

**ANÁLISIS SOBRE EL USO DE LOS TRATAMIENTOS FOTOCATALÍTICOS COMO
MÉTODOS PARA LA REMOCIÓN DE CONTAMINANTES EN LOS LIXIVIADOS DE
LOS RELLENOS SANITARIOS**



**JAIRO ALBERTO VILLAMIZAR GELVEZ
CÓDIGO 1090436515**

**UNIVERSIDAD NACIONAL ABIERTA Y A DISTANCIA UNAD
FACULTAD DE CIENCIAS AGRICOLAS, PECUARIAS Y DEL MEDIO AMBIENTE
INGENIERÍA AMBIENTAL
BUCARAMANGA
2019**

**ANÁLISIS SOBRE EL USO DE LOS TRATAMIENTOS FOTOCATALÍTICOS COMO
MÉTODOS PARA LA REMOCIÓN DE CONTAMINANTES EN LOS LIXIVIADOS DE
LOS RELLENOS SANITARIOS**



**JAIRO ALBERTO VILLAMIZAR GELVEZ
CÓDIGO 1090436515**

**Monografía de grado presentada como requisito para optar al título de Ingeniero
Ambiental**

**DIRECTORA
MARIA FERNANDA DOMINGUEZ AMOROCHO
Ingeniera Ambiental, Esp. Gerencia de Proyectos
UNAD - CEAD Bucaramanga**

**UNIVERSIDAD NACIONAL ABIERTA Y A DISTANCIA UNAD
FACULTAD DE CIENCIAS AGRICOLAS, PECUARIAS Y DEL MEDIO AMBIENTE
INGENIERÍA AMBIENTAL
BUCARAMANGA
2019**

Nota de Aceptación

Presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del Jurado

17/07/2019

DEDICATORIA

En mi crecimiento académico, hace algunos años decidí iniciar mi proceso formativo como Ingeniero Ambiental, y hoy llego a ese peldaño final para obtener ese tan anhelado título, por ello quiero dedicar este gran logro en primer lugar a Dios, el cual es mi fuente de fortaleza para luchar contra las adversidades que la vida te pone. Seguidamente a mis padres Jairo y María del Rosario, los cuales me han dado la vida, su amor y apoyo incondicional, y se dedicaron en formarme bajo un sin número de principios éticos, enfocados siempre a la perseverancia y búsqueda del éxito. También a mi hermana Viviana Paola, con la cual he pasado momentos inolvidables, y es uno de los seres más importantes en mi vida. Por último, quiero dedicarle este logro a mi compañera de viaje Adriana Mendivelso, por su constante apoyo y cariño durante todo mi proceso formativo, te quiero mucho.

Jairo Alberto Villamizar Gelvez

AGRADECIMIENTOS

Manifiesto mi agradecimiento a las siguientes personas que han hecho parte de este proceso,

A la Ingeniera **María Fernanda Domínguez Amorocho**, en calidad de directora de esta monografía, por su fiel apoyo y comprensión en cada una de las etapas ejecutadas, y por brindar su experiencia y amplio conocimiento.

A mis **padres y hermana**, por darme ánimo para no desfallecer en los momentos de cansancio físico, y finalizar con éxito este proceso.

A mi hermosa **novia Adriana** por sus consejos y ayuda durante todo el proceso formativo, además de sus palabras de ánimo y ayuda a no desfallecer en la consecución de este logro.

A mis **compañeros de carrera**, los cuales fueron un apoyo muy grande en el trasegar de la vida universitaria.

A los **docentes de la Universidad Nacional Abierta y a Distancia sede Bucaramanga**, pertenecientes al programa de Ingeniería Ambiental, por su aporte a mi formación profesional.

Muchas gracias.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	12
2. JUSTIFICACIÓN	14
3. OBJETIVOS	15
3.1 OBJETIVO GENERAL	15
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	15
4. METODOLOGÍA PLANTEADA	16
5. RESULTADOS	17
5.1. DESCRIPCIÓN DE LAS GENERALIDADES DE LA PRODUCCIÓN DE LIXIVIADOS EN LOS RELLENOS SANITARIOS	17
5.1.1 Residuos sólidos.	17
5.1.2 Aspectos que intervienen en la producción de residuos sólidos.	17
5.1.3 Particularidades generales de los residuos sólidos.	18
5.1.3.1 Particularidades físicas.	18
5.1.3.2 Particularidades químicas.	19
5.1.3.3 Particularidades biológicas.	19
5.1.4 Clasificación de los residuos sólidos.	20
5.1.5 Producción de residuos sólidos a nivel mundial y Colombia.	21
5.1.5.1 Cantidad de residuos sólidos a nivel mundial.	21
5.1.5.2 Cantidad de residuos sólidos a nivel de Colombia.	22
5.1.5.3 Reciclaje de residuos sólidos en Colombia.	23
5.1.5.4 Composición de residuos sólidos en Colombia.	24
5.1.6 Fases de degradación en los residuos sólidos.	25
5.1.6.1 Fases físicas.	25
5.1.6.2 Fases Químicas.	25
5.1.6.3 Fases Biológicas.	25
5.1.6.4 Tiempo de degradación de ciertos residuos sólidos.	26
5.1.6.5 Cinco fases para la descomposición de los residuos sólidos.	27
5.1.7 Rellenos sanitarios.	29
5.1.8 Clasificación de rellenos sanitarios.	30
5.1.9 Ventajas y desventajas de un relleno sanitario.	30
5.1.9.1 Ventajas.	30
5.1.9.2 Desventajas.	31
5.1.10 Impactos ambientales de algunos rellenos sanitarios en Colombia.	32
5.1.10.1 Relleno sanitario Doña Juana.	32
5.1.10.2 Parque Industrial de residuos sólidos La Miel.	32

5.1.10.3 Relleno sanitario Parque Ambiental Loma de los Cocos.	32
5.1.10.4 Relleno sanitario El Carrasco.	32
5.1.11 Lixiviados.	33
5.1.12 Composición y clases de lixiviados.	33
5.1.12.1 Composición de los lixiviados.	33
5.1.12.2 Clases de Lixiviados.	34
5.1.13 Aspectos que intervienen en la producción de lixiviados.	37
5.1.14 Impactos de los lixiviados sobre los recursos naturales.	38
5.1.15 Parámetros a monitorear en un lixiviado.	40
5.2. INVESTIGACIÓN DEL ESTADO DEL ARTE DE LOS DIFERENTES TRATAMIENTOS FOTOCATALÍTICOS, UTILIZADOS PARA LA REMOCIÓN DE SUSTANCIAS CONTAMINANTES EN LOS LIXIVIADOS PRODUCIDOS POR LOS RELLENOS SANITARIOS	42
5.2.1 Procesos de oxidación avanzada.	42
5.2.1.1 Ventajas de los procesos de oxidación avanzada.	43
5.2.1.2 Desventajas de los procesos de oxidación avanzada.	43
5.2.2 Técnicas fotoquímicas.	43
5.2.2.1 Foto - Fenton.	44
5.2.2.2 Fotocatálisis heterogénea con Óxido de Titanio (TiO ₂).	45
5.2.2.3 UV con Peróxido de Hidrogeno (H ₂ O ₂).	46
5.2.3 Técnicas no fotoquímicas.	48
5.2.3.1 Oxidación electroquímica.	48
5.2.3.2 Radiólisis y tratamiento con haces de electrones.	49
5.2.3.3 Ozonización con peróxido de Hidrogeno (H ₂ O ₂).	49
5.3. ANÁLISIS DE LA VIABILIDAD INTEGRAL DE LA FOTOCATÁLISIS HETEROGÉNEA CON IMPLICACIÓN DE ÓXIDO DE TITANIO (TiO ₂) COMO CATALIZADOR Y RADIACIÓN UV PARA LA REMOCIÓN DE CARGA CONTAMINANTE EN LOS LIXIVIADOS	51
5.3.1 Viabilidad Técnica.	51
5.3.1.1 Preparación y caracterización del catalizador.	51
5.3.1.2 Mecanismos implicados en la fotocatálisis heterogénea	53
5.3.1.3 Parámetros que influyen en la fotocatálisis heterogénea.	54
5.3.1.4 Inmovilización del catalizador para la fotocatálisis.	55
5.3.1.5 Fuente de energía y reactores utilizados.	56
5.3.2 Viabilidad Ambiental.	58
5.3.2.1 Radiación solar.	59
5.3.2.2 Potencial de la radiación ultravioleta.	60
5.3.2.3 Beneficios ambientales de la fotocatálisis heterogénea.	63
5.3.3 Viabilidad Social.	65
5.3.4 Viabilidad Económica.	68
6. CONCLUSIONES.	73
7. RECOMENDACIONES.	75
8. BIBLIOGRAFIA.	76

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Aspectos que intervienen en la cantidad y características de los residuos sólidos.	18
Tabla 2. Clasificación de los residuos sólidos según la GTC - 24.	20
Tabla 3. Generación mundial per-cápita y total de residuos sólidos por sectores para los años 2012 y 2025.	22
Tabla 4. Composición física de residuos sólidos en Colombia.	24
Tabla 5. Fases de fermentación en la degradación de los residuos sólidos.	26
Tabla 6. Procesos de descomposición de los residuos sólidos en un relleno sanitario.	28
Tabla 7. Clases de rellenos sanitarios.	30
Tabla 8. Principales variables fisicoquímicas presentes en los lixiviados.	35
Tabla 9. Impactos de los lixiviados sobre los recursos naturales.	39
Tabla 10. Parámetros monitoreados para el tratamiento y disposición de residuos sólidos.	40
Tabla 11. Clasificación de los procesos de oxidación avanzada.	42
Tabla 12. Longitud de onda (nm) necesaria para obtener la energía de salto de banda en los catalizadores	57
Tabla 13. Contaminantes orgánicos que son mineralizados por la fotocatalisis heterogénea.	65
Tabla 14. Costos anuales de la disposición de los residuos sólidos en el Departamento del Cauca.	70
Tabla 15. Costos Anuales Equivalentes para la implementación de una técnica avanzada de oxidación.	71
Tabla 16. Costos Anuales Equivalentes para los tratamientos convencionales.	72

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Esquema del origen de los residuos sólidos.	17
Figura 2. Particularidades biológicas de la fracción orgánica de los residuos sólidos.	19
Figura 3. Toneladas diarias promedio por departamento.	23
Figura 4. Porcentajes de reciclaje en Colombia año 2016.	24
Figura 5. Descomposición de la fracción orgánica de los residuos sólidos.	26
Figura 6. Esquema de la descomposición de residuos sólidos al contacto con el agua.	29
Figura 7. Relleno Sanitario el Carrasco, Bucaramanga- Colombia.	29
Figura 8. Como funciona un relleno sanitario.	31
Figura 9. Lixiviados provenientes de la degradación de residuos sólidos.	33
Figura 10. Compuestos generales presentes en los lixiviados de un relleno sanitario.	34
Figura 11. Aspectos que influyen en la producción de lixiviados.	38
Figura 12. Proceso de reacción de Foto-Fenton.	44
Figura 13. Fases de la Banda de Energía de una partícula esférica de TiO ₂ .	45
Figura 14. Tratamiento de un colorante y disminución del Carbono orgánico total con la técnica del UV/ peróxido.	47
Figura 15. Esquema aguas inyectadas.	48
Figura 16. Esquema para la técnica de ozonización con peróxido de hidrógeno.	50
Figura 17. Trabajos y publicaciones realizadas entre los años 2000 y 2014 con la utilización del TiO ₂ , como catalizador en los procesos de fotocátalisis.	52
Figura 18. Mecanismos que se producen durante la fotocátalisis heterogénea.	53
Figura 19. Radiación solar de onda corta recibida por parte del sol.	59
Figura 20. Irradiación global horizontal media diaria en Colombia.	61
Figura 21. Distribución del Índice Ultravioleta Máximo Diario en Colombia.	62

RESUMEN

TITULO: ANÁLISIS SOBRE EL USO DE LOS TRATAMIENTOS FOTOCATALÍTICOS COMO MÉTODOS PARA LA REMOCIÓN DE CONTAMINANTES EN LOS LIXIVIADOS DE LOS RELLENOS SANITARIOS.

AUTOR: JAIRO ALBERTO VILLAMIZAR GELVEZ.

PALABRAS CLAVES: Residuos sólidos, Rellenos sanitarios, Lixiviados, Contaminación, Oxidación avanzada, Fotocatálisis.

DESCRIPCIÓN: Los impactos ambientales que producen los lixiviados de los rellenos sanitarios, sobre los recursos naturales son notorios a simple vista, por tal razón esta problemática ha sido motivo de estudio continuo por los diferentes entes competitivos de nuestra sociedad. Los diferentes tratamientos fotocatalíticos aplicados a los lixiviados, para degradar los contaminantes a través de los procesos de oxidación avanzada, permiten establecer una barrera de contención hacia los efectos negativos de estas sustancia, que afectan los ciclos naturales de los diferentes procesos biológicos en el medio ambiente, por lo cual es necesario conocer de cerca los requerimientos técnicos y ambientales, necesarios para el desarrollo de dichas técnicas en el control de esta contaminación y su posible aplicación en el ámbito nacional.

Por todo lo anterior esta propuesta de trabajo de grado como modalidad de monografía para la carrera de Ingeniería ambiental, es importante realizarla y se enfoca en tres capítulos, el primero tendrá como finalidad la descripción de las generalidades asociadas a la producción de lixiviados en los rellenos sanitarios. El segundo será el reconocimiento de los diferentes tratamientos fotocatalíticos enfocados a la reducción de contaminantes en los lixiviados de los rellenos sanitarios; y el tercero será el análisis del tratamiento fotocatalítico más eficaz, evaluando la viabilidad técnica, económica y socioambiental para su implementación en el ámbito nacional. Todo ello planteado como fases secuenciales para el cumplimiento del objetivo general de este estudio.

TITLE: ANALYSIS ON THE USE OF PHOTOCATALYTIC TREATMENTS AS METHODS FOR THE REMOVAL OF CONTAMINANTS IN THE LIXIVIATES OF SANITARY FILLINGS.

AUTHOR: JAIRO ALBERTO VILLAMIZAR GELVEZ.

KEYWORDS: Solid waste, Sanitary landfills, Leachate, Pollution, Advanced oxidation, Photocatalysis.

ABSTRACT

The environmental impacts produced by the leachate of sanitary landfills, on natural resources are notorious at first sight, for this reason this problem has been the subject of continuous study by the different competitive entities of our society. The different photocatalytic treatments applied to the leachates, to degrade the contaminants through the advanced oxidation processes, allow to establish a barrier of containment towards the negative effects of these substances, which affect the natural cycles of the different biological processes in the environment , for which it is necessary to know closely the technical and environmental requirements, necessary for the development of these techniques in the control of this contamination and its possible application in the national scope.

For all the above, this proposal of degree work as a modality of monograph for the career of environmental engineering, it is important to do it and focuses on three chapters, the first will be aimed at describing the generalities associated with the production of leachates in landfills health The second will be the recognition of the different photocatalytic treatments focused on the reduction of pollutants in the leachates of sanitary landfills; and the third will be the analysis of the most effective photocatalytic treatment, evaluating the technical, economic and socio-environmental viability for its implementation in the national scope. All this raised as sequential phases for the fulfillment of the general objective of this study.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La producción de residuos sólidos es un factor de contaminación ambiental, asociado al desarrollo de las diferentes tareas realizadas por todos los seres humanos en su ámbito cotidiano, donde se generan desechos debido al uso de un bien, producto o servicio. Gran cantidad de estos desechos se observan tirados en las calles de las ciudades; a pesar de contarse con la implementación de sistemas de recolección de residuos sólidos puerta a puerta. Por ello la falta de una cultura ambiental genera que esta problemática aumente día a día en proporción.

Es aquí donde los ciclos de manejo integral de residuos sólidos implementados hoy en día, juegan un papel muy importante, estos desechos que se generan en las diferentes fuentes (casas, empresas, etc), luego deben ser almacenados y separados dependiendo del tipo de residuo, seguidamente son recolectados y transportados a los sitios de disposición final por empresas establecidas y autorizadas, algunas de ellas implementan el proceso de reciclaje y reutilización de productos que pueden ingresar al proceso productivo para la generación de nuevos materiales, todo ello aportando a la vida útil de los rellenos sanitarios y reduciendo la propagación de los impactos ambientales que todo ello genera.

Pero esta técnica de aprovechamiento no es implementada en todos los ciclos del manejo integral de los residuos sólidos, por tal razón en ciertos lugares estos desechos son mezclados y recolectados por camiones que los llevarán a los sitios de disposición final, depositando grandes cantidades de basura en cárcavas, las cuales se encuentran ubicadas generalmente a cielo abierto, donde el tiempo y los factores climáticos promoverán la degradación de la fracción orgánica de todos los residuos allí presentes, dando como resultado el famoso lixiviado (Vázquez, 2001). Si le sumamos a ello la alta precipitación de un lugar determinado, y la mezcla de este líquido con los demás componentes que puedan llevar todos los tipos de residuos allí depositados, este líquido incrementa en cantidad y en carga de contaminación.

Por tal razón se generan graves impactos negativos sobre los recursos naturales, entre los que se encuentra la contaminación de las fuentes hídricas, el suelo y el aire; motivo por el cual es necesario emplear técnicas que permitan reducir las cargas contaminantes de estos vertimientos peligrosos, por lo cual los tratamientos fotocatalíticos o fotocátalisis heterogénea, reducen considerablemente las cargas contaminantes de estos residuos a través de la implementación de una oxidación avanzada, en la cual se genera una fotorreacción en presencia de catalizadores especializados que permiten llevar a cabo una degradación parcial de contaminantes. (Gil, 2002)

La problemática planteada anteriormente, direcciona esta investigación a la siguiente pregunta:

¿Qué importancia tiene la revisión bibliográfica de los tratamientos fotocatalíticos para disminuir la contaminación de los lixiviados generados en los rellenos sanitarios y reducir de esta manera los problemas ambientales que se generan en los diferentes recursos naturales?

2. JUSTIFICACIÓN

La emanación de lixiviados por la descomposición de los residuos sólidos en los rellenos sanitarios es uno de los problemas ambientales más preocupantes, ya que ocasiona diversos impactos sobre los recursos naturales. Estos líquidos tóxicos y peligrosos se infiltran en el agua y el suelo ya sea por algún medio de transporte como vertimiento, escurrimiento, evaporación, infiltración o percolación, en las cuales generan una perturbación de los equilibrios ambientales, por lo cual es necesario realizar un tratamiento previo al lixiviado antes de ser vertido a una fuente hídrica o al alcantarillado (Caraballo, 2014). Por ello hoy en día se han diseñado y propuesto tratamientos ambientales apoyados en la fotocatalisis (oxidación avanzada) que permiten mitigar dichas afectaciones con el fin de promover el cuidado y protección del medio ambiente. Los tratamientos fotocatalíticos son utilizados para remover contaminantes a través de la interacción de diferentes catalizadores activados por la radiación (UV o Visible) que producen fotones fotoexcitados que degradan las moléculas contaminadas en fragmentos de peso molecular más bajos (Martínez, 2008).

Plantear los diferentes tratamientos fotocatalíticos para la degradación de contaminantes en los lixiviados, no es fácil, por lo cual se deben evaluar una serie de variables tanto teóricas, técnicas, sociales y económicas, para definir finalmente la mejor alternativa a implementar, que a su vez sea ambientalmente sostenible. El desarrollo de esta evaluación analítica ambiental permite la implicación de nuevas tecnologías limpias que promuevan el cuidado de los recursos, todo ello dignificando la calidad de vida de la comunidad y mejorando el estado de las áreas aledañas a los rellenos sanitarios, las cuales son las más afectadas por los impactos negativos generados por los lixiviados.

Por tal motivo la proposición y ejecución de esta monografía para la carrera de Ingeniera ambiental en la Universidad Nacional Abierta y a Distancia, seccional Bucaramanga, titulada como “Análisis sobre el uso de los tratamientos fotocatalíticos como métodos para la remoción de contaminantes en los lixiviados de los rellenos sanitarios”, tiene su importancia en primer lugar como una herramienta para el mejoramiento de los tratamientos de lixiviados en los rellenos sanitarios, en segundo lugar, para conocer la efectividad de los procesos fotocatalíticos en la degradación de contaminantes. Y como tercer lugar para evaluar la viabilidad de dichos procesos en el ámbito nacional y su posible aplicación en los principales rellenos sanitarios del país.

3. OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL

- Realizar un estudio teórico sobre los tratamientos fotocatalíticos como métodos para la remoción de contaminantes en los lixiviados generados por los rellenos sanitarios.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Describir las generalidades de la producción de lixiviados en los rellenos sanitarios.
- Investigar el estado del arte de los diferentes tratamientos fotocatalíticos, utilizados para la remoción de sustancias contaminantes en los lixiviados producidos por los rellenos sanitarios.
- Analizar la viabilidad técnica, ambiental, social y económica del tratamiento fotocatalítico más eficaz para la remoción de contaminantes en los lixiviados.

4. METODOLOGÍA PLANTEADA

4.1 TIPOS DE INVESTIGACIÓN A UTILIZAR

Los dos tipos de investigación que se aplicaron para el desarrollo de esta monografía son los siguientes:

- **Investigación exploratoria.** Permite estudiar e indagar los parámetros que no se han sido analizados en relación con investigaciones anteriores.
- **Investigación descriptiva.** Promueve el proceso de investigación con el fin de describir íntegramente una situación o aspecto en particular.

4.2 CLASIFICACIÓN DE LA INFORMACIÓN A RECOLECTAR

Las fuentes de información primaria son aquellas que se han presentado una única vez y no han sido evaluadas por ninguna otra persona; también comprenden los resultados obtenidos en una salida de campo, visitas oculares o similares. Por otra parte las fuentes de información secundaria proceden de estudios primarios que se han analizado y utilizado como base para posteriores estudios, están enfocadas al fácil acceso para la búsqueda de fuentes primarias, y se componen por todo el material bibliográfico existente. (Silvestrini & Vargas, 2008)

Por ello para el desarrollo de esta monografía, en base a un estudio sobre el uso de los tratamientos fotocatalíticos, como métodos para la remoción de contaminantes en los lixiviados de los rellenos sanitarios; se recolectó información de fuente secundaria, puesto que se realizó una búsqueda minuciosa en libros, revista, tesis de grado, normas y páginas de internet, con lo cual se pueda indagar los temas de referencia para este estudio y cumplir con los objetivos planteados.

5. RESULTADOS

5.1. DESCRIPCIÓN DE LAS GENERALIDADES DE LA PRODUCCIÓN DE LIXIVIADOS EN LOS RELLENOS SANITARIOS

5.1.1 Residuos sólidos.

El ser humano en el desarrollo de sus diversas actividades cotidianas, dentro del marco residencial, industrial, agropecuario, comercial, institucional y de servicios, genera una gran cantidad de desechos como producto final de un proceso; a los que se les ha denominado residuos sólidos. Estos pueden ser clasificados como residuos de tipo reciclable, orgánico y/o peligroso, los cuales de acuerdo con sus características fisicoquímicas, pueden ser o no aprovechados para la producción de un nuevo bien material, y con ello promover la obtención de un lucro económico rentable. (Jaramillo & Zapata, 2008)



Figura 1. Esquema del origen de los residuos sólidos.
Fuente. Veras, 2014.

5.1.2 Aspectos que intervienen en la producción de residuos sólidos.

Algunos de los aspectos que intervienen en la cantidad y características de los residuos sólidos en un determinado sitio se presentan a continuación.

Tabla 1. Aspectos que intervienen en la cantidad y características de los residuos sólidos.

Aspectos		Características
Climatológicos	Invierno	Incremento en el porcentaje de humedad de los residuos.
	Otoño	Incremento en residuos de jardín.
	Verano	Incremento en el contenido de envases de bebidas.
Festividades	Noche buena/ Año nuevo	Incremento en embalajes (papel, cartón, plástico y metal).
	Vacaciones	Incremento de comunidades en sectores turísticos.
	Otras festividades	Incremento de envases bebidas (lata, vidrio, plástico rígido)
Demográficos	Población citadina	Gran cantidad de población, mayor producción per cápita de residuos sólidos.
Socioeconómicos	Poder de adquisición	Gran consumo de productos superfluos, mayor producción per cápita de residuos sólidos.
	Desarrollo tecnológico	Introducción a materiales más livianos, reduciendo peso específico aparente de los residuos sólidos.
	Rebajas y promociones	Aumento de embalajes como bolsas y cajas.

Fuente. Leite & Peinado, 2006.

5.1.3 Particularidades generales de los residuos sólidos.

A continuación, se presentan algunas de las particularidades más específicas, evaluadas en referencia a parámetros físicos, químicos y biológicos que presentan los residuos sólidos.

5.1.3.1 Particularidades físicas.

- **Composición gravimétrica:** Se relaciona con el porcentaje en masa de un tipo de residuo determinado, en base a la cantidad general de residuos sólidos generados.
- **Peso específico:** Vínculo entre el peso de los residuos totales y el espacio que ocupan, expresados en Kg/m³.
- **Contenido de humedad.** Hace referencia a la determinación de humedad presente en una muestra de residuos sólidos, donde existen dos métodos de medición el peso húmedo y el peso seco.
- **Compresibilidad:** Es la fuerza de decrecimiento a raíz de una presión ejercida, que soporta un cierto volumen de residuos.
- **Producción Per Cápita:** Cantidad de residuos diarios que produce una persona los cuales se expresan en Kg/hab-día. (Maldonado, 2002)

5.1.3.2 Particularidades químicas.

- **Poder Calorífico:** Porcentaje de calor que produce un determinado material dentro de la fracción de residuos cuando es incinerado.
- **Potencial de Hidrógeno (pH):** Expresa el valor de acidez o basicidad que puede presentar un residuo.
- **Composición Química:** Da a conocer la estructura química de composición, en los residuos a través de un análisis químico.
- **Relación Carbono/Nitrógeno.** Permite conocer el porcentaje de degradación de la porción biológica en el manejo integral y disposición final. (Maldonado, 2002)

5.1.3.3 Particularidades biológicas. Cualquier fracción de residuos sólidos, posee cierta cantidad de agentes microbianos y patógenos dentro de su estructura de composición, con el objetivo de conocer estos microorganismos, se han establecido ciertos procedimientos analíticos en el laboratorio, para determinar la cantidad de parámetros biológicos como coliformes fecales, coliformes totales, constituyentes solubles en agua, hemicelulosa, lignina, lignocelulosa, proteínas y patógenos entéricos, los cuales se encuentran presentes en las diferentes etapas de maduración de los residuos sólidos. (Piedra, 2012)

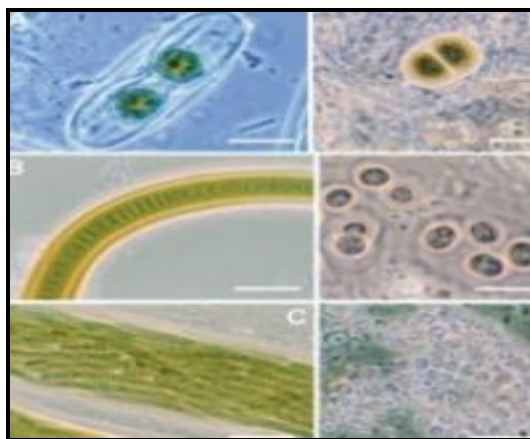


Figura 2. Particularidades biológicas de la fracción orgánica de los residuos sólidos.

Fuente. Piedra, 2012

5.1.4 Clasificación de los residuos sólidos.

La normatividad ambiental se ha encargado de especificar dos grupos de residuos sólidos, estos se dividen según su manejo, producción y disposición final, dentro de estos se encuentran los residuos ordinarios los cuales mediante un tratamiento se pueden convertir en otro bien aprovechable o se les aplica algún proceso de tratamiento final un ejemplo de ello son el cartón, vidrio y plástico. Por otra parte, están los residuos especiales, estos deben ser intervenidos mediante procesos más técnico, ya sea para producir otro bien o darles disposición final, ejemplo de ellos están las llantas, residuos de construcción, pilas, aparatos electrónicos. (RAS, 2005)

En la siguiente tabla se describe el tipo, la clasificación y los ejemplos para la clasificación de los residuos sólidos, según la Guía Técnica Colombiana 24, en base al proceso de separación en la fuente.

Tabla 2. Clasificación de los residuos sólidos según la GTC - 24.

Tipo de residuo	Clasificación	Ejemplos
Residuos no peligrosos	A) Aprovechables	<ul style="list-style-type: none"> • Cartón y papel (hojas, plegadiza, periódico, carpeta). • Vidrio (Botellas, recipientes) • Plásticos (Bolsas, garrafas, envases, tapas) • Residuos metálicos (chatarra, tapas, envases) • Textiles (ropa, limpiones, trapos). • Madera (aserrín, palos, cajas, guacales, estibas). • Cuero (ropa, accesorios). • Empaques compuestos (cajas de leche, cajas jugo, cajas de licores, vasos y contenedores desechables) ^A.
	B) No aprovechables	<ul style="list-style-type: none"> • Papel tissue (papel higiénico, paños húmedos, pañales, toallas de mano, toallas sanitarias, protectores diarios). • Papeles encerados, plastificados, metalizados. • Cerámicas. • Vidrio plano. • Huesos. • Material de barrido. • Colillas de cigarrillo. • Materiales de empaque y embalaje sucios.
	C) Orgánicos biodegradables	<ul style="list-style-type: none"> • Residuos de comida. • Cortes y podas de materiales vegetales.

Tipo de residuo	Clasificación	Ejemplos
	Residuos peligrosos	<p>A nivel doméstico se generan algunos de los siguientes residuos peligrosos:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Pilas, lámparas, fluorescentes, aparatos eléctricos y electrónicos. • Productos químicos como aerosoles inflamables, solventes de pinturas, plaguicidas, fertilizantes, aceites y lubricantes usados, baterías de automotores y sus respectivos envases o empaques. • Medicamentos vencidos. • Residuos con riesgo biológico tales como: cadáveres de animales y elementos que han entrado en contacto con bacterias, virus o microorganismo patógenos, como agujas, residuos humanos, limas, cuchillas, entre otros.
	Residuos especiales	<ul style="list-style-type: none"> • Escombros. • Llantas usadas. • Colchones. • Residuos en gran volumen como, por ejemplo: muebles, estanterías, electrodomésticos.

Fuente. Guía Técnica Colombiana. GTC 24, 2009

5.1.5 Producción de residuos sólidos a nivel mundial y Colombia.

5.1.5.1 Cantidad de residuos sólidos a nivel mundial.

Los científicos del Banco Mundial, Hoornweg y Bhada-Tata (2012), aseguran que para el año 2025 la cantidad de residuos sólidos urbanos se doblará a raíz del incremento en la producción per cápita, la cual fluctuará de 1,2 a 1,42 Kg/habitante en los siguientes 15 años; debido a ello la producción real de 1.300 millones de Tonelada/año pasará de 2.200 millones para el año 2025.

El origen de este aumento se debe al elevado crecimiento poblacional, las costumbres de consumo en países industrializados, también como cambios en los hábitos de consumidores que viven en los países subdesarrollados. (Hoornweg & Bhada-Tata, 2012)

Tabla 3. Generación mundial per-cápita y total de residuos sólidos por sectores para los años 2012 y 2025.

Región	Año 2012			Año 2025		
	Producción promedio Kg/hab/día	Población urbana (millones de habitantes)	Producción total (Ton/día)	Producción promedio Kg/hab/día	Población urbana (millones de habitantes)	Producción total (Ton/día)
AFR	0,65	261	169.120	0,85	518	44.840
EAP	0,95	777	739.959	1,52	1.230	1.865.380
ECA	1,12	227	254.389	1,48	240	354.811
LAC	1,09	400	437.545	1,56	466	728.392
MENA	1,07	162	173.545	1,43	257	369.320
OECD	2,15	729	1.566.286	2,07	842	1.742.417
SAR	0,45	426	192.411	0,77	734	567.545
TOTAL	1,19	2.982	3.532.255	1,42	4.287	6.069.705
AFR: África; EAP: Asia Oriental y el Pacífico; ECA: Europa y Asia Central; LAC: Latinoamérica y el Caribe; MENA: Medio Oriente y América del Norte; OECD: Países de la Organización para la Cooperación Económica y el Desarrollo; SAR: Asia del Sur.						

Fuente. Hoornweg & Bhada-Tata, 2012.

5.1.5.2 Cantidad de residuos sólidos a nivel de Colombia.

Colombia produce para el año 2017, 12.000.000 de toneladas de residuos sólidos al año, 1.000.000 de toneladas al mes y 33,333 toneladas por día de los cuales solo recicla el 17 % de la misma. (Pérez, 2017)

En el siguiente mapa se observa la cantidad de residuos sólidos generada por departamento en el país.

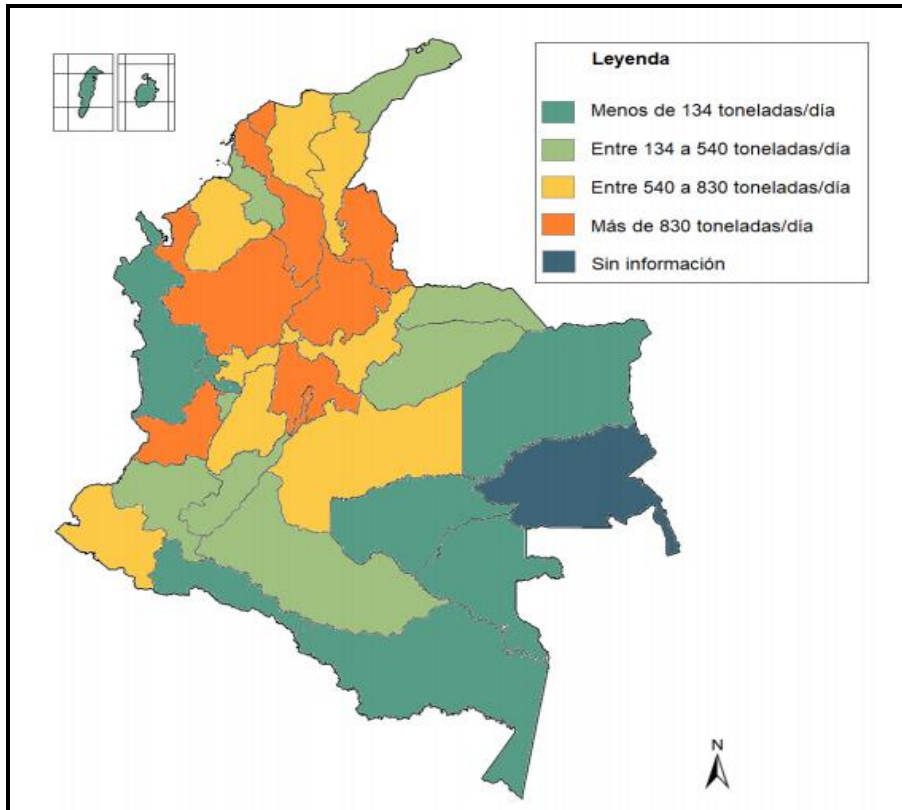


Figura 3. Toneladas diarias promedio por departamento.
Fuente. Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios, 2018

Como se evidencia en la figura 3, la mayor producción de residuos sólidos se presenta en los departamentos ubicados en la región andina (Antioquia, Cundinamarca, Valle del Cauca, Bolívar, Atlántico, Santander, Bogotá D.C. y Norte de Santander). Esto debido a que estos departamentos se ubican en las áreas de mayor densidad poblacional del país, de acuerdo con los estudios realizados por el DANE para el año 2017. (Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios, 2018)

5.1.5.3 Reciclaje de residuos sólidos en Colombia.

Según el Sistema Único de Información en el año 2016 en Colombia, se recicló un total de 97.905 toneladas de residuos sólidos aprovechables, donde el 57 % del material aprovechado fue papel y cartón, el 27 % metales, 8 % plástico, 7 % vidrio y el 1 % madera y textiles. (Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios, 2017)

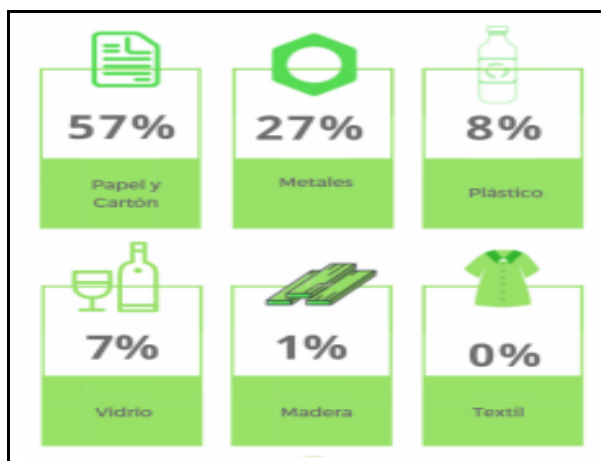


Figura 4. Porcentajes de reciclaje en Colombia año 2016.
Fuente. Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios, 2017.

5.1.5.4 Composición de residuos sólidos en Colombia.

En la siguiente tabla se presenta la composición física porcentual de los residuos sólidos urbanos en Colombia.

Tabla 4. Composición física de residuos sólidos en Colombia.

Clasificación	Contenido %
Orgánicos	43,2
Higiénicos	24,2
Vidrio y cerámicos	3,9
Cartón	3
Cauchos y cueros	1,2
Plásticos	13
Jardín	3,4
Papel	4,2
Textiles	1,9
Metales	2
Madera	0,6
Otros	1,1

Fuente. Contreras, 2006.

La composición física de los residuos se tomó de manera general, en base a estudios realizados para la determinación de esta. Es importante reconocer que estos contenidos, van a estar influenciados por aspectos climatológicos, socioeconómicos, demográficos y festividades especiales para un determinado lugar del territorio nacional.

En cuanto al volumen que se genera en Colombia de los residuos electrónicos, se estima un valor de 356,16 toneladas/días, los cuales provienen de computadores, impresoras, celulares y algunos electrodomésticos.

En Colombia la producción de residuos peligrosos se ha incrementado, debido al auge en el proceso de industrialización y de servicios médicos, pero para el control de los mismos, en el país se cuenta con diversas empresas que recolectan y dan un tratamiento de disposición final a estos, todo ello reduciendo la cantidad de residuos peligrosos que se generan, y por ende alargando la vida útil de los rellenos sanitarios. (Pinzón, 2011)

5.1.6 Fases de degradación en los residuos sólidos.

Los residuos sólidos son degradados por acción del tiempo y las condiciones climáticas, esta degradación ocurre en diferentes fases que relacionan propiedades de cada tipo de residuo.

5.1.6.1 Fases físicas. Estas reacciones se desarrollan gracias a la acción del agua sobre los residuos sólidos, promoviendo la dilución de los compuestos allí conformados. (Maldonado, 2002)

5.1.6.2 Fases Químicas. Estas tienen lugar en la fracción orgánica de los residuos sólidos, estableciéndose reacciones de oxidación gracias al oxígeno contenido allí, las siguientes reacciones son ácido-metal debido a la presencia de ácidos orgánicos y dióxido de carbono. Estas dos reacciones movilizan compuestos metálicos y sales. La constitución de metano produce baja concentración de ácidos y elevada retención de metales. (Maldonado, 2002)

5.1.6.3 Fases Biológicas. Dentro de esta fase se presentan los siguientes procesos:

- Hidrólisis Aerobia.
- Hidrólisis y Fermentación.
- Acetogénesis.
- Metanogénesis.
- Maduración y Estabilización. (Maldonado, 2002)

Las fases biológicas son desarrolladas por microorganismos que presentan ciertas características que le permiten degradar diferentes tipos de residuos, este tipo de microorganismo se alimentan y generan subproductos durante cada uno de los procesos en los cuales intervienen.

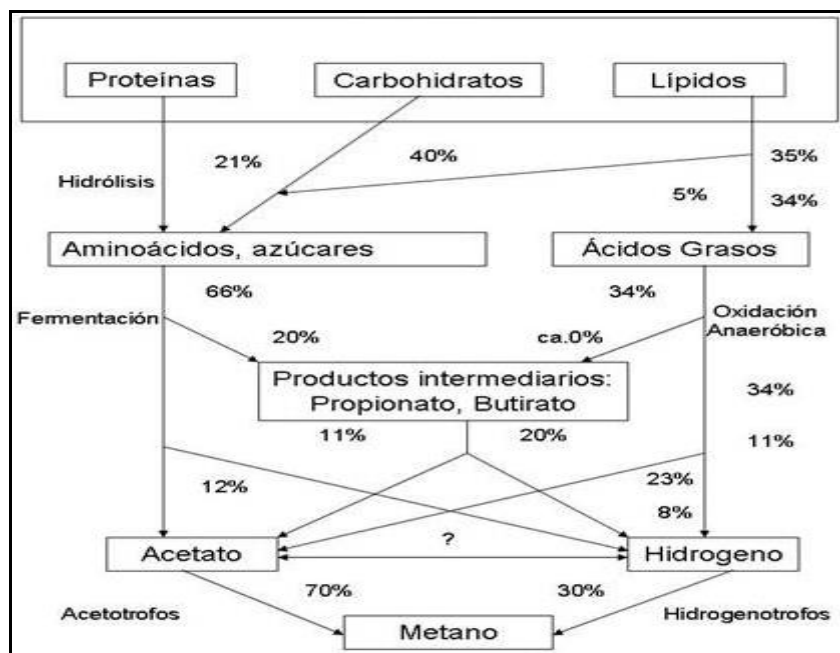


Figura 5. Descomposición de la fracción orgánica de los residuos sólidos.
Fuente. Siegrist *et al.*, 1993.

Tabla 5. Fases de fermentación en la degradación de los residuos sólidos.

Fase	Fermentación	Reacción	Edad del relleno	Gas producido
1	Aeróbica.	Oxidación.	0 – 2 años.	N ₂ , O ₂ .
2	Anaeróbica.	Fermentación ácida.	2 semanas – 2 meses.	N ₂ , CO ₂ , H ₂ .
3	Anaeróbica.	Fermentación desequilibrada con producción de metano.	2 meses – 2 años.	CO ₂ , CH ₄ , H ₂ .
4	Anaeróbica.	Fermentación equilibrada con producción de metano.	2 años – termino de fermentación (25 – 40 años)	CO ₂ , CH ₄ .
5	Termino.		> 25 – 40 años.	

Fuente. Röben, 2002.

5.1.6.4 Tiempo de degradación de ciertos residuos sólidos.

En la siguiente tabla se indica el tiempo de degradación, de algunos componentes de la fracción de residuos sólidos urbanos, en base al estudio realizado por algunos autores.

Autores	Componentes							
	Orgánicos	Vidrio	Papel y cartón	Plástico	Metales	Textiles	Madera	Pilas
	Años de degradación							
Guaman, 2005	0,33	4000	1	100-1000	10-30	-	-	Indefinido
Holguín & Puertas, 2006	-	4000	1	100-1000	10-100	-	-	<1000
Diamond, 2009	0,5	4000	0,42	100	1000000	30-40	2-3	
Wolf, 2009	0,5	Miles	0,42	100-1000	1000000	1-40	2-5	Nunca
Peralta & Valepucha, 2012	0,33	Indefinido	0,17	500	10-100	0,25	0,25	<1000

Fuente: Elaboración propia a partir de los autores referenciados.

5.1.6.5 Cinco fases para la descomposición de los residuos sólidos.

Según los escritores Kiss & Aguilar, 2006. Se presentan cinco fases para la descomposición de los residuos sólidos.

Fase 1: Esta etapa se caracteriza por la presencia de oxígeno, el cual se mueve por los espacios entre la basura dispuesta en las celdas, pero este oxígeno se agota por las bacterias aeróbicas. También el nitrógeno disminuye su concentración debido a los procesos de nitrificación, debido a la degradación de la materia orgánica se genera dióxido de carbono, donde a su vez se presenta incremento en la temperatura. Esta fase comprende un periodo de quince días, hasta que se consume todo el oxígeno presente en la fracción de residuos sólidos.

Fase 2: Esta etapa es denominada ácida, puesto que se presenta el cambio de procesos aerobios a anaerobios, caracterizada por los bajos niveles de pH, debido a la fermentación y degradación de la fracción orgánica donde se producen ácidos orgánicos. Por otra parte, el biogás producido está conformado en su mayoría por dióxido de carbono y nitrógeno e hidrogeno en menor cantidad. En los lixiviados se eleva la concentración de amoníaco, ácidos orgánicos y demanda química de oxígeno.

Fase 3: Es una fase netamente metanogénica intermedia, donde prevalecen condiciones anaerobias. El metano aumenta su contenido y el dióxido de carbono disminuye. Los ácidos grasos volátiles se transforman a biogás, y su presencia decrece en el lixiviado, lo cual genera un incremento en el pH, y a su vez reducción de la fracción orgánica en el lixiviado.

Fase 4: En esta fase los procesos metanogénicos se estabilizan, es un periodo ausente de oxígeno donde los valores de metano se elevan casi al 50 %, por otra parte, el pH y el amoníaco se incrementan en el lixiviado, y la fracción orgánica disminuye su valor en relación al análisis de la demanda química de oxígeno.

Fase 5: En esta etapa los residuos sólidos se encuentran en un ambiente aerobio estable, esto se presenta generalmente en rellenos recién clausurados, la concentración de metano disminuye y el dióxido de carbono es reemplazado por nitrógeno y oxígeno a medida que ingresa el aire atmosférico por las capas superficiales del relleno. (Kiss & Aguilar, 2006)

Tabla 6. Procesos de descomposición de los residuos sólidos en un relleno sanitario.

Procesos	Descomposición aerobia	Descomposición anaerobia	Lixiviación
Requisitos	Oxígeno y poca humedad	Ausencia de oxígeno, alta humedad	Alto volumen de agua pluvial, cubierta permeable
Temperatura	50 – 70 °C	35 – 50 °C	--
Reacciones	Oxidación, nitrificación	Reducción, desnitrificación	Disolución e hidrolisis
Consecuencias	Mineralización, esponjamiento	Consolidación, solidificación	Aumento de permeabilidad, acumulación de contaminantes
Productos	CO ₂ , H ₂ O y productos de oxidación	Ácidos orgánicos, CH ₄ , CO ₂ , NH ₃ , H ₂ S, lixiviado	Lixiviado

Fuente. Kiss & Aguilar, 2006.

En las cinco fases expuestas anteriormente, se presentan procesos de degradación de los residuos sólidos anaerobios, aerobios o por lixiviación; donde se incluye un compuesto primordial para que los mismos se lleven a cabo, este es el agua, la cual está presente por la degradación de la fracción orgánica o gracias a la precipitación. En la degradación de los residuos el agua juega un papel relevante, puesto que cataliza las fases de descomposición mediante la hidrolisis y disolución de compuestos tóxicos de la materia orgánica e inorgánica, dando como producto final un líquido llamado lixiviado. (Kiss & Aguilar, 2006)

A continuación, se muestra en la figura el rol que juega el agua al contacto con la materia orgánica presente en una muestra de residuos sólidos en general.

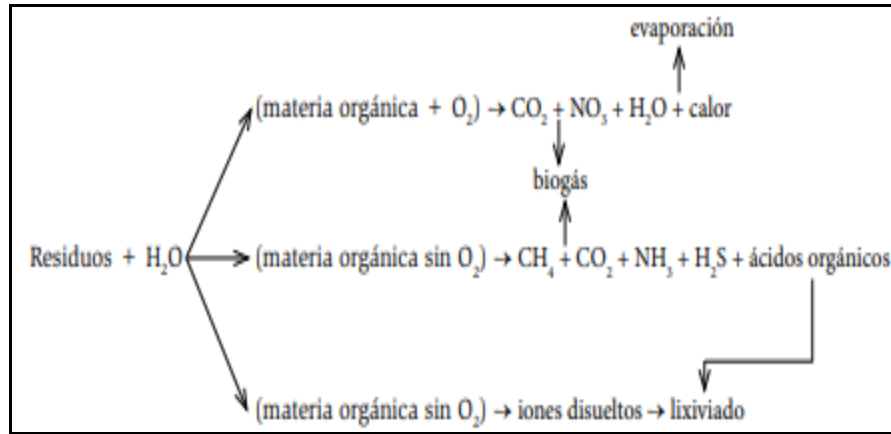


Figura 6. Esquema de la descomposición de residuos sólidos al contacto con el agua.
Fuente. Kiss & Aguilar, 2006.

5.1.7 Rellenos 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)



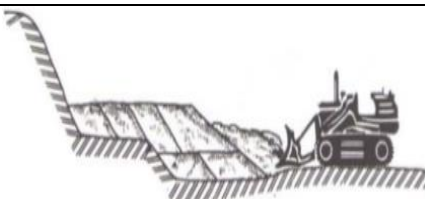


Figura 7. Relleno Sanitario el Carrasco, Bucaramanga- Colombia.
Fuente. Periódico el Tiempo, 2017.

5.1.8 Clasificación de rellenos sanitarios.

Existen los siguientes tipos de rellenos sanitarios, los cuales pueden ser establecidos en determinado lugar, dependiendo de las características del terreno donde se quiere implementar el mismo.

Tabla 7. Clases de rellenos sanitarios.

Clases	Características	Imagen
Relleno sanitario tipo Área	Se utiliza cuando el terreno es quebrado, o posee hondonadas naturales debido a la extracción de sedimentos del subsuelo.	
Relleno sanitario tipo Zanja o Trinchera	Se implementa cuando se cuenta con terrenos planos, donde se pueda realizar perforaciones es de fácil manejo.	
Relleno sanitario tipo Combinado o Rampa	Se desarrolla en terrenos quebrados o planos, Los residuos sólidos se deben extender, se apisonan y se cubren con material del subsuelo.	

Fuente. Collazos, 2013.

5.1.9 Ventajas y desventajas de un relleno sanitario.

5.1.9.1 Ventajas.

- Es un sistema muy utilizado puesto que recibe cualquier tipo de residuos sólidos municipales.
- La inversión de capital es menor comparada con otros procesos de disposición final de residuos sólidos.
- Si se opera de la mejor manera, su interacción con el medio ambiente no resulta un problema para las comunidades aledañas, ni para los recursos naturales.
- La utilización del gas metano que allí se produce, como fuente de energía en procesos industriales.

- Una vez clausurado un relleno sanitario, y adecuando el terreno mediante procedimientos de ingeniería, se puede construir un lugar de esparcimiento sobre dicho terreno.
- Permite la utilización de mano de obra calificada, para el desarrollo de las diferentes operaciones que allí se realizan. (Cubillo, 2005)

5.1.9.2 Desventajas.

- La adquisición del terreno es el primer obstáculo, a raíz de la oposición de las comunidades aledañas al sitio seleccionado.
- La producción de gases, vapores y líquidos lixiviantes, como resultado del proceso de degradación de los residuos sólidos.
- Su deficiente operación genera malos olores, y la reproducción de vectores sanitarios de manera rápida.
- Un mal manejo puede desencadenar contaminación de fuentes hídricas cercanas, contaminación del aire, contaminación de los suelos, pérdida de la fauna y flora del lugar, así como el deterioro estético del paisaje.
- Los predios ubicados en cercanías a los rellenos sanitarios tienden a devaluarse.
- Incomodidad de los vecinos por el alto tráfico de vehículos que ingresan al lugar (Cubillo, 2005).



Figura 8. Como funciona un relleno sanitario.

Fuente. Torri, 2017.

5.1.10 Impactos ambientales de algunos rellenos sanitarios en Colombia.

5.1.10.1 Relleno sanitario Doña Juana. Es el principal lugar de disposición final de residuos sólidos del país, abarca 472 hectáreas de terreno. Recibe los desechos de 6 municipios de Cundinamarca, ingresan diariamente 7.500 toneladas de basura, de las cuales un 80% los aporta la capital de la república. La problemática ambiental que caracteriza este sitio se evidencia en la emanación de olores ofensivos, la alta presencia de vectores fitosanitarios, la alta producción de lixiviados, los deslizamientos de residuos sólidos, la desestabilización del suelo, la alteración del paisaje y la incomodidad de las comunidades aledañas por los impactos que este produce sobre ellos.

5.1.10.2 Parque Industrial de residuos sólidos La Miel. Se encuentra ubicado en el municipio de Ibagué departamento del Tolima, recibe 540,9 toneladas de basura al día, posee un área de 46 hectáreas. Los principales impactos que este genera sobre el medio ambiente son: deforestación, eliminación de la fauna y microfauna del lugar, derrames de lixiviados, erosión del suelo, proliferación de olores. (SSPD, 2008 a)

5.1.10.3 Relleno sanitario Parque Ambiental Loma de los Cocos. Este solo recibe los residuos sólidos de la ciudad de Cartagena, alrededor de unas 850 toneladas/día, posee una extensión de 64 hectáreas, el manejo que este relleno sanitario recibe es positivo, puesto que aplica una cobertura diaria adecuada, posee un lugar de descargue bien identificado, posee chimeneas para la extracción y quema de gas producido, los vectores fitosanitarios no son un problema, el flujo vehicular es mínimo. Sin embargo, se presentan fallas operativas, como la creación y mantenimiento de carreteras, la ausencia de cunetas internas y externas sobre las vías; y la tubería en cuanto a su calidad y proporción a la cantidad de lixiviados generados. (SSPD, 2008 b)

5.1.10.4 Relleno sanitario El Carrasco. Es el principal sitio de disposición final de residuos sólidos del departamento de Santander, ubicado en la vía principal que comunica a Girón con Bucaramanga. Recibe 1.200 toneladas de desechos diarios de 16 municipios. Debido a la problemática ambiental que presenta ha soportado múltiples intentos de cierre, pero se ha extendido su vida útil debido a la implementación de cárcavas transitorias, y hoy en día se encuentra en operación. (EMAB, 2009)

Los principales inconvenientes ambientales que presenta este relleno sanitario son: incremento en la presencia de gallinazos, captación de residuos peligrosos, en algunas épocas del año se presenta escorrentía de lixiviados, proliferación de olores ofensivos en horas de la noche en los barrios circundantes, aplicación de una cobertura diaria no eficiente, extensión y compactación de residuos no apropiada. (Contraloría de Bucaramanga, 2008)

En base a toda la problemática nombrada anteriormente desde el año 2016, la alcaldía municipal en conjunto con la autoridad ambiental, inauguraron la planta de tratamiento de lixiviados, con el objetivo de disminuir la carga contaminante del vertimiento de este relleno sanitario sobre la quebrada la Iglesia, afluente del río de Oro. (Chio, 2016)

5.1.11 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.*, 2008)



Figura 9. Lixiviados provenientes de la degradación de residuos sólidos.
Fuente. Quitian, 2015.

5.1.12 Composición y clases de lixiviados.

5.1.12.1 Composición de los lixiviados. Los diferentes elementos y compuestos que se encuentran conformando los lixiviados que se producen en un relleno sanitario, dependen de la clase de residuos sólidos que allí se disponen, la velocidad de degradación y fermentación y el volumen de estos.

Se han identificado un número mayor a 200 compuestos orgánicos presentes en los lixiviados que se generan dentro de un relleno sanitario, dentro de los cuales se encuentran los siguientes: hidrocarburos cíclicos, hidrocarburos aromáticos, ácidos, esterés, bencenos,

alcoholes, éteres cíclicos, furanos, fenoles y lantanos, compuestos de nitrógeno, sílice, fósforo y sulfuro, trazas identificables. Entre los compuestos nombrados se encuentran algunos muy contaminantes como el tolueno, etilbenceno, xilano, estireno, naftaleno, pireno. (Paxéus, 2000)

Otros compuestos presentes en la estructura química de los lixiviados son los siguientes: A) Materia orgánica (Demanda Química de Oxígeno, Carbono Orgánico Total, Ácidos Grasos Volátiles, ácidos húmicos y fúlvicos). B) Materia inorgánica (Ca, Mg, Na, k, NH₄, Fe, Mn; Cl, SO₄²⁻, NaHCO₃). C) Metales pesados (Cd Cr, Cu, Pb, Hg, Ni, Zn). D) Compuestos xenobióticos (hidrocarburos aromáticos, fenoles, alifáticos clorados, pesticidas). También se encuentran, pero en pocas cantidades sulfuros, arsenatos, boratos, selenatos, Ba, Li, y Co. (Espinosa, *et al.*, 2007)



Figura 10. Compuestos generales presentes en los lixiviados de un relleno sanitario.
Fuente. Elaborado en base a Espinosa, et al., 2007.

5.1.12.2 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)

Tabla 8. Principales variables fisicoquímicas presentes en los lixiviados.

Parámetros		pH	Conductividad Eléctrica	Ácidos Grasos Volátiles	Alcalinidad total	Dureza Total	Demanda Bioquímica de Oxígeno	Demanda Química de Oxígeno	Carbono Orgánico Total	Sólidos Totales	Sólidos Disueltos Totales	Nitrógeno total	Nitrógeno amoniacal	Cloruros	
Unidades		Unidades de pH	mS/cm	meq/L	mg CaCO ₃ /L	mg CaCO ₃ /L	mg O ₂ /L	mg O ₂ /L	mg COT/L	mg/L	mg/L	mg N-NTK/L	mg N-NH ₃ /L	mg Cl/L	
Clases de Lixiviados	Lixiviado Joven	Valor máximo	8,26	36,7	295	36300	4324	13391	25455	7840	33796	33703	2492	2184	4200
		Valor mínimo	7,77	27,1	70	12400	1251	1171	9181	3531	17673	17041	2184	1050	2121
	Lixiviado Intermedio	Valor máximo	8,5	23,5	100	10746	1863	1594	6638	3025	17950	17775	2072	1848	3099
		Valor mínimo	7,6	16,2	50	7344	866	496	3673	1240	10596	10473	1204	1008	1398
	Lixiviado Viejo	Valor máximo	9,58	20,6	62,5	8694	2700	165	2197	999	9345	8877	1095	956	2420
		Valor mínimo	8,18	11,6	45	1689	400	78	1105	415	5472	5382	9,2	9,2	800

Fuente. Torres, et al., 2014

Las características de los lixiviados analizados se relacionan con el tiempo de maduración de los residuos sólidos en cada cárcava de la celda, por tal motivo el lixiviado joven corresponde a un tiempo < de 5 años; el lixiviado intermedio corresponde a un tiempo de 5 a 10 años y Lixiviado Viejo corresponde a un tiempo mayor de 10 años. (Kang, et al., 2002 & Shouliang, et al., 2008)

El pH se incrementó con la edad del lixiviado, lo cual se relaciona con la minimización de los Ácidos Grasos Volátiles, a raíz de que los vertederos jóvenes presentan la fase acidogénica del proceso anaerobio, esto conlleva a la liberación de elevadas proporciones de Ácidos Grasos Volátiles, que pueden representar hasta el 95 % de la materia orgánica, en cambio en rellenos sanitarios viejos se produce una fase metanogénica, donde los Ácidos Grasos Volátiles se transforman en metano y en dióxido de carbono (Renou, et al., 2008 & Kheradmand, et al., 2010)

La conductividad, la alcalinidad y la dureza, tienen una relación directamente proporcional, ya que obedecen a la presencia de iones en los lixiviados. Por ello se presenció que a medida que incrementa la edad del lixiviado, se reduce la dureza y la alcalinidad. También desciende la presencia de los iones bicarbonato, carbonato, magnesio y calcio, lo cual reduce el movimiento de iones, viéndose representado en bajos valores de conductividad. (Kang, et al., 2002)

En referencia a los parámetros relacionados con la Materia Orgánica (DQO, DBO, y COT), se identificó que estos se reducen si la edad del lixiviado incrementaba. La relación DBO/DQO se redujo considerablemente, de 0,53 para LJ; 0,16 para LI y 0,09 para LV, lo cual, representa reducción de la biodegradabilidad de los lixiviados en base a la edad. (Ramírez – Sosa, et al., 2013)

Para los valores de nitrógeno total y amoniacal, estos se reducen a medida que se incrementa la edad del lixiviado, debido a que en los rellenos sanitarios jóvenes ocurre la desaminación de los aminoácidos y la degradación de compuestos orgánicos. (Ziyang, et al., 2009)

En resumen los resultados de las variables físico-químicas para los tres muestras de lixiviados analizados, evidencian importantes relaciones entre la edad de la cárcava de donde se dispusieron los residuos sólidos y de donde provenían los lixiviados, con las modificaciones de sus características, identificándose una relación inversamente proporcional entre la edad de los lixiviados y la carga de toxicidad, evidenciado en la disminución de los valores de biodegradabilidad, en base de la mayor edad de los lixiviados. (Torres, et al., 2014)

5.1.13 Aspectos que intervienen en la producción de lixiviados.

Según Vázquez (2001), dentro de los aspectos que promueven la generación de lixiviados, se encuentran los que se basan en la composición fisicoquímica de los residuos sólidos, y por otra parte los aspectos que no dependen de dicha caracterización.

*1) **Caracterización fisicoquímica.** Depende de las características físicas y químicas de los residuos sólidos que se generan en un determinado lugar, en base a comportamientos de consumo y a condiciones climáticas.*

*2) **Descomposición gradual.** Varía en función de la naturaleza de los residuos sólidos, si estos son orgánicos e inorgánicos. Los primeros se descomponen más rápido en comparación a los segundos; por tal razón generan mayor concentración y volumen de lixiviados en el lugar de disposición final.*

*3) **Tamaño y estructura.** Mediante la aplicación de procesos que permiten reducir el tamaño original de los residuos sólidos, se produce la rápida descomposición de los mismos y por ende la pronta aparición del lixiviado. (Ibid., pág.23)*

*4) **Capacidad de intercambio catiónico.** Los suelos con textura orgánica y arcillosa permiten un elevado proceso de canje de cationes, reteniendo gran cantidad de metales pesados contenidos en la fracción de lixiviados, minimizando su movimiento hacia el subsuelo y posteriormente a las aguas subterráneas.*

*5) **Hidrogeología.** Relaciona ciertos parámetros de la capa freática de un determinado lugar como la textura, tipo de partículas, porosidad, capacidad de infiltración, capacidad de campo, y la influencia de estos al tener contacto con el lixiviado, en referencia a su volumen de producción.*

*6) **Aspectos climáticos.** Son todos los parámetros atmosféricos como precipitación, brillo solar, temperatura ambiente, humedad relativa, evapotranspiración, velocidad y dirección de la rosa de vientos, que una vez se interrelacionan, determinan el estado climático de un determinado lugar. Lo cual influye en la producción y volumen de los lixiviados de un relleno sanitario. (Ibid., pág.24)*

*7) **Estructura y operación de sitios de disposición final.** Hace referencia a los aspectos operativos, que se tuvieron en cuenta para la construcción y puesta en marcha de un relleno sanitario, tales como tipo de relleno sanitario, pendientes del lugar, profundidad de las cárcavas, tipos de texturas del suelo, técnicas de compactación diaria y clase de*

material de cubierta, sistema de circulación de líquidos, los cuales influyen de manera directa sobre la producción de lixiviados.

8) Clase de superficie de evaporación. El valor de la pendiente de un suelo y su relación con la intensidad de radiación solar diaria permitirá mayor o menor evaporación, por ello suelos planos presentan un elevado espejo de agua, y por ende un incremento en la evaporación y una reducción en la infiltración.” (Vázquez, 2001)

En la figura 11 se presentan algunos aspectos que influyen en la producción de lixiviados en un relleno sanitario, los cuales aumentan o disminuyen el caudal de dichos líquidos dependiendo de su fuerza de acción. Dentro de estos aspectos se encuentran: la precipitación (P), la escorrentía (R), cambio de humedad del suelo (ΔU_s), cambio de humedad de los desechos (ΔU_w), Evapotranspiración (ET), caudal de lixiviados (L). (Renou, et al., 2008)

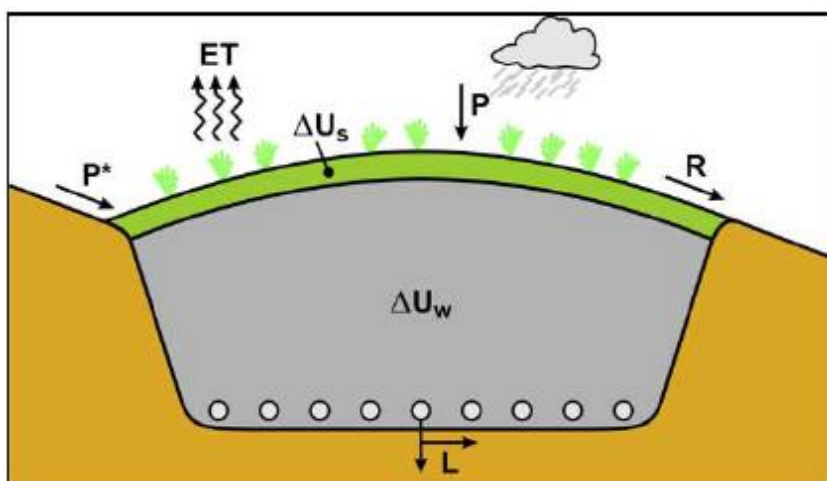


Figura 11. Aspectos que influyen en la producción de lixiviados.
Fuente. Renou, et al., 2008.

5.1.14 Impactos de los lixiviados sobre los recursos naturales.

Los impactos ambientales que se presentan en los diferentes recursos naturales, debido al contacto de estos con los lixiviados que se generan en un relleno sanitario, son la respuesta al proceso de degradación de los residuos sólidos. Dichos líquidos afectan de manera significativa un bioma, debido a elevada concentración de sustancias químicas que poseen, lo cual genera la alteración de ciertos parámetros fisicoquímicos presentes en los diversos organismos y estructuras que conforman la riqueza natural de un ecosistema en particular. (Pastor, 2001). Los impactos ambientales que se pueden presentar, por el contacto de lixiviados con los recursos naturales de un determinado lugar son los siguientes.

Tabla 9. Impactos de los lixiviados sobre los recursos naturales.

Recurso	Impacto	Valorización de impactos	
		Positivo	Negativo
Agua	Alteración de la calidad del agua		-
	Variación de caudales de cuerpos de agua		-
	Modificación en los cauces de cuerpos de agua		-
	Cambio en la estabilidad de la temperatura del agua		-
	Desequilibrio del sistema acuático		-
	Formación de cieno		-
	Reducción y desaparición de flora y fauna acuática		-
	Cambio en las propiedades organolépticas naturales		-
Suelo	Alteración de la calidad del suelo		-
	Inestabilidad del terreno		-
	Eliminación de la cobertura vegetal		-
	Cambio en la geología del terreno		-
	Presencia de erosión en el suelo		-
	Cambio de textura y permeabilidad del suelo		-
	Contaminación del suelo		-
	Muerte de microorganismos presentes en el suelo		-
Aire	Incremento en los niveles de presión sonora		-
	Proliferación de olores desagradables y gases		-
	Presencia de material particulado		-
	Contaminación atmosférica		-
Fauna	Migración y muerte de especies endémicas		-
Flora	Reducción y eliminación de flora nativa		-
Paisaje	Alteración del aspecto estético del lugar		-
Socioeconómico	Migración de la población		-
	Desvalorización de predios cercanos al relleno sanitario		-
	Exposición de la población a riesgos en su salud		-
	Conflictos entre diferentes entes de la población		-
	Generación de empleo	+	
	Riesgos de accidentes		-

Fuente. Yañez, 2013.

5.1.15 Parámetros a monitorear en un lixiviado.

En la resolución 0631 de 2015, la cual establece 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. Se presenta dentro del artículo 14, los parámetros fisicoquímicos a monitorear y sus valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales de Aguas Residuales no Domésticas (ARnD) de actividades asociadas con servicios y otras actividades.

Tabla 10. Parámetros monitoreados para el tratamiento y disposición de residuos sólidos.

Parámetro	Tratamiento y disposición de residuos sólidos	Unidades
Generales		
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		
Ortofosfatos	Análisis y Reporte	mg PO ₄ ⁻³ /L
Fósforo total	Análisis y Reporte	mg P/L
Compuestos de Nitrógeno		
Nitratos	Análisis y Reporte	mg NO ₃ -N/L
Nitritos	Análisis y Reporte	mg NO ₂ -N/L
Nitrógeno amoniacal	Análisis y Reporte	mg N-NH ₃ -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
Sulfatos (SO ₄ ²⁻)	600,00	mg/L
Sulfuros (S ²⁻)	Análisis y Reporte	
Metales y Metaloides		
Aluminio (Al)	3,00	mg/L
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		
Acidez total	Análisis y Reporte	mg/L CaCO ₃
Alcalinidad total	Análisis y Reporte	mg/L CaCO ₃
Dureza cálcica	Análisis y Reporte	mg/L CaCO ₃
Dureza total	Análisis y Reporte	mg/L CaCO ₃
Color real a (436nm, 525nm y 620 nm)	Análisis y Reporte	m ⁻¹

Fuente. Resolución 0631, 2015.

5.2. INVESTIGACIÓN DEL ESTADO DEL ARTE DE LOS DIFERENTES TRATAMIENTOS FOTOCATALÍTICOS, UTILIZADOS PARA LA REMOCIÓN DE SUSTANCIAS CONTAMINANTES EN LOS LIXIVIADOS PRODUCIDOS POR LOS RELLENOS SANITARIOS.

Los tratamientos fotocatalíticos son procesos de oxidación avanzada en la cual interviene un catalizador y luz incidente que genera un cambio en la velocidad de una reacción, en el catalizador se presenta una transferencia interna de electrones que permiten eliminar sustancias contaminantes en los lixiviados y son técnicas ambientalmente sostenibles. (Acevedo, 2015)

5.2.1 Procesos 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 11 se evidencia la clasificación de las principales técnicas utilizadas dentro de los procesos de oxidación avanzada.

Tabla 11. 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_2O_2)
UV/ H_2O_2	Procesos Fenton (Fe^{2+}/H_2O_2)
UV/ O_3	Oxidación electroquímica
Foto - Fenton y relacionados	Radiólisis y tratamiento con haces electrones
Oxidación en Agua subterránea y supercrítica	Plasma no térmico.
Fotocatálisis homogénea	Descarga Electrohidráulica y ultrasonidos

Fuente. Jiménez, 2014.

5.2.1.1 Ventajas de los procesos de oxidación avanzada.

- Modifican la fase del contaminante y lo alteran químicamente.
- Permite el cataclismo completo del contaminante.
- No genera lodo como resultado final del proceso.
- Son muy utilizados para contaminantes refractarios que soportan otros métodos de tratamientos biológicos.
- Son muy empleados para tratar contaminantes de poca concentración.
- Los subproductos de las reacciones se presentan en muy bajas proporciones.
- Disminuyen la concentración de sustancias que se forman en el proceso de desinfección del agua.
- Aportan beneficios a las características organolépticas del agua.
- El gasto de energía es mínimo comparado con otros métodos.

Mantiene una concentración óptima de compuestos desinfectantes. Fuente. (Jiménez, 2014)

5.2.1.2 Desventajas de los procesos de oxidación avanzada.

La mayor desventaja de los procesos de oxidación avanzada es su valor económico debido a la utilización de reactivos costosos (agua oxigenada o el ozono) y el alto gasto de electricidad (lámparas para generar radiación UV). De manera lógica no debe emplearse para reemplazar tratamientos más baratos, como la biodegradación. Su mayor potencial se alcanza cuando se logra incorporar con otros tratamientos que permitan alcanzar un sostenimiento ambiental. (Jiménez, 2014)

5.2.2 Técnicas fotoquímicas.

Las técnicas de oxidación avanzada fotoquímicas cubren todos los procesos que implican los diferentes cambios químicos producidos por la acción de la radiación electromagnética, en estas técnicas se presenta la generación de radicales hidroxilo que presentan un gran poder oxidante, los cuales permiten degradar contaminantes orgánicos e inorgánicos (Hincapié, 2011).

5.2.2.1 Foto - Fenton.

Esta técnica avanzada de oxidación produce y utiliza especies transitorias estables, como el ion hidroxilo. Este radical se genera por procesos fotoquímicos (incluida la luz solar) o por otros medios de energía, se le confiere una elevada efectividad para la oxidación de sustancias orgánicas. (Aznate, et al., 2013)

Dentro de las técnicas fotoquímicas se encuentra el proceso Foto-Fenton, el cual representa una clase de procesos fotocatalíticos homogéneos puesto que el catalizador y las diferentes sustancias que reaccionan están en el mismo estado físico. (Sirtori, 2010)

El proceso Foto - Fenton se caracteriza por su rapidez y efectividad en la descomposición de especies de la familia alifática, aromática clorada, colorantes azo, clorobencenos y fenoles. A su vez se han obtenido excelentes resultados en la disminución de la Demanda Química de Oxígeno en aguas residuales. (Aznate, et al., 2013) & (Hincapié, et al., 2011)

Durante las reacciones de fotocatalisis homogénea mediante Foto-Fenton, el ion de Hierro con valencia (II) se oxida a Hierro con valencia (III), degradándose el peróxido de hidrógeno para generar iones hidroxilo. La inclusión de la radiación ultravioleta UV-Vis aumenta la reacción de oxidación, debido a foto-reducción del Hierro (III) a Hierro (II) lo cual genera más iones hidroxilo) y mediante esta situación se produce un ciclo en el reactivo de Fenton y se generan los radicales hidroxilo para la oxidación de sustancias orgánicas; a su vez es factible utilizar la radiación solar, lo que disminuirá el costo de la radiación UV. (Aznate, et al., 2013)

En esta técnica fotoquímica se presentan las siguientes reacciones para el proceso Foto - Fenton.

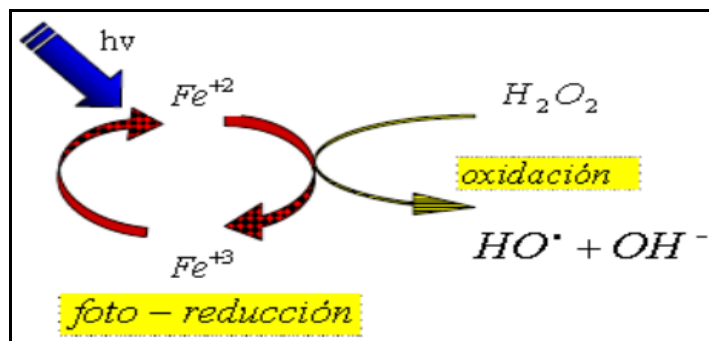
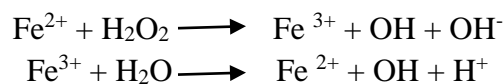


Figura 12. Proceso de reacción de Foto-Fenton.

Fuente. Betancourt y Torijano, 2014.

5.2.2.2 Fotocatálisis heterogénea con Óxido de Titanio (TiO₂).

Es una técnica que se fundamenta en la absorción directa o indirecta de energía radiante (visible o Ultravioleta) por un sólido (el fotocatalizador heterogéneo, que usualmente es un conductor medio de banda ancha). En la zona interfacial entre el sólido excitado y la solución se desarrollan las reacciones de remoción de los contaminantes, sin que el catalizador presente modificaciones en su estructura química. La excitación del conductor medio se presenta mediante dos situaciones. (Andreozzi & al., 1999)

- Por excitación directa del conductor medio, donde este absorbe los fotones usados en el proceso.
- Por excitación preliminar de moléculas retenidas en la superficie del catalizador, las cuales son capaces de transmitir cargas (electrones) en el conductor medio.

En estas fases, se generan pares electrón-hueco cuya vida media está en un periodo de los nanosegundos; en ese tiempo deben dirigirse a la superficie y reaccionar con las sustancias adsorbidas. Los pares electrón-hueco que no pudieron liberarse y reaccionar con las diferentes sustancias en la superficie se recombinan y la energía se transforma, esta recombinación se presenta tanto en la superficie como en el interior de la partícula. (Romero, 2003)

Para el óxido de titanio las reacciones que se presentan son las siguientes:

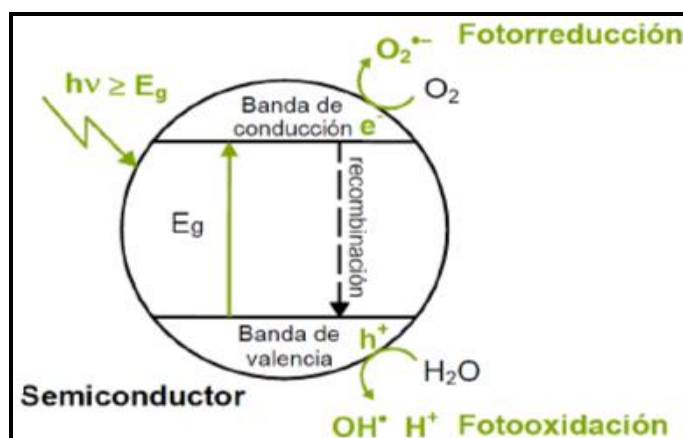
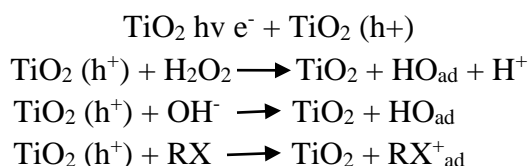


Figura 13. Fases de la Banda de Energía de una partícula esférica de TiO₂.

Fuente. Blanco & Malato, 2003

Los fotocatalizadores más estudiados hasta este tiempo son los óxidos metálicos conductores medios de banda ancha siendo su principal representante, el dióxido de titanio (TiO_2) el cual posee un alto equilibrio químico, que lo acredita como idóneo para trabajar en un extenso rango de pH, y a su vez por ser calificado para generar superficies electrónicas por absorción de la luz en el ultravioleta más próximo. (Kazuya & Akira, 2012)

Usualmente, el grado de degradación de contaminantes se eleva de forma directa con el incremento de la concentración del catalizador; a raíz de una mayor área superficial para que se establezcan los métodos de adsorción y degradación. Por otra parte, se debe tener en cuenta que se presenta una tasa óptima de concentración y que superior a ella, la composición se hace más oscura, generando así una disminución en la introducción de la luz y por lo tanto un decrecimiento en la tasa de descomposición del contaminante. (Blanco, et al., 2005 & Candal, et al., 2005)

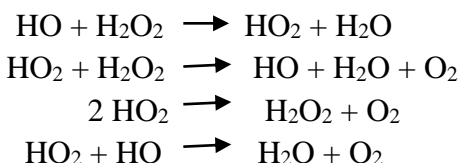
5.2.2.3 UV con Peróxido de Hidrogeno (H_2O_2).

La facilidad para dividirse que experimenta la molécula de H_2O_2 , por fotones con energía a la de la cohesión O-O^1 , tiene una efectividad cuántica unitaria, produciendo cuantitativamente dos moles de ion hidroxilo por cada molécula de peróxido. (Domènech, et al., 2004)

La fotólisis del H_2O_2 se lleva a cabo generalmente, mediante la utilización de lámparas de vapor de mercurio de poca o mediana presión, casi un 50% del consumo energético es emanado en forma de calor. Además del peróxido otros compuestos pueden absorber los fotones. Si los contaminantes se fotolizan en forma lineal, mejora el rendimiento de la técnica de destrucción oxidativa. Debido al declive de la intensidad de la radiación UV, hasta la base de la solución, es necesario generar un flujo de turbulencia continua para promover continuamente la solución en las zonas circundantes a la fuente de luz. El proceso fotoquímico es más efectivo en hábitat alcalino, puesto que la base conectada al peróxido de hidrogeno tiene una absorptividad elevada. (Ibid., pág.17)

Algunas ventajas que ofrece esta técnica son que el oxidante es comercialmente fácil de encontrar en el mercado, posee un equilibrio térmico, no requiere mayores indicaciones de cuidado para su almacenamiento, debido a su elevada solubilidad en agua no presenta problemas de transferencia de masa relacionados con los gases. La inversión económica y su operación son sencillas. En contraposición la técnica no es eficiente para descomponer alcanos fluorados o clorados, que no son atacados por HO, y posee poco rendimiento en el tratamiento de aguas con altas absorbancias. (Domènech, et al., 2004)

En altas cantidades de peróxido y con elevadas concentraciones de HO, se presentan reacciones competitivas que generan efecto inhibitorio para la descomposición. Los HO son celosos a recombinarse como muestran las reacciones siguientes:



En algunas de las anteriores reacciones se observa cómo se consume el HO y se reduce el proceso de oxidación. Se debe conocer la cantidad necesaria de H₂O₂, para evitar un incremento que retardaría la descomposición. Este método para el tratamiento de efluentes contaminados es uno de los más utilizados por su eficiencia y antigüedad de implementación, puesto que remueve sustancias contaminantes en aguas industriales como organoclorados alifáticos, aromáticos, fenoles (clorados y sustituidos) y plaguicidas (Rodríguez, T., et al., 2008).

En el siguiente ejemplo se evidencia la remoción de un colorante y de carbono orgánico total en la industria textil mediante la utilización de este método con peróxido.

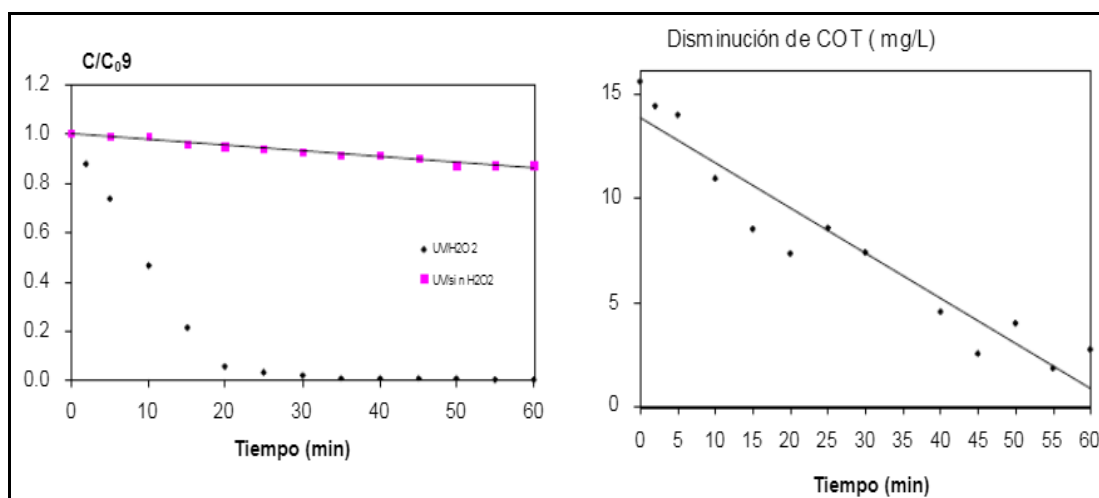


Figura 14. Tratamiento de un colorante y disminución del Carbono orgánico total con la técnica del UV/ peróxido.

Fuente. Domènech, et al., 2004.

5.2.3 Técnicas no fotoquímicas.

Las técnicas de oxidación avanzada no fotoquímicas producen compuestos muy reactivos, generalmente el radical hidroxilo, mediante la conversión de compuestos químicos o mediante el uso de diferentes formas de energía, excluyendo la irradiación solar. (Ripoll, 2008).

5.2.3.1 Oxidación electroquímica.

Hace parte de los procesos avanzados de oxidación debido a que los electrones se trasladan al compuesto orgánico a través de la participación de radicales hidroxilo. La principal virtud de este tipo de técnica es impedir la introducción de reactivos en disolución. En la oxidación anódica, los compuestos orgánicos se reducen por la acción de los radicales hidroxilos generados en un ánodo mediante la oxidación de moléculas de agua. En la oxidación electroquímica, las sustancias orgánicas reaccionan con oxidantes moleculares producidos electroquímicamente, un ejemplo de ello es el peróxido de hidrógeno que se genera en cátodos, de grafito, mediante el oxígeno disuelto en el medio:



Emplear esta técnica de oxidación electroquímica, para el tratamiento de vertimientos contaminados con compuestos orgánicos permite minimizarlos, transformarlos o excluirlos a través de la selección apropiada de los electrodos y del electrolito, se producen oxiradicales con una fuerza oxidante superior al de cualquier compuesto químico oxidante usual, los cuales permiten la oxidación de la materia orgánica, dando como productos CO_2 y H_2O . (Patiño, et al., 2011)

En la siguiente figura se muestra el funcionamiento de una celda con ánodo de BDD-Adamant, cátodo de zirconio, sistema de agitación y fuente de corriente BK Precisión.

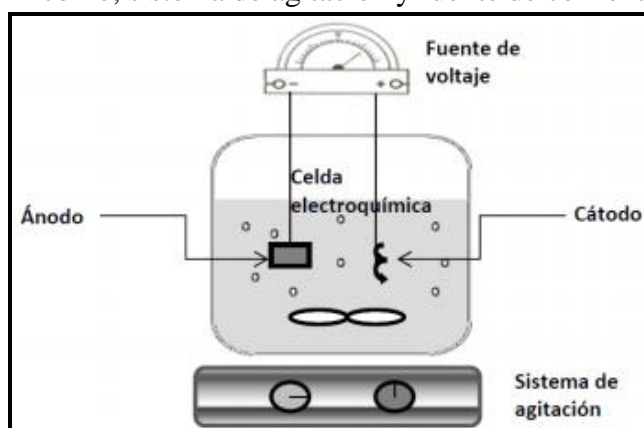


Figura 15. Esquema aguas inyectadas.

Fuente. (Patiño, et al., 2011)

El proceso electroquímico posee las siguientes características básicas:

- Excelentes resultados a presión atmosférica.
- Temperatura menor o igual a 100 °C.
- La rapidez de la reacción está definida por la densidad de corriente aplicada (A/m^2).
- Con ausencia de intensidad la reacción o tratamiento se interrumpe.
- Tiene factibles puestas en marcha y pausas del sistema.
- Posee un rápido proceso de regulación de la capacidad de tratamiento (Patiño, et al., 2011)

5.2.3.2 Radiólisis y tratamiento con haces de electrones.

Esta técnica de oxidación avanzada no fotoquímica es muy efectiva para el tratamiento de especies orgánicas volátiles (VOCs) y semivolátiles (SVOCs) en fuentes de aguas subterráneas, efluentes residuales, procesos de potabilización y generación de lixiviados. Ataca fuertemente a compuestos no oxidables y atacables por el ion hidroxilo. Estas estructuras químicas pueden ser descompuestas a compuestos de menor peso molecular. Esta técnica no genera ningún tipo de residuos que necesiten tratamiento, ni compuestos tóxicos como las dioxinas.

Un aspecto negativo de este proceso radica en la baja cantidad de radiación, se pueden producir aldehídos, ácidos orgánicos y SVOCs potentes. Esta técnica necesita alto consumo eléctrico, por ello no es viable económicamente para altas cargas de contaminantes en aguas. La combinación con ozono incrementa su eficiencia, a raíz de la rápida generación de especies reactivas adicionales. (Domènech. Op. cit., p. 24)

5.2.3.3 Ozonización con peróxido de Hidrogeno (H_2O_2).

La ozonización es una técnica de oxidación que compromete la producción de radicales hidroxilo, en un valor elevado para interactuar con las especies orgánicas del medio. Esta técnica se fundamenta, en permitir un tiempo de contacto apropiado del agua, con una proporción adecuada de ozono, entre valores de 0,5 y 0,8 mg/L de ozono durante unos 5 minutos, los cuales son necesarios para lograr retirarle al agua cierta cantidad de parámetros microbiológicos, y que la misma sea desinfectada. (Hidritec, 2011)

Los principales catalizadores utilizados en esta técnica son:

- Los óxidos de metales de transición (Mn, Ti, Al).
- Los metales u óxidos soportados (Cu, óxido de titanio sobre alúmina).
- Carbón activo.
- Sistemas silicatalíticos.

La ozonización se lleva a cabo en medio alcalino para elevar la rapidez de degradación del ozono, aumentando así la velocidad de producción de iones hidroxilo. La producción de iones hidroxilo puede elevarse con la inclusión de peróxido de hidrógeno (H_2O_2), incrementando la presencia de estos en el agua. Se obtiene un restablecimiento agregando agua oxigenada. (Alonso, 2008). La utilización de varios oxidantes mezclados faculta la explotación de los probables efectos sinérgicos entre ellos, lo cual genera una degradación agregada de la carga orgánica. Entre las probables combinaciones de agentes oxidantes, la del peróxido de hidrógeno con el ozono es la más utilizada. Esta técnica promueve la combinación del proceso de oxidación puntual del ozono con la reacción veloz y poco selectiva de los radicales hidroxilos con las especies orgánicas. (Domènech. Op. cit., p. 24)

Este proceso de oxidación no fotoquímico ha sido muy utilizado para la degradación de compuestos organoclorados como tricloroetileno, tetracloroetileno, etc. Debido a ello es eficiente para el posterior tratamiento de aguas que han desinfectadas por procesos químicos con cloro o dióxido de cloro. Su primordial área de aplicación es la descomposición de plaguicidas y herbicidas presentes en aguas crudas, potables o en vertimientos de aguas residuales y lixiviados de rellenos sanitarios. Ha sido ampliamente utilizado en la decoloración de compuestos de vertimientos de la industria papelera y otros procesos industriales. (Domènech. Op. cit., p. 21).

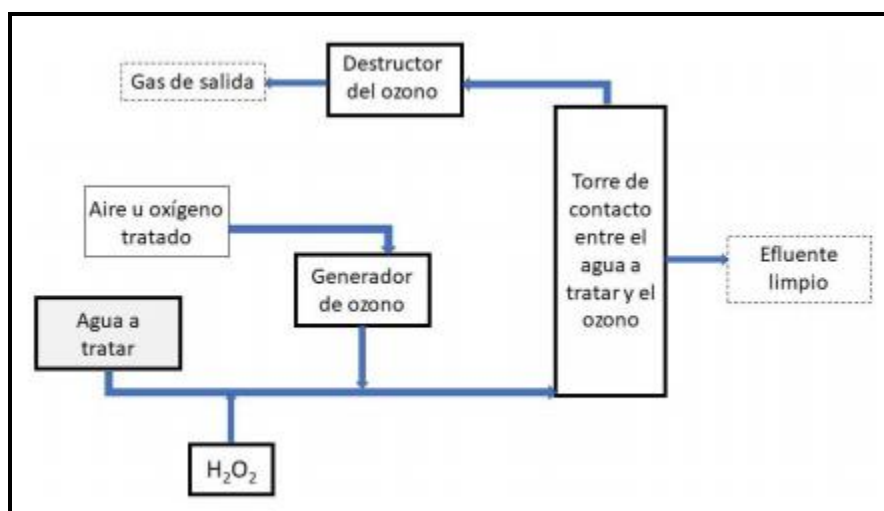


Figura 16. Esquema para la técnica de ozonización con peróxido de hidrógeno.

Fuente. Pelayo, 2018.

Esta técnica suele ser costosa pero veloz para tratar cargas contaminantes con compuestos orgánicos de muy bajas concentraciones, se resalta que el pH debe estar en el rango de la neutralidad, la relación molar óptima entre el ozono y el peróxido es de 2:1. (Domènech. Op. cit., p. 21).

5.3. ANÁLISIS DE LA VIABILIDAD INTEGRAL DE LA FOTOCATÁLISIS HETEROGÉNEA CON IMPLICACIÓN DE ÓXIDO DE TITANIO (TiO₂) COMO CATALIZADOR Y RADIACIÓN UV PARA LA REMOCIÓN DE CARGA CONTAMINANTE EN LOS LIXIVIADOS.

Debido al análisis que se realizó durante la búsqueda de información en relación a los diferentes tratamientos fotocatalíticos para la remoción de contaminantes en los lixiviados y evitar la contaminación de los recursos agua, suelo y aire, se procedió a indagar y determinar mediante referenciación bibliográfica más específica, cuál de los tratamientos expuestos presenta menos incidencia en los recursos y cumple con la viabilidad técnica, ambiental y social para ser aplicado en los procesos de descontaminación de lixiviados en los rellenos sanitarios. (Moncada, 2017)

Uno de los tratamientos fotocatalíticos más utilizados por su gran eficiencia y alto poder oxidativo en la remoción de contaminantes, es la fotocatalisis heterogénea con implicación de óxido de titanio (TiO₂) como catalizador y radiación UV. La fotocatalisis heterogénea permite la formación de especies transitorias que se encuentran altamente reactivas sobre un material que es semiconductor, que debe estar expuesto a una luz que proporcione la energía adecuada para degradar y mineralizar completamente una gran variedad de contaminantes orgánicos e inorgánicos refractarios, como los que hacen parte de la composición de lixiviados generados por los residuos sólidos en los rellenos sanitarios (Moncada, 2017). Dicho tratamiento permite obtener grandes ventajas en la remoción de contaminantes y es necesario evaluar todos sus pasos de operación para determinar su viabilidad técnica, ambiental, social y económica.

5.3.1 Viabilidad Técnica.

La viabilidad técnica de la fotocatalisis heterogénea con TiO₂, se define por las etapas en las cuales se realiza la eliminación de los contaminantes presentes en los lixiviados, y se centra en el catalizador y la fuente de energía utilizada.

5.3.1.1 Preparación y caracterización del catalizador.

El catalizador es una sustancia que permite aumentar la velocidad de una reacción química haciendo uso de la energía proporcionada por una fuente de luz (Álvarez, 2015). Las propiedades de los catalizadores son intermedias entre las de los metales y los aisladores; esto se debe a la distribución que existe entre sus electrones en los distintos niveles de energía.

Las bandas ubicadas en el catalizador son denominadas banda de valencia (VB), en la cual se cuenta con un nivel de energía menor y se encuentra ocupada en su totalidad por electrones; la banda de conducción (CB), posee un mayor nivel de energía que la presente en la (VB), por esta razón la fuente de luz irradia energía al catalizador, los electrones que se encuentran en la (VB) saltan inmediatamente a la (CB) a través de la brecha de banda (Álvarez, 2015), para que los electrones puedan realizar este salto es necesario suministrar una longitud de onda menor que la que posee dicho material (TiO_2), estudios demuestran que es necesario cerca de 400 nanómetros para arrancar los electrones del (TiO_2) (Mutzhas, et al., 1981), por lo cual es una alta energía en comparación con otros catalizadores como el sulfuro de cadmio que necesita longitudes de onda menores, pero que presentan inconvenientes ya que este tipo de catalizadores poseen partículas tóxicas, problema que no sucede con el TiO_2 , que se ha convertido en el fotocatalizador más utilizado en aplicaciones ambientales (Hernández, et al., 2009), ya que:

- Posee alta capacidad en la descontaminación de contaminantes orgánicos presentes en los lixiviados.
- Posee gran estabilidad química y fotoquímica.
- Viable económicamente si se emplea energía solar para activar la reacción.
- Es químicamente inerte, no presenta problemas de toxicidad.

Con base en las cualidades del (TiO_2) como catalizador se identifica su forma comercial más distribuida para su aplicación en tratamientos fotocatalíticos, el cual es denominado Evonik-Degussa Aeroxide TiO_2 P25, conformado por un 80 % de anatasa y un 20 % de rutilo y con un área superficial de $45 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$ (Maldonado, et al., 2015). Este catalizador es producido en grandes cantidades debido a que en los últimos 10 años su utilización en procesos fotocatalíticos aumento considerablemente como se evidencia en la figura 17.

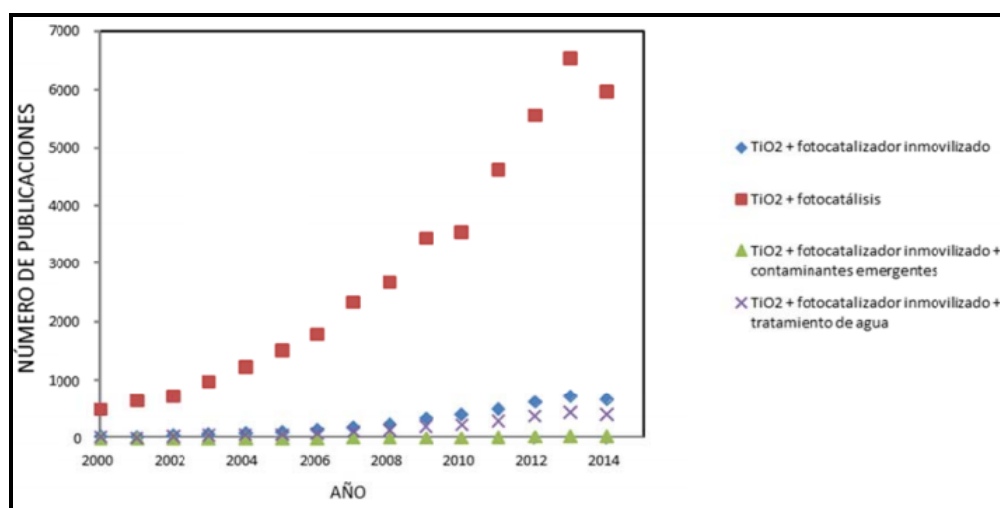


Figura 17. Trabajos y publicaciones realizadas entre los años 2000 y 2014 con la utilización del TiO_2 , como catalizador en los procesos de fotocatalisis.

Fuente. Maldonado, et al., 2015.

La fotocatalisis es un proceso complejo que implica un gran número de reacciones en serie y en paralelo. En la Figura 18, se detallan los mecanismos implicados en esta tecnología, en la cual la luz ultravioleta irradiada permite generar radicales hidroxilos y otros agentes oxidantes fuertes que facilitan la eliminación de los contaminantes en los lixiviados (Moncada, 2017).

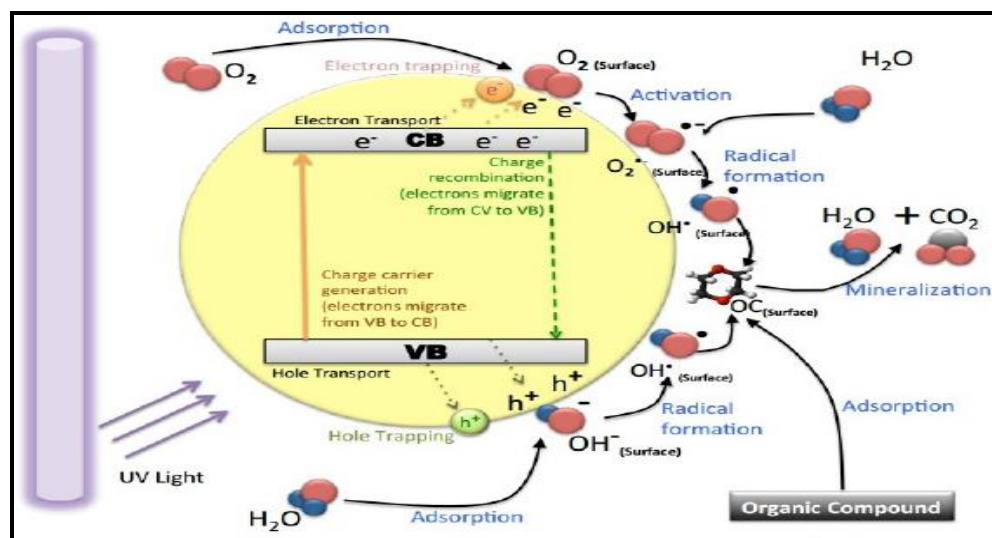


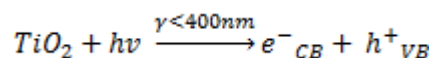
Figura 18. Mecanismos que se producen durante la fotocatalisis heterogénea.

Fuente. Moncada, 2017.

5.3.1.2 Mecanismos implicados en la fotocatalisis heterogénea

Los mecanismos que intervienen en el proceso de la fotocatalisis heterogénea se detallan a continuación:

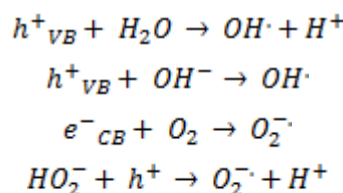
- **Generación de portadores de cargas.** La conductividad que existe en las moléculas del TiO_2 se producen como consecuencia de una exposición a una fuente de luz ultravioleta, la cual proporciona la longitud de onda que necesita el catalizador (400 nm), donde se garantiza la excitación de electrones que se mueven desde la banda de valencia (VB) hasta la banda de conducción (CB) en el catalizador; este movimiento forma un hueco con carga positiva, en la banda de valencia y la presencia de un electrón, con carga negativa en la banda de conducción (EPA, 1998), donde se genera la siguiente reacción:



- **Transporte y captura de cargas.** Durante esta fase tiene lugar la migración de la carga desde la estructura del catalizador (TiO_2), en la cual se generaron los portadores de

carga, hasta la superficie más grande, en la cual alcanzaran interacciones con otros compuestos. La captura de las cargas se obtiene cuando en la superficie del catalizador, los portadores de la carga alcanzan una mayor estabilidad. La efectividad del mecanismo se puede ver afectada si previamente no se realiza un diseño favorable para la captura de cargas. (Álvarez, 2015)

- **Recombinación de cargas.** Es una etapa considerada como efecto adverso en los procesos fotocatalíticos, ya que en esta etapa se disminuye la probabilidad de mantener unas condiciones adecuadas para la oxidación de los diferentes contaminantes. Cuando hay recombinación de carga, la producción de los radicales hidroxilos disminuye de manera significativa generando graves problemas para la oxidación. (Tang, et al., 1993)
- **Mecanismos de superficies totales de TiO₂.** Durante el tratamiento de contaminantes de lixiviados por medio de la fotocatalisis heterogénea se generan dos mecanismos la generación de especies activas y la adsorción de las sustancias contaminantes. Las especies activas cuentan con elevados potenciales de oxidación debido a la interacción de los portadores de carga (e^-_{CB} , h^+_{VB}) con oxígeno absorbido y con moléculas de aguas. La aparición de especies activas conocidas como radicales hidroxilo (HO^\cdot) y radicales superóxido (O_2^-) que cuentan con alta efectividad sobre especies activas que se producen a una menor escala como lo son los electrones atrapados, peróxido de hidrogeno (H_2O_2) y oxígeno (O_2) (Nosaka, et al., 1997). Las reacciones involucradas para radicales hidroxilo y superóxido se generan por la radiación ultravioleta para los primeros y el aporte de oxígeno en el lixiviado tratado para los segundos así:



En la etapa de adsorción de contaminantes, en el catalizador quedan retenidos en la superficie los componentes tóxicos que se encuentran en los lixiviados.

5.3.1.3 Parámetros que influyen en la fotocatalisis heterogénea.

- **pH de la solución.** Para desarrollar una excelente fotodegradación de contaminantes es necesario que el medio sea ácido (pH entre 3 y 5), dependiendo del sistema, ya que el pH afecta a las propiedades superficiales del catalizador y a la forma química del compuesto a degradar y se puede observar en las alteraciones ocasionadas hacia la velocidad de degradación y la mayor tendencia a floculación del catalizador. (Acevedo, 2015)

- **Morfología y concentración del TiO₂.** Es necesario que los parámetros del catalizador morfológicamente sean cristalinos, y que contenga tamaño de partícula y superficie adecuada para el proceso fotocatalítico. Elevadas concentraciones generan efectos de apantallamiento en los que se reduce el área superficial expuesta a la radiación incidente. (Acevedo, 2015)
- **Temperatura.** Pequeños cambios en la temperatura no afectan al tratamiento fotocatalítico, ni la velocidad, manteniéndose en rangos de 20 a 80 °C, pero en situaciones donde los sistemas alcanzan temperaturas mayores a 80 °C se puede generar la recombinación de los pares electrón/hueco generados y disminuye la adsorción de los contaminantes en la superficie del catalizador. (Acevedo, 2015)
- **Diseño del reactor.** Los rendimientos globales del tratamiento vienen condicionados a las características de los reactores en los cuales se genera la fotodegradación. Los reactores biológicos de lechada se utilizan debido a que presentan ventajas como alta transferencia de masa externa, superficie fotocatalítica ajustable, distribución uniforme del catalizador y la baja pérdida hidráulica a través de este; pero puede presentar inconvenientes debido a la dispersión y atenuación de la luz y de la necesidad de un tratamiento posterior de separación. Los reactores de medios fijos permiten obtener ventajas en la inmovilización del catalizador sobre medios estacionarios dentro del reactor, no requerir de tratamientos posteriores de separación y el funcionamiento continuo del sistema; pero puede presentar problemas de baja efectividad, no permite cambiar el catalizador en caso de avería y la superficie de este es limitada. (Moncada, 2017)

Otros reactores utilizados en los procesos fotocatalíticos son los fotorreactores con concentración de luz solar y los que no tienen concentración de luz, los cuales varían por tener un seguimiento de la luz solar en los primeros, dicho seguimiento permite aprovechar exitosamente la radiación directa, pero no logran concentrar la radiación difusa, pero además permiten utilizar toda la energía recolectada en otras aplicaciones. (Blanco, et al., 2008)

5.3.1.4 Inmovilización del catalizador para la fotocatalisis.

Para que el catalizador este fijo durante todo el proceso de degradación de contaminantes, este debe ser inmovilizado en el reactor, para lo cual se utiliza un sustrato o material sobre el cual se fija el TiO₂, siendo el vidrio a través del método sol-gel el más rentable y de fácil utilización (López, et al., 2010).

La técnica utilizada para realizar el recubrimiento es el “*dip coating*” método convencional que permite obtener los recubrimientos de forma firme y de excelente calidad superficial, es simple de utilizar, económica y versátil (Acevedo, 2015). El proceso incluye cinco pasos:

- Inmersión del sustrato en una solución que es preparada.
- Dejar en reposo en posición vertical por un tiempo para secado.
- Extracción del sustrato a una velocidad controlada.
- Drenaje del sustrato.
- Evaporación y posterior secado térmico.

El proceso inicia con la entrada del sustrato generalmente vidrio de tipo borosilicato ya que puede soportar altas temperaturas y tiene buena afinidad con el TiO_2 , lo cual le facilita fijación y una transparencia considerable en la zona de apertura de la radiación UV (Acevedo, 2015). Se realiza el reposo del sustrato para que se forme la película o capa de sustrato, donde se controla la velocidad de extracción, ya que es un factor importante, a diferentes velocidades se obtienen capas más gruesas del catalizador impregnado en el sustrato, sigue el proceso de evaporación y secado térmico, el cual finaliza con la obtención de un catalizador fijado en un sustrato inerte que está listo para degradar contaminantes por medio de la fotocatalisis.

5.3.1.5 Fuente de energía y reactores utilizados.

Durante el proceso de fotocatalisis heterogénea es necesario la irradiación de luz solar, lo que la convierte en una alternativa amigable con el medio ambiente y de amplia aplicación en zonas en la cuales las características ambientales, le permiten tener una fuente solar apropiada para desarrollar la técnica. Durante la aplicación de la fotocatalisis heterogénea se han utilizado diferentes catalizadores con el fin de obtener los fotones necesarios para la degradación de los contaminantes, el catalizador con el cual se han obtenido mejores rendimientos de remoción es el TiO_2 (Hermann, 2005). Además, se ha utilizado el óxido de zinc (ZnO) con rendimientos similares a los del óxido de titanio, pero algunas desventajas como la corrosión y alta contaminación lo alejan de su implementación en procesos fotocatalíticos (Miranda, et al., 2015).

En la tabla 12 se relacionan los catalizadores que han sido utilizados en diferentes estudios fotocatalíticos, en los cuales se evidencian las longitudes de onda necesarias para activar los saltos de banda y generación de fotones, los cuales son necesarios para la degradación de los contaminantes.

Tabla 12. Longitud de onda (nm) necesaria para obtener la energía de salto de banda en los catalizadores.

Catalizadores	Energía de salto de banda (eV)	Longitud de onda para el salto de banda (nm)
SnO ₂	3,9	318
SrTiO ₃	3,4	365
ZnS	3,7	336
BaTiO ₃	3,3	375
TiO₂	3,2	387
ZnO	3,2	390
WO ₃	2,8	443
CdS	2,5	497
GaP	2,3	540
Fe ₂ O ₃	2,2	565
CdO	2,1	590
CdSe	1,7	730
GaAs	1,4	887

Fuente: Miranda, et al., 2015.

Los reactores utilizados en la fotocatalisis heterogénea son denominados fotorreactores o sistemas compuestos de una serie de tubos que están distribuidos en paralelo sobre una superficie que es reflectante, la cual presenta forma de parábola y permite concentrar la luz solar hacia los tubos, en los cuales se encuentra el catalizador (TiO₂) y sobre el cual la irradiación UV genera los fotones que permiten degradar contaminantes en los lixiviados (Acevedo, 2015).

También existen fotoreactores que no concentran la luz solar, son considerados estáticos y no presentan un sistema para el seguimiento solar, son económicos y aprovechan la radiación directa como difusa (Acevedo, 2015).

Según Blanco, et al., (2008), esta es la clasificación de algunos fotorreactores sin concentración de luz solar:

“Placa plana o cascada: tiene una estructura abierta que cuenta con el catalizador inmovilizado sobre una superficie que esta inclinada y en la cual fluye el flujo a tratar.

Placa plana hueca: es un sistema que presenta el catalizador inmovilizado en medio de dos placas unidas sobre las cuales fluye el flujo a tratar.

Tubulares: es un sistema de tubos en paralelo sobre los cuales fluye el flujo a tratar y sobre el cual se soportan elevadas presiones y ofrecen rendimientos estructurales a gran variedad de materiales. Son la mejor opción para trabajar con flujos cerrados a través de grandes espacios.

***Balsa superficial:** es un sistema de depósito con poca profundidad para que la luz solar pueda penetrar a lo largo del espesor del agua, son utilizados en las industrias de tratamiento de desechos por su fácil diseño y utilización.” (Blanco, et al., 2008)*

5.3.2 Viabilidad Ambiental.

La viabilidad ambiental de la fotocatalisis heterogénea con TiO_2 , radica en la implementación de la radiación solar como fuente de energía necesaria para generar los pares electrón-hueco que se encargan de degradar los contaminantes en los lixiviados. La implementación de fuentes de energía alternativa permite preservar los recursos naturales y evitar la contaminación que se genera por la quema de combustibles fósiles. En Colombia el aprovechamiento de la radiación solar para generar energía es una técnica que va en aumento, por ejemplo la Universidad del Norte en Barranquilla implementó plantas de energía solar en su infraestructura, con el fin de desarrollar un aprovechamiento del recurso, implementando colectores de forma parabólica, los cuales permiten aprovechar las extensas horas de brillo solar que algunas zonas en el país brindan y a través de las cuales se logra generar altos rendimientos energéticos. (Universidad del Norte, 2012)

Debido a los diferentes fotoreactores que son empleados en la fotocatalisis heterogénea, los denominados concentradores cilíndricos parabólicos con seguimiento (PTC), son sistemas que permiten soportar una superficie concentradora parabólica reflectiva, que solo puede reflejar la radiación directa, presenta un sistema de seguimiento solar, donde la irradiación llega al fluido a tratar, que es recirculado por los tubos absorbedores situados en la parábola del fotorreactor (Hirales, 2009).

Existen otros sistemas que además de aprovechar la radiación directa, son capaces de aprovechar la radiación difusa, dichos sistemas son denominados colectores cilíndricos parabólicos compuestos (CPC), los cuales logran unificar las propiedades de los PTCs y los sistemas sin concentración, ya que con estas características utilizan tanto las radiaciones directas y difusas, siendo los sistemas más empleados en las fotocatalisis (Malato, et al., 2004).

Para comprender la viabilidad ambiental de la fotocatalisis heterogénea es necesario comprender las propiedades de la radiación ultravioleta que llegan a la tierra y su aprovechamiento para la degradación de contaminantes presentes en los lixiviados generados en los rellenos sanitarios.

5.3.2.1 Radiación solar.

Es la energía emitida por el sol y a través de la cual se propaga en todas las direcciones del espacio mediante ondas electromagnética, generadas por las diferentes reacciones que sufre el hidrogeno en el interior del sol por fusión nuclear, siendo emitida por toda la superficie solar. La radiación procedente del sol viaja en forma de radiación de onda corta, luego esta atraviesa la atmósfera donde sufre un pequeño debilitamiento a causa de la difusión, reflexión en las nubes y por la absorción de algunas moléculas de gases como el vapor de agua y el ozono, que están en suspensión, cuando la radiación solar alcanza la superficie terrestre esta la refleja o la absorbe (IDEAM, 2019). La medición de la irradiación solar se realiza instantáneamente como el cociente entre la cantidad de energía solar incidente en la unidad de área y de tiempo o integrada durante un lapso que normalmente es un día (W/m^2 o $\text{kWh/m}^2\text{día}$). (UPME, 2005)

La radiación solar es transmitida mediante longitudes de onda corta que comprenden el intervalo de 290 nm a 2500 nm ($0,290 \mu\text{m} - 2,5 \mu\text{m}$), siendo la región ultravioleta la que comprende longitudes de onda $< 400 \text{ nm}$. Durante la activación de los catalizadores en la fotocátalisis heterogénea, se necesita de una irradiación cercana a los 387 nm para activar el TiO_2 , y así poder generar los pares electrón-hueco, con los cuales se degradan los contaminantes, motivo por el cual es posible aprovechar toda la radiación ultravioleta que llega a la superficie y tratar los lixiviados, para disminuir la contaminación.

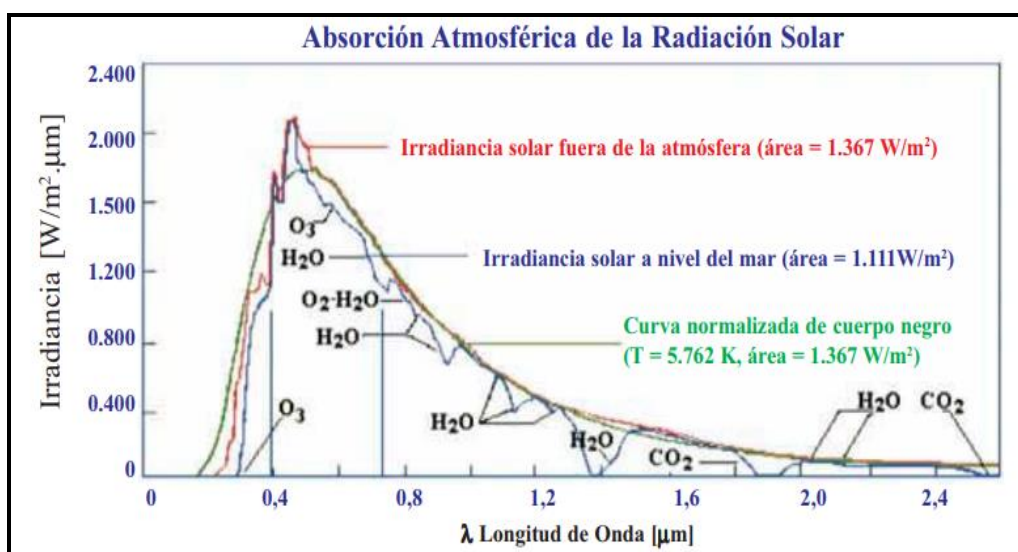


Figura 19. Radiación solar de onda corta recibida por parte del sol.
Fuente. UPME, 2005.

La radiación solar debe ser aprovechada por los fotorreactores CPC, los cuales aprovechan las radiaciones directas y difusas para realizar la fotocátalisis heterogénea; este tipo de radiaciones llega a la tierra a través de la irradiación solar y ambas conforman la

radiación solar global que llega a la tierra como resultado del componente vertical de la radiación directa más la radiación difusa, su evaluación se efectúa por el flujo de esta energía por unidad de área y de tiempo sobre la superficie horizontal expuesta al sol y sin ningún tipo de sombra (UPME, 2005). Es necesario mencionar que la radiación solar que llega a la superficie de la tierra se clasifica en:

- Radiación solar directa. La cual es la radiación que llega a la superficie de la tierra en forma de rayos provenientes del sol sin cambios de dirección y sin haber sufrido difusión, ni reflexión alguna; es expresada en función de $H_b = I' = I \sin h$, donde I' es el componente vertical de la radiación solar directa y h es la altura del sol sobre el horizonte. (UPME, 2005)
- Radiación solar difusa. La cual es el resultado de la difusión de energía por la interacción de la radiación directa con pequeñas partículas presentes en la atmosfera, esta radiación sobre la superficie de la tierra depende de la altura del sol en el horizonte y entre más partículas presentes en la atmósfera, mayor es el componente difuso, además aumenta con la presencia de capas de nubes blancas relativamente delgadas. (UPME, 2005)

5.3.2.2 Potencial de la radiación ultravioleta.

La radiación ultravioleta (UV) se caracteriza por tener alta energía y por presentar efectos en numerosos materiales, siendo uno de los principales factores para promover las reacciones fotoquímicas, pero puede presentar efectos agresivos con otros, razón por la cual es necesario utilizar materiales que soporten dicha energía para que puedan interactuar con el catalizador en la fotocatalisis heterogénea. La radiación UV aprovechada del sol se encuentra en el rango de < 400 nm, la cual es la longitud de onda necesaria para realizar la activación del TiO_2 , motivo por el cual un fotorreactor CPC, puede aprovechar la energía y generar el proceso de la fotocatalisis heterogénea utilizando la radiación directa y difusa. (Hirales Salazar, 2009).

Para implementar los proyectos fotocatalíticos con el fin de utilizar adecuadamente la radiación solar es necesario tener en cuenta que los proyectos varían dependiendo de la zona y las condiciones climáticas del lugar, es necesario realizar un diagnóstico inicial completo que retenga todos los conocimientos del lugar de implementación y las variabilidades climáticas que ocurren, además se deben evaluar los componentes de la radiación solar y el aporte ambiental y social.

En Colombia el IDEAM es el ente encargado de realizar el seguimiento de la radiación global en el país, para lo cual cuentan con una gran variedad de estaciones para monitorear las condiciones climáticas de todas las regiones y evaluar los potenciales energéticos de cada departamento (IDEAM, 2019). En el país algunas regiones presentan altos índices de radiación global y ultravioleta que le permiten a ciertas zonas ser potenciales sitios para la aplicación de un sistema de fotocátalisis heterogénea que permita reducir considerablemente los diferentes contaminantes presentes en los lixiviados generados por los rellenos sanitarios y de esta manera contribuir a la preservación de los recursos y a las comunidades aledañas a los rellenos sanitarios, las cuales son las más expuestas a los efectos nocivos que generan los lixiviados.

Por sus características Colombia está en la zona ecuatorial, en la cual la radiación UV resulta ser muy intensa y los rayos solares caen más directamente que en las latitudes medias (IDEAM, 2019). Estas características presentan a Colombia como un país con alto potencial para la implementación de tecnologías fotocatalíticas, como se evidencia en las Figuras 20 y 21.

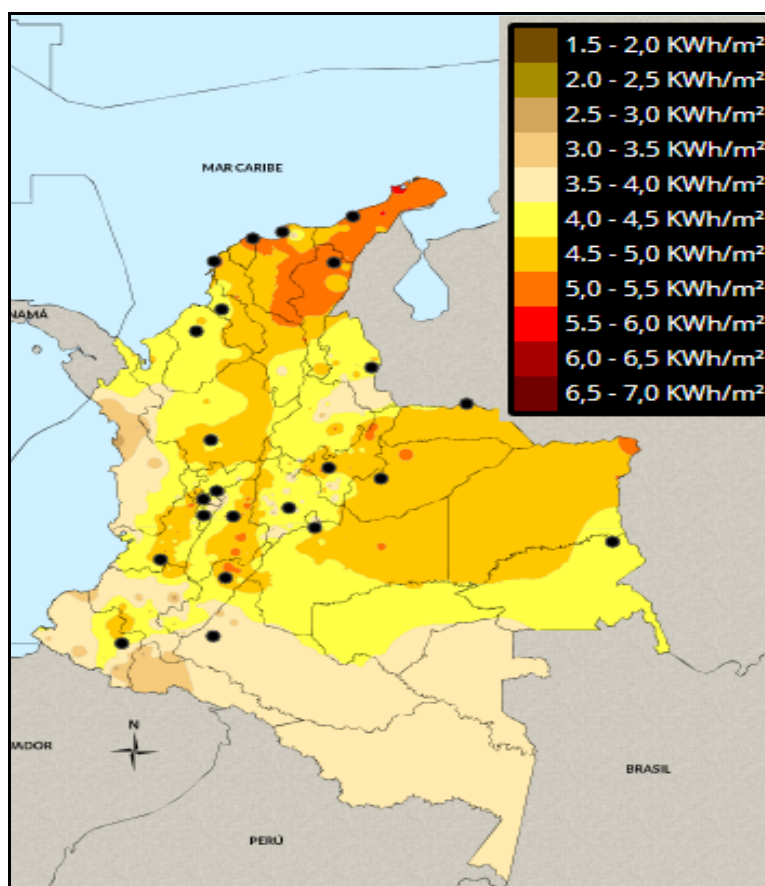


Figura 20. Irradiación global horizontal media diaria en Colombia.

Fuente: Atlas de Radiación Solar – IDEAM, 2019.

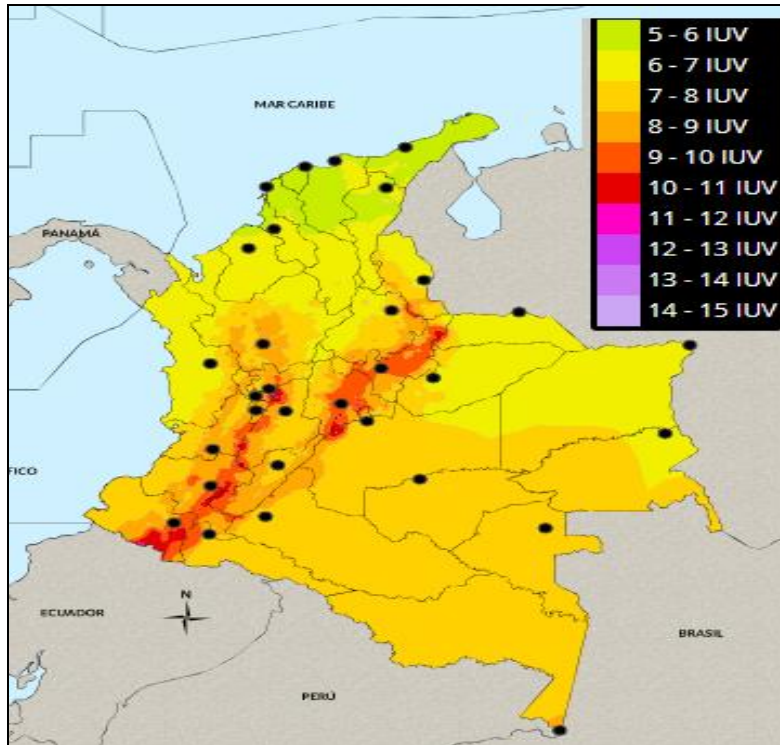


Figura 21. Distribución del Índice Ultravioleta Máximo Diario en Colombia.
 Fuente: Atlas de Radiación Solar – IDEAM, 2019.

Cuando se implementan fuentes de energía alternativa para tratar muchos de los problemas ambientales que se presentan en la actualidad, como lo es el manejo inadecuado de los residuos sólidos, proyectos como la fotocatalisis heterogénea que utiliza la radiación UV para degradar contaminantes, permiten que los impactos negativos sobre el medio ambiente se reduzcan considerablemente, partiendo de la premisa de remplazar la utilización de combustibles fósiles que generan grandes cargas de contaminantes que afectan el desarrollo del medio ambiente. La aplicación de la fotocatalisis depende de la energía solar, ya que las radiaciones UV que llegan a la superficie de la tierra permiten que fotorreactores aprovechen dichas longitudes de onda para activar el catalizador (TiO_2) y de esta manera contribuir en un proceso amigable con el medio ambiente.

Para implementar este tipo de técnicas es necesario instalar un sistema acorde a las condiciones climáticas y potencial solar de la zona de implementación. Ciudades como Barrancabermeja cuenta con un potencial único en la utilización de la energía solar, todo acorde a que es un municipio del departamento de Santander que presenta una temperatura media de 27,6 °C (clima soleado), presenta una mínima de 24 °C y una máxima de 37 °C (Alcaldía de Barrancabermeja, 2015). Además, otras ciudades como Bucaramanga que presentan graves problemáticas por la generación de lixiviados en el relleno sanitario *El Carrasco*, presentan condiciones óptimas para la implementación de técnicas fotocatalíticas

heterogéneas, ya que se observa un brillo solar que se mantiene constante en promedio 6 horas al día, lo que es muy bueno porque sería el tiempo de aprovechamiento máximo de la radiación UV, cuenta con índices de radiación global horizontal media diaria de (4,0 a 4,5 KWh/m²) y un índice ultravioleta máximo diario de 9 a 10 IUUV (Atlas de radiación solar, 2019), lo que la convierte en un área de potencial aplicación fotocatalítica y sobre la cual se pueden tratar los problemas generados en el relleno sanitario.

5.3.2.3 Beneficios ambientales de la fotocatalisis heterogénea.

La fotocatalisis heterogénea es una técnica de oxidación avanzada para la remoción de contaminantes muy utilizada en la purificación de aguas, las aguas residuales son tratadas mediante esta técnica con la utilización del TiO₂ como catalizador, lo cual ha convertido a esta técnica en una de las aplicaciones fotoquímicas de más interés dentro de la comunidad científica, ya que permite tratar mezclas complejas de contaminantes y la posibilidad de utilizar la radiación solar como fuente primaria de energía, que le otorga un gran valor medioambiental (Blanco, et al., 2014). El valor agregado de la fotocatalisis heterogénea radica en el claro ejemplo de las tecnologías sostenibles, en las cuales se busca aprovechar al máximo los recursos naturales y de esta manera generar menos impactos al medio ambiente.

Según Vanselaar (2003), señala que:

“para abordar los nuevos desafíos que se presentan en materia de desarrollo sostenible, es estrictamente necesario incluir nuevas tecnologías que presenten su propio modo de uso, libres de sustancias contaminantes y que permitan generar un cambio en la sociedad, en las industrias y para la ingeniería en particular; dicha afirmación está relacionada con el futuro sostenible, en el cual todas las industrias que intervienen en el desarrollo económico de un país, deben implementar sistemas de control durante todo el proceso industrial, con la finalidad de generar estrategias ecoeficientes que disminuyan los contaminantes derivados del proceso, como las cargas de aguas residuales, las cuales deben ser tratadas antes de ser descargadas en los cuerpos de agua y además trabajar de la mano con las comunidades que pueden verse afectadas por estos procesos.” (Vanselaar 2003)

La fotocatalisis heterogénea es un sistema aplicado a vertimientos de industrias dedicadas a la producción de medicamentos o en otros casos, a sistemas de tratamiento de aguas residuales, los cuales buscan reducir las cargas contaminantes y mejorar la calidad de las aguas.

Pero se ha avanzado en la utilización de esta técnica en los rellenos sanitarios, como un método de tratamiento In situ, los cuales buscan aprovechar el poder de oxidación de los radicales hidroxilo (OH \cdot), generados por fotocatalizadores que presentan un poder oxidante selectivo y con un gran potencial de oxidación, el cual es capaz de reaccionar con varios compuestos orgánicos, permitiendo generar la mineralización de los contaminantes (transformación en CO $_2$ y H $_2$ O) y eliminar el color y olor desagradable de los lixiviados (Primo, 2008).

Esta tecnología genera grandes beneficios al problema de los residuos sólidos, los cuales están generando graves problemas a los pobladores que se encuentran en las áreas de operación de los rellenos sanitarios. La fotocátalisis heterogénea con TiO $_2$, busca reducir el poder de contaminación de los lixiviados, el cual se concentra en:

- Contaminar aguas superficiales: cuando los lixiviados no son controlados pueden infiltrarse en el suelo hasta alcanzar cuerpos de agua y generar daños a las poblaciones de peces presentes en la fuente hídricas.
- Contaminar suelos: el contacto de los lixiviados con el suelo genera graves problemas de salinidad, debido a las altas cargas de sales con las cuales viaja el lixiviado y la afectación del pH en el suelo (Quintero, *et al.*, 2017).

La eficiencia de la fotocátalisis heterogénea con TiO $_2$ ha sido estudiada a través de los últimos años, arrojando grandes avances en las pruebas a nivel de laboratorio, Hincapié (2011), señala que durante su estudio de la remoción de contaminantes en aguas residuales derivadas del proceso de producción de biodiesel, obtuvo remociones del 60 % en la DQO y del 54 % de COT, para la cual emplea el catalizador TiO $_2$, de la forma Degussa P25, con fijación método sol-gel y fuente artificial UV, evidenciando una remoción considerable en la carga contaminante tratada; este tipo de estudios demuestran de las posibilidades que presenta la fotocátalisis como un método efectivo para la remoción de contaminantes y de su aplicación en sistemas sostenibles, debido a que la fuente de radiación UV puede ser aprovechadas mediante la utilización de fotorreactores especializados que permiten obtener grandes rendimientos.

Además de la reducción de DQO y DBO, otros contaminantes pueden ser mineralizados, es decir llevados a una forma menos tóxica que pueden ser asimilados por el ambiente sin generar daños graves, algunos de los contaminantes que se pueden tratar por la fotocátalisis heterogénea se evidencian en la Tabla 13.

Tabla 13. Contaminantes orgánicos que son mineralizados por la fotocatalisis heterogénea.

Compuestos orgánicos	Sustancias
Alcanos	Isobutano, pentano, heptano, ciclohexano, parafinas
Haloalcanos	Mono, di, tri, y tetraclorometano, tribromoetano
Alcoholes alifáticos	Metanol, etanol, propanol, glucosa
Ácidos carboxílicos alifáticos	Ácidos fórmicos, etanoico, propanoico, oxálico, butírico, málico
Alquenos	Propeno, ciclohexeno
Haloalquenos	1,2-dicloroetileno, 1,1,2-tricloroetileno
Aromáticos	Benceno, naftaleno
Haloaromáticos	Clorobenceno, 1,2-diclorobenceno
Nitrohaloaromáticos	Dicloronitrobenceno
Compuestos fenólicos	Fenol, hidroquinona, resorcinol, nitrofenol
Halofenoles	2-3-4-clorofenol, pentaclorofenol
Amidas	Benzamida
Ácidos carboxílicos aromáticos	Ácido benzoico, 4-aminobenzoico, ftálico, salicílico
Agentes tensoactivos	Dodecilsulfato de sodio, polietilenglicol
Herbicidas, plaguicidas	Atazina, prometon, propetrina, nonuron
Organofosforados	DDT, paratión, lindano, tetraclorovinfos, fenitrotion
Colorantes	Azul de metileno, rodamina, naranja de metilo, rojo congo

Fuente. Herrmann, 2005.

Los beneficios alcanzados por la fotocatalisis heterogénea son amplios, se logra evidenciar la gran cantidad de contaminantes tratados, además es el único método que realmente destruye sustancias tóxicas hasta compuestos inocuos, en los cuales se incluyen mezclas complejas de sustancias orgánicas (Garcés, *et al.*, 2004). Este método es amigable con el medio ambiente y es aplicable a los lixiviados, los cuales deben ser contenidos y descontaminados dentro de los rellenos sanitarios, para evitar los graves daños que pueden ocasionar.

5.3.3 Viabilidad Social.

Los impactos que generan los rellenos sanitarios sobre las poblaciones aledañas son alarmantes, debido a las diferentes enfermedades que se pueden contraer a partir de los olores ofensivos y vectores generados de la descomposición de los residuos y la formación de lixiviados.

La implementación de un sistema de fotocatalisis heterogénea con TiO₂ y radiación UV, es una técnica amigable con el medio ambiente, que puede ser aplicada a los problemas que presentan muchos sectores en los cuales se encuentran ubicados los rellenos sanitarios, que por lo general son afectados por la cantidad de lixiviados que se infiltran en el suelo y alcanzan cuerpos de agua.

Los pobladores aledaños a las zonas de funcionamiento del relleno sanitario Doña Juana sufren graves daños por la poca eficiencia en el tratamiento de los lixiviados generados en el relleno, sobre la vereda Los Mochuelos ubicada en el extremo suroriental de Bogotá, se han presentado problemas derivados del olor agrio que llega a los pobladores, en los cuales se generan infecciones respiratorias producidas por las emanaciones de gases tóxicos como el benceno y presencia de roedores y moscas (Makyu, J. 2017). A consecuencia de estos problemas, las comunidades aledañas han reportado graves daños en las tierras por pérdida de fertilidad e infección del ganado que se alimenta en la zona, ocasionando graves pérdidas para los habitantes que desarrollan la agricultura (Méndez, et al., 2006).

La comunidad tiene que enfrentarse a este tipo de problemas, ya que no se cuenta con un sistema que trate adecuadamente la contaminación en el relleno sanitario, motivo por el cual la fotocatalisis heterogénea puede tratar los lixiviados a través de la oxidación avanzada de los compuestos orgánicos presentes en ellos. Algunos compuestos organosulfurados, alquilbencenos y otros hidrocarburos generan efectos sobre la salud humana, incluyendo obstrucción de las vías respiratorias, conjuntivitis, alteraciones en el ritmo cardiaco y daños en el sistema nervioso central. Estos compuestos son tratados efectivamente por la fotocatalisis heterogénea. (Méndez, et al., 2006)

Herrmann (2005), concluye que:

“ Uno de los componentes presentes en las aguas residuales y lixiviados que es perjudicial para la salud humana es el benceno, el cual es eliminado efectivamente por la fotocatalisis heterogénea empleando catalizador de TiO_2 , el cual permite generar pares electrón-hueco con la irradiación de la energía UV; la degradación ocurre en una fase secuencial en la cual el aromático es degradado a una forma de hidroxilación del anillo bencénico, formando un intermediario que presenta concentraciones transitorias muy bajas con respecto a la del contaminante original, posteriormente se forman subproductos como CO_2 , acetato y formiato.” (Herrmann 2005)

La fotocatalisis heterogénea degrada compuestos orgánicos e inorgánicos que le permiten al medio ambiente asimilar compuestos menos tóxicos o incluso sin afectación ambiental, permitiendo tener un control adecuado sobre las cargas de los lixiviados, esta técnica permite mantener el equilibrio de los distintos ecosistemas sobre los cuales ya no estarán presentes compuestos que amenazan con el desarrollo de las especies, además de la utilización de fuentes de energía alternativas como el aprovechamiento de la radiación solar.

La implementación de energías limpias en la fotocátalisis heterogénea permite convertir a esta técnica en una poderosa herramienta para destruir los desechos perjudiciales para el medio ambiente, utilizando la radiación UV procedente del sol, se logra degradar contaminantes que no son fáciles de eliminar a través de tecnologías convencionales que solo tratan concentraciones bajas y que en muchos casos no logran eliminar este tipo de contaminantes (Gil, 2002).

En Bucaramanga (Colombia), hace años se despertó la preocupación por parte de las autoridades ambientales, debido al enorme riesgo que está presentando el alargamiento de la vida útil del relleno sanitario El Carrasco, el cual está contaminando los recursos suelo y agua en las áreas de disposición de los residuos y en zonas que ya han sido clausuradas previamente por focos de contaminación (Niño, et al., 2016).

En el Carrasco se han realizado diferentes estudios que arrojan resultados negativos para los habitantes de las zonas aledañas al relleno, uno de los principales problemas sobre los cuales se tiene conocimiento es la infiltración de lixiviados en los cuerpos de agua de la región, los cuales están cargados de metales pesados como el arsénico, el cual genera preocupación, ya que es un metal que puede generar intoxicación gradual en un lapso de 5 a 20 años que resulta en graves enfermedades como el cáncer de piel, vejiga y afectación de los riñones en las personas que tengan contacto a las fuentes hídricas contaminadas por este metal (Niño, et al., 2016).

Las hermanas Assaf, (2012), señalan en su estudio que:

“Los habitantes del barrio El Porvenir en el municipio de Girón – Santander, son los más afectados por el ineficiente manejo de los lixiviados por parte de los operadores del relleno sanitario El Carrasco, el barrio está ubicado a menos de 1.000 metros del relleno y cuenta con cerca de 10.000 habitantes que se han visto afectados en sus derechos fundamentales y colectivos. El estudio desarrollado a través de encuestas y visitas del lugar, lograron evidenciar una serie de problemas a los cuales se enfrentan los habitantes del barrio, cerca del 82 % de las personas encuestadas reconocieron tener problemas de salud a causa de la contaminación que vive El Carrasco, se lograron evidenciar que las enfermedades que padecían están relacionadas a alergias, rinitis, gripa, dengue, problemas de piel, bronquitis, entre otras enfermedades ocasionadas por los fuertes olores desagradables y gases nocivos que son emanados diariamente por el relleno sanitario. Además, se logró identificar la presencia de plagas (ratones, zancudos, gallinazos y moscas), las cuales están afectando con el derecho fundamental a contar con un ambiente sano y que les permita a los habitantes del barrio contar con una calidad de vida aceptable.” (Assaf & Assaf, 2012)

Este tipo de situaciones demuestra que el manejo inadecuado de los sitios de disposición final puede causar graves daños ambientales y sociales, centrándose en problemas socio-ambientales entre la población y los entes de control, que son los encargados de velar por el cumplimiento de las normas ambientales en el país; esta situación puede mejorar con la inclusión de nuevas técnicas amigables con el medio ambiente que representen una salida confiable al tratamiento de los residuos sólidos, la fotocatalisis heterogénea con TiO_2 ha sido evaluada en muchos campos, con resultados que incluyen la eliminación de contaminantes como el H_2S en el aire que es emanado en grandes cantidades por la descomposición de los residuos sólidos en los rellenos sanitarios (Portela, 2008). Otro de los beneficios radica en la eliminación de ácidos carboxílicos, aromáticos, alcanos, alcoholes, surfactantes, entre otros compuestos que son perjudiciales para la salud, además de la desinfección del agua mediante la desactivación de virus y bacterias. (Carbajo, 2013)

En definitiva una técnica que aprovecha la radiación UV como fuente principal de energía para realizar la fotocatalisis heterogénea con TiO_2 como catalizador para degradar contaminantes en los lixiviados, se convierte en una herramienta necesaria para operar adecuadamente los relleno sanitarios y evitar los problemas socio-ambientales, de esta manera se implementaría un sistema amigable con el medio ambiente que le permita a los habitantes de las zonas aledañas contar con un ambiente sano y libre de contaminantes que permitan mejorar la calidad de vida de todos los pobladores y mejorar las condiciones ambientales de toda la zona.

5.3.4 Viabilidad Económica.

La viabilidad económica de la implementación de un sistema de fotocatalisis heterogénea con catalizador de TiO_2 y radiación UV para tratar lixiviados, radica en la obtención de beneficios por parte de los operadores de los rellenos sanitarios y las comunidades que son afectadas por los problemas derivados de la contaminación generada en estos sitios. Los tratamientos fotocatalíticos necesitan de una fuerte inversión para colocar a operar un sistema de tratamiento que reduzca contaminantes en los lixiviados, el proyecto debe estar contemplado para su utilización In Situ, ya que de esta manera se puede monitorear el proceso en base a la cantidad de lixiviados producidos en el relleno sanitario, que características presenta, todos los contaminantes que puede albergar y la entrada y salida del sistema fotocatalítico con evaluación constante de rendimientos de remoción.

Durante el estudio de un proyecto que necesita de una inversión inicial, es necesario conocer si es económicamente viable, que se obtenga beneficio privado positivo y que tenga características socioambientales, que sea eficiente en cuanto a la cantidad de inversión involucrada y la recuperación financiera en aportes de individuos luego de la intervención. (Segura, 2015)

En el caso de los rellenos sanitarios es una inversión que necesitan los pobladores de las zonas aledañas al relleno y el medio ambiente, ya que son los más afectados por las diferentes fuentes de contaminación emanadas por la descomposición de los residuos sólidos; las empresas encargadas de manejar la disposición final de los residuos en las diferentes ciudades deben evaluar la viabilidad de implementar técnicas modernas en el tratamiento de los lixiviados, suspendiendo de esta manera los tratamientos convencionales que en algunos casos debido a manejos inadecuados generan daños al ambiente.

En octubre de 2018, en la ciudad de Bucaramanga en Santander se presentó una emergencia por infestación de malos olores en varios sectores de la ciudad, el problema surgió de un accidente presentado en horas de la madrugada en el relleno sanitario el Carrasco, en el cual se presentó un derrumbe en una de las celdas del relleno, la cual colapso cuando dos vehículos recolectores operaban descargando la basura y manejando el sistema convencional que se realiza en el relleno durante los últimos años, el incidente generó la liberación de una gran cantidad de gas sulfhídrico que presenta un olor desagradable y que tomaría alrededor de 48 horas en mitigar y eliminar los olores desagradables a los cuales quedó expuesta la población de los diferentes sectores afectados (El Tiempo, 2018).

El hecho presentado en el Carrasco es una muestra clara de que en algunos sitios de disposición final no cuentan con la tecnología acorde para el tratamiento de los residuos sólidos, la utilización de sistemas convencionales y manejos inapropiados por operadores que descuidan el tratamiento efectivo que deben tener los rellenos sanitarios pueden causar graves emergencias que tienden a afectar a las comunidades y al medio ambiente.

Los costos por el manejo de los residuos sólidos en los diferentes rellenos sanitarios en Colombia ascienden cada año debido al crecimiento demográfico del país y por la actitud consumista que presenta actualmente la sociedad. El tratamiento que se le da a los residuos en los rellenos sanitarios dependen de gastos de operación y de traslado, siendo este el más preocupante, ya que además de tratar los residuos sólidos en el relleno, estos deben ser trasladados por vehículos que se convierten en fuertes gastos de operación si se tiene en cuenta factores como la distancia que existe entre los rellenos sanitarios y los grandes centros poblados, la disminución o inexistencia de un control de reciclaje y el gasto en combustible y reparaciones a los cuales se exponen los diferentes vehículos (Melo, 2013).

El gasto de operación en los rellenos sanitarios es elevado, en la Tabla 14, se evidencian los costos anuales por la operación de algunos rellenos sanitarios ubicados en el Valle del Cauca. Los altos costos que genera el manejo de los residuos sólidos deben ser minimizados con la inclusión de una técnica novedosa que busque reducir los costos de operación del relleno y que brinde la seguridad de contar con un sistema de descontaminación acorde a las características del lugar y que permita contar con ambientes sanos.

Tabla 14. Costos anuales de la disposición de los residuos sólidos en el Departamento del Cauca.

Costo Anual de Disposición (Pesos)				
Municipio	Sitio de disposición final	Toneladas / año	Costo de disposición / Tonelada	Costo total de disposición
Popayán *	Estación de transferencia Palmaseca, Palmira Valle	66988	66279	\$ 4.439.897.652,00
Jamundí	Relleno sanitario Colomba – Guabal Yotoco Valle	18175	2246	\$ 386.146.050,00
Candelaria	Relleno sanitario Colomba – Guabal Yotoco Valle	15093	21246	\$ 320.665.878,00
Florida	Relleno sanitario Colomba – Guabal Yotoco Valle	10425	21246	\$ 221.489.550,00
Miranda	Estación de transferencia Palmaseca, Palmira Valle	2880	66279	\$ 190.883.520,00
Puerto Tejada **	“El cortijo”, Botadero a cielo abierto	9895	6064	\$ 60.003.280,00
Corinto	Relleno sanitario Colomba – Guabal Yotoco Valle	1850	21246	\$ 39.305.100,00
Villa Rica	Relleno sanitario Colomba – Guabal Yotoco Valle	1812	21246	\$ 38.497.752,00
COSTO TOTAL DE DISPOSICIÓN				\$ 5.696.888.782,00
% Popayán *				78%
% Resto				22%

Fuente. Melo, 2013.

*El costo establecido para Popayán es una proyección, ya que solo a partir del año 2013 ha iniciado su disposición en un nuevo sitio, por disposición de la autoridad ambiental CRC (Corporación Autónoma Regional del Cauca). ** El sitio de disposición final el Cortijo, es un botadero a cielo abierto.

La fotocatalisis heterogénea es una técnica novedosa que permite obtener grandes resultados en la degradación de compuestos orgánicos e inorgánicos; es un proceso que aligera costos gracias a la utilización de la radiación solar (UV) y es utilizada en diferentes campos.

La implementación de un sistema de fotocatalisis heterogénea permite reducir parte de los costos de operación de los rellenos sanitarios, en algunos casos cuando se presentan infiltraciones de lixiviados hacia las fuentes hídricas, los operadores deben realizar sistemas de contención y limpieza que generan más gastos y menos efectividad en el control ambiental de los rellenos.

Existen algunos estudios que contemplan los costos necesarios para implementar un sistema de fotocatalisis heterogénea y sus implicaciones ambientales y sociales. Varela, 2013, realizó un estudio completo para la implementación de un tratamiento fotocatalítico para tratar aguas residuales del sector textil en Bogotá y la compara con un tratamiento convencional. La comparación se realiza en base a la determinación de los Costos Anuales Equivalentes (CAE) y esta soportada en una propuesta preliminar para el diseño básico de un proceso fotocatalítico a nivel industrial, los resultados se evidencian en las Tablas 15 y 16, en las cuales se logra observar la viabilidad económica de implementar un proceso fotocatalítico.

Tabla 15. Costos Anuales Equivalentes para la implementación de una técnica avanzada de oxidación.

Costo Anual Equivalente Técnica de Oxidación Avanzada				
ITEM	Unidad	\$/Unidad	No. unidades /año	Total
Inversión				
	\$	\$ 43.000.000	1	\$ 43.000.000
Costos de administración				
	\$/mes	\$ 2.000.000	12	\$ 24.000.000
Costos de Producción				
Materia prima				
Peróxido de hidrogeno	Kg	\$ 2.050	134	\$ 274.700
Ácido clorhídrico	Kg	\$ 1.250	1737	\$ 2.171.250
Dióxido de Titanio	Kg	\$ 8.650	1586,96	\$ 13.727.174
Nitrato de Hierro	Kg	\$ 9.200	476,09	\$ 4.380.000
Agua destilada	Kg	\$ 1.100	15869,57	\$ 17.456.522
Mano de Obra				
	\$/mes	\$ 589.500	12	\$ 7.074.000
Mantenimiento				
	\$/año	\$ 600.000	12	\$ 7.200.000
Gastos energéticos				
	Kwh	\$ 250	2036,70	\$ 509.175
CAE (0,12) *				\$ 119.792.821

* La tasa del 12 % es el actual descuento para proyectos en Colombia.

Fuente. Varela Reyes, 2013.

Tabla 16. Costos Anuales Equivalentes para los tratamientos convencionales.

Costo Anual Equivalente Tratamiento Convencional				
ITEM	Unidad	\$/Unidad	No. unidades /año	Total
Inversión				
	\$	\$ 75.000.000	1	\$ 75.000.000
Costos de administración				
	\$/mes	\$ 2.000.000	12	\$ 24.000.000
Costos de Producción				
Materia prima				
Coagulante	Kg	\$ 1.400	730	\$ 1.022.000
Polímero floculante	Kg	\$ 19.150	10,22	\$ 195.713
Soda caustica	Kg	\$ 1.200	146	\$ 175.200
Mano de Obra				
	\$/mes	\$ 589.500	12	\$ 7.074.000
Mantenimiento				
	\$/año	\$ 1.300.000	12	\$ 15.600.000
Gastos energéticos				
	Kwh	\$ 250	4467,26	\$ 1.116.814
CAE (0,12) *				\$ 124.183.727

* La tasa del 12 % es el actual descuento para proyectos en Colombia.

Fuente. Varela Reyes, 2013.

La fotocatalisis heterogénea tiene propiedades que pueden ser aprovechadas eficientemente para el tratamiento adecuado de los lixiviados en los rellenos sanitarios, es cuestión de tiempo y esfuerzo que esta técnica se implemente en el país.

6. CONCLUSIONES.

Mediante el diagnóstico preliminar realizado sobre las generalidades de la producción de lixiviados en los rellenos sanitarios se evidenciaron problemas en diferentes rellenos del país, como lo son Doña Juana en Cundinamarca y El Carrasco en Santander, en los cuales se presentan problemas derivados por olores ofensivos y contaminación de fuentes hídricas aledañas, debido al manejo inadecuado de los lixiviados.

Los procesos de oxidación avanzada son eficaces en la remoción de agentes contaminantes presentes en los lixiviados, estos procesos se basan en técnicas que permiten generar variaciones en la composición química del contaminante, utilizando agentes oxidantes los cuales se producen por medios fotoquímicos y no fotoquímicos, siendo los fotoquímicos los que aprovechan considerablemente los beneficios de la radiación solar.

La fotocatalisis heterogénea con TiO_2 se convierte en una técnica adecuada para reducir contaminantes en los lixiviados, debido al aprovechamiento de la radiación solar que le genera la energía necesaria para activar los mecanismos de degradación, lo cual la hace sostenible con el medio ambiente.

La viabilidad técnica de la fotocatalisis heterogénea con TiO_2 , radica en la elección y preparación del catalizador para su interacción con la radiación UV que permita activar y generar la degradación de los contaminantes en los lixiviados.

La elección del catalizador Evonik-Degussa Aeroxide TiO_2 P25, conformado por un 80 % de anatasa y un 20 % de rutilo y con un área superficial de $45 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$, presenta grandes beneficios durante la fotocatalisis heterogénea, ya que presenta una energía de activación cercana a los 387 nm, la cual se encuentra dentro de las longitudes de onda $< 400 \text{ nm}$ que irradia la radiación UV.

La implementación de los colectores cilíndricos parabólicos compuestos (CPC) en la fotocatalisis heterogénea, permiten aprovechar la radiación solar directa y difusa, generando una optimización en la recolección de energía necesaria para activar los catalizadores y degradar los contaminantes en los lixiviados.

La viabilidad ambiental de la fotocatalisis heterogénea con TiO_2 , radica en la utilización de la radiación solar como fuente de energía, para producir los pares electrón-hueco que se encargan de degradar los compuestos orgánicos e inorgánicos presentes en los lixiviados, disminuyendo considerablemente el consumo de energía eléctrica.

Colombia presenta un alto potencial para la implementación de la fotocatalisis heterogénea, debido a su geografía ciertas zonas del país presentan altos índices de radiación UV y brillo solar, ciudades como Bucaramanga cuenta con índices de radiación global horizontal media diaria de (4,0 a 4,5 KWh/m²) y un índice ultravioleta máximo diario de 9 a 10 IUUV. (Atlas de radiación solar, 2019)

La viabilidad social de la fotocatalisis heterogénea con TiO₂, radica en el beneficio que trae consigo en las comunidades aledañas a los rellenos sanitarios durante la implementación de la técnica para remover lixiviados, evitando la proliferación de vectores y olores ofensivos que amenazan con la salud de los pobladores, además de evitar que los suelos y aguas utilizadas sean contaminadas.

La viabilidad económica de la fotocatalisis heterogénea, con catalizador de TiO₂ y radiación UV, comparada con los métodos convencionales utilizados actualmente para el tratamiento de lixiviados, resulta benéfica debido a que puede presentar costos de implementación, operación y mantenimiento más bajos.

7. RECOMENDACIONES.

Es importante realizar de manera preliminar un análisis fisicoquímico y microbiológico a los lixiviados que se generan en determinado relleno sanitario, con el objetivo de caracterizar los elementos y compuestos presentes en el mismo, e implementar a su vez los requerimientos técnicos necesarios para desarrollar la fotocatalisis heterogénea.

Es necesario que la operación del sistema de fotocatalisis heterogénea con TiO_2 sea operado y manejado por un equipo de trabajo adecuado, con el objetivo de realizar todas las actividades de manera técnica y profesional.

Se recomienda la implementación de la técnica de fotocatalisis heterogénea en zonas rurales, ya que se puede utilizar a mayor escala la radiación solar como fuente de generación de energía UV, para estimular el proceso de eliminación de la carga orgánica e inorgánica presente en los lixiviados.

Es necesario tener en cuenta mediante un análisis y evaluación final de la fotocatalisis heterogénea, el cumplimiento de estas con la normatividad ambiental vigente para los vertimientos tratados, determinando si los parámetros analizados se encuentran dentro de los rangos máximos permitidos por la resolución 0631 de 2015.

8. BIBLIOGRAFIA.

- Acevedo, A. (2015). Estudio de la fotocatalisis heterogénea solar para tratar un efluente contaminado con productos farmacéuticos: ibuprofeno, diclofenaco y sulfametoxazol. Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Química y Agroindustria. Recuperado de [<http://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/10366/3/CD-6165.pdf>]
- Alcaldía de Barrancabermeja. (2015). Plan de Desarrollo Barrancabermeja Incluyente, Humana y Productiva 2016 – 2019. Recuperado de: [<https://www.barrancabermeja.gov.co/institucional/pdm20162919/PLAN%20DE%20DESARROLLO%202016%20-%202019%20DEFINITIVO.pdf>]
- Alonso, J. A. (2008). MIOD. Un lugar para la ciencia y la tecnología. Recuperado de: [<http://www.madrimasd.org/blogs/remtavares/2008/01/16/82477>]
- Álvarez, J. (2015). Heterogeneous photocatalysis for the treatment of contaminants of emerging concern in water. Submitted to the Faculty of the Worcester Polytechnic Institute. Recuperado de: [<https://web.wpi.edu/Pubs/ETD/Available/etd-070915-001746/unrestricted/jalvarez.pdf>]
- Andreozzi, R., Caprio, V., Insola, A., & Marotta, R. (1999). Advanced oxidation processes (AOP) for water purification and recovery. *Catalysis Today*, Volume 53. p. 51-59.
- Anzola, P. (2015). Estudio del manejo de residuos sólidos en el relleno sanitario Doña Juana con el fin de delinear un borrador de propuesta para el manejo integral de residuos sólidos en la ciudad de Bogotá D.C. Universidad Colegio Mayor de Nuestra Señora del Rosario. Recuperado de <https://core.ac.uk/download/pdf/86441479.pdf>
- Assaf, K. S & Assaf, S. H. (2012). Sitio de disposición final de residuos sólidos El Carrasco y la afectación a derechos fundamentales y colectivos. Universidad Pontificia Bolivariana, Escuela de Derecho y Ciencias Políticas. Recuperado de: [https://repository.upb.edu.co/bitstream/handle/20.500.11912/2086/digital_24593.pdf?sequence=1]
- Atlas de Radiación Solar – IDEAM. (2019). Atlas de radiación solar, ultravioleta y ozono en Colombia. Recuperado de: [<http://atlas.ideam.gov.co/visorAtlasRadiacion.html>]
- Aznate, L., Cerro, O & Orozco, Á. (2013). Degradación por fotocatalisis homogénea (foto-Fenton) de efluentes líquidos contaminados con residuos de fenol. [Trabajo de grado: Ingeniería Química]. Universidad de Cartagena.

- Blanco, J., Malato, S., Estrada, C., Bandala, R., Gelover, S., & Leal, T. (2014). Purificación de aguas por fotocátalisis heterogénea: estado del arte. Recuperado de: [<https://www.psa.es/en/projects/solwater/files/CYTED01/08cap03.pdf>]
- Blanco, J., Malato, S., Peral, J., Sánchez, B., & Cardona, A. (2008). Diseño de reactores para fotocátalisis: evaluación comparativa de las distintas opciones. Recuperado de <https://www.cnea.gob.ar/xxi/ambiental/cyted/17cap11.pdf>
- Candal, R. J., Rodríguez, J & Colón, G. (2005). Materiales para fotocátalisis y electrofotocatálisis. In: Argentina: CONICET.
- Canón, L. F & Pedroza, S. P. (2016). Evaluación del potencial de la fotocátalisis mediante técnicas de radiación y compuestos foto-oxidantes, como alternativa de la potabilización de aguas en zonas rurales. Universidad Santo Tomás, Facultad de Ingeniería Ambiental. Recuperado de: [<https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/2849/Pedrozasilvia2016.pdf?sequence=1&isAllowed=y>]
- Carbajo, J. (2013). Aplicación de la fotocátalisis solar a la degradación de contaminantes orgánicos en fase acuosa con catalizadores nanoestructurados de TiO₂. Tesis doctoral, Instituto de Catálisis y Petroleoquímica (CSIC), Madrid. Recuperado de: [http://digital.csic.es/bitstream/10261/100081/1/Carbajo%20Olleros%2C%20J.%20_Tesis_2013.pdf]
- Chio, J. C. (2016). “Nueva planta de lixiviados de El Carrasco es la más eficiente del país”: Emab. Recuperado de: [<http://www.vanguardia.com/area-metropolitana/bucaramanga/350187-nueva-planta-de-lixiviados-de-el-carrasco-es-la-mas-eficiente->]
- Collazos, H. (2013). Diseño y Operación de Rellenos Sanitarios. Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería. Bogotá D.C. p. 73.
- Contraloría de Bucaramanga. (2008). Control de advertencia 121.42.6.13.00. Recuperado de: [<http://www.contraloriabga.gov.co/portal/descargas/CONTROLES%20DE%20ADVERTENCIA%202008/control%20de%20advertencia%20No%206.pdf>.]
- Contreras. (2006). Manejo integral de aspectos ambientales – Residuos Sólidos. Diplomado en gestión ambiental empresarial para funcionarios de ETB.pontifica Universidad Javeriana Bogotá. p. 26

- Cubillo, P.E. (2005). Ubicación del nuevo relleno sanitario en base a criterios ambientales, socioeconómicos y técnicos, en la ciudad de Quero, Cantón Quero provincia del Tungurahua. Tesis de grado. Facultad de ingeniería geográfica y del medio ambiente. Escuela Politécnica del Ejército. p.12-13.
- Diamond, A. (2009). El colapso de la basura en Bolivia. Revista Virtual Época Ecológica. p. 2-3.
- Domènech, X., Jardim, W & y Litter, M. (2004). Procesos avanzados de oxidación para la eliminación de contaminantes. p.17-24. Recuperado de:
[[https://www.researchgate.net/publication/237764122_Procesos_avanzados_de_oxidacion_para_la_eliminacion_de_contaminantes](https://www.researchgate.net/publication/237764122_Procesos_avanzados_de_oxidacion_para_la Eliminacion_de_contaminantes)]
- El Tiempo. (2018). Bucaramanga tendrá 48 horas de malos olores por derrumbe en basurero. Columna presentada por Bucaramanga en el periódico. Recuperado de:
[<https://www.eltiempo.com/colombia/otras-ciudades/bucaramanga-infestada-de-malos-olores-por-derrumbe-en-el-carrasco-276488>]
- El Tiempo. (2018). Los cuatro rellenos en crisis que pueden causar emergencia sanitaria. Publicado por Milena Sarralde Duque.
- EMAB, Empresa de Aseo de Bucaramanga. (2009). Recuperado de:
[<http://emabesp.com/descargas/Disposicionfinal.pdf>.]
- Environmental Protection Agency - EPA. (1998). Handbook, “Advanced photochemical oxidation processes”. Office of Research and Development Washington.
- Espinosa, C., López, M., Pellón, A., Fernández, L., Hernández, C & Bataller, M. (2007). Lixiviados de vertederos de residuos sólidos urbanos. Centro de investigaciones del ozono. Centro de investigaciones científicas. p.3-5.
- Garcés Giraldo, L., Mejía Franco, E., & Santamaría Arango, J. (2004). La fotocatalisis como alternativa para el tratamiento de aguas residuales. Revista Lasallista de Investigación, Vol. 1, No. 1, pp. 83 – 92. Recuperado de:
[<http://lasallista.edu.co/fxcul/media/pdf/Revista/Vol1n1/08392%20La%20fotocat%20C3%A1lisis%20como%20alternativa%20para%20el%20tratamiento.pdf>]
- Gil, E. (2002). Fotocatalisis: una alternativa viable para la eliminación de compuestos orgánicos. Revista Académica Universidad EAFIT, Vol. 38, No. 127, pp 59 – 64. Recuperado de: [<http://publicaciones.eafit.edu.co/index.php/revista-universidad-eafit/article/view/931/836>]

- Giraldo, A & Marroquín, V. (2014). Síntesis y refinamiento de la estructura de dióxido de titanio dopada con cromo (Ti_{1-x}Cr_xO₂). Trabajo de grado: Química Industrial. Universidad Tecnológica de Pereira.
- Guamán, F. (2005). Manejo de Residuos Sólidos Domiciliarios. Perú: Centro Guamán Poma de Ayala.
- Hermann, J. (2005). Destrucción de contaminantes orgánicos por Fotocatálisis Heterogénea. Tecnologías solares para la desinfección y descontaminación del agua. *Solar Safe Water*, pp. 147 – 164. Recuperado de: [https://www.psa.es/es/projects/solarsafewater/documents/libro/10_Capitulo_10.pdf]
- Hernández, A., Fresno, F., Suárez, S., & Coronado, J. (2009). Development of alternative photocatalysts to TiO₂: challenges and opportunities. *Energy & Environmental Science*, vol. (2), No. 12. p. 121 – 125.
- Hidritec. (2011). Tratamiento de agua potable con ozono. Recuperado de: [<http://www.hidritec.com/hidritec/tratamiento-de-agua-potable-con-ozono>]
- Hincapié, G., Ocampo, D., Restrepo, G & Marín, J. (2011). Fotocatálisis heterogénea y foto-fenton aplicadas al tratamiento de aguas de lavado de la producción de biodiesel. *Información Tecnológica*. Vol. 22(2), pp. 33 – 42. Recuperado de: [https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-07642011000200005]
- Hirales, D. (2009). Evaluación del desempeño fotocatalítico de materiales sol – gel TiO₂/clinoptilolita en la degradación de cianuro. Biblioteca Digital de Sonora. Recuperado de: [<http://www.bidi.uson.mx/tesisindice.aspx?tesis=20848>]
- Holguín, Ó & Puertas, G. (2006). Proyecto de desarrollo e implementación de un plan de marketing para la concienciación del reciclaje en colegios particulares del cantón Guayaquil. Guayaquil, Ecuador: Escuela Superior Politécnica del Litoral. p.25-29.
- Hoornweg, D. y Bhada-Tata, P. (2012). What a waste. A Global Review of Solid Waste Management. Washington: World Bank. Recuperado de: [http://www.prepare-net.com/sites/default/files/what_a_waste2012_final.pdf]
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM. (2019). Atlas de radiación solar, ultravioleta y ozono de Colombia. Recuperado de: [<http://atlas.ideam.gov.co/basefiles/5.Aspectos-teoricos.pdf>]

- Jaramillo, J. (2002). Guía para el Diseño Construcción y Operación de Rellenos Sanitarios Manuales. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente. p. 22. Recuperado de: [http://ambiente.lapampa.gob.ar/images/stories/Imagenes/Archivos/Guia.pdf]
- Jaramillo, L & Zapata, L. (2008). Aprovechamiento de los residuos sólidos orgánicos en Colombia. Universidad de Antioquia. Facultad de ingeniería posgrados de ambiental. Tesis de grado especialistas en gestión ambiental. p.25.
- Jayant, D & Aniruddha, P. (2009). Simple method of measuring the Band Gap Energy value of TiO₂ using a UV/Vis/NIR spectrometer, Shelton. USA: PerkinElmer.
- 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.
- Kang, K., Shin, H.S., Park, H. (2002). Characterization of humic substances present in landfill leachates with different landfill ages and its implications. Water Res. 36. p. 4023- 4032.
- Kazuya, N. & Akira, F. (2012). TiO₂ photocatalysis: Design and applications. Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews, Volume 13, pp. 169-189.
- Kheradmand, S., Karimi-Jashni, A & Sartaj, M. (2010). Treatment of municipal landfill leachate using a combined anaerobic digester and activated sludge system. Waste Manag. 30. p 1025-1031.
- Kiss, G & Aguilar. (2006). Los productos y los impactos de la descomposición de residuos sólidos en los sitios de disposición final. P. 42-44.
- Leite, M & Peinado, M.J. (2006). Manual de Gestión Integrada de Residuos Sólidos Municipales en ciudades de América Latina y el Caribe. Ed. IBAM-IDRC. Río de Janeiro. p.261.
- López, L., Daoud, W., & Dutta, D. (2010). Preparation of large scale photocatalytic TiO₂ films by the sol-gel process. Surface & Coatings Technology. p. 251 – 257.
- Makyu, J. (2017). Problemática de basuras en el Relleno Sanitario Doña Juana. Revista Semilleros, Vol. 2, No. (1), pp 1- 9. Recuperado de: [http://www.unihorizonte.edu.co/revistas/semilleros/vol/Vol_2_Nro_1_2017/1/Impacto_Ambiental_Centro_de_Acopio_DONA_JUANA.pdf]

- Malato, S., Blanco, J., Maldonado, R., & Fernández, P. (2004). Engineering of solar photocatalytic collectors. *Solar Energy*, vol. (77), No. 5. p. 513 - 524.
- Maldonado Rubio, M., Suárez Gil, S., & Miranda García, N. (2015). Degradación de contaminantes emergentes mediante TiO₂ inmovilizado e irradiación solar. Recuperado de: [https://www.psa.es/es/areas/tsa/docs/Tesis_Noelia_Miranda.pdf]
- Maldonado, J. (2005). Rellenos Sanitarios. Guía Ambiental. Ministerio del Medio ambiente y Desarrollo Territorial. p. 16- 22.
- Melo, C., I. (2013). Análisis de viabilidad económica y financiera de una planta de tratamiento de residuos sólidos en el Departamento del Cauca. Universidad EAN Bogotá. Recuperado de: [<file:///C:/Users/AGANA4/Downloads/MeloCesar2013.pdf>]
- Méndez, F., Gómez, O., Girón, S., Mateus, J., Mosquera, J., Filigrana, P., Gómez, R., Ocampo, C., Guloso, L. (2006). Evaluación del impacto del relleno sanitario Doña Juana en la salud de grupos poblacionales en su área de influencia. Recuperado de: [[http://www.cerrarelbotadero.org/inicio/archivos/Estudio EpidemiologicoRSDJ.pdf](http://www.cerrarelbotadero.org/inicio/archivos/Estudio_EpidemiologicoRSDJ.pdf). Último acceso noviembre 5 de 2010]
- Miranda, N., Suárez, S., & Maldonado, M. (2015). Degradación de contaminantes emergentes mediante TiO₂ inmovilizado e irradiación solar. Recuperado de: [https://www.psa.es/es/areas/tsa/docs/Tesis_Noelia_Miranda.pdf]
- Moncada, V. F. (2017). Diseño de un sistema de tratamiento de lixiviados de residuos sólidos mediante oxidación fotocatalítica. Universidad Carlos III de Madrid. Escuela Politécnica Superior, Departamento de Ingeniería Térmica y fluidos. Recuperado de: [https://earchivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/27603/TFG_Victor_Florindo_Moncada.pdf]
- Mutzhaz, M., Hölzle, E., Hofmann, C., & Plewig, G. (1981). A new apparatus with high radiation energy between (320 – 460 nm): physical description and dermatological applications. *Journal of Investigative Dermatology*, vol. (76), No. 1. p. 42 – 47.
- Niño Carvajal, L., Ramón Valencia, J., & Ramón Valencia, L. (2016). Contaminación fisicoquímica de acuíferos por lixiviados generados del relleno sanitario El Carrasco, de Bucaramanga. *Producción + Limpia*. Vol. 1, (11), No. 1, pp. 66 – 74. Recuperado de: [<http://www.scielo.org.co/pdf/pml/v11n1/v11n1a07.pdf>]

- Nosaka, Y., Yamashita, Y., & Fukuyama, H. (1997). Application of chemiluminescent probe to monitoring superoxide radicals and hydrogen peroxide in TiO₂ photocatalysis. *The Journal of Physical Chemistry B*, vol. (101), No. 30. p. 5822 – 5827.
- Pastor, J. (2001). Vertederos controlados problemática de los lixiviados. En *La naturaleza de los residuos y los lixiviados: Contribución a la educación ambiental: el problema de los residuos urbanos*. Madrid, España. p. 58.
- Patiño., Arroyave & Marín. (2011). *Oxidación Electroquímica y Ozonización Aplicadas al Tratamiento de Aguas de Lavado de la Producción de Biodiesel*. Medellín: Universidad de Antioquia.
- Paxéus, N. (2000). Organic compounds in municipal landfill leachate. *Water Science and Technology*. p. 323-333.
- Pelayo, D. (2018). *Procesos de oxidación avanzada: avances recientes y tendencias futuras*. Escuela técnica superior de ingenieros industriales y de telecomunicación. Universidad de Cantabria. Tesis de grado. p. 16.
- Peralta, D & Velepucha, A. (2011). *Propuesta de Gestión de los Residuos Sólidos en la ciudadela universitaria Guillermo Falconí Espinosa*. Loja, Ecuador: Universidad Nacional de Loja. p. 12-14.
- Pérez, A. (2017). Colombia genera 12 millones de toneladas de basura y solo recicla el 17%. *Revista Dinero*. Recuperado de: [<https://www.dinero.com/edicion-impresa/pais/articulo/cuanta-basura-genera-colombia-y-cuanta-recicla/249270>]
- Periódico el Tiempo. (2017). *Montañas de basura en Colombia: el estado de los rellenos sanitarios*. Galería. Recuperado de: [<https://www.eltiempo.com/colombia/otras-ciudades/estado-actual-de-los-rellenos-sanitarios-en-colombia-142736>]
- Piedra, A. (2012). *Caracterización Biológica de los residuos sólidos*. Recuperado de: [<https://es.slideshare.net/aniambiental/121-residuos-slidos>]
- Pinzón, F., Hoyos, M & Ramírez, J. (2011). *Informe nacional generación y manejo de residuos o desechos peligrosos en Colombia- año 2011*. Subdirección de estudios ambientales – IDEAM. p.18.
- Portela, R. (2008). *Eliminación fotocatalítica de H₂S en aire mediante TiO₂ soportado sobre sustratos transparentes en el UV-A*. Tesis doctoral, Universidad de Santiago de

Compostela. Recuperado de:
[https://www.psa.es/es/areas/tsa/docs/Tesis_Raquel_Portela.pdf]

Primo, O. (2008). Mejoras en el tratamiento de lixiviados de vertedero de RSU mediante procesos de oxidación avanzada. Departamento de Ingeniería Química y Química Inorgánica. Universidad de Cantabria. Recuperado de:
[<https://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/10692/1de8.OPMcap.1.pdf?sequence=2&isAllowed=y>]

Quintero, A., Valencia, Y., & Lara, L. (2017). Efecto de los lixiviados de residuos sólidos en un suelo tropical. Recuperado de:
[<https://www.redalyc.org/jatsRepo/496/49655603036/html/index.html>]

Ramírez-Sosa, D.R., Castillo-Borges, E.R., Méndez-Novelo, R.I., Sauri-Riancho, M.R., Barceló-Quintal, M & Marrufo-Gómez, J.M. (2013). Determination of organic compounds in landfill leachates treated by Fenton-Adsorption. Waste Manag. 33. p. 390-395.

RAS. (2005). Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico – RAS. TÍTULO F Sistemas de Aseo Urbano. p.49-50.

Renou, S., Givaudan, J.G., Poulain, S., Dirassouyan, F., Moulin, P. (2008). Landfill leachate treatment: Review and opportunity. J. Hazard Mat.150. p. 468-493.
residuos.htm]

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.

Ripoll, A. G. (2008). Aumento de biodegradabilidad y eliminación de plaguicidas en efluentes acuosos mediante métodos de oxidación avanzada. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia. p. 12.

Röben, E. (2002). Diseño, Construcción, Operación y Cierre de Rellenos Sanitarios Municipales. Loja, Ecuador. p. 36.

Romero, M. (2003). Tratamiento Fotocatalítico de aguas residuales utilizando TiO₂ como catalizador. Poza Rica, Veracruz: Instituto Tecnológico de Ciudad Madero.

Sarralde, M. (2018). Los cuatro rellenos en crisis que pueden causar emergencia sanitaria. Periódico El Tiempo.

- Segura, J., C. (2015). Viabilidad económica, social y financiera de proyectos urbanos frente al desarrollo territorial. *Dimensión Empresarial*, Vol. 13, No. 2, pp. 55 – 74.
Recuperado de: [<http://www.scielo.org.co/pdf/diem/v13n2/v13n2a04.pdf>]
- Shouliang, H., Beidou, X., Haichan, Y., Liansheng, H., Shilei, F., Hongliang, L. (2008). Characteristics of dissolved organic matter (DOM) in leachate with different landfill ages. *J. Environ. Sci.* p. 492.
- Siegrist, H., Renggli, D. & Gujer, W. (1993). Mathematical modelling of anaerobic mesophilic sewage treatment. *Water Science and Technology.* p. 25-36.
- Silvestrini, M & Vargas, J. (2008). Fuentes de información primaria, secundaria y terciaria. p. 2-3. Recuperado de: [<https://ponce.inter.edu/cai/manuales/FUENTES-PRIMARIA.pdf>]
- Sirtori, C. (2010). Evaluación analítica de procesos de transformación biológica, fotoquímica y fotocatalítica de fármacos en agua. [Tesis doctoral]. Universidad de Almería. p. 15-22.
- SSPD, Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios. (2008 b). Evaluación Integral a empresa: CARIBE VERDE S.A.E.S.P. recuperado de [http://www.superservicios.gov.co/c/document_library/get_file?folderId=65121&name=DLFE-5715.pdf.]
- SSPD, Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios. (2008 a). Situación de la disposición final de residuos sólidos en Colombia.
- Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios. (2017). Informe de Nacional de aprovechamiento – 2016. Bogotá D.C. p.65
- Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios. (2018). Informe de Disposición Final de Residuos Sólidos – 2017. Bogotá D.C. p.21, 33.
- Tang, H., Berger, H., Schmid, P., Levy, F., & Burri, G. (1993). Photoluminescence in TiO₂ anatase single crystals. *Solid State Communications*, vol. (87), No. 9., pp. 847 – 850.
- 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.

- Torri, SI. (2017). ¿Qué es un relleno sanitario? Publicación on-line del Centro de Estudios y Desarrollo de Políticas Públicas, CECePP. Recuperado de: [http://cedepp.org.ar/?p=381]
- Unidad de Planeación Minero-Energética - UPME. (2005). Características de la radiación solar, radiación solar. Recuperado de: [http://www.upme.gov.co/docs/atlas_radiacion_solar/8-apendice_b.pdf]
- Universidad del Norte. (2012). Avanzan en la implementación de plantas de energía solar., de Universidad en Colombia. Recuperado de: [http://noticias.universia.net.co/en-155portada/noticia/2012/07/03/947980/avanzan-implementacion-plantasenergia-solar.html]
- Vanselaar J. (2003). Sustainable growth and chemical engineering. *Chemical Engineering and Technology*. V. (26), pp. 868 – 874. Recuperado de: [https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/ceat.200310010]
- Varela, D. J. (2013). Evaluación de la viabilidad técnica y de costos de la aplicación de un proceso avanzado de oxidación fotocatalítico en el tratamiento de aguas residuales del sector textil de Bogotá. Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ingeniería. Recuperado de: [http://bdigital.unal.edu.co/45620/1/53154918.2013.pdf]
- Vázquez, E. (2001). Cuantificación y efectos de la producción de lixiviados en el Relleno Sanitario de Salinas Victoria, N. Tesis de grado. Universidad Autónoma de Nuevo León. p. 23–25.
- Veras, M. A. (2004). Alternativas para Cuidar el Medio Ambiente. Generación de residuos sólidos urbanos. *Revista*. Recuperado de: [http://consultoriaempresariamaslimpias.blogspot.com/2014/10/generacion-de-residuos-solidos-urbanos.html]
- Wolf, M. (2009). Ecológicamente Correcto. Recuperado de: [http://ecologicamentecorrecto.blogspot.com/2009/11/descomposicion-de-los-
- Yañez, S. (2013). Estudio de Impacto Ambiental para la construcción del relleno sanitario para el municipio de San Vicente del Caguán – Caquetá. Tesis de grado. Universidad Militar Nueva Granda. p. 13-15.
- Zamorano, M., Garrido, E., Moreno, B., Paolini A & Ramos, A. (2007). Description of the methodology EVIAVE for the environmental diagnosis of municipal waste landfills. *J Sustain Dev and Plan* 2007. p.14

Ziyang, L., Youcai, Z., Tao, Y., Yu, S., Huili, C & Nanwen, Z. (2009). Natural attenuation and characterization of contaminants composition in landfill leachate under different disposing ages. *Sci. Total Environmental*. 407. p. 3385-3391.