

**EVALUACIÓN DEL MÉTODO DE FOTOCATÁLISIS HETEROGÉNEA PARA LA
REMOCIÓN DE DQO Y DBO PRESENTE EN LOS LIXIVIADOS DEL RELLENO
SANITARIO LOS CORAZONES, VALLEDUPAR**

AUTORES

JORGE MARIO DÍAZ NASSER

DANIEL ALEJANDRO LEÓN ARCIA

**UNIVERSIDAD POPULAR DEL CESAR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y TECNOLÓGICAS
INGENIERÍA AMBIENTAL Y SANITARIA
VALLEDUPAR, CESAR**

2022

**EVALUACIÓN DEL MÉTODO DE FOTOCATÁLISIS HETEROGÉNEA PARA LA
REMOCIÓN DE DQO Y DBO PRESENTE EN LOS LIXIVIADOS DEL RELLENO
SANITARIO LOS CORAZONES, VALLEDUPAR**

AUTORES

JORGE MARIO DÍAZ NASSER
DANIEL ALEJANDRO LEÓN ARCIA

DIRECTOR

SANDY MILENA PINTO ROBLES
ESPECIALISTA EN GESTIÓN AMBIENTAL

UNIVERSIDAD POPULAR DEL CESAR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y TECNOLÓGICAS
INGENIERÍA AMBIENTAL Y SANITARIA
VALLEDUPAR, CESAR

2022

DEDICATORIA

Dedicó esta investigación primeramente a Dios, que me permitió concluir esta etapa de nuestras vidas de una excelente manera.

A mis padres, Jendy Nasser Florez y Carlos Augusto Díaz Pinto; a mi abuela, Angela Florez de Nasser por el apoyo que nos brindaron en todo momento, gracias a su motivación constante y buen ejemplo logramos sobrepasar todos los obstáculos que aparecieron en el camino, a ellos les damos infinitas gracias por inspirarnos a ser cada día mejores personas.

A mis hermanas Karen Díaz Nasser y María José robles Nasser

Por último, a los docentes, amigos y familiares que nos acompañaron en este proceso, a todos los que nos apoyaron le agradecemos de corazón.

JORGE MARIO DÍAZ NASSER

A mis padres, Jhon Jairo Leon Rojas y Yolanda Isabel Arcia Vega por su apoyo moral y económico durante todos los momentos de mi vida, y en especial este que permite ser un profesional.

A mis hermanos, Nataly Anaya Arcia, Moisés Leon Arcia y Jhon Leon.

A la ingeniera Sandy Milena Pinto Robles que es la directora de proyecto, la cual estuvo en cada momento brindando no solo su sabiduría, sino también su empatía para la solución de los problemas presentados durante la realización de este proyecto de grado.

Al Laboratorio Cristal Violeta Aguas y Alimentos, por prestar sus instalaciones con el fin de realizar los análisis correspondientes.

Amigos, docentes, directivos de la Universidad Popular del César, ¡Gracias!

DANIEL ALEJANDRO LEÓN ARCIA

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a Dios por bendecirnos cada día y por darnos la sabiduría necesaria para realizar nuestra investigación, sin su guía jamás habiésemos logrado nuestro objetivo.

A nuestros familiares, amigos por su apoyo incondicional en esta etapa que culmina.

Agradecemos a los docentes de la Universidad Popular del Cesar, por compartir con nosotros sus conocimientos a lo largo del desarrollo de nuestra profesión, especialmente a la ingeniera Sandy Milena Pinto Robles, directora de nuestro proyecto de investigación quien nos guio pacientemente en esta etapa.



TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
RESUMEN	6
ABSTRACT.....	7
INTRODUCCIÓN	8
1. TÍTULO DEL PROYECTO	9
2. PLANTEAMIENTO Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	10
3. JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO	12
4. OBJETIVOS	13
4.1. OBJETIVO GENERAL.....	13
4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	13
5. MARCO REFERENCIAL.....	14
5.1. ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS	14
5.2. MARCO TEÓRICO.....	17
5.2.1 Lixiviados	17
5.2.2 Clases de lixiviados.....	17
5.2.3. Relleno sanitarios.....	18
5.2.4. Proceso de oxidación avanzada	18
5.2.5. Ventajas y desventajas de los procesos de oxidación avanzada	19
5.2.6. Fotocatálisis heterogénea	20
5.2.7. Parámetros que influyen en el proceso de fotocatálisis	22
5.3. MARCO CONCEPTUAL	23
5.4. MARCO CONTEXTUAL	24
4.4.1 Área de estudio	26
5.5. MARCO LEGAL.....	28

5.6.	MARCO INSTITUCIONAL	36
6.	MARCO METODOLÓGICO.....	39
6.1.	LÍNEA Y SULÍNEA DE INVESTIGACIÓN	39
6.2.	TIPO DE INVESTIGACIÓN	39
6.3.	NIVEL DE INVESTIGACIÓN	39
6.4.	POBLACIÓN DE ESTUDIO	39
6.5.	MUESTREO POBLACIONAL	39
6.6.	DESARROLLO METODOLÓGICO	39
6.6.1.	Fase 1. Caracterizar la concentración de la DQO y DBO en los lixiviados del relleno sanitario.....	40
6.6.2.	Fase 2. Aplicar el tratamiento de fotocátalisis heterogénea utilizando dióxido de titanio (TiO ₂), peróxido de hidrogeno (H ₂ O ₂), sulfato ferroso (FeSO ₄).	41
6.6.3.	Fase 3. Determinar la eficiencia final de DQO y DBO en los lixiviados a través del tratamiento empleado.	42
7.	ANÁLISIS DE RESULTADOS	44
7.1.	Concentración de la DQO y DBO en los lixiviados del relleno sanitario	44
7.2.	Aplicación del tratamiento de fotocátalisis heterogénea utilizando dióxido de titanio (TiO ₂), peróxido de hidrogeno (H ₂ O ₂), sulfato ferroso (FeSO ₄).....	45
7.3.	Eficiencia final de DQO y DBO en los lixiviados a través del tratamiento empleado.	49
7.	Conclusiones	55
8.	Recomendaciones	56
	Referencias Bibliográficas	57

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Clasificación de los procesos de oxidación avanzada.	18
Tabla 2. Ventajas y desventajas de los POA sobre los métodos de tratamiento convencionales.	19
Tabla 3. Marco legal aplicable al estudio.	28
Tabla 4. Concentración de lixiviados de acuerdo con la resolución 0631 del 2015.	32
Tabla 5. Parámetros fisicoquímicos y metales.	40
Tabla 7. Resultados de la caracterización de lixiviados.	44
Tabla 8. Concentración final de fotocátalisis con el sulfato ferroso.	49
Tabla 9. Concentración final de fotocátalisis con el dióxido de titanio.	50
Tabla 10. Concentración de fotocátalisis con el peróxido de hidrogeno.	51
Tabla 11. Eficiencia de los impulsores para remover DBO5.	52
Tabla 12. Eficiencia de los impulsores para remover DQO.	53

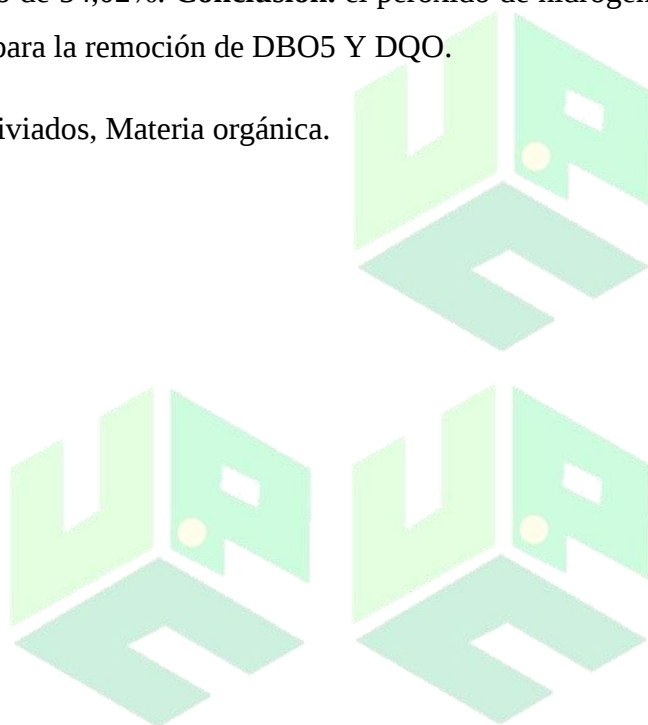
LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Ejemplo de lixiviados.	17
Figura 2. Ubicación de Valledupar, Cesar.	25
Figura 3. Diagrama del reactor batch con equipo de luz UV integrado usado para la fotocátalisis en suspensión.	42
Figura 4. Toma de muestra de lixiviados.	44
Figura 5. Tamizaje de los impulsores.	45
Figura 6. Pesaje de los impulsores.	46
Figura 7. Activación de los impulsores en la mufla.	46
Figura 8. Desecador con la muestra.	47
Figura 9. Agitador magnético y reactor Batch.	48
Figura 10. Reactor Batch con el equipo de luz UV integrado.	48
Figura 11. Pesaje y montaje en funcionamiento.	49
Figura 12. Eficiencia global de los impulsores para DBO5 Y DQO.	54

RESUMEN

Introducción. Los lixiviados son aguas productos de la descomposición de los residuos sólidos de un relleno sanitario, para el tratamiento de estos existen muchas tecnologías entre las cuales se encuentra la fotocatálisis. **Objetivo.** Evaluar el método de fotocatálisis heterogénea para la remoción de DQO y DBO presente en los lixiviados del relleno sanitario Los Corazones, Valledupar. **Metodología.** Explicativo, experimental, las muestras serán tomadas en la salida de los lixiviados del relleno sanitario, y también a la salida del foto reactor para cada uno de los parámetros de estudio. se establecieron tres fases, la primera, caracterización inicial del lixiviado; la segunda, es el diseño y construcción del fotoreactor, aplicación del tratamiento de fotocatálisis heterogénea utilizando dióxido de titanio (TiO_2), peróxido de hidrogeno (H_2O_2), sulfato ferroso (FeSO_4), tercera fase, determinar la eficiencia final de DQO y DBO en los lixiviados a través del tratamiento empleado. **Resultados.** La DBO5 tuvo una concentración de 7835 mg O_2/L y la DQO de 5224 mg O_2/L . Para el caso del DBO5 el dióxido de titanio y el peróxido de hidrogeno tienen una eficiencia del 84,61% y 84,84% respectivamente, el sulfato ferroso presenta un valor de 76%. Por su parte, Para el caso de la DQO, la mayor eficiencia se obtuvo con el peróxido de hidrogeno con un valor del 55,42%, la diferencia entre cada uno de los impulsores fue de una décima siendo el sulfato ferroso con 52,61% y el dióxido de titanio de 54,02%. **Conclusión.** el peróxido de hidrogeno es el impulsor que mejor eficiencia tiene para la remoción de DBO5 Y DQO.

Palabras clave. Fotocatálisis, Lixiviados, Materia orgánica.



ABSTRACT

Introduction. Leachates are water products of the decomposition of solid waste from a sanitary landfill, for the treatment of these there are many technologies, among which is photocatalysis. **Goal.** Evaluate the heterogeneous photocatalysis method for the removal of COD and BOD present in the leachate of the Los Corazones landfill, Valledupar. **Methodology.** Explanatory, experimental, the samples will be taken at the outlet of the leachate from the landfill, and also at the outlet of the photoreactor for each of the study parameters. three phases were established, the first, initial characterization of the leachate; the second is the design and construction of the photoreactor, application of the heterogeneous photocatalysis treatment using titanium dioxide (TiO_2), hydrogen peroxide (H_2O_2), ferrous sulfate (FeSO_4), third phase, determining the final efficiency of COD and BOD in leachate through the treatment used. **Results.** The BOD5 had a concentration of 7835 mg O_2/L and the COD of 5224 mg O_2/L . In the case of BOD5, titanium dioxide and hydrogen peroxide have an efficiency of 84.61% and 84.84% respectively, ferrous sulfate has a value of 76%. For its part, in the case of COD, the highest efficiency was obtained with hydrogen peroxide with a value of 55.42%, the difference between each of the drivers was one tenth, being ferrous sulfate with 52.61 % and titanium dioxide 54.02%. **Conclusion.** Hydrogen peroxide is the driver with the best efficiency for the removal of BOD5 and COD.

Keywords. Photocatalysis, Leachate, Organic matter.



INTRODUCCIÓN

Los lixiviados pueden acabar contaminando el agua subterránea como consecuencia de la filtración en el suelo o incluso también, alterar el contenido químico y bacteriológico de las aguas superficiales con las que entren en contacto. Esta capacidad que poseen los lixiviados para contaminar aguas, reside en su composición y en su alto contenido en organismos patógenos; por lo cual durante muchos años, las tecnologías basadas en los tratamientos convencionales y en los métodos clásicos, han sido consideradas como las más apropiadas para la manipulación y el manejo de efluentes de alta resistencia como los lixiviados de residuos sólidos, sin embargo, muchos investigadores han centrado sus estudios en el desarrollo de nuevas tecnologías que permitan el tratamiento eficaz de estas aguas contaminadas, eliminando los compuestos tóxicos y peligrosos para la salud humana, una de estas tecnologías es la fotocátalisis. (Florindo, 2017)

Este proceso consiste en la combinación de la fotoquímica con la fotocátalisis, es decir, la luz y un catalizador, los cuales son necesarios para acelerar las reacciones químicas. En el caso de la fotocátalisis heterogénea, se emplean semiconductores (sólidos en suspensión acuosa o gaseosa), los foto-sensibilizadores más comunes son el Al_2O_3 , ZnO , Fe_2O_3 y TiO_2 , el más empleado para reacciones de fotocátalisis es el dióxido de titanio, ya que este presenta mayor actividad fotocatalítica, no es tóxica, es estable en soluciones acuosa y no es costoso (Gómez, 2000).

Siendo así, este proyecto de investigación tiene como objetivo evaluar el método de fotocátalisis heterogénea para la remoción de DQO y DBO presente en los lixiviados del relleno sanitario Los Corazones, Valledupar. Para la metodología se establecieron tres fases, la primera, caracterización inicial del lixiviado; la segunda, es el diseño y construcción del fotoreactor, aplicación del tratamiento de fotocátalisis heterogénea utilizando dióxido de titanio (TiO_2), peróxido de hidrogeno (H_2O_2), sulfato ferroso (FeSO_4), tercera fase, determinar la eficiencia final de DQO y DBO en los lixiviados a través del tratamiento empleado.

1. TÍTULO DEL PROYECTO

EVALUACIÓN DEL MÉTODO DE FOTOCATÁLISIS HETEROGÉNEA PARA LA REMOCIÓN DE DQO Y DBO PRESENTE EN LOS LIXIVIADOS DEL RELLENO SANITARIO LOS CORAZONES, VALLEDUPAR.



2. PLANTEAMIENTO Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

Uno de los principales problemas mundiales que se están tratando en la actualidad, es la disposición final de los residuos sólidos. Hoy, la opción preferida para su almacenamiento, continúan siendo los vertederos abiertos. Sin embargo, el empleo de este tipo de almacenamiento está ligado a un fuerte impacto medioambiental, ya que para poder construirlo son necesarias grandes superficies de terreno, lo que afecta a la flora y a la fauna (Florindo, 2017).

Además, una vez operando los rellenos sanitarios forman lixiviados, los cuales son objeto de estudio en esta investigación, se presentan como uno de los principales problemas de la disposición final de residuos por este método considerado como el convencional, ya que estos son producto de la estabilización y transformación que sufren los residuos sólidos dentro del relleno sanitario debido a diferentes factores tales como: precipitación anual, infiltración, evaporación, transpiración, heladas, cambios de temperatura, contenido de humedad, composición y densidad de los residuos. Los lixiviados se caracterizan por ser corrientes líquidas altamente contaminantes que contienen gran cantidad de materiales suspendidos y materia orgánica (Cerde, 2007). De acuerdo con Buzón y Ponce (2014) estas corrientes líquidas se caracterizan principalmente por su alta concentración especialmente de Nitrógeno amoniacal, Nitrógeno orgánico, carga orgánica y metales pesados, Tales como: (Cd), Níquel (Ni), Zinc (Zn) y plomo (Pb). (Buzón y Ponce, 2014).

De acuerdo con información suministrada por Aseo del Norte S.A y citado por Trujillo, Quintero y Vega (2020) los lixiviados del vertimiento final del relleno sanitario Los Corazones presentan valores de DBO₅, DQO, nitrógeno amoniacal, SST, sulfatos con concentraciones por encima de lo estipulado en la resolución 0631 del 2015. Además, de acuerdo con reportaje del diario El Pílon en el 2017 se presentó una emergencia debido a que los vertimientos de lixiviados del relleno sanitario estarían llegando al arroyo Aguas Blancas, que atraviesa el corregimiento Los Corazones, lo cual representó un impacto negativo para la vida acuática del ecosistema en mención.

El relleno sanitario Los Corazones presenta problema en el manejo de sus lixiviados debido a que de acuerdo con visitas técnicas realizadas se encuentran infiltraciones de este líquido en la laguna N.2 lo cual evidentemente puede llegar hasta el suelo o aguas bien sea

superficiales o subterráneas. El mismo reporte menciona que la celda para la disposición final de residuos sólidos es deficiente y la geo membrana se encuentra instalada de manera incorrecta. Debido a lo cual esta situación vulnera los derechos colectivos a la salubridad pública, al goce a un medio ambiente sano y a la prestación eficiente de los servicios públicos estipulado en el artículo 4 de la ley 472 de 1998 de los habitantes de la región de Los Corazones corregimiento de Valledupar y demás población asentada alrededor del relleno sanitario.

¿Cuál es la eficiencia de remoción de la DQO y DBO de los lixiviados del relleno sanitario Los Corazones por medio del método de fotocátalisis heterogénea?

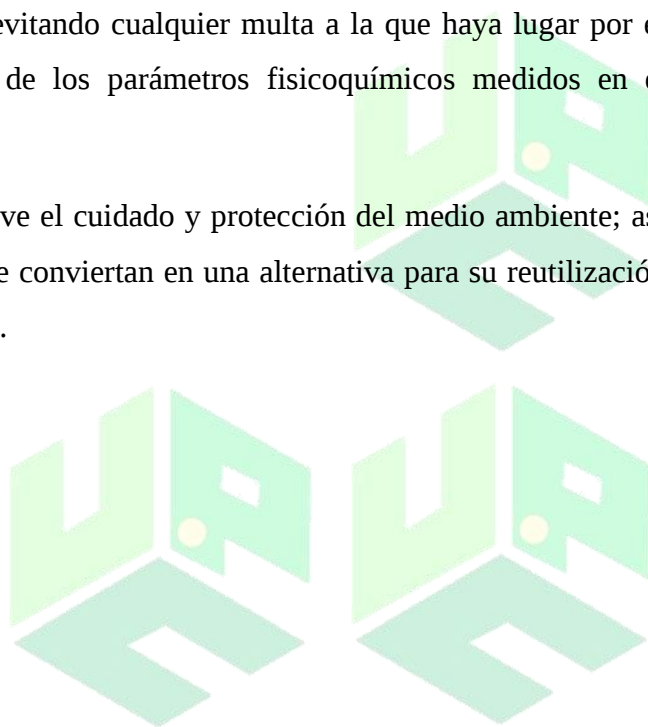


3. JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO

Dada la peligrosidad de los lixiviados, regularmente son tratados para remover o transformar los contaminantes y así disminuir el impacto negativo generado sobre el medio, por lo cual resulta muy importante tener que explorar tratamientos no convencionales que permitan lograr esta disminución en las concentraciones de los contaminantes, teniendo en cuenta esta situación la fotocatalisis surge como una alternativa cuya ventaja principal es la posibilidad de incorporar la energía solar en la foto activación del catalizador, por lo que el proceso de degradación adquiere un valor ambiental adicional significativo y se convierte en una técnica sostenible. El uso de la luz solar en la fotodegradación de contaminantes de aguas residuales hace, de este, un proceso económicamente viable, en particular para aplicaciones a gran escala (Borges, Sierra, Cuevas, García y Esparza, 2016). Adicionalmente, este proceso es de bajo costo, no tóxico, estable químicamente y de alta foto actividad, y se ha demostrado en aplicaciones a tratamiento de aguas residuales industriales y lixiviados, mejorando la biodegradabilidad de compuestos orgánicos refractarios (Hassan, Zhao y Xie, 2016).

Siendo así con la realización de este estudio en primer lugar el relleno sanitario podrá contar con una información sólida sobre la eficiencia de esta alternativa de tratamiento lo cual le permitirá aplicarla a escala real en aras de poder cumplir con la responsabilidad ambiental que le acarrea sus operaciones, y sobretodo evitando cualquier multa a la que haya lugar por el incumplimiento en las concentraciones de los parámetros fisicoquímicos medidos en el lixiviado.

Además, este tipo de tratamiento promueve el cuidado y protección del medio ambiente; así como puede permitir que los lixiviados se conviertan en una alternativa para su reutilización en sistemas de riego en las áreas comunes.



4. OBJETIVOS

4.1. OBJETIVO GENERAL

Evaluar el método de fotocátalisis heterogénea para la remoción de DQO y DBO presente en los lixiviados del relleno sanitario Los Corazones, Valledupar.

4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar la concentración de la DQO y DBO en los lixiviados del relleno sanitario.
- Aplicar el tratamiento de fotocátalisis heterogénea utilizando dióxido de titanio (TiO_2), peróxido de hidrogeno (H_2O_2), sulfato ferroso (FeSO_4)
- Determinar la concentración final de DQO Y DBO en los lixiviados a través del tratamiento empleado.



5. MARCO REFERENCIAL

5.1. ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS

En Quito, Ecuador, Llamatumbi (2019) realizó un estudio titulado “Fotocatálisis heterogénea como método de tratamiento de lixiviados del Relleno Sanitario Romerillos Del Cantón Mejía” para optar por el título de ingeniero ambiental de la Universidad Central de Ecuador. Este estudio se realizó con la finalidad de disminuir la concentración de los lixiviados del relleno sanitario para los parámetros arsénico, conductividad, Ph, DQO. La metodología estuvo conformada por varias etapas, la primera fue la caracterización inicial de los lixiviados, luego se realizó la activación del dióxido de titanio y se realizó el diseño y construcción del fotoreactor, es menester aclarar que para el muestreo se adquirieron seis muestras en total, las muestras se obtuvieron así, las primeras dos a los 15 minutos, luego cada media hora hasta las dos horas y la última se sustrajo una hora después de la quinta muestra. A la par que se realizaba la toma de muestras se medía la radiación en un lapso de cinco minutos entre toma y toma con una radiación promedio de 775 W/m². En cuanto a los resultados, el pH permanece prácticamente constante en un valor de 8.89 y disminuye el DQO en un 28.54% y en un 87.126% el Arsénico, con una radiación promedio de 775 W/m².

En Quito, Ecuador, Ortiz (2018) realizó un estudio titulado “Tratamiento de los lixiviados del relleno sanitario El Inga mediante fotocátalisis con dióxido de titanio (TiO₂) en presencia de luz UV” para optar por el título de ingeniero ambiental de la Universidad San Francisco de Quito el cual tuvo como finalidad estudiar la factibilidad de aplicar un tratamiento de fotocátalisis utilizando TiO₂ como catalizador para la degradación de DQO, DBO₅, y NO₃ - en una muestra de lixiviado del Relleno Sanitario de El Inga, lugar de disposición final de los residuos sólidos urbanos de la ciudad de Quito, Ecuador. En cuanto a la metodología en la fase 1 se realizó una caracterización inicial del efluente para los parámetros DQO, DBO y nitratos, en la fase 2, se realizó el diseño y construcción de dos reactores, el primer reactor tipo batch y el segundo fue un reactor de flujo continuo con un lecho de arena, finalmente, la fase tres permitió conocer la eficiente para cada uno de los reactores. La caracterización inicial de estos lixiviados mostró concentraciones de 12627, 3250 y 1437 mg/L para DQO, DBO₅ y NO₃ -, respectivamente. Se llevaron a cabo dos experimentos de fotocátalisis; el primero fue sobre un lecho fijo en donde 300 mL de arena se cargaron con 1 g/L de TiO₂, y el segundo fue en suspensión en donde se utilizaron 300 mL de lixiviado al cual se le agregó 0.3 g/L de TiO₂. En

los dos experimentos se usaron tres lámparas de luz UV (0.6W c/u) con una longitud de onda de 375 nm como fuente de energía principal y se trabajó a un pH igual a 8 y a una temperatura ambiente de 22°C. Los resultados experimentales indican que el tratamiento por fotocátalisis en suspensión es más eficiente debido a que se requiere menos recursos y menos tiempo para obtener porcentajes de remoción del 71, 55, y 97 % para DQO, DBO5, y NO₃ -, respectivamente. Por otro lado, el tratamiento de fotocátalisis sobre un lecho fijo se saturó a los 60 minutos alcanzando un porcentaje de remoción de 63, 14, y 38 % para DQO, DBO5, y NO₃, respectivamente. Al final de los dos experimentos la relación DQO/DBO5 fue menor a 2.5, 1.67 para fotocátalisis sobre un lecho fijo y de 2.27 para fotocátalisis en suspensión.

EN Perú, Mayorca (2017) realizó un estudio titulado “Reducción de la carga orgánica en lixiviado estabilizado del botadero municipal de San Ramón mediante oxidación avanzada foto-fenton” para optar por el título de ingeniero ambiental de la Universidad Nacional Agraria de La Selva con el fin de contar con información científica que permita mitigar la contaminación por lixiviados; en cuanto a la metodología, estuvo conformado por varias etapas, la primera consistió en la caracterización de los lixiviados; en la segunda etapa se realizó el diseño del reactor el cual fue un colector parabólico solar basado en la ecuación $X^2 = 20y$ de 0.41 m² de área de colector solar y un tubo de borosilicato de 16 mm de diámetro. El proceso Foto-Fenton se conformó de peróxido de hidrógeno (H₂O₂) como oxidante, tricloruro férrico hexahidratado (FeCl₃·6H₂O) como catalizador y radiación solar como fuente fotónica. Se estableció un pH=3 como pH inicial del proceso, empleando un diseño de dos factores con tres niveles (factorial 3X3). En el factor relación molar se evaluaron dosis de 1:15, 1:25 y 1:35 de Fe:H₂O₂ y en el factor tiempo de exposición se evaluaron los periodos de 10, 20 y 30 minutos. Como resultado se obtuvo una tasa de remoción de materia orgánica de 90.71%, 94.38% y 92.67% para la relación molar de 1:25 de Fe:H₂O₂. De igual manera, un índice de remoción de 85.60%, 89.21% y 88.04% para la relación molar de 1:15 de Fe:H₂O₂. Por otro lado, para la relación molar de 1:35 de Fe:H₂O₂, se encontró una eficiencia de remoción de 86.02%, 87.92% y 87.15%. Se observó que la relación molar 1:25 de Fe:H₂O₂ con exposición solar de 20 minutos tiene la mayor eficiencia de remoción de materia orgánica, reduciendo además microorganismos bacterianos y fúngicos, del cual se obtuvo una reducción del 37% de bacterias y 50% en numeración de fungi.

En Barranquilla, Colombia, Buzón y Ponce (2014) realizaron una investigación titulada “comparación de la aplicación de dos procesos de oxidación avanzada: fotofenton y fotocátalisis heterogénea en la remoción de DQO de lixiviado maduro del relleno sanitario El Henequén” para optar por el título de ingeniero ambiental de la Corporación Universitaria de la Costa cuya finalidad fue evaluar la eficiencia de dos Procesos de Oxidación Avanzada: Foto Fenton y Fotocátalisis Heterogénea en la remoción de DQO del lixiviado del Relleno Sanitario “El Henequén”. La metodología estuvo compuesta por etapas, en la etapa uno se realizó una caracterización del lixiviado proveniente del relleno sanitario “El Henequén”, en la etapa dos, se establecieron los valores de concentración de Sulfato Ferroso y Peróxido de Hidrógeno a pH neutro en el sistema Foto Fenton donde se obtenga la mayor eficiencia de remoción de DQO al tratar el lixiviado del relleno sanitario “El Henequén”; asimismo, en la etapa tres se establecieron los valores de concentración de Dióxido de Titanio en el sistema de Fotocátalisis Heterogénea donde se obtenga la mayor eficiencia de remoción de DQO al tratar el lixiviado del relleno sanitario “El Henequén”.

En cuanto a los resultados, se diseñó y construyó un reactor Tipo Bach a escala laboratorio que trabajó con un caudal de 9ml/min y un TRH de 8 minutos. El mayor porcentaje de remoción de DQO obtenido en el proceso Foto Fenton, el cual arrojó un 23% a una concentración de 1500 mg/L de sulfato ferroso (FeSO_4). Convirtiendo este proceso en no eficaz para el tratamiento del lixiviado maduro en esta experiencia. El proceso de fotocátalisis heterogénea fue el tratamiento que permitió el mayor porcentaje de remoción de DQO en esta experiencia el cual se obtuvo un 94% a una concentración de 0.05 mg/L de Dióxido de Titanio TiO_2 , por lo cual este proceso se convirtió en el más adecuado para su aplicación en el tratamiento de lixiviado maduro. De acuerdo a la eficiencia de remoción de DQO obtenido en esta experiencia con los dos procesos desarrollados, se observó que en el proceso con TiO_2 , hubo mejor comportamiento para la remoción de DQO, a diferencia del FeSO_4 , el cual se pudo observar un leve y mínimo porcentaje de remoción convirtiendo este proceso complejo para el tratamiento de lixiviados de este tipo. - Según el costo de los reactivos empleados, el TiO_2 es de mayor asequibilidad económica debido a su bajo costo comercial y además es un producto que permite su reutilización en el proceso de remoción de DQO sin perder su efectividad.

5.2. MARCO TEÓRICO

5.2.1 Lixiviados

Son los líquidos generados cuando el agua emanada de la escorrentía superficial, precipitación o la producida por el proceso de degradación de los residuos sólidos, se pone en contacto con los desechos depositados, aumentando su capacidad de absorción, pasando a través de ellos e incrementando la concentración de contaminantes. Este líquido tiene la facultad de dirigirse a las aguas subterráneas, superficiales y al subsuelo. (Zamorano, et al., 2006).

Figura 1. Ejemplo de lixiviados.



Fuente: Quitian, 2015.

5.2.2 Clases de lixiviados

Las clases de lixiviados en un relleno sanitario dependerán del tiempo de maduración de los residuos sólidos dispuestos en una cárcava, y por ende de la degradación de la fracción orgánica con la ampliación que genera la producción de lixiviados. A continuación, se presentan los resultados de tres muestras de lixiviados, catalogados como jóvenes, intermedios y viejos; en donde se tiene en cuenta tiempos específicos de disposición final. (Torres, et al., 2014).

5.2.3. Relleno sanitarios

Son espacios técnicamente elegidos, proyectados y manipulados para la disposición final de residuos sólidos, los cuales no generan amenaza o riesgo a la salud pública, una vez se mitiguen y controlen los tensionantes ambientales, mediante el desarrollo de principios de ingeniería, todo ello con el fin de confinar y aislar los desechos generados en una superficie mínima, mediante la compactación de residuos, revestimiento diario de estos, control de gases y lixiviados. (Jaramillo, 2002)

5.2.4. Proceso de oxidación avanzada

Los procesos de oxidación avanzada se utilizan en la remoción de agentes contaminantes, presentes en las aguas residuales y lixiviados donde no interfiere para este fin la cantidad de caudal. Estos procesos se fundamentan en técnicas capaces de generar variaciones en la composición química de los contaminantes, mediante la utilización de agentes oxidantes los cuales pueden ser producidos por medios fotoquímicos o no fotoquímicos. (Giraldo & Marroquín, 2014)

Dentro de los procesos de oxidación avanzada se encuentran las técnicas fotoquímicas y las no fotoquímicas, en la Tabla 1 se evidencia la clasificación de las principales técnicas utilizadas dentro de los procesos de oxidación avanzada.

Tabla 1. Clasificación de los procesos de oxidación avanzada.

Procesos fotoquímicos	Procesos no fotoquímicos
Fotocatálisis heterogénea	Ozonización en medios alcalino (O ₃ /OH ⁻)
Fotólisis de agua en ultravioleta de vacío (UVV).	Ozonización con peróxido de Hidrogeno (O ₃ /H ₂ O ₂)
UV/H ₂ O ₂	Procesos Fenton (Fe ²⁺ / H ₂ O ₂)
UV/O ₃	Oxidación electroquímica
Foto - Fenton y relacionados	Radiólisis y tratamiento con haces electrones

Oxidación en Agua subterránea y
supercrítica Fotocatálisis homogénea

Plasma no térmico.
Descarga Electrohidráulica y ultrasonidos

Fuente. Jiménez, 2014.

5.2.5. *Ventajas y desventajas de los procesos de oxidación avanzada*

A continuación, se presentan las ventajas y desventajas de los procesos de oxidación avanzada sobre los métodos convencionales.

Tabla 2. Ventajas y desventajas de los POA sobre los métodos de tratamiento convencionales.

Ventajas	Desventajas
No sólo cambian de fase al contaminante, sino que lo transforma químicamente.	Algunos POA, como los fotoquímicos, involucran costos adicionales por consumo de energía eléctrica.
Se puede conseguir la mineralización completa en la mayoría de los compuestos estudiados	En procesos que involucran luz, la eficiencia en la destrucción de contaminantes puede alertarse en función del diseño reactor (tipo de lámparas, geometría, hidrodinámica, etc.).
Casi no se generan sustratos que se tengan que tratar posteriormente.	Los POA mediadas por luz no son adecuadas para procesar mezclas de sustancias de elevada absortividad, ya que la eficiencia cuántica disminuye por pérdida de luz, por dispersión y/o absorción competitiva.
Se consume menos energía que con otros métodos como la incineración.	
Eliminan efectos sobre la salud como el uso de desinfectantes y oxidantes residuales como el cloro.	

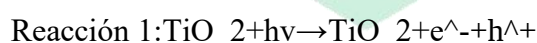
Ventajas	Desventajas
Se pueden transformar los contaminantes refractarios en productos más simples, tratables luego por métodos económicos	

Fuente: (Domènech, Jardim y Litter, 2003; Primo, 2008).

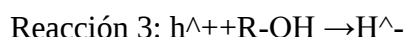
5.2.6. Fotocatálisis heterogénea

La fotocatálisis heterogénea con dióxido de titanio - TiO_2 es una iniciativa con ciertas ventajas en la purificación y remediación de aguas contaminadas (Litter, et al., 2010) y es una energía solar económica que puede usarse en muchas de las regiones donde existen problemas drásticos de Arsénico-As, debido a que el As en su forma trivalente es difícil de remover, por lo que se usan métodos de oxidación avanzada con luz UV, aunque lo ideal es que la tecnología pueda reducir o eliminar ambas formas de Arsénico (Morgada & Litter, 2010), este proceso consiste en la combinación de la fotoquímica con la fotocatálisis, es decir, la luz y un catalizador, los cuales son necesarios para acelerar las reacciones químicas. En el caso de la fotocatálisis heterogénea, se emplean semiconductores (sólidos en suspensión acuosa o gaseosa), los foto-sensibilizadores más comunes son el Al_2O_3 , ZnO , Fe_2O_3 y TiO_2 , el más empleado para reacciones de fotocatálisis es el dióxido de titanio, ya que este presenta mayor actividad fotocatalítica, no es tóxica, es estable en soluciones acuosa y no es costoso (Gómez, 2000).

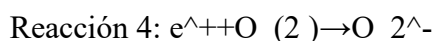
Cuando el electrolito y el semiconductor entran en contacto, se transfieren cargas que ocurren a través de la inter-fase sólido/líquido (heterogénea), además se crea un campo eléctrico alrededor del semiconductor hasta la superficie. En el periodo de foto excitación, cuando un fotón de energía suficiente es absorbido, se curva la banda y éstas adquieren la condición óptima para la separación de cargas (par e^-/h^+). (Rodríguez, 2002) Cuando se emplea dióxido de titanio el proceso de degradación es de especial interés por los huecos (h^+) producidos en la banda de valencia de semiconductor, al emplear TiO_2 , en forma de anatasa, la radiación a la cual se deberá someter es de una longitud de onda menor a 400 nm, generando la siguiente reacción (LI, et al., 2011). Ver ecuación 1.



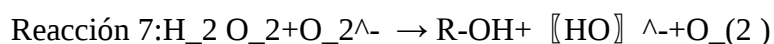
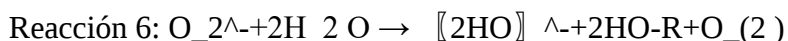
Superficialmente en el TiO_2 , el agua constituye el medio que hará reaccionar a los huecos (reacción 2) y con grupos R-OH (reacción 3) formando así radicales Hidroxilo ($\text{OH}^\cdot$). Ver ecuación 2 y 3.



Por otra parte, los electrones en exceso de la banda conductora reaccionarán con el oxígeno molecular formando radicales superóxido $\text{O}_2^\cdot$ y peróxido de hidrógeno (reacción 4 y reacción 5) respectivamente. Ver ecuación 4 y 5.



Posterior a estas reacciones el radical superóxido como el peróxido de hidrógeno produce otros radicales hidroxilos mediante las reacciones presentadas a continuación:



Finalmente, el radical hidroxilo $\text{HO}^\cdot$ generado, reacciona de tal manera que completa la mineralización de sustancias orgánicas, dependiendo del punto de equilibrio de adsorción/desorción para un contaminante dado, siendo incidente la oxidación fotocatalítica en sustrato orgánico adsorbido podría incidir en la eficiencia de su degradación oxidativa, reacción que se muestra a continuación (Rodríguez, 2002) (Hincapié y Sapúveda, 2002): Ver ecuación 9.



5.2.7. Parámetros que influyen en el proceso de fotocatalisis

Existen varios parámetros que según los autores (Garcés Giraldo, et al., 2004) influyen de manera cuantitativa y cualitativa en el proceso de óxido-reducción foto catalítico, siendo estos los que mencionan:

Longitud de onda e intensidad de luz: la longitud de onda óptima para ser absorbida por el dióxido de titanio es de 400nm, que se ubican en el espectro ultravioleta, está tendrá la capacidad de producir en el semi-conductor pares electrón-hueco. La distancia de penetración de los fotones dentro de la partícula de TiO₂ se vuelve corta a menor longitud de onda debido a que son absorbidos con mayor fuerza por las moléculas del semiconductor, por tal motivo, el empleo de longitudes de ondas cortas (UVC) producen los pares electrón-hueco más cerca de la superficie, empleando menos tiempo de transporte hacia la superficie de la partícula, es decir, a menor longitud de onda empleada, mayor es el aprovechamiento de la energía absorbida.

El catalizador: En término de eficiencia a mayor dosis empleada de catalizador, mayor será en principio la eficiencia obtenida, al emplear partículas de TiO₂ se producen sólidos suspendidos, dicho parámetro presenta un límite permisible exigente en la legislación ambiental (AM 097-A, 2015). Por lo que, es importante separar las partículas de TiO₂ de las aguas tratadas antes de su vertido o reutilización, para solventar esta problemática se debe aumentar el tamaño de la partícula o adherirlas a soportes de mayor tamaño mejorando el proceso de decantación y evitando el empleo de catalizador en suspensión. (Vidal, 2012) (Marín, 2002).

Efecto del oxígeno: El oxígeno molecular interviene recibiendo electrones y produce el radical superóxido, que genera más radicales hidroxilos. Por lo tanto, la presencia de oxígeno es esencial para generar reacción efectiva.

Temperatura y pH: este parámetro afecta al tamaño de las partículas, la carga superficial y las posiciones de los máximos y mínimos de las bandas del TiO₂ por sus características anfóteras, se deberá emplear un pH de diferente punto isoeléctrico para el TiO₂ (Ph 7), debido a que la superficie del óxido no está cargada.

Calidad del agua a tratar: La materia orgánica contenida, la presencia de turbidez, los sólidos suspendidos totales en el agua restan la eficiencia de la oxidación fotocatalítica con TiO₂,

debido a que estos elementos, reducen la cantidad de luz ultravioleta con la que interactúa el agua, el catalizador también reduce su eficiencia en la reacción de destoxificación. (Jiang, 2004).

5.3. MARCO CONCEPTUAL

Afluente: agua residual u otro líquido que ingrese a un reservorio, o algún proceso de tratamiento. (RAS, 2000).

Ambiente: conjunto de elementos naturales o inducidos por el hombre que interactúan en un espacio y tiempo determinados (Jaramillo, 2002).

Ambiente aerobio: proceso que requiere o no es destruido por la presencia de oxígeno (RAS, 2000).

Ambiente anaerobio: proceso desarrollado en ausencia de oxígeno molecular (Carriazo, Bossa y Castillo, 2012).

Ambiente anóxico: ambiente bioquímico en el cual no existe oxígeno molecular, pero existe oxígeno en forma combinada como nitratos y nitritos (RAS, 2000).

Biodegradable: dicho de la materia orgánica, cualidad de ser metabolizada por medios biológicos (Jaramillo, 2002).

Celda de seguridad: infraestructura que podrá ser ubicada en las áreas donde se realizará la disposición final de residuos sólidos, mediante la tecnología de relleno sanitario, donde se confinarán y aislarán del ambiente los residuos peligrosos previo cumplimiento de las normas ambientales y sanitarias en materia de residuos peligrosos (Constitución política de Colombia, 1991).

Celda: infraestructura ubicada en el relleno sanitario, donde se esparcen y compactan los residuos durante el día para cubrirlos totalmente al final del mismo (Constitución política de Colombia, 1991).

Contaminante: todo elemento, materia, sustancia, compuesto, así como toda forma de energía térmica, radiación ionizante, vibración o ruido que, al incorporarse o actuar en cualquier elemento del medio físico, altera o modifica su estado y composición o afecta la flora,

la fauna o la salud humana. Debe entenderse como medio físico el suelo, el aire y el agua (Jaramillo, 2002).

Concentración: denomínese concentración de una sustancia, elemento o compuesto en un líquido, la relación existente entre su peso y el volumen del líquido que lo contiene (RAS, 2000).

Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) ó Demanda de oxígeno: cantidad de oxígeno usado en la estabilización de la materia orgánica carbonácea y nitrogenada por acción de los microorganismos en condiciones de tiempo y temperatura especificados (generalmente cinco días y 20°C). Mide indirectamente el contenido de materia orgánica biodegradable (RAS, 2000).

Demanda Química de Oxígeno (DQO): medida de la cantidad de oxígeno requerido para oxidación química de la materia orgánica del agua residual, usando como oxidantes sales inorgánicas de permanganato o dicromato en un ambiente ácido y a altas temperaturas (RAS, 2000).

Eficiencia de tratamiento: relación entre la masa o concentración removida y la masa o concentración en el afluente, para un proceso o planta de tratamiento y un parámetro específico; normalmente se expresa en porcentaje (RAS, 2000).

Membrana: barrera constituida por material sintético, arcillas u otros materiales de baja permeabilidad, destinadas a impermeabilizar el fondo de un relleno sanitario (Constitución política de Colombia, 1991).

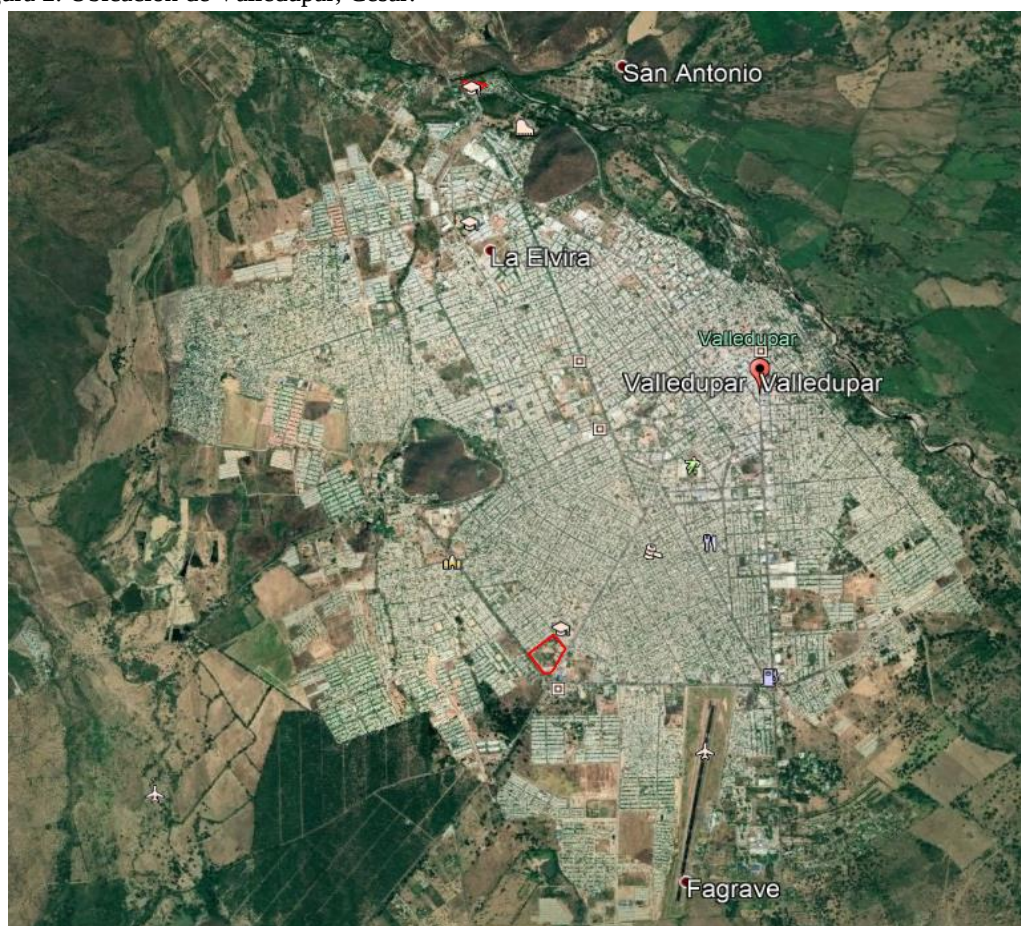
5.4. MARCO CONTEXTUAL

Valledupar es la capital del departamento del Cesar, Colombia. Está ubicada al nororiente de la Costa Caribe colombiana, a orillas del río Guatapurí, en el valle del río Cesar formado por la Sierra Nevada de Santa Marta y la serranía del Perijá.

La ciudad es un importante centro para la producción agrícola, agroindustrial y ganadera en la región comprendida entre el norte del departamento del Cesar y el sur del departamento de La Guajira. También es uno de los principales epicentros musicales, culturales y folclóricos de Colombia por ser la cuna del vallenato, género musical de mayor popularidad

en el país y actualmente símbolo de la música colombiana. Anualmente atrae a miles de visitantes de Colombia y del exterior durante el Festival de la Leyenda Vallenata, máximo evento del vallenato.

Figura 2. Ubicación de Valledupar, Cesar.



Fuente: Tomada y adaptada de Google Earth, 2021.

Extensión total: 4.493 Km²

Extensión área urbana: El casco urbano tiene una longitud norte-sur de 8.3 km y este-oeste de 6.2 km

Altitud de la cabecera municipal (metros sobre el nivel del mar): la ciudad se encuentra a una altitud que oscila entre los 220 m. al norte y 150 m. a sur, siendo la altitud media de 168 m.

Temperatura media: la temperatura Media Anual es de 28,4 °C, con máximas y mínimas de 22°C y 34°C respectivamente, la temperatura máxima histórica registrada es de 41.5°C y la mínima de 16°C. El mes más caluroso es abril con un promedio de 30°C y el más fresco octubre.

Vegetación: El valle del río Cesar pertenece a la clasificación climática Bosque Seco Tropical, estando cubierto por un bosque claro muy intervenido donde se alternan árboles dispersos y pastos artificiales para el sostenimiento de la importante cabaña bovina existente en sus campos. Las especies más representativas de la región, que corresponde a bosque seco tropical, están representadas por los géneros *Cassia*, *Tabebuia*, *Crescentia* e *Inga* entre otras con nombres comunes como acacias, cañaguates, guanábanos, cedros, ceibas y una importante variedad de especies foráneas muy adaptadas ya al medio local como los mangos, eucaliptos y cítricos.

También es importante la presencia de árboles frutales en zonas públicas como parques, andenes y separadores de avenidas, en este caso por iniciativa de la municipalidad. El árbol más común es el mango seguido de cañahuate, ceibas, robles, totumos, acacias, mamones, cotoprix, uvitos, cardamomos y un importante corredor vial de cauchos.

Fauna: La fauna silvestre en la actualidad se encuentra muy afectada, los felinos y mamíferos como el tigrillo y los venados son actualmente una rareza sobresaliendo casi exclusivamente los reptiles representados por las iguanas, lagartijas y algunas serpientes como boas, falsas corales, y mapaná. En cuanto a las aves sobresalen algunas rapaces como la lechuza y los gavilanes y otras como palomas, tierrelitas, pericos y colibríes.

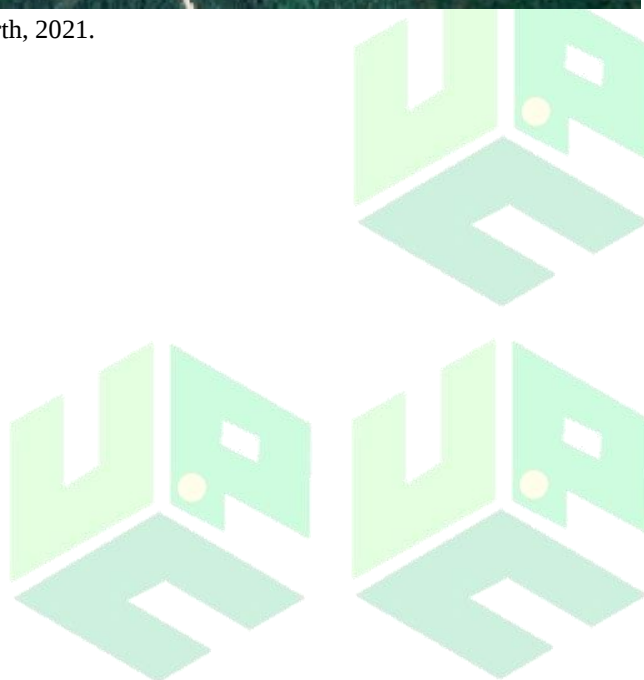
4.4.1 Área de estudio

El relleno sanitario Los Corazones se encuentra ubicado en el municipio de Valledupar, departamento de Cesar a los 10°32'57.1"N y 73°14'45.1"W (ver figura 2), a seis kilómetros del casco urbano de la capital departamental, sobre la vía que conduce a Patillal y posee un área de ciento (120) hectáreas; limita en la parte sur con el río Guatapurí, al occidente la carretera que de Valledupar conduce a Patillal, al norte con el arroyo El Pájaro y hacia el oriente con La Vega (Trujillo-Romero et al, 2019). Este relleno sanitario es combinado (tipo trinchera y área) y en él se disponen los residuos sólidos de municipios como Agustín Codazzi, La Paz, La Jagua de Ibirico, Manaure, San Diego, Valledupar, entre otros.

Figura 3. Ubicación del relleno sanitario los corazones.



Fuente: tomada y adaptada de google Earth, 2021.



5.5. MARCO LEGAL

A continuación, se presenta la normatividad aplicable a la temática de estudio, lo cual permitirá conocer el marco legal en cuestión que debe cumplir el relleno sanitario con relación a los lixiviados.

Tabla 3. Marco legal aplicable al estudio.

Norma	Artículo	Aplicabilidad
Constitución política de Colombia 1991	Artículo 79. Todas las personas tienen derecho a gozar de un ambiente sano. La ley garantizará la participación de la comunidad en las decisiones que puedan afectarlo. Es deber del Estado proteger la diversidad e integridad del ambiente, conservar las áreas de especial importancia ecológica y fomentar la educación para el logro de estos fines.	Se toma como referencia porque es normas de normas por medio de la cual se prohíbe de manera irrestricta y sin contemplaciones la contaminación al medio ambiente, protegiendo asimismo la salud de la población en general.
	Artículo 80. El Estado planificará el manejo y aprovechamiento de los recursos naturales, para garantizar su desarrollo sostenible, su conservación, restauración o sustitución. Además, deberá prevenir y controlar los	

Norma	Artículo	Aplicabilidad
	factores de deterioro ambiental, imponer las sanciones legales y exigir la reparación de los daños causados. Así mismo, cooperará con otras naciones en la protección de los ecosistemas situados en las zonas fronterizas.	
Ley 99 de 1993 Por la cual se crea el Ministerio del Medio Ambiente, se reordena el Sector Público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables, se organiza el SINA, y se dictan otras disposiciones.	Crea el Ministerio del Medio Ambiente y Organiza el Sistema Nacional Ambiental (SINA). Reforma el sector público encargado de la gestión ambiental. Organiza el Sistema Nacional Ambiental y exige la Planificación de la gestión ambiental de proyectos. La aplicabilidad de esta norma en este estudio tiene que ver con los principios generales ambientales que rigen el país. Dentro de estos el principio 10 busca La acción para la protección y recuperación ambiental del país es una tarea conjunta y coordinada entre el Estado, la comunidad, las organizaciones no	Se tiene en cuenta dado que por medio de esta ley se designa funciones a las autoridades competentes con el fin de proteger el medio ambiente y la salud de las personas.

Norma	Artículo	Aplicabilidad
	gubernamentales y el sector privado. El Estado apoyará e incentivará la conformación de organismos no gubernamentales para la protección ambiental y podrá delegar en ellos algunas de sus funciones.	
Decreto 2811 de 1974 Por el cual se dicta el Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente	En el decreto 2811 de 1974, se hace especial énfasis en materia de suelos en Colombia los siguientes artículos: Artículo 8: Se consideran factores que deterioran el ambiente entre otros: - La contaminación del aire, de las aguas, del suelo y de los demás recursos naturales renovables. - La degradación, la erosión y el revenimiento de suelos y tierras. - Las alteraciones nocivas de la topografía. Artículos 178 al 180: se relacionan los principios para el uso y el aprovechamiento del	El decreto que establece el código de recursos naturales se tiene en cuenta dado el impacto que tienen los lixiviados en los recursos naturales.

Norma	Artículo	Aplicabilidad
	suelo. Artículos 182 al 186: Relacionado con el uso y conservación de los suelos. Artículos 324 al 326: Referencia los distritos de conservación del suelo.	
Decreto 3930 del 2010. Por el cual se reglamenta parcialmente el Título I de la Ley 9 de 1979, así como el Capítulo 11 del Título VI-Parte 11I- Libro 11 del Decreto - Ley 2811 de 1974 en cuanto a usos del agua y residuos líquidos y se dictan otras disposiciones"	Capítulo IV: Vertimientos. Establece en el artículo 24 las prohibiciones, es decir lugares donde no se admiten vertimientos. Y en el capítulo VII. Refiere el proceso para el permiso de vertimiento de determinada actividad	Se tiene en cuenta dado que los rellenos sanitarios son regidos bajo el decreto en mención, por lo cual deben cumplir con ciertos criterios como una concentración del contaminante permitida.

Fuente: Villamizar, 2019.

Resolución 0631 del 2015 por el cual se establece los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de agua superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones. En el artículo 14 menciona la concentración de parámetros fisicoquímicos que deben cumplir los sistemas de tratamientos y disposición final de residuos, los cuales se relacionan a continuación:

Tabla 4. Concentración de lixiviados de acuerdo con la resolución 0631 del 2015.

Parámetro Generales	Tratamiento y disposición de residuos sólidos	Unidades
pH	6.00 – 9.00	Unidades de pH
Demanda bioquímica de oxígeno (DBO)	800,00	mg O ₂ /L
Demanda química de oxígeno (DQO)	2000,00	mg O ₂ /L
Sólidos suspendidos totales (SST)	400,00	mg/L
Sólidos sedimentables (SSED)	5,0	ml/L
Grasas y aceites	50,00	mg/L
Compuestos semivolátiles fenólicos	Análisis y reporte	mg/L
Fenoles	0.20	mg/L
Sustancias activas al azul de metileno (SAAM)	Análisis y Reporte	mg/L
Hidrocarburos		
Hidrocarburos Totales (HTP)	10,00	mg/L
Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos (HAP)	Análisis y Reporte	mg/L
BTEX (Benceno, Tolueno, Etilbenceno, y Xileno)	Análisis y Reporte	mg/L
Compuestos Orgánicos Halogenados Absorbibles (AOX)	Análisis y Reporte	mg/L
Compuestos de Fósforo		

Parámetro Generales	Tratamiento y disposición de residuos sólidos	Unidades
Ortofosfatos	Análisis y Reporte	mg PO4-3/L
Fósforo total	Análisis y Reporte	mg P/L
Compuestos de Nitrógeno		
Nitratos	Análisis y Reporte	mg NO3-N/L
Nitritos	Análisis y Reporte	mg NO2-N/L
Nitrógeno amoniacal	Análisis y Reporte	mg N-NH3-N/L
Nitrógeno total	Análisis y Reporte	mg N/L
Parámetro	Tratamiento y disposición de residuos sólidos	Unidades
IONES		
Cianuro Total (CN ⁻)	0,50	mg/L
Cloruros (CL ⁻)	500,00	mg/L
2- Sulfatos (SO4)	600,00	mg/L
Sulfuros (S2 ⁻)	Análisis y Reporte	
Metales y Metaloides		
Aluminio (Al)	3,00	mg/L

Parámetro Generales	Tratamiento y disposición de residuos sólidos	Unidades
Arsénico (As)	0,10	mg/L
Bario (Ba)	2,00	mg/L
Cadmio (Cd)	0,05	mg/L
Cinc (Zn)	3,00	mg/L
Cobalto (Co)	Análisis y Reporte	mg/L
Cobre (Cu)	1,00	mg/L
Cromo (Cr)	0,50	mg/L
Estaño (Sn)	Análisis y Reporte	mg/L
Litio (Li)	Análisis y Reporte	mg/L
Manganeso (Mn)	Análisis y Reporte	mg/L
Mercurio	0,01	mg/L
Molibdeno (Mo)	Análisis y Reporte	mg/L
Níquel (Ni)	0,50	mg/L
Plomo (Pb)	0,20	mg/L
Selenio (Se)	0,20	mg/L
Vanadio (V)	1,00	mg/L
Otros parámetros para análisis y reporte		

Parámetro Generales	Tratamiento y disposición de residuos sólidos	Unidades
Acidez total	Análisis y Reporte	mg/L CaCO3
Alcalinidad total	Análisis y Reporte	mg/L CaCO3
Dureza cálcica	Análisis y Reporte	mg/L CaCO3
Dureza total	Análisis y Reporte	mg/L CaCO3

Fuente: Villamizar, 2019.

5.6. MARCO INSTITUCIONAL

INTERASEO S.A.S. E.S.P. es una organización globalizada, excelente y experta. Destacada por brindar soluciones innovadoras en residuos, facility, agua y energía.

INTERASEO fue constituida por Escritura Pública N° 2547 del 31 de julio de 1996 de la Notaria 2a. de Medellín, inscrita ante la Cámara de Comercio de Santa Marta el 03 de octubre de 1996, con el N° 9321 del Libro IX, quedando constituida la personería jurídica de naturaleza comercial denominada INTERASEO ESP SA Con 25 años de trabajo, nos consolidamos como una de las empresas más importantes de Colombia en el sector de servicios públicos de aseo, cuidado de superficies, acueducto, saneamiento y energía, con operaciones sustentables y respetuosas con el medio ambiente.

INTERASEO nace de la compañía TERMOTECNICA COINDUSTRIAL, una de las más antiguas y reconocidas empresas de ingeniería en Colombia, con amplia experiencia en la prestación de todo tipo de servicios, incluyendo la prestación de servicios públicos como: diseño, construcción y manejo de rellenos sanitarios (Relleno Sanitario Curva de Rodas en Medellín y Relleno Sanitario de Santa Marta).

El nombre de INTERASEO nace de la unión entre las sociedades INSICON y TERMOTÉCNICA, de donde se sacaron las dos primeras letras de la primera empresa (IN) con las tres primeras de la segunda (TER), dando así la base del nombre de la compañía y sumándosele la terminación ASEO.

Debido a la emergencia sanitaria que vivió Santa Marta en los años 90, nace INTERASEO, empresa que participó en la licitación pública que buscaba quién tomara la atención del servicio público de aseo hasta el año 2007.

Luego de consolidar la prestación del servicio público domiciliario de aseo en la ciudad de Santa Marta, la empresa adoptó una política de expansión de sus servicios a diferentes ciudades del país y nivel internacional, suministrando en la actualidad el mismo servicio en: Valledupar, Sincelejo, Pereira, Ibagué, Soledad, Sucre, Riohacha, Maicao, Malambo y Ciénaga, entre otros municipios. En otros Países INTERASEO hace presencia en Chile, Perú, Panamá, El Salvador y Honduras.

A la fecha la organización ha logrado consolidar una amplia infraestructura a nivel nacional e internacional, generando más de 8.300 empleos entre directos e indirectos. Es importante destacar que el 73% de los cargos directivos de la compañía son ocupados por mujeres.

Con presencia en 6 países, 48 departamentos (27 de Colombia y 21 internacionales), 84 operaciones en mercado regulado (83 operaciones de aseo -66 en Colombia y 17 internacionales- y 1 operación de aguas en Colombia), 153 operaciones de facility (129 en Colombia y 24 internacionales) y 200 operaciones de Residuos Especiales (199 en Colombia y 1 Internacional).

Estamos comprometidos con el crecimiento y fortalecimiento de nuestras líneas de negocio, buscando generar vínculos más sólidos con nuestros usuarios, conociendo, entendiendo y solucionando sus necesidades.

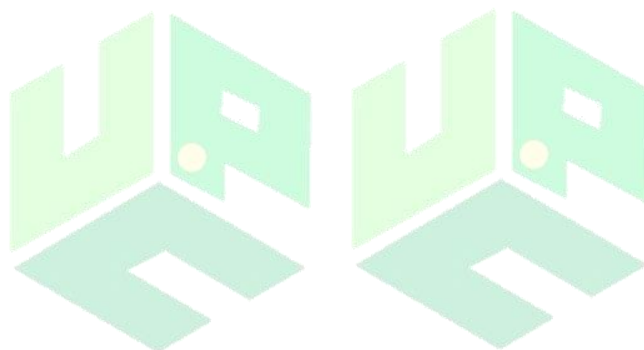
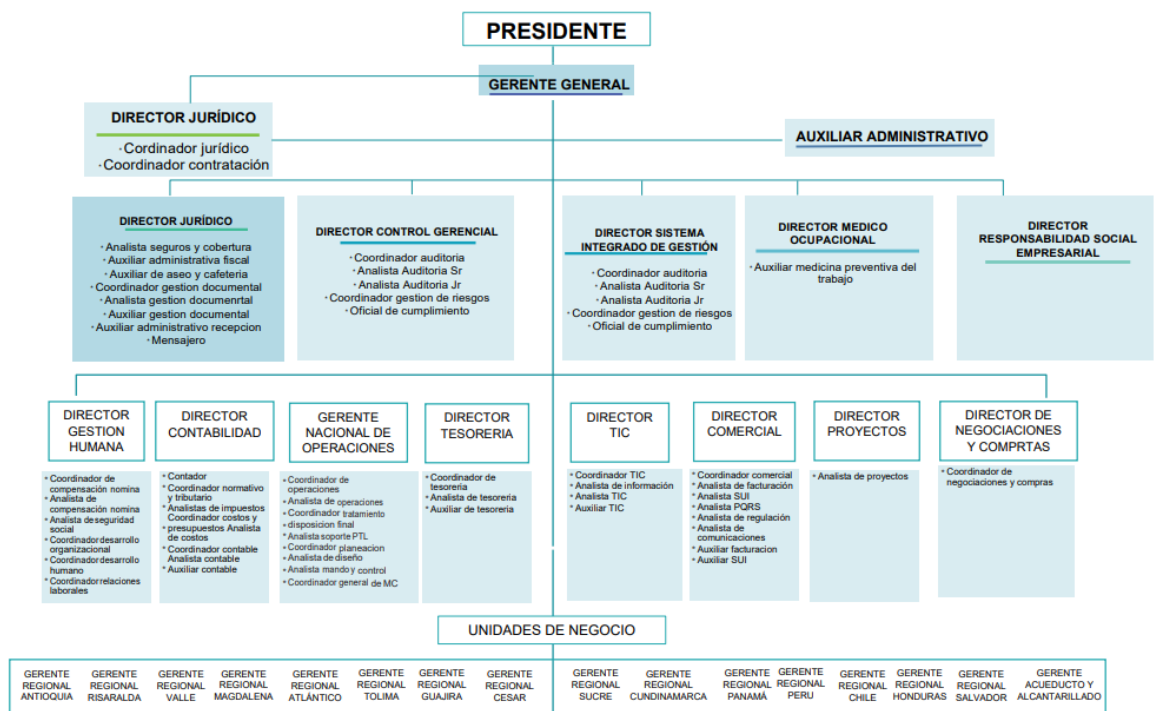
En mercado regulado presta el servicio de recolección de residuos sólidos, barrido, lavado de áreas públicas, limpieza de playas, poda de árboles, transporte de residuos y transferencia, corte de césped, disposición final, aprovechamiento y mantenimiento de cestas públicas.

INTERASEO desarrolla labores en los rellenos sanitarios de Los Corazones (Valledupar, Cesar), El Clavo (Palmar, Atlántico), Yotoco (Yotoco, Valle del Cauca), Magic Garden (San Andrés Islas), La Miel (Ibagué, Tolima), La Glorita (Pereira, Risaralda), Oasis (Sincelejo, Sucre), Sur de La Guajira (Fonseca, La Guajira), Riohacha (Riohacha, La Guajira), La María (Ciénaga, Magdalena), Ecosistema de la Sierra (Arcataca, Magdalena) y Palangana (Santa Marta, Magdalena), además diseñó, construyó y opera las estaciones de transferencia de Palmira (Valle del Cauca) y Sabaneta (Antioquia).

En la a línea de Facility, INTERASEO presta los servicios de: Aseo y limpieza; servicios administrativos; limpieza y desinfección; manejo integral de residuos; mantenimiento hidrosanitario; operación de plantas de tratamiento de agua, fumigación y control de plagas, manejo de silvicultura, mantenimiento civil y de equipos menores y consultoría de proyectos.

Entre los principales aliados de esta línea se encuentran: OPAIN (Aeropuerto El Dorado), Cerrejón, Puerto Brisa, Schlumberger, Frontero Energy, Avianca, Drummond, Claro, ETB, Keralty, EPM, Ecopetrol y Terminal de transportes de Barranquilla, entre otros.

Aguas es el servicio que INTERASEO presta en el municipio de Ciénaga, Magdalena, desde el año 2001, atendiendo más de 125 mil metros lineales de tuberías. Por su parte, en energía, INTERASEO se logra la generación de energía a través del biogás de la basura en los rellenos sanitarios de Cerro Patacón en Ciudad de Panamá y hace poco se puso en funcionamiento en San Andrés, la Planta de Residuos Sólidos Urbanos que autogenera un 80% de la energía que requiere para incinerar residuos que permiten darle mayor vida útil al relleno sanitario.



6. MARCO METODOLÓGICO

6.1. LÍNEA Y SULÍNEA DE INVESTIGACIÓN

La línea de investigación de la facultad corresponde a sostenibilidad y gestión ambiental y la sublínea de investigación tratamiento de aguas residuales.

6.2. TIPO DE INVESTIGACIÓN

Este estudio fue explicativo. La investigación explicativa se encarga de buscar el porqué de los hechos mediante el establecimiento de relaciones causa-efecto. En este sentido, los estudios explicativos pueden ocuparse tanto de la determinación de las causas (investigación post facto), como de los efectos (investigación experimental), mediante la prueba de hipótesis. Sus resultados y conclusiones constituyen el nivel más profundo de conocimientos (Arias, 2006).

6.3. NIVEL DE INVESTIGACIÓN

El nivel de esta investigación fue experimental, este nivel de investigación es un proceso que consiste en someter a un objeto o grupo de individuos, a determinadas condiciones, estímulos o tratamiento (variable independiente), para observar los efectos o reacciones que se producen (variable dependiente). (Arias, 2006).

6.4. POBLACIÓN DE ESTUDIO

La población correspondió a los lixiviados del relleno sanitarios los corazones ubicado en Valledupar, Cesar.

6.5. MUESTREO POBLACIONAL

Las muestras fueron tomadas en la salida de los lixiviados del relleno sanitario, y también a la salida del foto reactor para cada uno de los parámetros de estudio.

6.6. DESARROLLO METODOLÓGICO

A continuación, se presentan las fases y actividades que permitieron el cumplimiento de los objetivos específicos trazados en este proceso investigativo.

6.6.1. Fase 1. Caracterizar la concentración de la DQO y DBO en los lixiviados del relleno sanitario

Actividad 1.1. Caracterización de los lixiviados

Descripción: La toma de muestras de lixiviados fue puntual y se realizó por medio de la metodología para la toma de muestra de aguas residuales establecida por el IDEAM. A continuación, se detallan los puntos más importantes para la toma de muestras:

Los recipientes fueron de plásticos y estuvieron previamente lavado con agua destilada. Asimismo, rotulados para evitar confusiones.

Una vez en el sitio de muestreo se colocó un balde (previamente purgado con agua destilada) debajo de la descarga y se retiró una vez tuviera un volumen considerable, luego con mucho cuidado se debió verter el agua del balde al recipiente de un litro.

Se colocaron las botellas en posición vertical dentro de la nevera y se agregó hielo suficiente para refrigerar.

Las muestras de agua, fueron transportadas el mismo día hasta las instalaciones de los laboratorios.

Los parámetros de estudio se describen en la siguiente tabla:

Tabla 5. Parámetros fisicoquímicos y metales

Parámetros	Unidad	Método
DBO ₅	mg O ₂ /L	mg O ₂ /L Reflujo cerrado SM 5220 D
DQO	mg O ₂ /L	mg O ₂ /L Incubación 5 días SM 5210 B

Fuente: IDEAM, 2015.

Una vez caracterizados se procedió a comparar los valores con las concentraciones permitidas en la resolución 0631 del 2015.

6.6.2. Fase 2. Aplicar el tratamiento de fotocátalisis heterogénea utilizando dióxido de titanio (TiO_2), peróxido de hidrogeno (H_2O_2), sulfato ferroso (FeSO_4).

Actividad 2.1. Activación de los impulsores

Descripción: se debió adquirir el TiO_2 , (H_2O_2) y (FeSO_4), luego se procedió a realizar un tamizaje utilizando los tamices No. 230, 270, 325 y 400; este proceso se realizó para separar las partículas de TiO_2 que se encuentran cargadas con la humedad del ambiente, para posteriormente proceder con la activación de este para lo cual se necesitó una mufla la cual se encuentra en el laboratorio Cristal Violeta.

Para activar los impulsores ya mencionados se introdujo un crisol a la mufla a una temperatura previamente ajustada de $400\text{ }^\circ\text{C}$, se cerró la mufla y se esperó un tiempo de 45 minutos a que ésta llegue a la temperatura deseada, pasado este tiempo se contó cuatro horas para otorgarle estabilidad mecánica, mejorar la porosidad y la actividad catalítica de las partículas de los impulsores (Candal, et al., 2001), se desconectó el equipo para que se enfríe el interior y se pasó este recipiente a un desecador donde estuvo hermético hasta cuando fue utilizado.

Actividad 2.2. Diseño, construcción y operación del fotoreactor

Descripción: para este diseño se siguió el criterio de (Alarcón y Peñafiel, 2014) quienes proponen un fotoreactor que cuenta con un agitador magnético en la parte inferior, sobre el cual se colocó un reactor batch que es un recipiente plástico de 300 mL, una lámpara de luz UV fija y tres lámparas de luz UV BLB cada una de las cuales proveen una cantidad de 0.6 W de luz con una longitud de onda de 375 nm. En la Figura 3 se presenta el diagrama del reactor batch con el equipo de luz UV integrado usado para la fotocátalisis en suspensión.

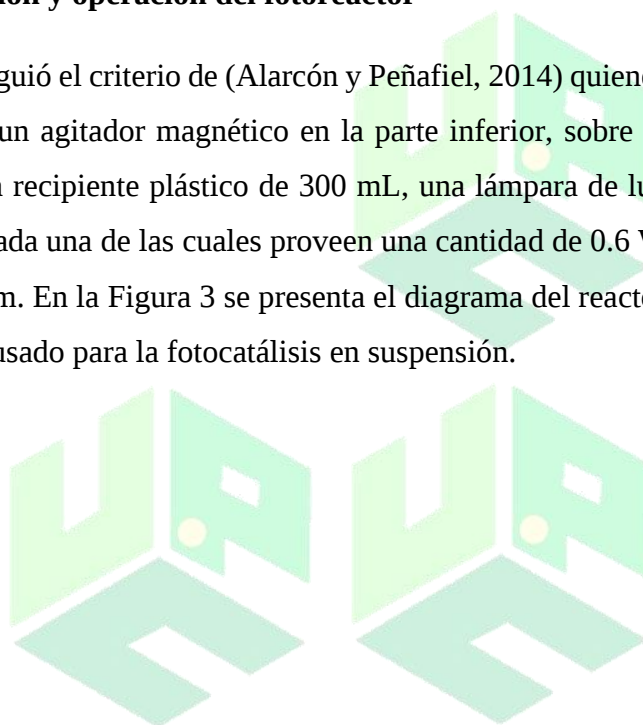
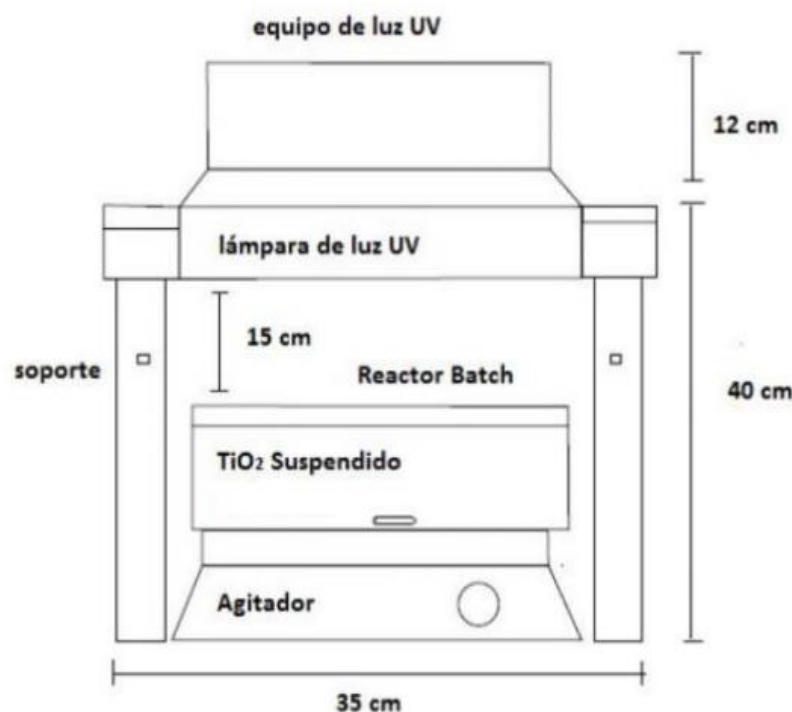


Figura 3. Diagrama del reactor batch con equipo de luz UV integrado usado para la fotocátalisis en suspensión.



Fuente: (Alarcón y Peñafiel, 2014).

De acuerdo con el mismo autor del párrafo anterior, el proceso de degradación del lixiviado por fotocátalisis en suspensión se realizó colocando 0.3 g de cada impulsor en 300 mL de muestra, se fijó el valor de pH al cual se trabajó (pH 8), luego se expuso la solución a luz UV durante un periodo de dos horas y se tomaron muestras. Todo esto se repitió durante una semana para obtener un total de cinco muestras.

6.6.3. Fase 3. Determinar la eficiencia final de DQO y DBO en los lixiviados a través del tratamiento empleado.

Actividad 3.1. Caracterizar del efluente del fotoreactor

Descripción: se repitieron los pasos de la etapa 1 actividad 1.1. y una vez caracterizados se procedió a comparar los valores con las concentraciones permitidas en la resolución 0631 del 2015.

Actividad 3.2. Cálculo de la eficiencia del tratamiento

Descripción: la determinación de la eficiencia se realizó estudiando los resultados de la caracterización al afluente y efluente del sistema a partir de los parámetros establecidos (DBO y DQO), estos se aplicaron a la fórmula clásica para determinar la eficiencia de un sistema de tratamiento:

$$E = ((S_0 - S)) / S_0 * 100$$

Dónde:

E: Eficiencia de remoción del sistema, o de uno de sus componentes (%)

S: Carga contaminante de salida.

S₀: Carga contaminante de entrada



7. ANÁLISIS DE RESULTADOS

7.1. Concentración de la DQO y DBO en los lixiviados del relleno sanitario

La toma de muestra se realizó el 12 de junio del 2022, fue una muestra puntual, para este caso se solicitó ante la entidad un permiso para realizar dicho procedimiento (Ver anexo 1). Previo a la llegada al lugar se lavó el balde con agua destilada y se ubicó debajo de la descarga del lixiviado con el fin de tomar la muestra. Luego de esto, del balde, en donde ya estaba la muestra, se pasó el líquido a los recipientes suministrados por el laboratorio, los cuales ya se encontraban lavados y rotulados con los parámetros de estudio, es decir DBO Y DQO. A continuación, se muestra dicho procedimiento.

Figura 4. Toma de muestra de lixiviados.



Fuente: autores, 2022.

Una vez caracterizados se procedió a comparar los valores con las concentraciones permitidas en la resolución 0631 del 2015.

Tabla 6. Resultados de la caracterización de lixiviados.

Parámetro	Resultados	Normatividad 0631 del 2015
DBO5 (mg O ₂ /L)	7835	800,00
DQO (mg O ₂ /L)	5224	2000,00

Fuente: autores, 2022.

Como se puede observar los dos parámetros de estudio se encuentran por fuera de la normatividad 0631 del 2015, por lo cual se infiere un grave impacto ambiental producto de las descargas realizadas por el relleno sanitario. La relación entre la demanda biológica de oxígeno en cinco días y la demanda química de oxígeno (DBO5/DQO), indicará el grado de biodegradabilidad del lixiviado, en este caso de estudio la relación tuvo un valor de 1,5 por lo tanto el grado de biodegradabilidad es alto ya que $DBO5/DQO > 0,4$. Este lixiviado se caracteriza por la presencia de ácidos grasos volátiles, alcoholes, amonio y altos niveles de iones inorgánicos con bajo pH (Nader, 2003).

7.2. Aplicación del tratamiento de fotocátalisis heterogénea utilizando dióxido de titanio (TiO₂), peróxido de hidrogeno (H₂O₂), sulfato ferroso (FeSO₄)

Lo primero que se realizó fue la compra de los impulsores, es decir el dióxido de titanio (TiO₂), peróxido de hidrogeno (H₂O₂), sulfato ferroso (FeSO₄), dicha compra se realizó en el almacén “Doquímica de la costa LTDA” ubicado en la ciudad de Barranquilla, en el anexo 2 de este documento se adjunta la factura de la compra como evidencia. Una vez se contaba con esos químicos se procedió a tamizar el TiO₂ y FeSO₄ por los tamices No. 230, 270, 325 y 400 como se muestra en la siguiente figura.

Figura 5. Tamizaje de los impulsores.



Fuente: autores, 2022.

El anterior procedimiento se realizó con el fin de separar aquellas partículas que se encuentran cargadas con la humedad del ambiente. Luego se procedió a pesar cada uno de los químicos como se muestra en las siguientes figuras.

Figura 6. Pesaje de los impulsores.



Fuente: autores, 2022.

Para la activación de los impulsores nos trasladamos hasta el laboratorio Cristal violeta y utilizando sus instalaciones se introdujo un crisol a la mufla a una temperatura previamente ajustada de 400 °C. (Ver figura).

Figura 7. Activación de los impulsores en la mufla.

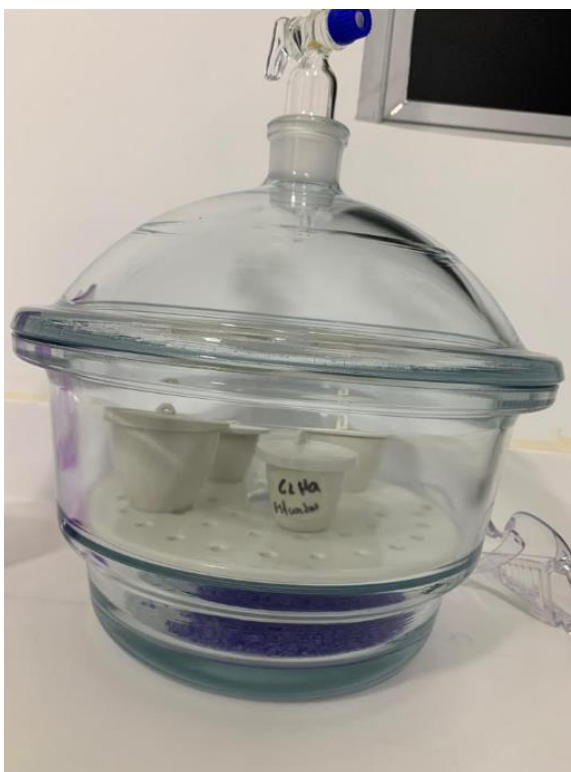


Fuente: autores, 2022.

Se cerró la mufla y se esperó un tiempo de 45 minutos a que ésta llegue a la temperatura deseada, pasado este tiempo se contó cuatro horas para otorgarle estabilidad mecánica, mejorar

la porosidad y la actividad catalítica de las partículas de los impulsores. Una vez terminó el tiempo se procedió a introducir la muestra en un desecador con el fin de evitar la absorción de humedad del ambiente. (Ver figura).

Figura 8. Desecador con la muestra.



Fuente: autores, 2022.

Una vez se tuvieron entonces los impulsores activados permanecieron en este desecador y se procedió con la construcción del fotoreactor. En este caso se realizó dicho montaje en las instalaciones del laboratorio Cristal violeta, a continuación, se muestra cada uno de los equipos y materiales utilizados.

Se presenta el agitador magnético utilizado, así como el reactor batch que es el recipiente plástico de 300 ml.

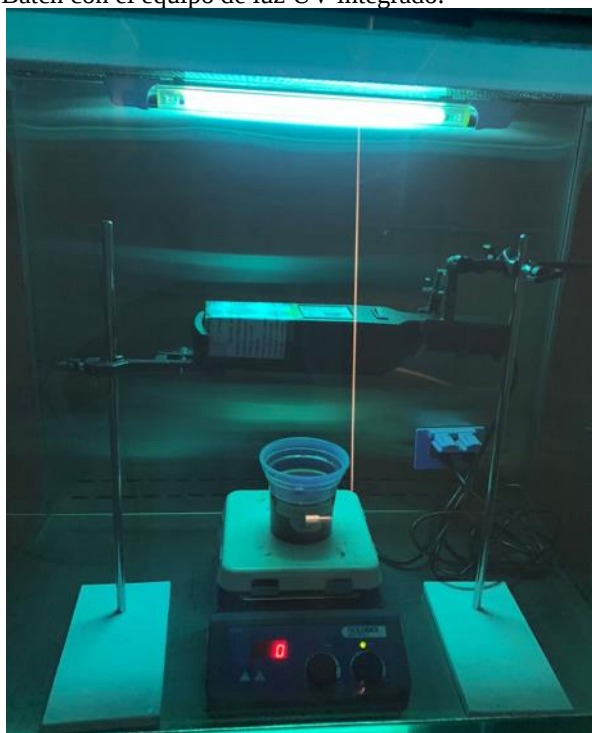
Figura 9. Agitador magnético y reactor Batch.



Fuente: autores, 2022.

Luego se procede con la instalación de una lámpara de luz UV fija y tres lámparas de luz UV BLB cada una de las cuales proveen una cantidad de 0.6 W de luz con una longitud de onda de 375 nm. En las siguientes figuras se presenta se presenta el diagrama del reactor batch con el equipo de luz UV integrado usado para la fotocatalisis en suspensión.

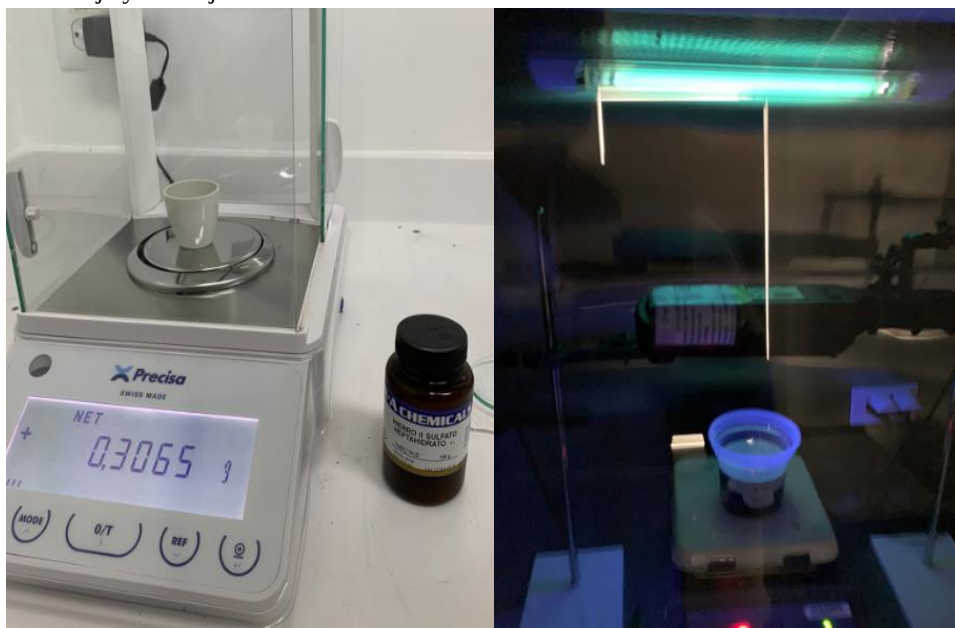
Figura 10. Reactor Batch con el equipo de luz UV integrado.



Fuente: autores, 2022.

Luego de esto se pesaron 0,3 gramos de cada impulsador en 300 mL de muestra, se fijó el valor de pH al cual se trabajará (pH 8), y se expuso la solución a luz UV durante un periodo de dos horas y se tomaron las muestras. Todo esto se repite durante una semana para obtener un total de cinco muestras.

Figura 11. Pesaje y montaje en funcionamiento.



Fuente: autores, 2022.

7.3. Eficiencia final de DQO y DBO en los lixiviados a través del tratamiento empleado.

Tabla 7. Concentración final de fotocátalisis con el sulfato ferroso.

Sulfato ferroso (FeSO ₄)			
Parámetro	Resultados	Normatividad 0631 del 2015	Cumplimiento
DBO ₅ (mg O ₂ /L)	1255	800,00	No
DQO (mg O ₂ /L)	2503	2000,00	No
DBO ₅ (mg O ₂ /L)	1240	800,00	No
DQO (mg O ₂ /L)	2458	2000,00	No

Sulfato ferroso (FeSO₄)

Parámetro	Resultados	Normatividad 0631 del 2015	Cumplimiento
DBO5 (mg O ₂ /L)	1242	800,00	No
DQO (mg O ₂ /L)	2472	2000,00	No
DBO5 (mg O ₂ /L)	1206	800,00	No
DQO (mg O ₂ /L)	2443	2000,00	No
DBO5 (mg O ₂ /L)	1245	800,00	No
DQO (mg O ₂ /L)	2501	2000,00	No

Fuente: autores, 2022.

De acuerdo con la tabla 3, se observa que ninguna de las muestras de lixiviados tomadas después de aplicar el tratamiento de fotocátalisis, en este caso con sulfato ferroso, cumplen con la normatividad 0631 del 2015. Aunque cabe señalar que sí se observa una reducción considerable respecto a la concentración inicial del lixiviado.

Tabla 8. Concentración final de fotocátalisis con el dióxido de titanio.

Dióxido de titanio (TiO ₂)			
Parámetro	Resultados	Normatividad 0631 del 2015	Cumplimiento
DBO5 (mg O ₂ /L)	1233	800,00	No
DQO (mg O ₂ /L)	2443	2000,00	No
DBO5 (mg O ₂ /L)	1225	800,00	No
DQO (mg O ₂ /L)	2435	2000,00	No
DBO5 (mg O ₂ /L)	1224	800,00	No

Dióxido de titanio (TiO₂)

Parámetro	Resultados	Normatividad 0631 del 2015	Cumplimiento
DQO (mg O ₂ /L)	2375	2000,00	No
DBO ₅ (mg O ₂ /L)	1217	800,00	No
DQO (mg O ₂ /L)	2325	2000,00	No
DBO ₅ (mg O ₂ /L)	1129	800,00	No
DQO (mg O ₂ /L)	2431	2000,00	No

Fuente: autores, 2022.

De acuerdo con la tabla 4, se observa que ninguna de las muestras de lixiviados tomadas después de aplicar el tratamiento de fotocátalisis, en este caso con dióxido de titanio, cumplen con la normatividad 0631 del 2015. Aunque cabe señalar que sí se observa una reducción considerable respecto a la concentración inicial del lixiviado.

Tabla 9. Concentración de fotocátalisis con el peróxido de hidrogeno.

Peróxido de hidrogeno (H₂O₂)

Parámetro	Resultados	Normatividad 0631 del 2015	Cumplimiento
DBO ₅ (mg O ₂ /L)	1220	800,00	No
DQO (mg O ₂ /L)	2413	2000,00	No
DBO ₅ (mg O ₂ /L)	1214	800,00	No
DQO (mg O ₂ /L)	2338	2000,00	No
DBO ₅ (mg O ₂ /L)	1209	800,00	No
DQO (mg O ₂ /L)	2307	2000,00	No

Peróxido de hidrogeno (H₂O₂)

Parámetro	Resultados	Normatividad 0631 del 2015	Cumplimiento
DBO5 (mg O ₂ /L)	1195	800,00	No
DQO (mg O ₂ /L)	2302	2000,00	No
DBO5 (mg O ₂ /L)	1102	800,00	No
DQO (mg O ₂ /L)	2283	2000,00	No

Fuente: autores, 2022.

De acuerdo con la tabla 5, se observa que ninguna de las muestras de lixiviados tomadas después de aplicar el tratamiento de fotocátalisis, en este caso con peróxido de hidrogeno, cumplen con la normatividad 0631 del 2015. Aunque cabe señalar que sí se observa una reducción considerable respecto a la concentración inicial del lixiviado.

A continuación, se presenta el cálculo de la eficiencia del tratamiento para cada uno de los impulsores.

Tabla 10. Eficiencia de los impulsores para remover DBO5.

DBO5				
Toma de Muestras	C. Inicial	Eficiencia	Eficiencia	Eficiencia
		Sulfato ferroso	Dióxido de titanio	Peróxido de hidrogeno
Día 1	7835	83,98%	84,26%	84,43%
Día 2	7835	84,17%	84,37%	84,51%
Día 3	7835	84,15%	84,38%	84,57%
Día 4	7835	84,61%	84,47%	84,75%
Día 5	7835	84,11%	85,59%	85,93%
Promedio		84,20%	84,61%	84,84%

Fuente: autores, 2022.

Como se puede observar en la anterior tabla para el caso del DBO5 el dióxido de titanio y el peróxido de hidrogeno tienen una eficiencia del 84,61% y 84,84% promedio respectivamente, siendo las mayores de los tres tratamientos, en cambio el sulfato ferroso presenta un valor de 84,20%. Aunque la eficiencia tiene una diferencia mínima se podría decir que los tratamientos en general son eficientes, sin embargo, la concentración no cumple con los límites máximos permisibles de la normatividad ambiental 0631 del 2015.

Tabla 11. Eficiencia de los impulsores para remover DQO.

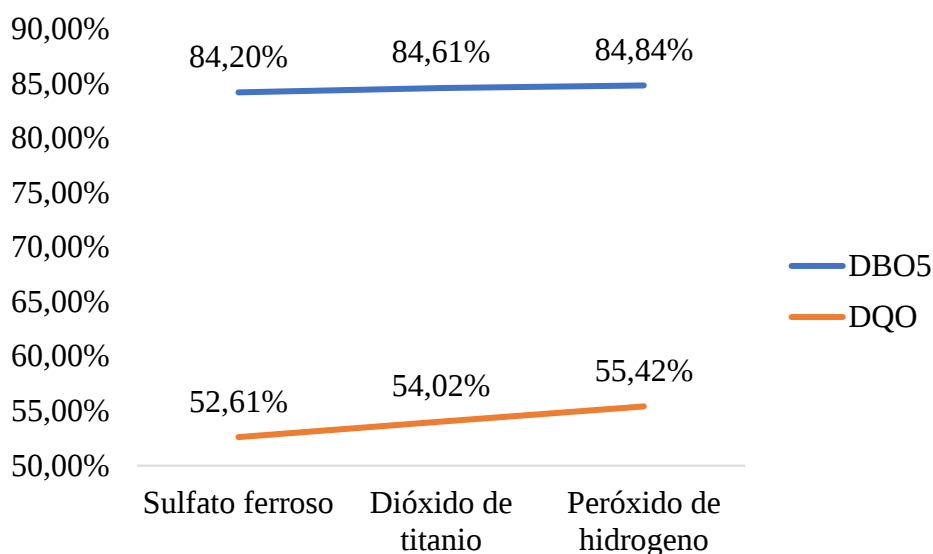
DQO				
Toma de Muestras	C. Inicial	Eficiencia	Eficiencia	Eficiencia
		Sulfato ferroso	Dióxido de titanio	Peróxido de hidrogeno
Día 1	5224	52,09%	53,24%	53,81%
Día 2	5224	52,95%	53,39%	55,25%
Día 3	5224	52,68%	54,54%	55,84%
Día 4	5224	53,24%	55,49%	55,93%
Día 5	5224	52,12%	53,46%	56,30%
Promedio		52,61%	54,02%	55,42%

Fuente: autores, 2022.

Para el caso de la DQO, la mayor eficiencia se obtuvo con el peróxido de hidrogeno con un valor del 55,42%, la diferencia entre cada uno de los impulsores fue mínima siendo el sulfato ferroso con 52,61% y el dióxido de titanio de 54,02%. Aunque la eficiencia tiene una diferencia de una décima se podría decir que los tratamientos en general son eficientes, sin embargo, la concentración no se encuentra dentro de la normatividad ambiental 0631 del 2015.

Además, para este caso se trabajó con el promedio de los resultados de cada impulsor con el fin de tener una eficiencia global o general (Ver figura).

Figura 12. Eficiencia global de los impulsores para DBO5 Y DQO.



Fuente: autores, 2022.

Como se puede observar en la figura anterior, para el caso de la DBO5, el dióxido de titanio y el peróxido de hidrogeno tuvieron las mayores eficiencias con el 84,84%, lo cual se diferencia con el estudio realizado por Ortiz (2018), en el cual los resultados experimentales indican que el tratamiento por fotocátalisis en suspensión tuvo una eficiencia del 55% para DBO5.

Para el caso del DQO, la mayor eficiencia de remoción se obtuvo con el peróxido de hidrogeno con el 55,42%, estos valores son similares con el estudio realizado por Jia et al., (2010), en donde se encontró un porcentaje de remoción de más del 60% de DQO en una muestra de lixiviado con una concentración de 2 g/L de TiO_2 . En el estudio de Ortiz (2018), en una muestra de lixiviado de 100 mL con 1 g/L de TiO_2 , se alcanzó un porcentaje de remoción de 62.5%. También se diferencia del estudio de Buzón y Ponce (2014), en el cual el mayor porcentaje de remoción de DQO se obtuvo con el proceso de Fotocátalisis Heterogénea donde se empleó el Dióxido de Titanio con una concentración de 0.05 gr/L, removiendo un 94%.

Finalmente, en este estudio el sulfato ferroso tuvo una remoción del 52,61% para la DQO lo que se diferencia con el estudio de Buzón y Ponce (2014), en el cual se puede observar que el sulfato ferroso a concentración de 1500 mg/L tuvo un mayor porcentaje de remoción de DQO (23%) en el lixiviado tratado.

7. Conclusiones

En cuanto a las concentraciones iniciales de la DBO (7835 mg O₂/L) y DBO (5224 mg O₂/) en los lixiviados del relleno sanitario. los dos parámetros de estudio se encuentran por fuera de la normatividad 0631 del 2015, por lo cual se infiere un grave impacto ambiental producto de las descargas realizadas por el relleno sanitario. La relación entre la demanda biológica de oxígeno en cinco días y la demanda química de oxígeno (DBO₅/DQO), tuvo un valor de 1,5 por lo tanto el grado de biodegradabilidad es alto ya que $DBO_5/DQO > 0,4$. Este lixiviado se caracteriza por la presencia de ácidos grasos volátiles, alcoholes, amonio y altos niveles de iones inorgánicos con bajo pH.

En cuanto a la aplicación del tratamiento de fotocátalisis heterogénea, lo primero que se realizó fue el tamizaje de los impulsores sulfato ferroso (FeSO₄) y dióxido de titanio (TiO₂), luego se realizó el pesaje y la activación haciendo uso de una mufla calibrada a una temperatura de 400°C en donde permanecieron estos químicos durante cuatro horas. Luego se instaló el reactor batch que es un recipiente de 300 ml y se procedió con el montaje del sistema de iluminación el cual consta de una lámpara de luz UV fija y tres lámparas de luz UV BLB cada una de las cuales proveen una cantidad de 0.6 W de luz con una longitud de onda de 375 nm.

En cuanto a la concentración final, ninguna de las muestras de lixiviados tomadas después de aplicar el tratamiento de fotocátalisis con sulfato ferroso, Peróxido de hidrogeno (H₂O₂) y dióxido de titanio (TiO₂) cumplen con la normatividad 0631 del 2015. Aunque cabe señalar que sí se observa una reducción considerable respecto a la concentración inicial del lixiviado.

Para el caso de la eficiencia de la DBO₅, el dióxido de titanio y el peróxido de hidrogeno tienen una eficiencia del 84,61% y 84,84% respectivamente, siendo las mayores de los tres tratamientos, en cambio el sulfato ferroso presenta un valor de 84,20%. Aunque la eficiencia tiene una diferencia mínima y se podría decir que los tratamientos en general son eficientes. Para el caso de la DQO, la mayor eficiencia se obtuvo con el peróxido de hidrogeno con un valor del 55,42%, la diferencia entre cada uno de los impulsores fue de una décima siendo el sulfato ferroso con 52,61% y el dióxido de titanio de 54,02%.

8. Recomendaciones

Seguir realizando investigaciones con otros precursores con el fin de evaluar su eficiencia.

Complementar este método con otra alternativa de tratamiento con el fin de ver si de esta manera se cumple con la eficiencia o concentración exigida por la resolución 0631 del 2015.

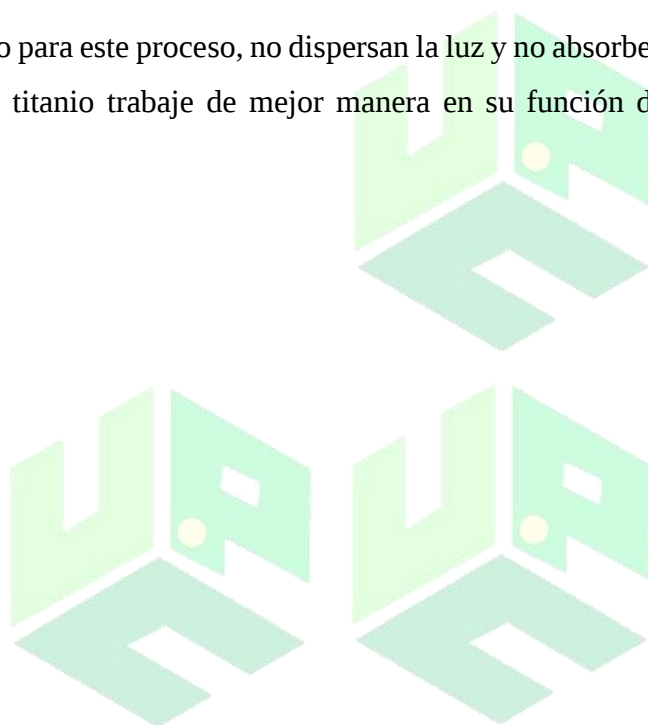
Evaluar otros parámetros fisicoquímicos y microbiológicos con el fin de tener un panorama más completo sobre esta alternativa de tratamiento.

Cuando se trabaje con una fuente de luz artificial, se recomienda que antes de iniciar el recorrido en el proceso se conecte a un interruptor para que las lámparas adquieran una temperatura uniforme en el reactor.

Para futuros estudios se recomienda experimentar con fotocátalisis fijada por más tiempo y/o con mayores cantidades de los impulsores según lo que se requiera.

Realizar el análisis complementario de carbono orgánico total (TOC); como indicador de mineralización de los contaminantes con el proceso Foto-Fenton.

Se recomienda usar tubos de cuarzo para este proceso, no dispersan la luz y no absorben la radiación, permiten que el dióxido de titanio trabaje de mejor manera en su función de catalizador.



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Arias, C., & Brix, H. (2003). artificiales para el tratamiento de aguas residuales Abstract, 17–24.
- Alarcón, C. & Peñafiel, R. (2014). Tratamiento de Aguas residuales provenientes de la fase de teñido de la curtiembre mediante un sistema físico químico basado en la oxidación avanzada con la ayuda del semiconductor TiO_2 en presencia de luz UV (Tesis de pregrado). Universidad San Francisco de Quito, Quito, Ecuador
- Buzón, K y Ponce, A. (2014). Comparación de la aplicación de dos procesos de oxidación avanzada: fotofenton y fotocátalisis heterogénea en la remoción de DQO de lixiviado maduro del relleno sanitario el henequén. (Tesis de pregrado). Universidad de la Costa. Barranquilla, Colombia.
- Borges, M.; Sierra, M.; Cuevas, E.; García, R. & Esparza, P. (2016). Photocatalysis with solar energy: Sunlight-responsive photocatalyst based on TiO_2 loaded on a natural material for wastewater treatment. *Solar Energy*, 135, 527–535.
- Carriazo J., Bossa, L y Castrillo, E. (2012). Actividad catalítica de metales de transición en la descomposición de peróxido de hidrógeno», *Quim Nova*, vol. 35, n.o 6, pp. 1101-1106, 2012.
- Cerda, I. (2007). Aplicación de foto-fenton a lixiviados de rellenos sanitarios. (Tesis de pregrado). Universidad Nacional Autónoma de México.
- C. P. Colombia, «Congreso de Colombia», Bogotá Colomb., 1991.
- Domènech, X., W Jardim, M Litter. (2001). Procesos Avanzados de Oxidación para la eliminación de contaminantes. En: Eliminación de contaminantes por Fotocátalisis Heterogénea, (M. Blesa, Ed.). Pp. 3-25. Red CYTED VIII-G, Buenos Aires, Argentina.
- Giraldo, A & Marroquín, V. (2014). Síntesis y refinamiento de la estructura de dióxido de titanio dopada con cromo ($\text{Ti}_{1-x}\text{Cr}_x\text{O}_2$). Trabajo de grado: Química Industrial. Universidad Tecnológica de Pereira.

- Giraldo, D. (2016). eficiencia del proceso de fotocátalisis heterogénea con TiO_2 y H_2O_2 en la reducción de DBO5 Y DQO de los lixiviados del botadero la mejorada el tambo Huancayo. (Tesis de pregrado).
- Gómez, L., 2000. Fotooxidación de ertidos químicos: Revisión de experiencias de procesos de oxidación avanzada. Ingeniería Química, Issue 371, pp. 211 - 216.
- Hassan, M.; Zhao, Y. & Xie, B. (2016). Employing TiO_2 photocatalysis to deal with landfill leachate: Current status and development. Chemical Engineering Journal, 285, 264–275.
- Hincapié, M. & Sapúveda, J., 2002. la fotocátalisis en el tratamiento de aguas contaminadas. Revista de la ingeneiría, Issue 602, pp. 83 - 91.
- Jaramillo, J. (2002). Guía para el diseño, construcción y operación de rellenos sanitarios manuales», Colomb. Cent. Panam. Ing. Sanit. Cienc. Ambiente Opscepis,
- Jiménez, A. C. (2014). Procesos de oxidación avanzada aplicados en el tratamiento de aguas de la industria del petróleo. Colombia: Especialización en Recursos Hidráulicos y Medio Ambiente. p. 12.
- Jia, C., et.al. (2010). UV- TiO_2 Photocatalytic Degradation of Landfill Leachate. Water, Air, & Soil Pollution, 217(1-4), 375–385.
- Litter, M. I. y otros, 2010. Experiencias de remoción de arsénico por tecnologías fotoquímicas y solares en argentino. En: m. Litter, a. M. Sancha & a. M. Ingallinella, edits. Tecnologías económicas para el abatimiento de arsenico en aguas. Buenos aires: CYTED, pp. 191-208.
- LI, X.Z & F.B, 2011. Study of Au/Au^{3+} - TiO_2 photocatalysis toward visible Photooxidation for water and wasterwater treatment.. Environmental Science & Technology, Issue 35, pp. 2381 - 2387.
- Morgada, M. E. & Litter, M. I., 2010. Tecnologías fotoquímicas y solares para la remoción de Arsénico de soluciones acuosas.. En: M. LITTER , A. M. SANCHA &

INGALLINELLA, edits. TECNOLOGIAS ECONOMICAS PARA EL ABATIMIENTO DE ARSENICO EN AGUAS. s.l.:CYTED, pp. 73- 85.

Nader, M. (2003). Investigación relativa a la minimización de lixiviados en vertederos y su depuración. (Tesis de pregrado). Universidad Politécnica de Madrid.

Ortiz, P. (2018). Tratamiento de los lixiviados del relleno sanitario El Inga mediante fotocátalisis con dióxido de titanio (TiO₂) en presencia de luz UV. (Tesis de pregrado). Universidad San Francisco de Quito.

Otero, T. (2012). Determinación de la eficiencia de remoción de la demanda química de oxígeno del lixiviado maduro del relleno el henequén tratado con oxidación avanzada foto-fenton. (Tesis de pregrado). Corporación Universitaria de la Costa.

Primo, O. (2008). Mejoras en el tratamiento de lixiviados de vertedero de RSU mediante procesos de oxidación avanzada. Tesis de doctorado. Universidad de Cantabria, España.

REGLAMENTO TÉCNICO DEL SECTOR DE AGUA POTABLE Y SANEAMIENTO
BASICO RAS-2000

Rodríguez, M., 2002. La fotocátalisis en el tratamiento de aguas contaminadas. Revista de Ingeniería Universidad de Medellín, Issue 602, pp. 83-91.

Resolución 0631. (2015). Por la cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones. Artículo 14. Servicios y otras actividades. Tratamiento y disposición de residuos sólidos. p. 13-14.

Torres, P., Barba, L., Ojeda, C., Martínez, J & Castaño, Y. (2014). Influencia de la edad de lixiviados sobre su composición fisicoquímica y su potencial de toxicidad. Artículo Científico. p. 247-250.

Zamorano, M., Garrido, E., Moreno, B., Paolini A & Ramos, A. (2006). Description of the methodology EVIAVE for the environmental diagnosis of municipal waste landfills. J Sustain Dev and Plan 2006. p.1

Anexo 1. Evidencias del permiso para toma de muestra



Anexo 2. Evidencia de la compra de químicos



DOQUIMICA DE LA COSTA LIMITADA
NIT 890.111.930-0



Kra 38 No 79B-67 LOCAL 102
(605) 3601169 - 3526761
Barranquilla - Colombia
doquim@meinetel.net.co

Factura electrónica de venta

N°: FVE-1259

Cliente: DANIEL ALEJANDRO LEON ARCIA
Nit: 1.100.251.260-9
Teléfono: (605) 3012661354
Dirección: DIAGONAL 18E NO 30-66 BARRIO SABANA DEL VALLE
Ciudad: Valledupar - Colombia
Correo: danielaleon@unicesar.edu.co

Fecha y hora Factura

Generación	18/05/2022, 07:30
Expedición	25/05/2022, 07:30
Vencimiento	18/05/2022
Vendedor	DOQUIMICA DE LA
Centro de costo	0
Cotización	

Item	Código	Descripción	Cantidad	V. Unitario	Imp. Cargo	Imp. Ret.	V. Total
1	CHN338732	TITANIO IV OXIDO X 100 GMS	1.00	35.000.00	19 %	0 %	45.220.00
2	CHN302884	HIERRO II SULFATO 7 HIDR. X 100 GMS	1.00	35.050.00	19 %	0 %	45.279.50

Total items: 2

Valor en Letras:
 Noventa mil cuatrocientos noventa y nueve pesos m/cte con cincuenta cent.

Condiciones de Pago:
 Crédito - Cuota No. 001 vence el 2022-05-18 por \$ 90.499.50

Observaciones:
 Favor consignar en la cuenta corriente No. 151073368 Banco de Bogotá
 Favor consignar en la cuenta corriente No. 8010352706 Bancoomeva
 Favor consignar en la cuenta Ahorro No. 434-000018-68 Bancolombia
 Favor consignar en la cuenta Ahorro No. 027600070943 Banco Davivienda

Orden de Compra No.

A esta factura de venta aplican las normas relativas a la letra de cambio [artículo 5 Ley 1231 de 2008]. Con esta el Comprador declara haber recibido real y materialmente las mercancías o prestación de servicios descritos en este título - Valor. **Número Autorización 18764016884330 aprobado en 20210824 prefijo FVE desde el número 1 al 4000 Vigencia: 12 Meses**

Responsable de IVA - Actividad Económica 4664 Comercio al por mayor de productos químicos básicos, cauchos y plásticos en formas primarias y productos químicos de uso agropecuario Tarifa 5.4

CUFE:

Elaborado por _____

Firma recibido _____

Evidencia de las actividades de laboratorio







Bogotá D.C., 25 de junio de 2022

Señores:

COMERCIALIZADORA Y LABORATORIO CRISTIAM GRAM BOGOTA S.A.S

Att: LAIDETH ESTRADA BRITO

La Ciudad.

Asunto: Entrega Informe de Resultados de Análisis R-193776

Cordial Saludo.

Atendiendo la solicitud de análisis enviada por ustedes, hago entrega del informe de resultados de análisis correspondiente a las muestras:

Nº Muestra	Código Interno	Identificación Cliente
1	MI296193	DL-080622001
2	MI296194	DL-080622002
3	MI296195	DL-080622003

Cualquier solicitud de aclaración del presente reporte, así como sugerencias, quejas y/o reclamaciones por favor comunicarnos a coordinación calidad comunicándose al teléfono 6702853 o al correo electrónico calidad@chemilab.com.co.

Agradezco su atención.

Atentamente.



JOHANA PORTILLO GARCIA
Profesional de Reportes

