáticos y la salud humana, por esta razón, es necesario eliminarlos previamente a su descarga a través de la implementación de tratamientos efectivos. Mediante este estudio se analizó la influencia a diferentes dosis de catalizador, material lavado y medio oxidante a través de un proceso de oxidación avanzada con el fin de remover su carga contaminante y cumplir con normativa.

Como demuestra este análisis, al incrementar la dosis (catalizador, lavado o medio oxidante al 50%) se obtiene un efecto sobre la remoción de color, turbidez y DQO. El lavado de carbón activado con agua destilada permitió remover el polvo presente e incrementar su capacidad de adsorción. Esto es confirmado por (Zhaolian, 2007), la adsorción rápida de moléculas, en el carbón activado se produce gracias a la presencia de mesoporos, y gracias a la disminución de la obstrucción de los poros, causados por polvo. Algo similar ocurre con el lavado de zeolitas con agua destilada (Calderón, 2016). Al igual que el carbón activado, las zeolitas, presentan propiedades específicas responsables de su alta capacidad de adsorción, tales como: gran área superficial, porosidad, e intercambio iónico (Curi, 2016).

El empleo de carbón activado puede ser utilizado como catalizador en un proceso de oxidación avanzada con un medio oxidante de peróxido de hidrógeno (Serp, 2009), al igual que las zeolitas previa activación a temperaturas superiores a 500°C y posterior tratamiento ácido, para completar su activación y potenciar la remoción de contaminantes presentes en el agua (Corma, 2011).

Los carbones activados son utilizados también como catalizadores en diferentes tratamientos de efluentes. Es primordial, establecer un proceso de activación termoquímico en donde el material es sometido a elevadas temperaturas y un medio ácido, de esta manera, incrementar el área superficial de los poros y atrapar con mayor facilidad los contaminantes presentes en el agua. Este estudio se alinea a lo indicado por (Serp, 2009) en donde menciona en su estudio que el carbón activado como catalizador se basa en su estructura porosa y su alta área superficial.

La zeolita es un material utilizado como catalizador debido a que cuenta con una estructura tridimensional favoreciendo la retención de moléculas presentes en el efluente. La implementación de zeolita como catalizador empieza con un proceso de activación, en donde, se somete el material a temperaturas superiores a 500°C y posterior a un medio ácido para completar su activación,

de esta manera, potenciar la remoción de contaminantes presentes en el agua. Por este motivo, se afirma lo mencionado por (Corma, 2011) en donde hace referencia al uso de zeolitas como catalizadores para mejorar la calidad de agua mediante su implementación, de esta forma, desarrollar nuevos materiales y procesos que permitan reducir considerablemente el impacto ambiental a través de su aplicación como catalizadores, y a su vez, poder reemplazarlos con procesos poco eficientes.

El empleo de radiación UV en oxidación avanzada de aguas residuales, es una práctica usada para eliminar contaminantes, reducir el color y la turbidez, eliminar microorganismos y otro tipo de impurezas (Orellana, 2013).

Los resultados obtenidos en este estudio demuestran que el uso de lámparas UV durante largos periodos de tiempo es una buena técnica de remoción, afirmando estudios de (Orellana, 2013), que menciona sobre el uso de lámparas UV y un medio oxidante potencia su capacidad de eliminación de contaminantes y logran obtener como resultado agua de tono más claro, sin turbidez, sin color y libre de microorganismos u otro tipo de impurezas.

Tabla 34

Resumen de procesamiento de casos con catalizadores a diferentes dosis.

	Casos					
	Válido		Perdidos		Total	
	N	Porcentaje	N	Porcentaje	N	Porcentaje
DQO	18	100.0%	0	0.0%	18	100.0%
Color	18	100.0%	0	0.0%	18	100.0%
Turbidez	18	100.0%	0	0.0%	18	100.0%

Nota. Resumen de procesamiento en los catalizadores.

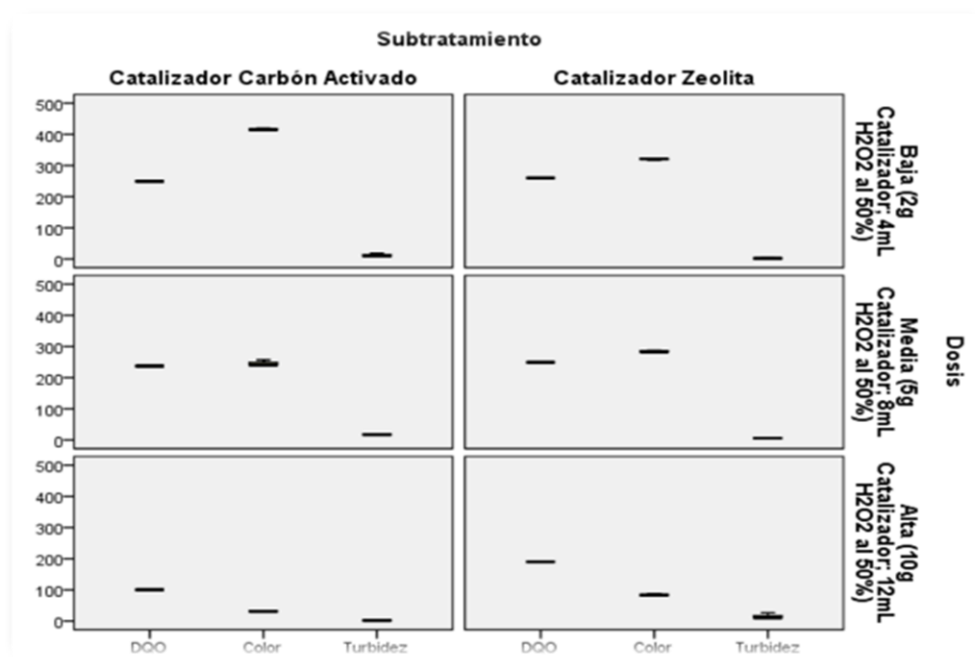


Figura 18. Análisis del uso de catalizadores a diferentes dosis. Este apartado muestra la relación del uso de catalizadores y sus diferentes dosis.

Las dosis de catalizadores y peróxido de hidrógeno al 50% presentan significancia para la remoción de variables respuesta. Como se observa, a mayor dosis mayor incremento en su remoción. Los resultados concuerdan con (Uscátegui, 2012), donde establece que el incremento de las concentraciones de catalizador aumenta efectivamente su capacidad de remoción. Por otro lado, (Forero, 2005) afirma que el uso de peróxido de hidrógeno como medio oxidante en un proceso de oxidación avanzada incrementa de manera notoria la velocidad de degradación, además, al incrementar su concentración la velocidad de reacción podrá incrementarse en un 150%.

5.2. Dosis, subtratamientos y color.

Se procedió a realizar el análisis de varianza en los tratamientos considerando un intervalo de confianza del 95% (P-valor igual a 0.05). Para determinar la existencia de una diferencia significativa en el análisis de varianzas, se definieron las siguientes hipótesis:

Hipótesis nula ($p > 0.05$): La dosis y subtratamientos no tiene un efecto significativo en el color.

Hipótesis alternativa ($p < 0.05$): La dosis y subtratamientos si tienen un efecto significativo en el color.

Tabla 35
Análisis de varianza en color.

Origen	Tipo III de suma de cuadrados	gl	Cuadrático promedio	F	Sig.
Modelo corregido	320155.167 ^a	5	66031.033	3310.748	.000
Interceptación	1409520.500	1	1409520.500	70672.337	.000
Dosis	260017.333	2	130008.667	6518.540	.000
Subtratamiento	42340.500	1	42340.500	2122.922	.000
Dosis * Subtratamiento	27797.333	2	13898.667	696.869	.000
Error	239.333	12	19.944		
Total	1739915.000	18			
Total corregido	330394.500	17			

Nota. Datos obtenidos de varianza en la variable color.

b. R al cuadrado = .999 (R al cuadrado ajustada = .999)

gl= grados de libertad, Sig. = significancia.

La tabla 35 demuestra que tanto las dosis como el tratamiento si presentan significancia para la remoción de color.

Entre los dos materiales de carbón activado y zeolita lavados con agua destilada, es decir, únicamente utilizados como adsorbentes, el carbón activado en altas dosis presenta mejores resultados de remoción de color con un 60%, mientras que la zeolita, únicamente alcanza el 47% de su remoción. Por esta razón, se afirma lo mencionado por (Ziolo, 2015), en donde demuestra en su

estudio que en el tratamiento para la remoción de color en efluentes es necesario la implementación de materiales como carbón activado o zeolita como catalizadores siendo óptimos para este tipo de tratamientos. Además, se afirma lo mencionado por (Conchi, 2011) en donde indica que, el carbón activado es uno de los materiales más efectivos en remoción debido a su variedad de propiedades fisicoquímicas texturales y estructurales que presenta este material, por esta razón mejora la eficiencia al aumentar el área superficial y actuar como catalizador.

Tabla 36

Resumen de procesamiento de datos a diferentes dosis para remoción de color.

	Casos					
	Válido		Perdidos		Total	
	N	Porcentaje	N	Porcentaje	N	Porcentaje
Color	18	100.0%	0	0.0%	18	100.0%

Nota. Datos obtenidos a diferentes dosis en remoción de color.

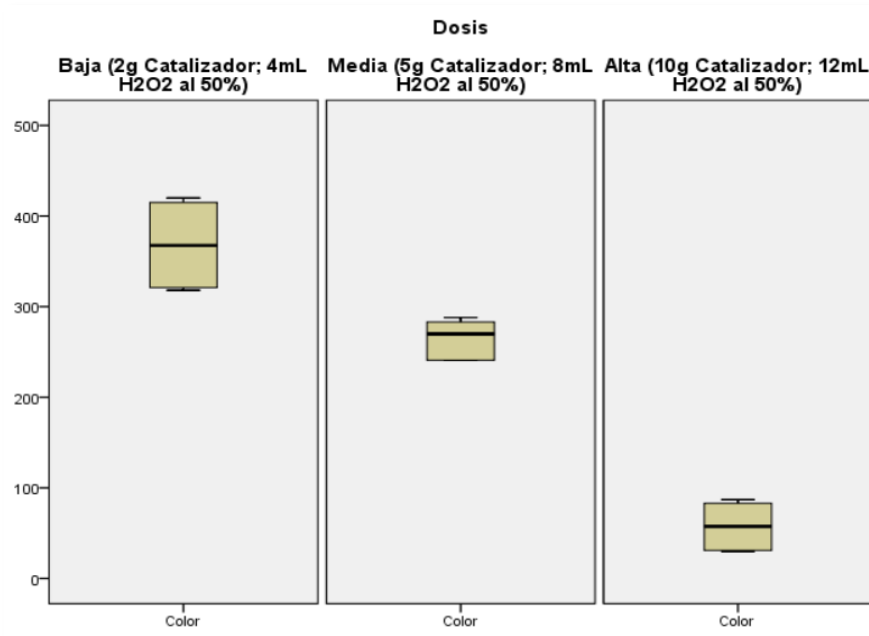


Figura 19. Análisis del uso de catalizadores a diferentes dosis para remoción de color. Este apartado muestra el efecto del catalizador y dosis para remoción de color.

Como se observa, a diferentes dosis realizadas en este estudio demuestra que presenta mayor remoción de la variable color en altas dosis. Es decir, 10 gramos del catalizador con 12 ml de peróxido de hidrógeno al 50%.

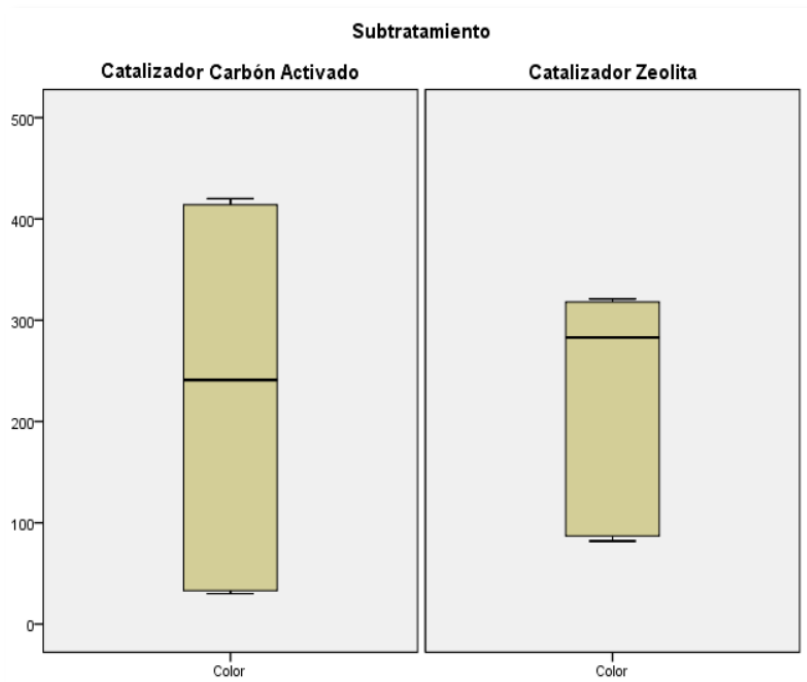


Figura 20. Subtratamientos de catalizador de carbón activado y zeolita en la remoción de color. Este apartado muestra los subtratamientos para remoción de color.

La oxidación avanzada con carbón activado en calidad de catalizador, se obtuvo la mejor remoción en la variable color con el 95% presente en la muestra de lixiviados. El valor obtenido concuerda con (Vayas, 2019), quien señala que, con el empleo de carbón activado, se puede obtener eficiencias de remoción del color superiores al 53%.

5.3. Dosis, subtratamientos y turbidez

Se procedió a realizar el análisis de varianza en los tratamientos considerando un intervalo de confianza del 95% (P-valor igual a 0.05). Para determinar la existencia de una diferencia significativa en el análisis de varianzas, se definieron las siguientes hipótesis:

Hipótesis nula ($p > 0.05$): La dosis y subtratamientos si presentan efectos significativos en la variable turbidez.

Hipótesis alternativa ($p < 0.05$): La dosis y subtratamientos no presentan efectos significativos en la variable turbidez.

Tabla 37

Análisis de varianza en turbidez.

Origen	Tipo III de suma de cuadrados	gl	Cuadrático promedio	F	Sig.
Modelo corregido	671.656	5	134.391	7.403	.002
Interceptación	1488.761	1	1488.761	82.013	.000
Dosis	54.081	2	27.041	1.490	.264
Subtratamiento	28.125	1	28.125	1.549	.237
Dosis * Subtratamiento	589.750	2	294.875	16.244	.000
Error	217.833	12	18.153		
Total	2378.550	18			
Total corregido	889.789	17			

Nota. Datos obtenidos en el análisis de varianza en turbidez.

c. R al cuadrado = .999 (R al cuadrado ajustada = .999)

gl= grados de libertad, Sig. = significancia.

La tabla demuestra valores de significancia mayores a $p > 0.05$, por esta razón, se acepta la hipótesis nula y se rechaza la hipótesis alternativa.

Los catalizadores de carbón activado y zeolita demuestran ser efectivos para la reducción de turbiedad en el tratamiento de lixiviados. Generalmente, la turbidez es causada por materia suspendida y coloidal, como lo corrobora (Carpio, 2019), en donde indica que la correlación de la turbiedad con la concentración o peso de material suspendido afectan las propiedades de dispersión de la luz, de esta forma, la determinación de este parámetro es fundamental para el análisis de aguas.

Por otro lado, los lixiviados presentan partículas de mayor diámetro que producen el incremento de turbiedad, esto afirma lo mencionado por (Méndez, 2019) en donde menciona que las partículas que interfieren en la turbidez en los lixiviados son predominantemente sólidos suspendidos o coloides; por esta razón, es necesario someterlos a un proceso de sedimentación de mínimo 4 horas, en donde se notará un decremento de la turbiedad. Como se mencionó anteriormente, el tiempo de sedimentación (1 hora y 24 horas) realizado en cada uno de los ensayos demostró ser un factor clave para su remoción, de manera que, a mayor tiempo de sedimentación, los sólidos suspendidos lograron decantar y disminuir efectivamente la turbidez.

En ambos subtratamientos se evidenciaron reducciones efectivas de turbidez, tanto el carbón activado como de zeolita demostraron ser un medio absorbente de contaminantes. El material más efectivo en este estudio es el carbón activado, debido a su gran capacidad de absorción. Por esta razón, se afirma lo mencionado por (Vaca, 2017), en donde menciona que el material de carbón activado tiene alta capacidad de absorber y remover contaminantes presentes en aguas con alta carga orgánica debido a sus potenciales características estructurales.

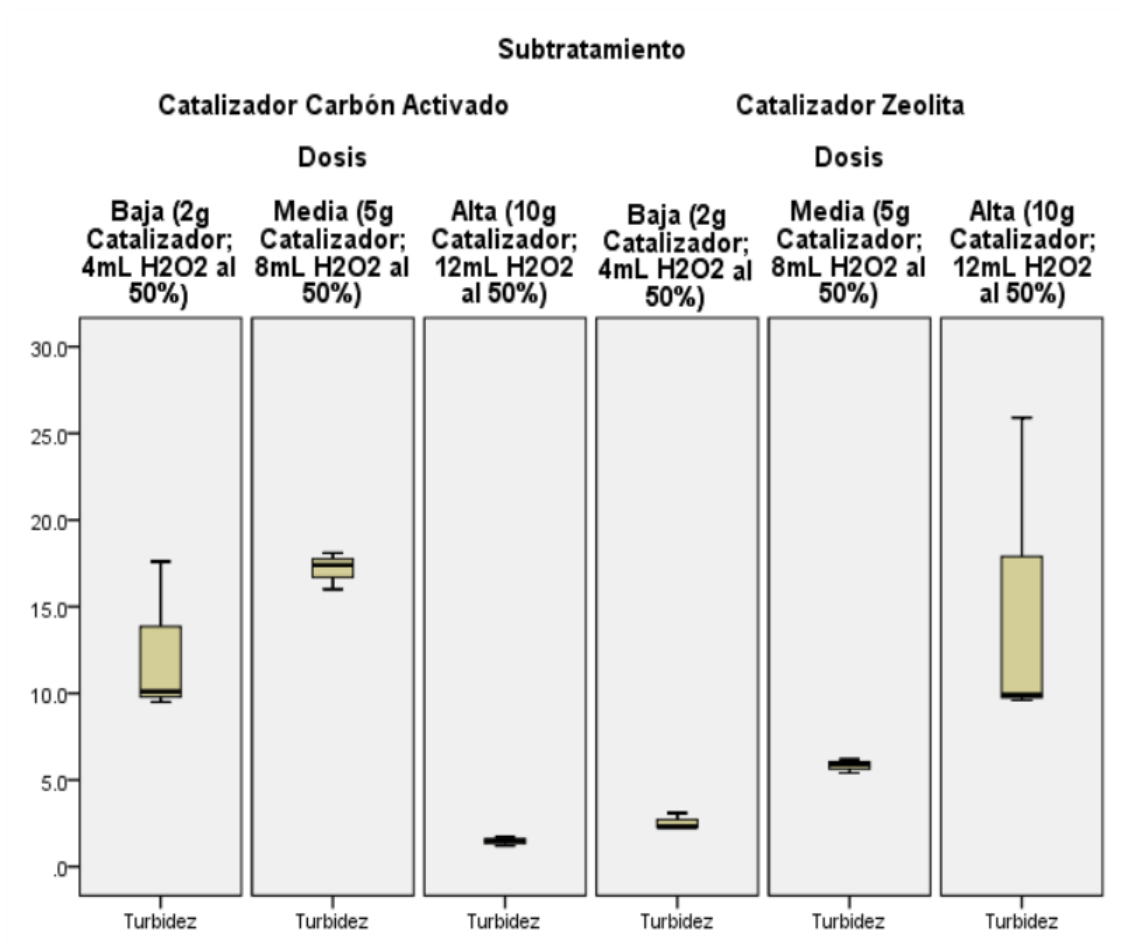


Figura 21. Subtratamiento de catalizadores de carbón activado y zeolita a diferentes dosis. Este apartado muestra los subtratamientos a diferentes dosis.

La figura indica la incidencia del Subtratamiento de carbón activado y zeolita a diferentes dosis, en donde demuestra que a dosis más altas de catalizador y oxidante los resultados de turbidez son más efectivos en relación con media y baja dosis.

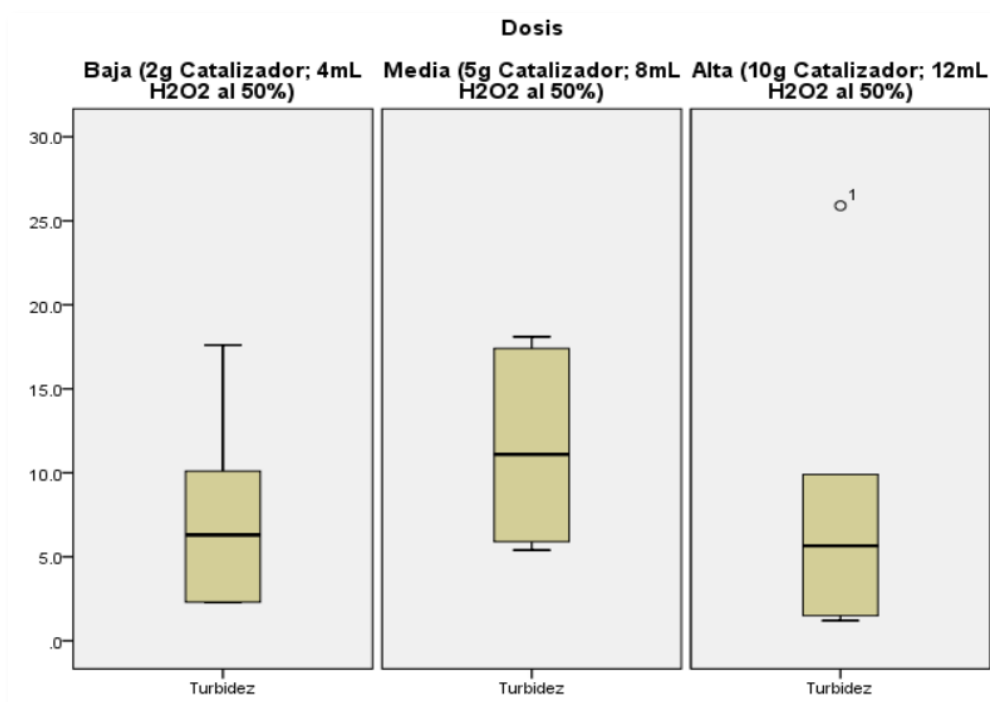


Figura 22. Dosis alta, media y baja con catalizadores. Este apartado muestra las diferentes dosis en el tratamiento y el uso de catalizadores.

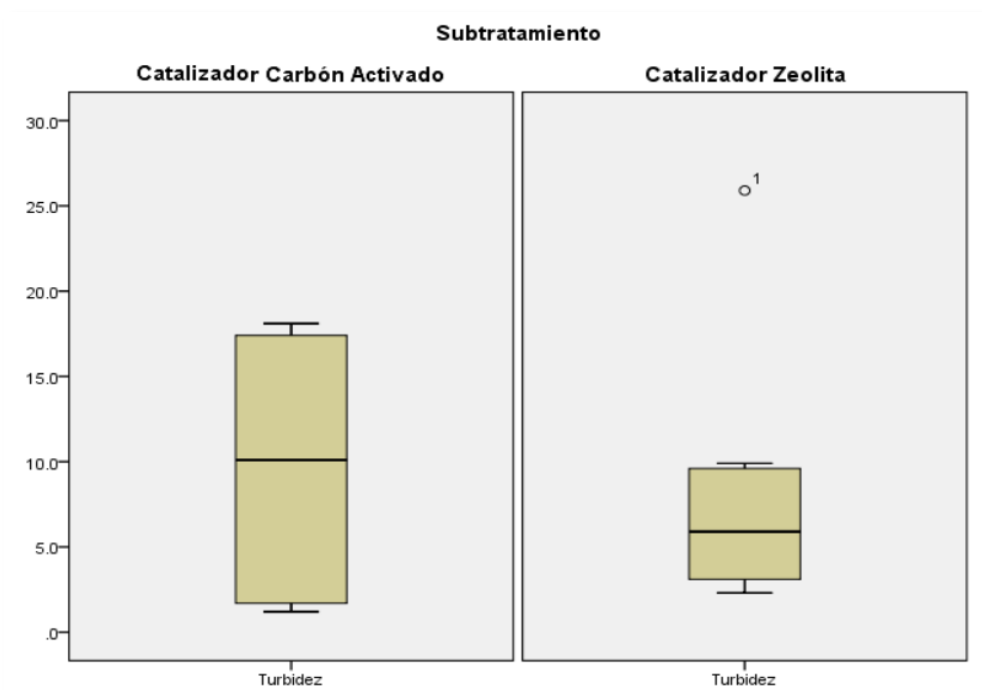


Figura 23. Remoción de turbidez en los catalizadores de análisis. Este apartado muestra la remoción de turbidez en los diferentes subtratamientos.

Como se observa en las figuras, la turbidez en cada dosis y catalizador se encuentra en el rango óptimo establecido por normativa ambiental. Sin embargo, el catalizador de carbón activado demuestra mayor capacidad de remoción, que, a su vez, se considera catalizador óptimo para esta variable.

5.4. Dosis, subtratamientos y DQO.

En este estudio se observa claramente el efecto del uso de catalizadores con un medio oxidante para la reducción de la Demanda Química de Oxígeno y el cumplimiento de normativa ambiental vigente establecida para descargas a cuerpos de agua.

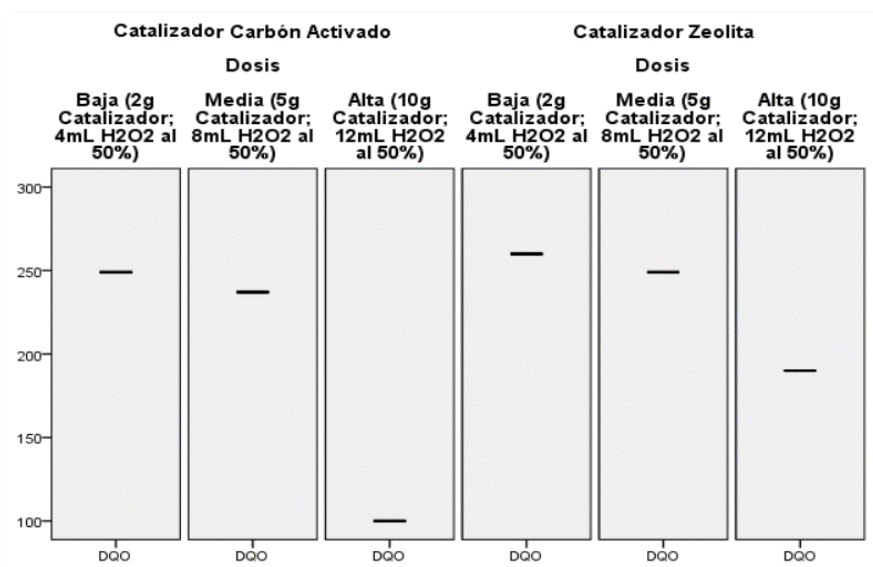


Figura 24. Remoción de DQO a distintas dosis con el uso de catalizadores. Este apartado muestra la remoción de DQO mediante el uso de catalizadores de carbón activado y zeolita.

De los tratamientos realizados, el porcentaje de remoción más efectivo de la variable DQO, es en altas dosis de catalizador de carbón activado y medio oxidante (10g;12ml al 50%), de esta forma, si se compara con los tratamientos con catalizador de zeolita en altas dosis también cumple con la normativa, pero no de manera representativa.

La cantidad de sólidos que presenta una muestra influye considerablemente en el análisis de DQO, así el DQO de la muestra inicial de lixiviado superaba los límites establecidos, siendo este valor de 272 mg/l O₂. Al realizar el diseño experimental en este estudio, en la dosis adecuada tanto del catalizador como del medio oxidante se logró reducir las variables respuesta. Incrementando el período de reposo (sin mezcla) para facilitar la reacción y permitir la sedimentación de sólidos. Se corrobora lo mencionado por (Calderón, 2016), en donde menciona que la cantidad de sólidos removidos influyen en parámetros fisicoquímicos como DQO, aumentándolo o disminuyendo según sea el caso.

Al comparar la efectividad de ambos catalizadores, se determinó que la zeolita registra valores cercanos al límite establecido por la ley en parámetros de DQO, en donde se obtuvo en este tratamiento el valor de 190 mg/L O₂. El carbón activado registró una mejor capacidad de remoción en esta variable, alcanzando valores DQO < 100 mg/l O₂. Por lo tanto, se afirma lo señalado por (Juárez, 2016) en donde en su estudio indica que la zeolita tiene menor capacidad de remoción del parámetro DQO en comparación con el carbón activado.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

6.1. Conclusiones.

El proceso de oxidación avanzada fotoquímico con el uso de catalizadores de carbón activado y zeolita presenta resultados efectivos en reducción de variables respuesta: color, turbidez y DQO para el tratamiento de lixiviados.

El presente estudio analizó el efecto de un medio oxidante de peróxido de hidrógeno al 50% y el uso de carbón activado y zeolita activados termoquímicamente para su acción como catalizadores a diferentes dosis, obteniendo porcentajes de remoción efectivos en comparación con el uso de éstos mismos materiales, los cuales fueron sometidos únicamente a procesos de lavado con agua destilada. De esta forma, se comprobó el uso de catalizadores y medio oxidante al 50% en un proceso de oxidación avanzada, siendo altamente efectivo para el tratamiento de lixiviados.

La implementación de nuevas tecnologías efectivas como los procesos de oxidación avanzada con catalizadores, medio oxidante y lámparas ultravioleta permiten reducir la Demanda Química de Oxígeno, hasta $<100 \text{ mg/L O}_2$, que es inferior a 200 mg/L O_2 , que es el límite máximo establecido por la ley.

En el caso de variables respuesta de color y turbidez no se pudo comparar con el Anexo 1 del Libro VI del Texto Unificado de Legislación Ambiental Secundaria del Ministerio de Ambiente (TULSMA), en donde se observa los límites de descarga a un cuerpo de agua dulce (AM 097-A Tabla 9) debido a que estos parámetros no forman parte como criterios de evaluación para descargas a cuerpos de agua dulce.

En la Tabla 1 sobre criterios de calidad de aguas para consumo humano y doméstico, se establece que el criterio de calidad en el parámetro color el límite máximo permitido es Pt-Co: 75 y en el parámetro de turbidez es 100 NTU. Los

mejores resultados de remoción de estos parámetros se obtuvieron con fue el catalizador de carbón activado en dosis alta, obteniendo un valor de color Pt-Co: 30 y turbidez 1.2 NTU. Adicional, en el proceso de optimización se obtuvo mayor reducción alcanzando valores de color Pt-Co: 28 y turbidez 0.4 NTU, de esta forma, cumple con la normativa.

La combinación de catalizador (carbón activado o zeolita) y medio oxidante al 50% en diferentes dosis tuvieron efectos significativos en la remoción de variables respuesta analizadas en este estudio. La dosis óptima para lograr resultados efectivos que permitan cumplir con la normativa ambiental, fue 10 g de carbón activado y medio oxidante al 50%.

Para la optimización del proceso resultó ser necesario adicionar de 12 a 15ml del tratamiento.

El solo lavado de los materiales, no genera resultados efectivos, por esta razón la mejor opción es realizar un proceso de activación termoquímico en los materiales, y potenciar su uso como catalizadores, así se obtienen porcentajes de remoción del 63% de DQO, 100% de turbidez y 95% de color presente en una muestra de lixiviados.

El medio oxidante de peróxido de hidrógeno al 50% presenta la concentración adecuada para mineralizar sustancias orgánicas debido a su alto poder oxidante de radicales hidroxilos $\text{OH}\cdot$. Esta oxidación resulta ser ideal para el tratamiento de sustancias con alta toxicidad, biorrecalcitrantes o efluentes de alta carga contaminante.

La implementación de tratamientos a lixiviados hoy en día debe ser prioritario debido al rápido incremento poblacional y las altas cantidades de residuos generados en el país, esto a su vez, incrementa la cantidad de lixiviados en puntos de disposición final. Por tal motivo, es fundamental implementar este tipo de tratamientos para reducir el impacto que genera al medio ambiente y

salud de las personas. Si únicamente se desea tratar el parámetro de turbidez, se podría realizar el tratamiento con cualquiera de los dos catalizadores, pero, si se desea optimizar su remoción y reducir turbidez, color y DQO se deberá optar por elegir el catalizador de carbón activado en dosis alta.

El proceso de oxidación avanzada fotoquímico con el uso de lámparas ultravioleta y catalizadores de carbón activado y zeolita para la remoción de contaminantes dependerá del tipo de material que será sometido a procesos de activación termoquímicos para que actúen como catalizadores; además, dependerá del medio oxidante y de su concentración, pH, intensidad de lámparas UV, tiempo de mezcla con el uso del test de jarras (relación tiempo-rpm), dosis de catalizador y peróxido de hidrógeno, pH, temperatura y la clasificación del lixiviado a tratar, en este estudio se realizó el tratamiento a un lixiviado clasificado mediante bibliografía como lixiviado viejo.

6.2. Recomendaciones.

La temperatura es un factor que influye en la velocidad de reacción que en su mayoría puede generar reacciones más lentas. La muestra de lixiviados fue almacenada en un área de refrigeración a 4°C con el fin de mantener sus condiciones y conservar la muestra durante el proceso experimental.

Es recomendable conocer el tipo de lixiviado a tratar mediante la clasificación establecida por bibliografía (joven, intermedio o viejo) y de esta forma, lograr resultados efectivos como se ha realizado en este estudio en donde se trabajó con un lixiviado clasificado como viejo proveniente de un botadero de basura con pH de 8.5 y DQO inferior a 4000 mg/L O₂. De esta manera, se evitará obtener resultados erróneos.

Se recomienda realizar el proceso de oxidación con un medio oxidante de peróxido de hidrógeno al 50% debido a su poder oxidativo, de igual manera, en este estudio se realizó el mismo procedimiento con peróxido de hidrógeno al 30% y no se evidenció significancia en su capacidad de remoción.

El uso de catalizadores de carbón activado y zeolita deberán iniciar con un proceso de lavado previo a su activación, debido a que estos materiales presentan cantidades de polvo que afectan los resultados. Es recomendable, lavarlos con agua destilada y remover toda presencia de polvo en el material, finalizado este proceso, se procederá a realizar la respectiva activación termoquímica.

El uso de test de jarras y lámparas ultravioleta es importante para este tratamiento. Sin embargo, se podría considerar otras alternativas con mayor disponibilidad que ejerzan un efecto similar, por ejemplo, agitación manual y el aprovechamiento de otras alternativas de energía como la luz solar.

Se recomienda realizar mayores estudios que demuestren de igual manera la eficacia de estas tecnologías pero con el uso adicional de nuevos catalizadores y medios oxidantes, de esta forma, lograr en un futuro su implementación a escala industrial.

REFERENCIAS

- Abdelouahab, Z. (2015). *Catalizadores soportados en carbón activado para la oxidación total de compuestos orgánicos volátiles*. Recuperado el 18 de noviembre de 2018 de https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/53574/1/tesis_zinab_abdelouahab_reddam.pdf
- Aleboyeh, A. (2003). *Critical effect of hydrogen peroxide in photochemical oxidative decolorization of dyes*. Recuperado el 14 abril de 2018 de <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S014372080300010X>
- Almecija, M. (2010). *Advanced Oxidation Processes for Wastewater Treatment: State of the Art*. Recuperado el 28 abril de 2018 de: https://www.researchgate.net/publication/227121204_Advanced_Oxidation_Processes_for_Wastewater_Treatment_State_of_the_Art
- Amer, A. (2008). *Treatment of textile wastewater using H₂O₂/UV system*. Recuperado el 8 julio de 2018 de <https://pdfs.semanticscholar.org/8706/cd6494f42cf06662f8361b24826630e4f716.pdf>
- Auerbach, S. (2003). *Zeolite science and technology*. Recuperado el 10 mayo de 2019 de http://www.naturalzeolite.eu/medical_application_of_zeolites.pdf
- Ballesteros, D. (2013). *Enlaces inorgánicos*. Recuperado el 02 de febrero de 2019 de <https://repository.unad.edu.co/handle/10596/12161>
- Benavides, L. (2004). *Remoción de color de los lixiviados del relleno sanitario la esmeralda por adsorción sobre carbón activado*. Recuperado el 24 febrero de 2019 de http://bdigital.unal.edu.co/1212/1/REMOCI%C3%93n_de_color_de_los_lxivados_del_relleno_sanitario_la.pdf
- Bes Monge, R. (2018). *Manual técnico sobre procesos de oxidación avanzada aplicados al tratamiento de aguas residuales industriales*. Recuperado el 26 noviembre de 2018 de <http://www.cytel.org/es/biblioteca/manual->

tecnico-sobre-procesos-de-oxidacion-avanzada-aplicados-al-tratamiento-de-aguas

- Calderón, A. (2016). *Estudio comparativo de la aplicación de zeolita activada y carbón activado en el tratamiento de aguas residuales de la fabricación de pinturas base de agua*. Recuperado el 2 septiembre de 2018 de <http://ri.ues.edu.sv/id/eprint/12509/1/Estudio%20comparativo%20de%20la%20aplicaci%C3%B3n%20de%20Zeolita%20activada%20y%20Carb%C3%B3n%20activado%20en%20el%20tratamiento%20de%20aguas%20residuales%20de%20la%20fabricaci%C3%B3n%20de%20pinturas%20base%20agua.pdf>
- Calvino, C. (2010). *Química fina y sostenibilidad*. Barcelona, España: Santina
- Carpio, T. (2019). *Turbiedad*. Recuperado el 15 julio de 2019 de <http://www.ideam.gov.co/documents/14691/38155/Turbiedad+por+Nefelometr%C3%ADa..pdf/fc92342e-8bba-4098-9310-56461c6a6dbc>
- Carvajal, A. (2014). *Modificación Química de Carbones Activados y su Efecto en la Adsorción de Compuestos Fenólicos*. Recuperado el 6 marzo de 2019 de <http://bdigital.unal.edu.co/46399/1/285599.2014.pdf>
- Carvalho, R. (2016). *Modificación química superficial de carbones mesoporosos activados, aplicaciones en catálisis y adsorción*. Recuperado el 19 agosto de 2018 de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=47660>
- CEPIS (2004). *Guía técnica para la clausura y conversión de botaderos de residuos sólidos*. Lima, Peru: Desarrollo sostenible y salud ambiental.
- Clemente, J. (2008). *Aplicación de procesos de oxidación avanzada (Fotocatálisis solar) para el tratamiento y reutilización de efluentes textiles*. Recuperado el 28 agosto de 2018 de <https://riunet.upv.es/handle/10251/2241>
- Conchi, A. (2011). *Materiales de carbono en fotocatalisis*. Recuperado el 21 enero de 2018 de https://www.researchgate.net/publication/281997486_Materiales_de_carbono_en_fotocatalisis

- Contreras, A. (2006). *Tratamiento biológico del lixiviado generado en el relleno sanitario "El Guayabal"*. San José de Cúcuta, Ecuador: EditMec
- Corena, M. (2008). *Sistemas de tratamientos para lixiviados generados*. Recuperado el 14 septiembre de 2018 de <https://repositorio.unisucre.edu.co/bitstream/001/304/2/628.44564C797.pdf>
- Corma, A. (2011). *Catálisis con zeolitas: desde el laboratorio a su aplicación industrial*. Recuperado el 5 noviembre de 2018 de https://www.researchgate.net/publication/49941693_Catalisis_con_zeolitas_Desde_el_laboratorio_a_su_aplicacion_industrial
- Curi, O. (2016). *Estudio comparativo de la aplicación de zeolita activada y Carbón activado en el tratamiento de aguas residuales en la fabricación de pinturas en base de agua*. Recuperado el 2 abril de 2019 de <http://ri.ues.edu.sv/id/eprint/12509/1/Estudio%20comparativo%20de%20la%20aplicaci%C3%B3n%20de%20Zeolita%20activada%20y%20Carb%C3%B3n%20activado%20en%20el%20tratamiento%20de%20aguas%20residuales%20de%20la%20fabricaci%C3%B3n%20de%20pinturas%20base%20agua.pdf>
- Díaz, A. (2018). *Tratamiento de lixiviados de un relleno sanitario: propuesta y evaluación de un sistema de humedales artificiales*. Recuperado el 23 marzo de 2019 de <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/152920>
- Espinosa, M. (2016). *Lixiviados de vertederos de residuos sólidos urbanos*. Recuperado el 19 mayo de 2018 de https://www.researchgate.net/publication/303677305_Lixiviados_de_Verterederos_de_Residuos_Solidos_Urbanos_Monografia
- Espinoza, J. (2010). *Informe de la Evaluación Regional del manejo de residuos sólidos urbanos en América Latina y el Caribe 2010*. Recuperado el 25 de junio de 2018 de <https://publications.iadb.org/es/informe-de-la-evaluacion-regional-del-manejo-de-residuos-solidos-urbanos-en-america-latina>
- Fernández, N. (2007). *Aplicación del Análisis del Ciclo de Vida en el estudio ambiental de diferentes Procesos Avanzados de Oxidación*.

- Recuperado el 25 de junio de 2018 de <https://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/5820/nrf1de1.pdf?sequence=1>
- Forero, J. (2005). *Aplicación de procesos de oxidación avanzada como tratamiento de fenol en aguas residuales industriales de refinería*. Recuperado el 2 de abril de 2019 de http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S0122-53832005000100008&lng=en&nrm=iso&tlng=es
- García, M. (2013). *Métodos específicos para la eliminación de contaminantes*. Recuperado el 25 de mayo de 2019 de <https://www.ugr.es/~mgroman/archivos/Mojacar/charla3.pdf>
- Giraldo, E. (2001). *Tratamiento de lixiviados de rellenos sanitarios*. Recuperado el 20 de abril de 2019 de <https://ojsrevistaing.uniandes.edu.co/ojs/index.php/revista/article/download/538/718>
- GMI. (2011). *Control de Agua Pluvial y Líquidos Lixiviados*. Recuperado el 20 de enero de 2019 de https://www.globalmethane.org/documents/events_land_20100422_7_control_agua_pluvial_pixiviados.pdf
- Gogate, A. (2004). *Aumento de biodegradabilidad y eliminación de plaguicidas en efluentes acuosos mediante métodos de oxidación avanzada*. Recuperado el 20 de enero de 2019 de <https://riunet.upv.es/handle/10251/2928?show=full>
- Grau, A. (2016). *Preparación y caracterización de zeolitas jerarquizadas con estructura MFI y Faujasita: Análisis de diferentes métodos de incorporación de mesoporosidad en las mismas*. Recuperado el 17 de enero de 2019 de https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/62237/1/tesis_grau_atienza.pdf
- GreenPeace. (2013). *Botaderos de basura*. Recuperado el 10 de enero de 2019 de <https://es.greenpeace.org/es/>

- Guevara, H. (2014). *Diseño de Sistemas de Tratamiento de Lixiviados del Relleno Sanitario*. Recuperado el 20 de abril de 2019 de <http://www.ecuadorencifras.gob.ec/institucional/home/>
- INEC. (2014). *Instituto Nacional de Estadísticas y Censos*. Recuperado el 10 de abril de 2019 de <http://www.ecuadorencifras.gob.ec/estadisticas/>
- IUPAC. (2019). *Características del Carbón Activado*. Recuperado el 5 de enero de 2019 de <https://iupac.org/>
- Juárez, T. (2016). *La zeolita en la mitigación ambiental*. Recuperado el 10 de abril de 2019 de [www.redalyc.org/articulo.oa?id= 69530106](http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=69530106)> ISSN 1794-4449.
- Kadlec, C. (2004). *Estudio preliminar de carbón activado*. Recuperado el 3 de enero de 2019 de https://www.academia.edu/8071614/Carb%C3%B3n_Activado._Estudio_Preliminar_situaci%C3%B3n_en_el_Per%C3%BA
- Maldonado, R. (2012). *Propuesta de un programa de gestión ambiental en la municipalidad de naranjito como medida precutelaría para preservar el medio ambiente, a partir del año 2012*. Recuperado el 10 de mayo de 2019 de <http://repositorio.ug.edu.ec/bitstream/redug/6125/1/tesis%20final%20solano%20maldonado%20%23%2030.pdf>
- Martínez, O. (2008). *Mejoras en el tratamiento de lixiviados de vertedero de rsu mediante procesos de oxidación avanzada*. Recuperado el 22 de mayo de 2019 de <https://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/10692/4de8.OPMcap.4.pdf?sequence=5&isAllowed=y>
- Medina, A. (2015). *Determinación de la cantidad de lixiviado generado en rellenos sanitarios*. Recuperado el 10 de mayo de 2019 de <http://www.bvsde.paho.org/bvsaidis/paraguay5/IIIRS05.pdf>
- Méndez, T. (2019). *Tratamiento fisicoquímico de los lixiviados de un relleno sanitario*. Recuperado el 7 de mayo de 2019 de <http://www.redalyc.org/pdf/467/46780213.pdf>

- Michel, T. (2014). *Procesos de oxidación radicalaria y soluciones avanzadas para el tratamiento de efluentes industriales*. Recuperado el 20 de febrero de 2019 de <http://www.ingenieriadelagua.com/2004/JIA/Jia2009/fs/CO14rev.pdf>:
- Miklos, L. (2018). *Evaluation of advanced oxidation processes for water and wastewater treatment*. Recuperado el 20 de marzo de 2019 de https://www.researchgate.net/publication/323947555_Evaluation_of_advanced_oxidation_processes_for_water_and_wastewater_treatment_-_A_critical_review
- MINAM. (2015). *Lixiviados*. Recuperado el 3 de febrero de 2019 de <https://www.gob.pe/busquedas?utf8=%E2%9C%93&search%5Bterms%5D=LIXIVIADOS>
- Ministerio de medio ambiente. (2013). *Proyecto de Fortalecimiento de la Capacidad Institucional en el Manejo Integral de los Residuos Sólidos a Nivel Nacional en la República Dominicana*. Recuperado el 10 de abril de 2019 de <https://ambiente.gob.do/fortalecimiento-de-la-capacidad-institucional-en-el-manejo-integral-de-los-residuos-solidos/>
- Mora, H. (2004). *Estudio preliminar de carbón activado*. Recuperado el 20 de abril de 2019 de https://www.academia.edu/8071614/Carb%C3%B3n_Activado._Estudio_Preliminar_situaci%C3%B3n_en_el_Per%C3%BA
- Noguera, K. (2010). *Physiochemical Characteristic of Activated Carbon of Coconut Shell Modified with HNO₃*. Santiago de Cuba, Cuba: Cubana de Química.
- ONU. (2017). *Procesos de depuración en el recurso hídrico*. Recuperado el 9 de marzo de 2019 de <https://www.un.org/es/about-un/>
- OPS. (2003). *Evaluación regional de los servicios de manejo de residuos sólidos municipales*. Recuperado el 10 de abril de 2019 de <https://www.paho.org/hq/?lang=es>
- Orellana, J. (2013). *Calidad de aguas y la necesidad de tratamientos*. Recuperado el 3 de abril de 2019 de

- https://www.frro.utn.edu.ar/repositorio/catedras/civil/ing_sanitaria/Ingenieria_Sanitaria_A4_Capitulo_06_Tratamiento_de_Aguas.pdf
- Pelayo, D. (2018). *Advanced oxidation processes: recent advances and future trends*. Recuperado el 2 de marzo de 2019 de <https://repositorio.unican.es/xmlui/bitstream/handle/10902/14217/409513.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Pera-Titus, C. (2004). *Degradation of chlorophenols by means of advanced oxidation processes*. Recuperado el 2 de abril de 2019 de https://www.researchgate.net/publication/275650121_Degradation_of_Organic_Compounds_from_Industrial_Pharmaceutical_Effluent_Through_Advanced_Oxidation_Processes
- Reinoso, F. (2007). *Desarrollo de nuevos adsorbentes y catalizadores basados en carbón activo*. Recuperado el 14 de marzo de 2019 de <https://sgittotri.ua.es/es/empresa/documentos/ot-0721-carbon-activo.pdf>
- Ripoll, A. (2008). *Aumento de biodegradabilidad y eliminación de plaguicidas en efluentes acuosos mediante métodos de oxidación avanzada*. Recuperado el 1 de abril de 2019 de <https://riunet.upv.es/handle/10251/2928?show=full>
- Rodas, M. (2016). *Zeolitas*. Recuperado el 5 de marzo de 2019 de <https://www.ucm.es/data/cont/media/www/pag-15563/Tecto%206.pdf>
- Rodríguez, P. (2014). *Modificación de la química superficial de carbónes activados, efecto de la oxidación con soluciones de HNO₃ y H₂O₂ sobre la remoción de Cadmio (II) en solución acuosa*. Recuperado el 1 de abril de 2019 de <https://core.ac.uk/download/pdf/39152369.pdf>
- Rodríguez, T. (2008). *Treatment of industrial effluents of recalcitrant nature using ozone, hydrogen peroxide and ultraviolet radiation*. Recuperado el 10 de enero de 2019 de <http://www.scielo.org.co/pdf/rfiua/n46/n46a03.pdf>
- Román, M. (2010). *Tratamientos específicos de vertidos industriales*. Recuperado el 3 de abril de 2019 de <https://www.ugr.es/~mgroman/archivos/TARI/Guia.pdf>

- Ruiz, M. (2013). *Estrategias de desarrollo bajo en carbono en megaciudades de América Latina*. Recuperado el 5 de mayo de 2019 de <https://www.cepal.org/es/publicaciones/36624-estrategias-desarrollo-carbono-megaciudades-america-latina>
- Schrank, S. (2007). *Decolourisation effects of Vat Green 01 textile dye and textile wastewater using H₂O₂/UV process*. Recuperado el 2 de enero de 2019 de https://www.researchgate.net/publication/311731882_Malachite_green_a_cationic_dye_and_its_removal_from_aqueous_solution_by_adsorption
- SEDESOL. (2009). *Manual de Rehabilitación y Clausura de Tiraderos a Cielo Abierto*. Recuperado el 15 de febrero de 2019 de <http://www.ods.org.pe/material-de-consulta/27-manual-para-la-rehabilitacion-y-clausura-de-tiraderos-a-cielo-abierto-san-bartolo-sedesol-pdf/file>
- Serp, L. (2009). *Carbon Materials for Catalysis*. Recuperado el 10 de marzo de 2019 de http://www.gecarbon.org/boletines/articulos/BoletinGEC_039_art1.pdf
- Shahmoradi, B. (2013). *Collection of municipal solid waste*. Recuperado el 14 de febrero de 2019 de https://www.researchgate.net/publication/280644392_Municipal_Solid_Waste_Management_in_Mahabad_Town_Iran
- Shalaby, C. (2006). *Preparation and characterization of activated carbons by one-step steam pyrolysis/activation from apricot stones*. Recuperado el 2 de abril de 2019 de <https://core.ac.uk/download/pdf/83046838.pdf>
- Smart, K. (2005). *On the Structure of a Pd₅₆₁ Giant Palladium Cluster*. Recuperado el 2 de abril de 2019 de <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.823.4581&rep=rep1&type=pdf>
- Solíz, M. (2015). *Political ecology and critical geography of waste in Ecuador*. Recuperado el 10 de febrero de 2019 de

<http://repositorio.flacsoandes.edu.ec:8080/handle/10469/6807?mode=simple>

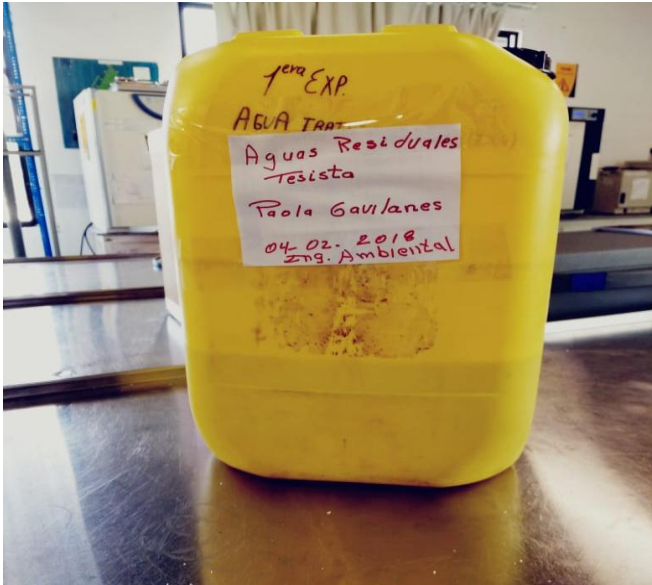
- Teng, H. (1998). *Activated carbon production from low ash subbituminous coal with CO₂ activation*. Recuperado el 2 de abril de 2019 de [https://www.researchgate.net/publication/320183471_Activated_Carbon_Production_from_Peat_Using_ZnCl₂_Characterization_and_Applications](https://www.researchgate.net/publication/320183471_Activated_Carbon_Production_from_Peat_Using_ZnCl2_Characterization_and_Applications)
- Terán, M. (2016). *Estudio de la aplicación de procesos de oxidación avanzada a aguas contaminadas*. Recuperado el 20 de marzo de 2019 de https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/88273/01_TFG.pdf
- Torres, F. (2014). *Influence of leachates age on its physicochemical composition and toxicity potential*. Recuperado el 10 de enero de 2019 de http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S0123-42262014000100027&script=sci_arttext&tlng=pt
- Uscátegui, A. (2012). *Removal of synthetic dyes by Fenton process using activated carbon-supported Fe₂O₃ obtained from rose remnants*. Recuperado el 3 de marzo de 2019 de http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0122-74832012000300006
- Vaca, C. (2017). *Agua segura para comunidades rurales a partir de un sistema alternativo de filtración*. Recuperado el 10 de mayo de 2019 de <https://revistas.unal.edu.co/index.php/revsaludpublica/article/view/56039>
- Valero, M. (2017). *Desarrollo de nuevos fotocatalizadores de dióxido de titanio para la fotodegradación de contaminantes en aguas utilizadas para el tratamiento postcosecha de frutas*. Recuperado el 2 de abril de 2019 de <https://riunet.upv.es/handle/10251/94163>
- Van Deventer, J. (2003). *The dynamic simulation of in-pulp sorption processes using the lumping of competitive and fouling phenomena*. Recuperado el 25 de mayo de 2019 de https://www.researchgate.net/publication/299196747_Dynamic_simulation_of_the_carbon-inpulp_and_carbon-in-leach_processes

- Van Santen, R. (2006). *Molecular Heterogeneous Catalysis*. Recuperado el 2 de marzo de 2019 de [https://books.google.com.ec/books?hl=es&lr=&id=1CU7yA4gPeMC&oi=fnd&pg=PR7&dq=Van+Santen,+R.,+%26+Neurock,+M.+\(2006\).+Molecular+Heterogeneous+Catalysis+.+WILEY-VCH+.&ots=6mmpM0oeyy&sig=1P2qlodW4FVtEESVP3yhVQ59m90#v=onepage&q&f=false](https://books.google.com.ec/books?hl=es&lr=&id=1CU7yA4gPeMC&oi=fnd&pg=PR7&dq=Van+Santen,+R.,+%26+Neurock,+M.+(2006).+Molecular+Heterogeneous+Catalysis+.+WILEY-VCH+.&ots=6mmpM0oeyy&sig=1P2qlodW4FVtEESVP3yhVQ59m90#v=onepage&q&f=false)
- Vargas, C. (2015). *Aplicación de un filtro de zeolita para potabilización del agua nivel domiciliario sitio palestina cantón el guabo provincia El Oro*. Recuperado el 2 de enero de 2019 de <http://repositorio.utmachala.edu.ec/handle/48000/3120>
- Vayas, J. (2019). *Análisis del carbón activado de origen vegetal con las costras de coco como filtro en el tratamiento de aguas residuales provenientes de la textilera "andelas"*. Recuperado el 2 de marzo de 2019 de <http://repositorio.uta.edu.ec/handle/123456789/27014>
- Vicent, H. (2017). *Procesos de oxidación avanzada en el ciclo integral del agua*. Recuperado el 5 de mayo de 2019 de <http://repositori.uji.es/xmlui/bitstream/handle/10234/168282/9788416546305.pdf?sequence=4&isAllowed=y>
- WHO. (2018). *Lixiviados y su efecto en recursos naturales*. Recuperado el 3 de enero de 2019 de <https://www.who.int/es>
- Wu, Z. (2012). *Synthesis and catalytic properties of metal clusters encapsulated within small-pore (SOD, GIS, ANA) zeolites*. Recuperado el 3 de enero de 2019 de <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/ja307370z>
- Xu, R. (2007). *Chemistry of Zeolites and Related Porous Materials*. Recuperado el 5 de marzo de 2019 de <https://pdfs.semanticscholar.org/facc/a460cec68aa82c0ac2b3ff67b3de742289ae.pdf>
- Zhaolian, I. (2007). *Preparation and characterization of highly mesoporous spherical activated carbons from divinylbenzene-derived polymer by ZnCl₂ activation*. Recuperado el 6 de marzo de 2019 de https://www.researchgate.net/publication/5941054_Preparation_and_ch

aracterization_of_highly_mesoporous_spherical_activated_carbons_fro
m_divinylbenzene-derived_polymer_by_ZnCl2_activation

Ziolo, B. (2015). *Tecnologías para la remoción de colorantes y pigmentos presentes en aguas residuales*. Recuperado el 3 de febrero de 2019 de <https://revistas.unal.edu.co/index.php/dyna/article/view/42924/53662>

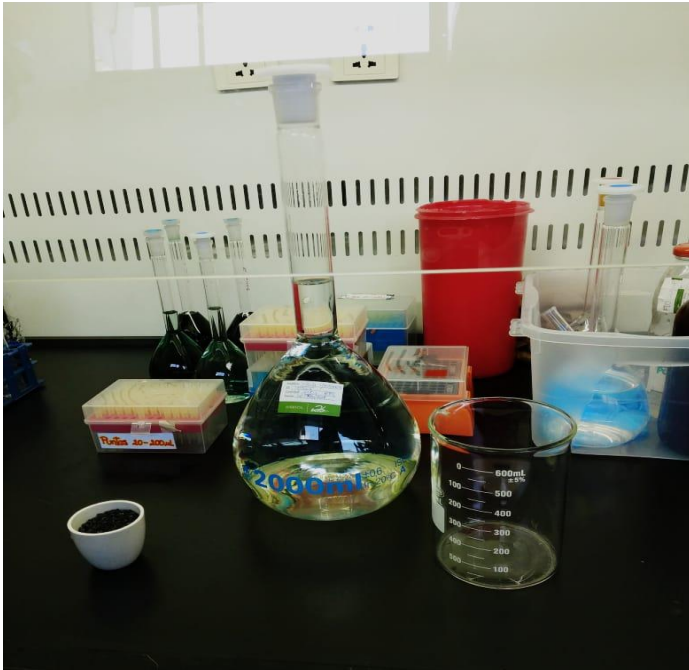
ANEXOS



Anexo 1. Muestra inicial de lixiviados proveniente del botadero de basura de Naranjito, provincia de Bolívar.



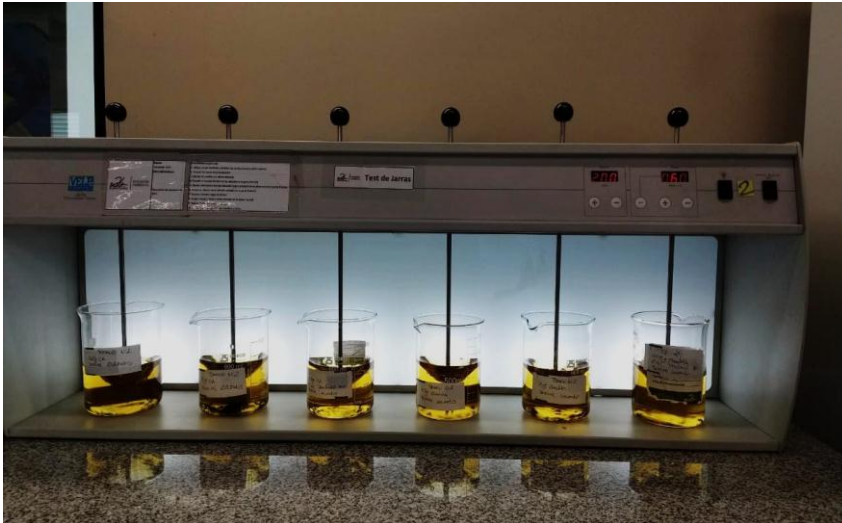
Anexo 2. Carbón activado y zeolita previo a su proceso de activación termoquímico.



Anexo 3. Proceso de activación termoquímica de los materiales en la sorbona.



Anexo 4. Proceso de activación termoquímica en el Carbón Activado y Zeolita para su acción como catalizadores.



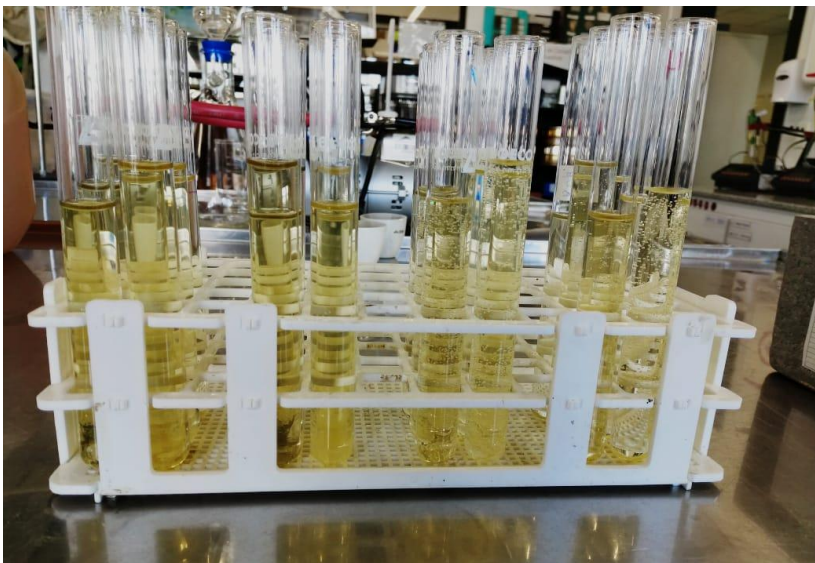
Anexo 5. Ensayos a diferentes dosis con el uso de test de jarras y lámparas UV.



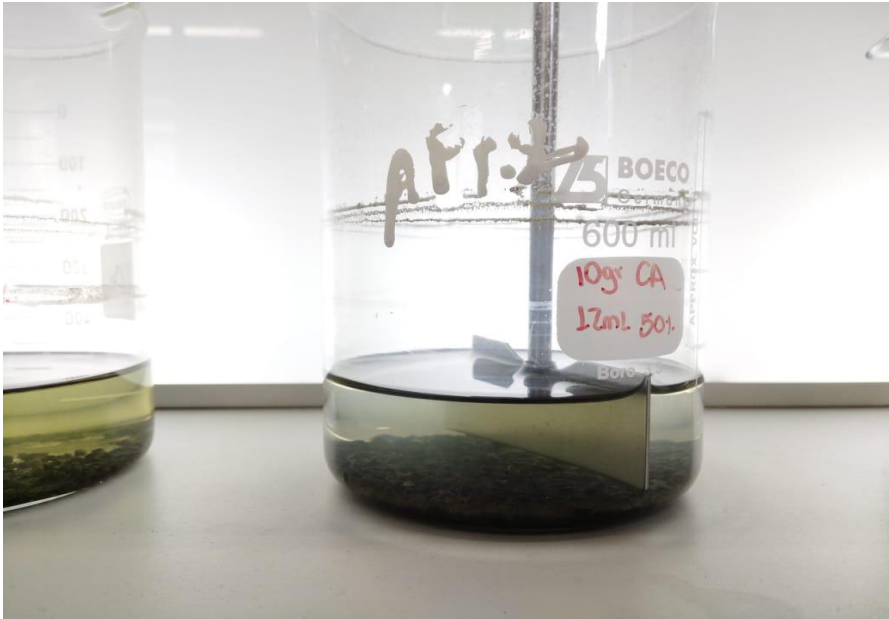
Anexo 6. Preparación del diseño experimental con materiales lavados y materiales activados termoquímicamente (catalizadores).



Anexo 7. Primeros análisis obtenidos en el diseño experimental.



Anexo 8. Primeros resultados obtenidos en el diseño experimental.



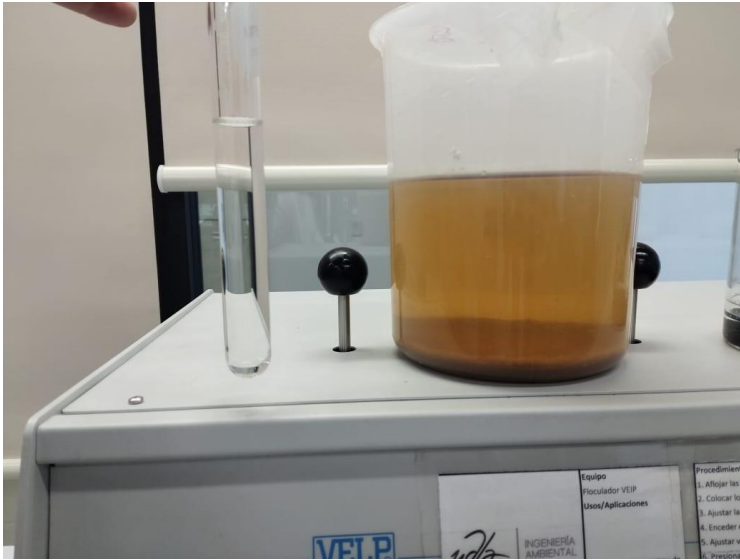
Anexo 9. Resultados durante las primeras horas de remoción con el uso de test de jarras y luz ultravioleta.



Anexo 10. Resultados evidentes de remoción en los ensayos realizados (izquierda: lixiviado inicial; derecha: lixiviado final con tratamiento).



Anexo 11. Resultado final de experimentación con los catalizadores de carbón activado y zeolita.



Anexo 12. Resultado final de experimentación en comparación con la muestra inicial de lixiviado.

