

PROCESOS AVANZADOS DE OXIDACIÓN

# **PRESENCIA DE CONTAMINANTES EMERGENTES EN FUENTES HÍDRICAS Y TRATAMIENTOS POTENCIALES PARA SU ELIMINACIÓN**

## **PRESENCE OF EMERGING POLLUTANTS IN WATER SOURCES AND POTENTIAL TREATMENTS FOR THEIR DISPOSAL**

Leidy Carolina Jaimes Arias  
Químico Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales -UDCA  
Universidad Militar  
Bogotá, Colombia.

U2701007@unimilitar.edu.co

### **Artículo de Investigación**

#### **DIRECTOR**

**Ph.D. Ximena Lucía Pedraza Nájar**

Doctora en Administración – Universidad de Celaya (México)  
Magíster en Calidad y Gestión Integral – Universidad Santo Tomás e Icontec  
Especialista en gestión de la producción, la calidad y la tecnología - Universidad Politécnica  
de Madrid (España)  
Especialista en gerencia de procesos, calidad e innovación – Universidad EAN (Bogotá D.C.)  
Microbióloga Industrial – Pontificia Universidad Javeriana  
Auditor de certificación: sistemas de gestión y de producto  
  
Gestora Especialización en Gerencia de la Calidad - Universidad Militar Nueva Granada  
ximena.pedraza@unimilitar.edu.co; gerencia.calidad@unimilitar.edu.co



**ESPECIALIZACIÓN EN PLANEACIÓN AMBIENTAL Y MANEJO DE RECURSOS  
NATURALES  
UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
MAYO DE 2020**

# **PRESENCIA DE CONTAMINANTES EMERGENTES EN FUENTES HÍDRICAS Y TRATAMIENTOS POTENCIALES PARA SU ELIMINACIÓN**

## **PRESENCE OF EMERGING CONTAMINANTS IN WATER SOURCES AND POTENTIAL TREATMENTS FOR THEIR DISPOSAL**

Leidy Carolina Jaimes Arias  
Químico Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales -UDCA  
Universidad Militar  
Bogotá, Colombia.  
U2701007@unimilitar.edu.co

### **RESUMEN**

Los contaminantes emergentes (CE) se han estudiado por su alta incidencia en diferentes entornos, incluido el acuático, sin embargo, en el contexto de los países en desarrollo, la información sobre su ocurrencia, magnitud y amenaza potencial es escasa. El presente artículo tuvo como objetivo hacer una revisión bibliográfica sobre los principales contaminantes en fuentes hídricas, teniendo como base las principales industrias generadoras y clases de sustancias, normatividad vigente a nivel nacional y alternativas para su eliminación basados en los Procesos Avanzados de Oxidación (PAOs). Fundamentado en la generación de radicales hidroxilos eficientes para tratar compuestos recalcitrantes, que difícilmente podrían ser eliminados por tratamientos convencionales.

**Palabras clave:** Procesos Avanzados de Oxidación, medio ambiente, contaminantes emergentes (CE).

### **ABSTRACT**

Emerging contaminants (CE) have been studied for their high incidence in different environments, including aquatic, however, in the context of developing countries, information on their occurrence, magnitude and potential threat is scarce. The objective of this article is to make a bibliographic review of the main pollutants in water sources, based on the main generating industries and classes of substances, current national regulations and alternatives for their elimination in Advanced Oxidation Processes (PAOs). Based on the generation of efficient hydroxyl radicals to treat recalcitrant compounds, which can hardly be eliminated by conventional treatments.

**Keywords:** Advanced processes of oxidation (PAOs), environment, emerging contaminants (CE).

## PROCESOS AVANZADOS DE OXIDACIÓN

### INTRODUCCIÓN

La creciente industrialización ha mejorado el desarrollo económico y social, pero desafortunadamente ha incrementado los índices de contaminación y el vertimiento de residuos al medio ambiente (Jaimes, 2016, p.12).

Pese a los avances en el desarrollo de nuevas tecnologías hay vertimientos que no se eliminan efectivamente, siendo la alta concentración en la que dichas sustancias se encuentran y su naturaleza química las principales causas de bajos rendimientos en la remoción y/o degradación (Jaimes, 2016, p. 12).

En Colombia se encuentran disposiciones y parámetros exigibles a todas las actividades productivas que generan vertimientos de aguas superficiales y/o alcantarillado. No obstante, los altos índices de contaminación derivan de las principales industrias que mantienen la economía del país; resaltando la industria del petróleo, farmacéutica, minería, licores, papel, producción de sustancias químicas, metalurgia, cemento, vidrio, textiles, azúcar, perfumes y jabones (O'Neil, William Maurer, Martin Polanía, Doris, 1992).

Sustancias como metales pesados son de gran interés por su alta toxicidad y la capacidad de bioacumulación en el organismo. Algunos de los agentes más contaminantes son el arsénico, el plomo y el mercurio (Durán,2016). Actualmente en Colombia, los valores máximos aceptables de arsénico y plomo son 0.01 mg/L y mercurio 0.001 mg/L en agua de consumo humano (Ministerio de Protección Social, Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2007).

El mercurio presente en las aguas proviene principalmente de la minería de oro, plata, industria de la pulpa, papel y pintura. Para el caso de Colombia, se encontraron valores alarmantes de mercurio por arriba de 0.17 mg/kg en sitios con actividad industrial y minera,

## PROCESOS AVANZADOS DE OXIDACIÓN

principalmente de extracción de oro (Idrovo, A., Hurtado, N., Blanco, L., Bermúdez, J., & Jaimes, D., 2012), p, 87).

El cromo proviene principalmente de la industria del cuero y cromado. Este metal disminuye la cantidad de oxígeno y provoca daños a la salud al ser cancerígeno y generar mutaciones en las células (Esparza & Gamboa, 2001).

En el sector cafetero algunos estudios muestran presencia de fenoles totales en el intervalo de 1129 a 2582 mg, el resultado se reportó como mg equivalentes de ácido gálico por gramo de café (EAG/ g café) (Fonseca, García, L., Calderón, Jaimes, L. S., & Rivera, M. E.2014).

Otros contaminantes de gran preocupación son los plaguicidas, tres de los principales grupos están asociados a enfermedades como el cáncer e infertilidad: Organoclorados, organofosforados y carbamatos. Aunque contribuyen efectivamente al sistema agrícola, su baja biodegradabilidad y el crecimiento poblacional ha generado la contaminación en el medio ambiente y problemáticas alimentarias; conllevando a la permanencia de los residuos en las fuentes hídricas, suelo, aire y vegetales, que posteriormente llegan al ser humano ( Hiago de O. Gómez , Jorge Marcell C. Menezes, José Galberto M. da Costa, Henrique Douglas M. Coutinho,, Raimundo Nonato P. Teixeira, Ronaldo F. do Nascimento, 2020).

En consecuencia, existe la necesidad de implementar alternativas que permitan la descontaminación de efluentes, que conlleven al cumplimiento de la normatividad y disminución de los impactos ambientales. Acorde a lo mencionado, es de vital importancia determinar los principales contaminantes y alternativas de tratamiento que permitan mejorar los criterios de calidad del agua, contemplando el factor social, económico y ambiental.

## PROCESOS AVANZADOS DE OXIDACIÓN

A continuación, se desarrolla el capítulo de materiales y métodos donde se describe la metodología de investigación y el marco teórico basado en los principales (CE) y posibles tratamientos para su eliminación, como alternativas que disminuyan la presencia de contaminantes en las fuentes hídricas.

### MATERIALES Y MÉTODOS

Una revisión sistemática requiere de una secuencia de localizar, analizar, ordenar, contar y evaluar bibliografía de fuentes definidas a través de un período de tiempo (Tranfield; Denyer; Smart, 2003). Esta revisión propone la exploración y análisis de datos asociados a la presencia de contaminantes y metodologías para su eliminación, teniendo en cuenta tres etapas para su búsqueda e interpretación:

- Etapa investigativa: Elección de la fuente de información y selección de datos de la muestra.
- Etapa desarrollo de estudio: Se establecerán principales contaminantes teniendo a consideración el efecto en las fuentes hídricas, normatividad y mejores alternativas de tratamiento que disminuyan el deterioro de calidad del agua.
- Etapa de análisis: Respuesta a la problemática planteada en la investigación.

El proceso de búsqueda se realizó desde febrero a mayo de 2020, partiendo de una búsqueda exploratoria, mediante el termino equivalente a “Contaminantes Emergentes” en bases de datos internaciones especializadas en el ámbito de investigación ambiental, seleccionando como fuente principal *ScienceDirect* y *Scopus* y estudios a nivel nacional asociados a la normatividad legal, artículos de referencia y panorama nacional de sustancias químicas. Se escogieron aquellos artículos con el objeto de investigación con base científica, como resultado de todo el proceso se obtuvo una muestra de 28 artículos y 8 documentos entre normatividad legal, tesis, libros y diagnósticos ambientales a nivel nacional.

## PROCESOS AVANZADOS DE OXIDACIÓN

Los documentos seleccionados fueron analizados sistemáticamente a fin de determinar las líneas de investigación, para ello se realizaron dos fases de lectura, una primera de la que se extrajeron tipos de contaminantes, industrias generadoras y normatividad vigente y una segunda en la que se analizaron los tipos de tratamiento contemplando, diferentes PAOs, resultados obtenidos y conclusiones.

### **Contaminantes Emergentes del Agua**

El término contaminante emergente (CE) hace referencia a compuestos de distinta naturaleza química y difícil degradación por métodos convencionales. De esta manera se ha identificado su ingreso a través de fuentes, como aguas residuales domésticas y no domésticas, residuos de plantas de tratamiento como lodos, residuos hospitalarios, actividades agrícolas e industriales como la farmacéutica, motivo de preocupación ya que las plantas de tratamiento convencionales no están diseñadas para eliminarlos (Gil, Soto, Usma, & Gutiérrez, 2012).

Adicionalmente, algunos contaminantes no tienen alguna regulación que determine las concentraciones máximas permisibles en el ambiente. Sin embargo, el avance tecnológico y la demanda de recursos naturales ha conllevado a su cuantificación en las diferentes matrices como agua, suelo y aire, siendo reconocidos como contaminantes peligrosos que pueden producir efectos en la salud humana y el medio ambiente (Kitamura et al., 2005).

La literatura indica que los contaminantes trazas y los CE pertenecen a tres grupos; 1) industrial, 2) pesticidas y 3) farmacéuticos y de cuidado personal. La lista de contaminantes incluye sustancias bioacumulables y tóxicas; tales como fenoles, perfluorados, difenileteres polibromados (PBDE), ftalatos, carbamatos, organofósforados, analgésicos, hormonas sintéticas, etc, (Murray, Thomas, & Bodour, 2010b). Adicionalmente, los riesgos no están aún disponibles para la mayoría de estos contaminantes. No obstante, los estudios indican las alteraciones en el

## PROCESOS AVANZADOS DE OXIDACIÓN

sistema endocrino, perturbaciones hormonales, resistencia microbiana, disminución de fertilidad e incidencia de diferentes tipos de cáncer (Clemente, Chica Arrieta, & Peñuela Mesa, 2013), las tablas 1 y 2 muestran los principales contaminantes y sus efectos.

Tabla 1

### *Contaminantes Emergentes*

<b>Clase de Compuesto</b>	<b>Ejemplo</b>
Fármacos	Paracetamol, carbamazepina,
Esteroides y hormonas	Estradiol, estrona, estriol
Drogas de abuso	Anfetamina, cocaína, tetrahidrocanabinol.
Fragancias	Almizcles policíclicos, macrocíclicos.
Filtros solares	3-Benzofenona, ácido octildimetil-p-aminobenzoico
Antioxidantes y conservantes	Fenoles y parabenos
Insecticidas y repelentes	Piretroides, N, N-Dietil-meta-toluamida
Biocidas	Triclosán y clorofeno.
Detergentes, tensoactivos	Alquilfenoles y derivados
Retardantes de llama	Éteres difenilo polibromado, Ésteres organofósforados.
Plastificantes	Ftalatos, bisfenol A, ácido perfluorooctanoico.
Aditivos y agentes industriales	Agentes quelantes, sulfonatos aromáticos, benzotriazoles.
Aditivos de la gasolina	Éteres de dialquilo, metil-ter-butil éter (MTBE)
Subproductos de desinfección	Bromoaldehidos, cianoformaldehido.

La tabla 1 recoge los principales Contaminantes Emergentes. Fuente: (Rodríguez, 2015)

Tabla 2

### *Efectos de las sustancias químicas*

<b>Sustancias Químicas</b>	<b>Aplicaciones</b>	<b>Efectos sobre la salud</b>
Fármacos y drogas de abuso	Esteroides y anticonceptivos	Feminización de machos <sup>a</sup> .
Aditivos industriales	Antibióticos(sulfonamidas, penicilina, tetraciclinas, etc.)	Resistencia microbiana. Alteración de la cadena trófica <sup>a</sup> .
	Bisfenol-A (fabricación de plásticos)	Actividad estrogénica en ratas y hormonal en seres humanos. Aumento del riesgo de cáncer de mama <sup>a</sup> . Agente anti-andrógeno. Provoca feminización en machos <sup>a</sup> .
	Ftalatos (fabricación de plásticos, juguetes para bebés y suelos)	Alteraciones en el embarazo y abortos involuntarios <sup>a</sup> .
	Alquilfenoles (fabricación de detergentes)	Alteraciones en el desarrollo del proceso reproductivo <sup>a</sup> .

## PROCESOS AVANZADOS DE OXIDACIÓN

Productos de higiene y cuidado personal	Fragancias con almizcle	Poder cancerígeno en roedores <sup>a</sup> .
	Parabenos (agentes bactericidas y antifúngicos en comidas y cosméticos)	Actividad estrogénica <sup>a</sup> .
	Desinfectantes y antisépticos (fabricación de pastas de dientes, jabón de manos y cremas para el acné; ej. triclosan)	Resistencia microbiana y biocida <sup>a</sup> .
Surfactantes	Compuestos perfluorados (ej. Ácido perfluorooctanoico)	Cancerígeno <sup>b</sup> .

La tabla 2 recoge un resumen de los principales efectos que producen algunas de estas sustancias sobre los seres vivos. Fuente: <sup>a</sup>Bolong et al., 2009; <sup>b</sup>Farré et al., 2008

### Productos Farmacéuticos

Son un grupo diverso de compuestos que ingresan al medio ambiente principalmente a través de las heces y orina, también son utilizados en la ganadería, avicultura y la piscicultura. La principal fuente de fármacos son las aguas residuales municipales y plantas de tratamiento convencionales ya que no están diseñadas para eliminar este tipo de contaminantes (Vargas-Berrones, Bernal-Jácome, Díaz de León-Martínez, & Flores-Ramírez, 2020)

Lo que ha despertado gran preocupación es su presencia en aguas superficiales y potables incluyendo variedad de analgésicos, anticonvulsivos, antimicrobianos, reguladores de lípidos, medicamentos antiinflamatorios, hormonas sintéticas y otros (Richardson & Kimura, 2017).

### Analgésicos

El diclofenaco, ibuprofeno, ketoprofeto y naproxeno han sido reportados en aguas residuales y superficiales (Murray, Thomas, & Bodour, 2010a). El diclofenaco no se elimina por completo debido a su baja degradación y tasas de consumo, se ha demostrado toxicidad hacia varios organismos, como peces, mejillones y buitres. En 2013 fue incluido en la lista de vigilancia de la Unión Europea determinando concentraciones máximas de 0.1 µg/L en aguas dulces 0.01 µg/L en aguas marinas (Lonappan, Brar, Das, Verma, & Surampalli, 2016).

## PROCESOS AVANZADOS DE OXIDACIÓN

### **Antibióticos**

Son una de las clases de productos farmacéuticos más usados a nivel mundial; su uso contra microorganismos patógenos en animales y humanos ha incrementado su producción, generando su descarga al medio acuático, se destaca la presencia de eritromicina, penicilina y sulfonamidas en aguas superficiales y subterráneas (Wilkinson, Hooda, Barker, Barton, & Swinden, 2017)

A nivel nacional la información es escasa; un estudio de la universidad Javeriana identificó en muestras de agua del ciclo urbano de Bogotá compuestos como ftalatos, Bisfenol A, naproxeno y carbamazepin, evidenciando que los sistemas de tratamiento convencionales no ejercen efecto importante sobre los compuestos emergentes, generando un riesgo importante para la salud (Diego F. Bedoya-Ríos, Jaime A Lara-Borrero, Andrés M. Enríquez- Hidalgo, 2018).

### **Drogas Ilícitas**

Son sustancias tóxicas y de baja biodegradabilidad, no se eliminan por tratamientos convencionales; por lo tanto, es necesario utilizar procesos de oxidación avanzada, ozonización, etc.; sin embargo, la mayoría de los tratamientos no los incluyen debido a sus altos costos, lo que significa que son liberados a las aguas superficiales e incluso en agua potable. Entre los contaminantes de drogas ilícitas más estudiadas están la anfetamina, la cocaína, metanfetamina, heroína y morfina (Gil et al., 2012), p. 6).

Algunos reportes informan presencia en aguas residuales a niveles de  $\mu\text{g/L}$ , determinando la presencia del metabolito de cocaína benzoilecgonina tóxico para los mejillones de cebr e induce estrés y daño en el ADN a  $1 \mu\text{g} / \text{L}$ , aunque son concentraciones bajas no se puede descartar los efectos en la salud humana y fauna (Richardson & Kimura, 2017).

## PROCESOS AVANZADOS DE OXIDACIÓN

### Pesticidas

Los pesticidas son mezclas de sustancias usados para prevenir, eliminar y controlar las plagas. Son altamente tóxicos y tienen gran potencial para bioacumularse en la cadena alimenticia, se clasifican generalmente por composición su química como carbamatos, cloroacetanildes, clorofenoxiácidos, organoclorados, organofosforados, piretroides y triazinas los estudios han demostrado que los organoclorados y los organofosforados tienen el potencial de causar efectos adversos en la biota y los humanos (Murray et al., 2010). La tabla 3 muestra la clasificación de los plaguicidas.

Tabla 3  
Clasificación de los plaguicidas

Familia Química	Ejemplos
Organoclorados	DDT, aldrín, endosulfán, endrín
Organofosforados	Bromophos, diclorvos, malatión
Carbamatos	Carbaryl, methomyl, propoxur
Tiocarbamatos	Ditiocarbamato, mancozeb, maneb
Piretroides	Cypermethrin, fenvalerato, permethrin
Derivados biperidilos	Clorfenatol, diquat, paraquat
Derivados del ácido fenoxiacético	Diclorprop, picram, silvex
Derivados cloronitrofenólicos	DNOC, dinoterb, dinocap
Derivados de triazinas	Atrazine, ametryn, desmetryn, simazine
Compuestos orgánicos del estaño	Cyhexatin, dowco, plictrán
Compuestos inorgánicos	Arsénico pentóxido, obpa, fosfito de magnesio, cloruro de mercurio, arsenato de plomo, bromuro de metilo, antimonio, mercurio, selenio, talio, y fósforo blanco
Compuestos de origen botánico	Rotenona, nicotina, aceite de canola

La tabla 3 muestra la clasificación de los plaguicidas de acuerdo a su familia química. Fuente: (Gil et al., 2012).

A nivel nacional, durante los años 2013 - 2016 los departamentos con mayor reporte de plaguicidas fueron Cundinamarca con el 37,6%, Nariño con el 15,7% y Valle con el 14,1%. El

## PROCESOS AVANZADOS DE OXIDACIÓN

menor número de reporte fue Putumayo, Antioquia y Cauca con menos del 1% de uso de plaguicidas (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MDAS) y el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), 2018), p.36).

El uso más frecuente de plaguicidas por grupo químico correspondió al grupo de organofosforados con el 34,5%; seguido por los carbamatos con el 13,2%, tiocarbamatos (13,1%) y el ácido fosfónico (9,7%) con el uso del glifosato (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MDAS) y el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), 2018), p. 37).

### **Productos para el cuidado personal**

Comúnmente incluyen fragancias, protectores solares, detergentes, lociones, repelentes, desodorantes, cosméticos y productos de limpieza, llegando a las fuentes hídricas de manera directa o transportadas por las PTAR, algunos son tóxicos y muestran resistencia microbiana.

Pueden afectar a los organismos acuáticos y a los humanos en ciertas concentraciones, estando presentes como: DEET-N, N-dietil-meta-toluamida, el ingrediente activo más común de los repelentes de insectos; parabenos -ésteres de alquilo del ácido p-hidroxibenzoico, utilizados desde los años 1930 como agentes bacteriostáticos y fungistáticos en medicamentos, cosméticos, y alimentos; filtros de protección solar UV, compuestos principalmente por aromáticos conjugados lipofílicos (Gil et al., 2012). El carácter bioacumulable se ve reflejado en los peces, problemática que genera un riesgo ambiental y humano.

### **Surfactantes**

Son agentes tensoactivos están agrupados en aniónicos, catiónicos y anfóteros, pueden producir efectos biológicos o influir sobre la toxicidad de herbicidas (Ramírez-Duarte, Rondón-Barragán, & Eslava-Mocha, 2005). Debido a su bajo costo los más utilizados son los

## PROCESOS AVANZADOS DE OXIDACIÓN

tensoactivos aniónicos del tipo sulfonato alquilbenceno lineal (LAS) y no aniónicos del tipo alquilfenolpolietoxilado (APEO) de los cuales más del 90% son etoxilatos de nonilfenol (Wilkinson et al., 2017).

A nivel nacional son regulados bajo el decreto 1076 de 2015, donde se estipula una concentración máxima de 0.5 mg/L para aguas de consumo (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2015).

### **Retardantes de llama**

Debido a su baja solubilidad en agua ( $< 0.13 \text{ mg / L}$ ) son ampliamente utilizados en la prevención de incendios. Entre los retardantes de llama, se encuentran aquellos compuestos como el Bisfenol A y ftalatos y otros basados en organofosfatos y organoclorados, tales como el tris (2-cloro-1-metiletil) fosfato (TCPP) y tris(2-cloroetil) fosfato (TCEP), usados en productos industriales y de consumo. Compuestos bromados entre los que se destacan, el polibromodifenil éter (PBDE), fueron algunos de los retardantes de llama más utilizados, pero se descubrió que son persistentes en el medio ambiente y bioacumulativos en humanos y vida silvestre; (Richardson & Kimura, 2017).

### **Panorama nacional**

En la actualidad las bases de datos han permitido establecer las características generales de las sustancias químicas manejadas a nivel nacional y descritas en la tabla 4. De acuerdo al perfil Nacional de sustancias químicas, los residuos o desechos peligrosos generados oscilaron alrededor de 143.749,2 toneladas para 2010. Los tipos de residuos peligrosos se encuentran asociados: mezclas y emulsiones de aceite y agua o hidrocarburos y agua (28,2 %); residuos clínicos y afines (19,0 %); aceites minerales no aptos para el uso al que estaban destinados (12,5 %); desechos resultantes de la utilización de dispositivos de control de la contaminación

## PROCESOS AVANZADOS DE OXIDACIÓN

industrial para la depuración de los gases industriales (5,2 %); desechos metálicos y desechos que contengan aleaciones de cualquiera de las sustancias siguientes: Antimonio, Arsénico, Berilio, Cadmio, Plomo, Mercurio, Selenio, Telurio, Talio (4,8 %); y líquidos de desechos del decapaje de metales (3,8 %) (López et al., 2012), p.55).

Tabla 4

*Grupo de sustancias químicas a nivel nacional*

<b>Grupo</b>	<b>Descripción</b>	<b>Distribución</b>
1	Sustancias químicas orgánicas	18,70%
2	Sustancias químicas inorgánicas	22,90%
3	Pinturas, barnices, tintas, colorantes y pigmentos.	7,80%
4	Plaguicidas	28,40%
5	Abonos y fertilizantes	3,60%
6	Petróleo, gas natural y sus derivados	5,80%
7	Otras sustancias químicas no clasificadas anteriormente	12,80%

La tabla 4 muestra siete categorías de sustancias químicas (López, Suárez, Hoyos Martha, & Montes, 2012)

A nivel nacional los CE han sido poco estudiados; acorde al Diagnóstico de Salud Ambiental 2012, las principales sustancias tóxicas se encuentran asociadas a sustancias como: cadmio, plomo, arsénico y mercurio y pesticidas como los organofosforados y carbamatos (Idrovo, A., Hurtado, N., Blanco, L., Bermúdez, J., & Jaimes, D., 2012).

Otros estudios relacionan el río Bogotá y sus cuencas son receptores de alta contaminación; una investigación desarrollada en el 2010 evaluó la presencia de metales en sedimentos del río Bogotá y Tunjuelito, identificando concentraciones superiores a 0.001 mg de Hg/L, 0.005 mg de Cr<sup>6+</sup>/L, 0.049 mg de Pb/L provenientes de los desechos de las diferentes industrias (Soto, Gutiérrez, Rey-León, & González-Rojas, 2010). Otro factor importante es la minería ilegal de oro; Segovia, Antioquia es considerada la región con mayores índices de contaminación de sustancias tóxicas como mercurio, cromo y cianuro (Díaz-Arriaga, 2014).

## PROCESOS AVANZADOS DE OXIDACIÓN

En 2018 fueron evaluados en los ríos Cauca y Magdalena los índices de calidad de las aguas, determinando condiciones de calidad en la categoría aceptable, regular y mala, asociados a la carga de materia orgánica en términos de Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO), Demanda Química de Oxígeno (DQO), Sólidos Suspendidos Totales (SST), Nitrógeno Total y Fósforo Total (PT). Del total de carga contaminante por la industria manufacturera el 90% corresponde a DBO y DQO, 8% SST y 2% NT y PT (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MDAS) y el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), 2018), p.33).

### Normatividad

Con el fin de compilar las normas, el gobierno nacional expidió el Decreto 1076 de 2015 que estructura de forma total el sector ambiental. Acorde a lo anterior, se relaciona la normatividad de interés en fuentes hídricas.

Tabla 5  
*Grupo de sustancias químicas a nivel nacional*

	Normatividad
Decreto Número 1575 de 2007	Por el cual se establece el Sistema para la Protección y Control de la Calidad del Agua para Consumo Humano.
Resolución 2115 de 2007	Por medio de la cual se señalan características, instrumentos básicos y frecuencias del sistema de control y vigilancia para la calidad del agua para consumo humano.
Resolución 0631 de 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.

Tabla 5. Principales normas de control de calidad de agua potable y vertimientos. Autoría propia.

### Tratamientos de Eliminación de Contaminantes Emergentes

Los tratamientos de aguas residuales empleando métodos convencionales no son del todo satisfactorios, al punto que se ha detectado que muchos compuestos persisten sin alteración aún

## PROCESOS AVANZADOS DE OXIDACIÓN

después de aplicar tratamientos terciarios (Gil et al., 2012). Por tal razón, no solo deben implicar tratamientos físicos y biológicos, se deben considerar tratamientos combinados junto con el químico permitiendo remover altas tasas de materia orgánica y sustancias especiales como metales, sustancias tóxicas, microorganismos, virus, etc, (Idarraga, 2013).

De manera general, los tratamientos de aguas residuales disponen de tratamientos primarios, basados en la coagulación y floculación de la materia orgánica; tratamientos secundarios donde se engloban los procesos biológicos y terciarios los cuales tienen como objetivo la eliminación de la materia orgánica u otros contaminantes que permanecen en el agua residual tras los procesos convencionales anteriores, los cuales no son del todo satisfactorios ya que algunos compuestos por su composición química son difíciles de degradar (Teijon, Candela, Tamoh, Molina-Díaz, & Fernández-Alba, 2010).

Los métodos avanzados descritos a continuación fueron basados en mi autoría de tesis como opción de grado obteniendo el título de Química (Jaimés, 2016).

### **Procesos avanzados de oxidación**

Los procesos avanzados de oxidación (PAOs), son aquellos procesos oxidativos en fase acuosa que se basan en el uso de radicales hidroxilos como especie principal que favorece la oxidación. Son procesos bastante eficientes para tratar compuestos recalcitrantes, que difícilmente podrían ser eliminados a partir de tratamientos biológicos (Poyatos et al., 2010).

Los radicales hidroxilos ( $\text{OH}\cdot$ ) han recibido mucha atención, debido a su alto potencial redox y a su naturaleza no selectiva para la mayoría de contaminantes orgánicos. En efecto, tal como se aprecia de la tabla 6, éstos cuentan con el segundo potencial de oxidación más alto entre las especies químicas individuales (Asghar, Abdul Raman, & Wan Daud, Wan Mohd Ashri, 2015).

## PROCESOS AVANZADOS DE OXIDACIÓN

Tabla 6

Potenciales de Oxidación

Oxidante	Potencial de oxidación (eV)
Flúor	3.0
Radical hidroxilo	2.8
Ozono	2.1
Aniones persulfato	2.01
Peróxido de hidrógeno	1.8
Permanganato de potasio	1.7
Péroxido de cloro	1.5

Tabla 6 muestra los principales potenciales de oxidación. (Jaimes, 2016).

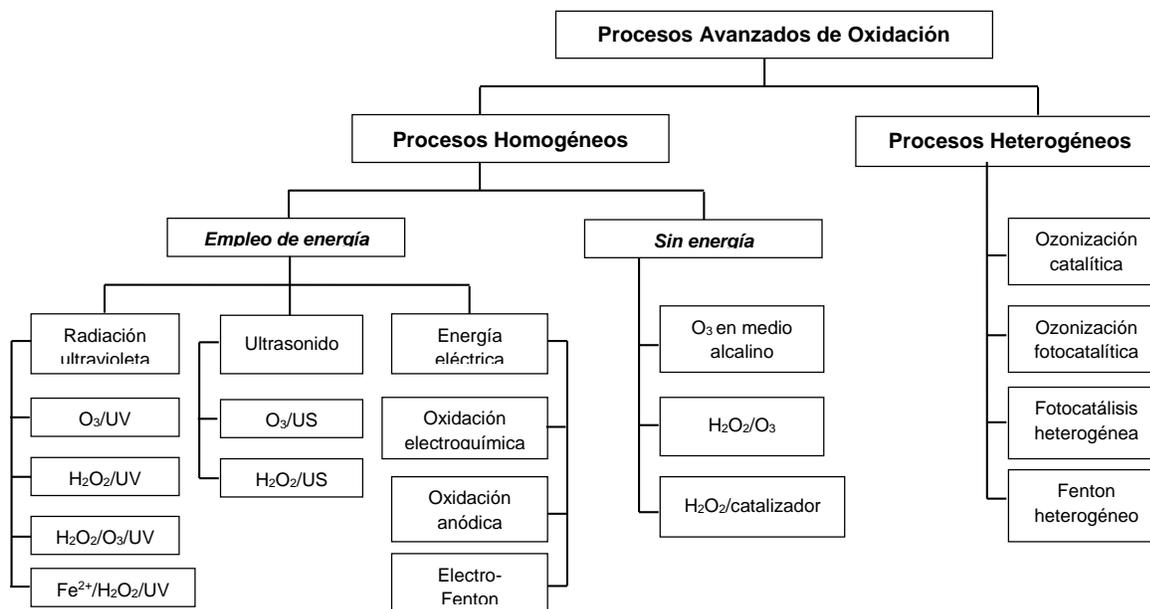
Los PAOs guardan entre sí la característica primordial de emplear radicales hidroxilos en el proceso oxidativo, estos procesos se pueden diferenciar por el tipo de agentes que usan como precursores, así como por la forma en la que están dispuestos en el medio. En la figura 1, se presenta un diagrama que ilustra la división de los diferentes PAOs dependiendo de las características mencionadas, cada uno de los procesos que allí se exponen, usan de una u otra manera la formación de los radicales hidroxilos ( $\text{OH}\cdot$ ) para propiciar la degradación de la materia orgánica presente en el agua (Poyatos et al., 2010).

Entre las principales ventajas se pueden destacar la elevada capacidad para mineralizar los contaminantes orgánicos a  $\text{CO}_2$  y  $\text{H}_2\text{O}$ , la descomposición de las sustancias en componentes menos nocivos para el medio ambiente, su potencial de ser combinado con otro tipo de procesos como los biológicos, sus pocas exigencias operacionales, la producción de radicales hidroxilos partiendo de diversas fuentes y la habilidad de funcionar a bajas temperaturas (Azbar, Yonar, & Kestioglu, 2004). La principal desventaja en algunos casos es el alto costo de los reactivos o de las fuentes de energía como la luz ultravioleta. De aquí la necesidad de buscar métodos más económicos.

## PROCESOS AVANZADOS DE OXIDACIÓN

Figura 1

*Procesos avanzados de Oxidación.*



La figura 1 muestra la clasificación de los procesos avanzados. (Jaimes, 2016).

Una de las posibles clasificaciones de los PAOs se puede dar en función del mecanismo de generación de los radicales hidroxilos. Esta clasificación se muestra la tabla 7, donde se recogen los principales tipos de PAOs según sean fotoquímicos o no fotoquímicos.

Tabla 7

*Tipos de Procesos de Oxidación*

Procesos no fotoquímicos	Procesos fotoquímicos
	Fotólisis en el ultravioleta de vacío (UVV)
Ozonización con peróxido ( $O_3/ H_2O_2$ )	UV/peróxido de hidrógeno
Procesos Fenton ( $Fe(II)/ H_2O_2$ )	UV/ $O_3$
Oxidación electroquímica	Fotocatálisis heterogénea
	Foto-Fenton ( $Fe(II)/H_2O_2/UV$ )

La tabla 7 muestra la clasificación de los procesos avanzados de oxidación, de acuerdo a la generación de radicales hidroxilos. (Jaimes, 2016).

## PROCESOS AVANZADOS DE OXIDACIÓN

### **Proceso Fenton**

El proceso de oxidación Fenton fue descrito por primera vez en 1894 por Henry J. Fenton, cuando descubrió que el peróxido de hidrógeno ( $H_2O_2$ ) podría activarse con iones ferrosos para oxidar ácido tartárico. Este proceso consiste en la adición de sales de hierro en presencia de  $H_2O_2$  y en medio ácido, para la formación de radicales ( $OH\bullet$ ) (Pignatello, Oliveros, & MacKay, 2006).

El proceso Fenton ha resultado efectivo para degradar compuestos alifáticos y aromáticos clorados, bifenilos policlorados (PCBs), nitroaromáticos, colorantes azo, clorobenceno, octacloro-p-dioxina, formaldehído, ácido fórmico, fenol, 2,4-diclorofenol, 4-clorofenol y nitrobenzoceno (Neyens & Baeyens, 2003).

### **Oxidación con Ozono**

El ozono es un oxidante fuerte, ya que su potencial de oxidación es de 2,07 V comparado con 2,8 V del radical hidroxilo. Se produce generalmente mediante un método de descarga eléctrica en presencia de aire u oxígeno (Agustina, Ang, & Vareek, 2005)

Algunos estudios muestran la eficacia de eliminación de 4-clorofenol por tratamiento con ozono y peróxido de hidrógeno, llegando al resultado de que con 113 mg/L de ozono se pueden eliminar 20 mg/L de 4-clorofenol. Esta eliminación se produce mediante la transformación del 4-clorofenol en 4-quinona, que posteriormente se oxida a ácido fórmico y ácido oxálico (Pi & Wang, 2006).

### **Oxidación Electroquímica**

El uso de la electricidad para el tratamiento de aguas fue propuesto por primera vez en el Reino Unido en el año de 1889 (Chen, 2004). Dentro de los métodos electroquímicos se encuentra la oxidación anódica para la electrogeneración de los radicales ( $OH\bullet$ ) producidos por

## PROCESOS AVANZADOS DE OXIDACIÓN

la oxidación del agua en el ánodo, empleando ánodos de Pt, PbO<sub>2</sub>, TiO<sub>2</sub>, SnO<sub>2</sub> y recientemente electrodos de diamante dopados con boro (Canizares, Garcia-Gomez, Lobato, & Rodrigo, 2003).

Un ejemplo representativo de estos procesos electroquímicos es la presencia de iones cloruro, los cuales se oxidan en el ánodo formando cloro gaseoso, que disuelto en el agua genera hipoclorito, un agente oxidante y desinfectante, lo cual explica la disminución de coliformes presentes en el agua residual (Jaimes, 2016).

### **Combinación peróxido de hidrógeno y radiación ultravioleta (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/UV)**

Este proceso de oxidación avanzada conlleva a la formación de radicales hidroxilos a través de la fotólisis del H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> en disolución acuosa y, en una reacción secundaria, radicales hidroperóxidos (HO<sub>2</sub>•) mostradas en las siguientes reacciones:



El proceso fotoquímico es más eficiente en medio alcalino, probablemente debido a que la longitud de onda, 253,7 nm del anión peróxido (HO<sub>2</sub><sup>-</sup>) base conjugada del peróxido de hidrógeno, tiene un valor mayor de coeficiente de absorción (240 M<sup>-1</sup>.cm<sup>-1</sup> frente a 18,6 M<sup>-1</sup>.cm<sup>-1</sup> del H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>). Aunque la fotólisis directa de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, es un proceso intrínsecamente muy eficaz, el H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> absorbe solo ligeramente en el UV a longitudes de onda menores de 300 nm, esto obliga al uso de concentraciones relativamente altas de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>. Esta técnica ha sido utilizada con éxito, en la remoción de contaminantes presentes en aguas y efluentes industriales, incluyendo organoclorados alifáticos, aromáticos, fenoles (clorados y sustituidos) (López Cisneros, Gutarra Espinoza, & Litter, 2002).

## PROCESOS AVANZADOS DE OXIDACIÓN

### **Fotocatálisis Heterogénea**

La fotocatalisis, hace referencia a la reacción catalítica que implica la absorción de radiación por parte de una especie fotosensible, que, en este caso, es el catalizador capaz de producir tras absorción de luz, transformaciones químicas de los reactivos. El concepto de fotocatalisis heterogénea se basa en el uso de un sólido semiconductor de banda ancha ( $\text{TiO}_2$ ,  $\text{ZnO}$ ,  $\text{CdS}$ ,  $\text{SnO}_2$ ,  $\text{ZnS}$ , entre otros.) en suspensión bajo irradiación (visible o UV) para generar una reacción en la interfase sólido/líquido o sólido/gas (Rubiano Hernández, Laguna, Alejandro, Zapata Sánchez, & Marín Sepúlveda, 2005).

### **Foto-Fenton (Fe(II)/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/UV)**

La reacción Fenton es la más aplicada a la hora de eliminar compuestos recalcitrantes, debido a su simplicidad, pero la mayor desventaja de este proceso es que produce un residuo de lodos de hierro, hecho que ha llevado al desarrollo del proceso foto-Fenton. En este contexto el proceso foto-Fenton es un claro ejemplo de fotocatalisis homogénea y está basado en la reacción Fenton (Busca, Berardinelli, Resini, & Arrighi, 2008), a la que se aumenta su eficiencia mediante radiación, que produce la fotólisis de hidroxocomplejos de  $\text{Fe}^{3+}$ . El ión  $\text{Fe}^{2+}$  fotogenerado produce radicales hidroxilos adicionales, este proceso es catalítico ya que el ión  $\text{Fe}^{2+}$  oxidado a ión  $\text{Fe}^{3+}$ , se reduce de nuevo al ión  $\text{Fe}^{2+}$  por acción de la radiación para generar radicales hidroxilos.

### **Catalizadores tipo Hidrotalcita**

Una alternativa para mejorar la degradación de sustancias tóxicas es el uso de catalizadores los cuales gracias a sus propiedades de adsorción, estabilidad química y síntesis sencilla permiten mejorar la velocidad de reacción. El estudio realizado en 2016 logró demostrar la degradación de Fenol, por medio de la utilización de Hidrotalcitas (catalizadores) en su

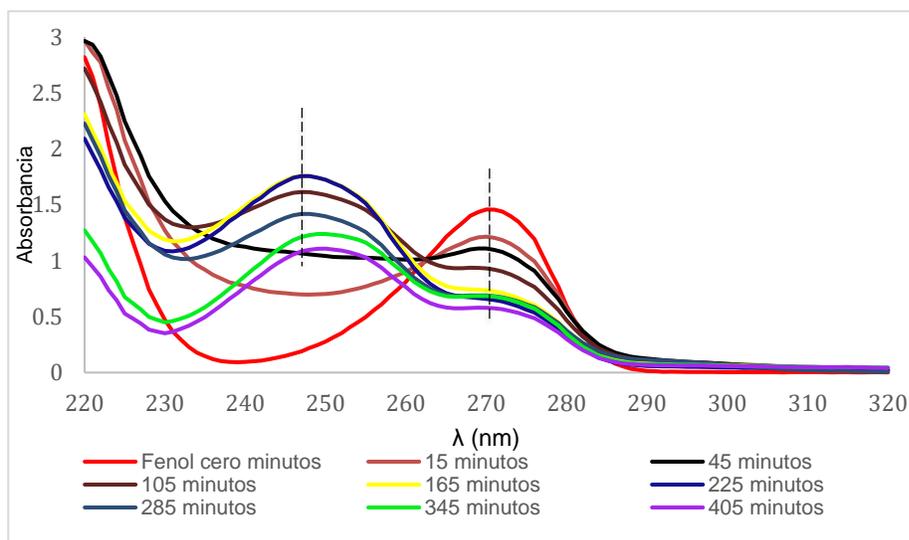
## PROCESOS AVANZADOS DE OXIDACIÓN

combinación con metales con propiedades redox y el agente oxidante  $H_2O_2$ , los resultados demostraron una mejor actividad catalítica para el catalizador AlMgCo (Jaimes, 2016, p. 55).

Aunque no se logró degradar completamente el fenol, los resultados revelan que este catalizador tiene mejor actividad catalítica, llegando a la hidroxilación evidenciada por la presencia del intermediario p-Benzoquinona, alcanzando una remoción de fenol de un 60.77% en tiempo de reacción de 405 minutos a una temperatura de 30 °C, mostrado en la figura 2.

Figura 2

*Espectro UV del fenol.*



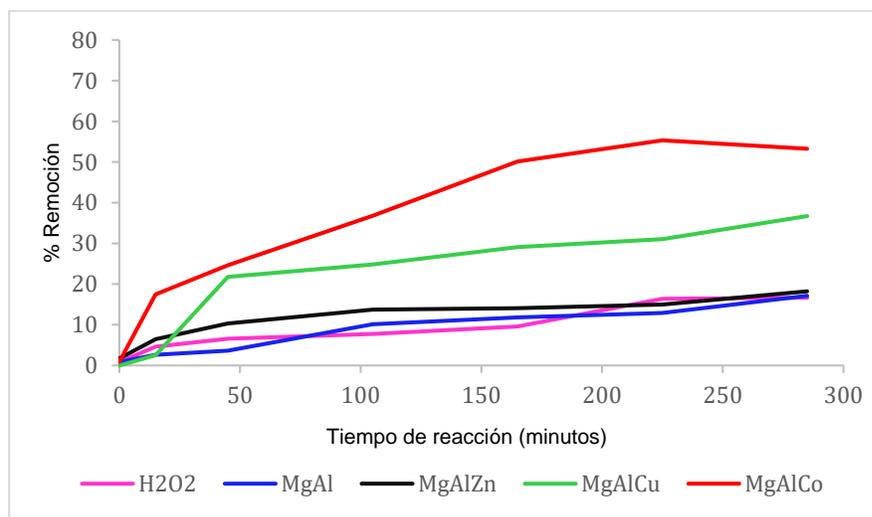
La figura 2 Muestra el espectro UV de fenol en presencia de 0.999 mM de fenol; 9.988 mmol de  $H_2O_2$ ; temperatura de 30°C; pH= 7.2; 0.2 g HT-MgAlCo, (Jaimes, 2016).

Se comprobó que para llevar a cabo el test catalítico es indispensable utilizar el oxidante  $MnO_2$  para la eliminación del peróxido residual, y así mismo deben estar en coexistencia el agente oxidante como el catalizador para obtener mejores resultados en la degradación (Jaimes, 2016, p. 55), figura 3.

## PROCESOS AVANZADOS DE OXIDACIÓN

Figura 3

*Ensayo catalítico de la remoción de Fenol.*



La figura 3 Muestra la remoción de fenol en presencia de 0.999 mM de fenol; 9.988 mmol de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>; temperatura de 30°C; pH= 7.2; 0.2 g HT-MgAlCo, HT-MgAlZn y/o HT-MgAlZn. (Jaimes, 2016).

Los ensayos demostraron que la actividad catalítica en reacciones de oxidación no solo depende de las características redox del material, sino también, de la capacidad que tenga el agente oxidante para generar los radicales hidroxilos y así llevar la degradación del fenol.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Mediante el análisis de los estudios mencionados, se evidenciaron 6 artículos a nivel nacional contemplando en su gran mayoría estudios de remediación de metales como mercurio, cromo hexavalente, plomo y arsénico y algunos pesticidas asociados a los organosforados y organoclorados. Sin involucrar otros contaminantes como hidrocarburos aromáticos policíclicos, carbamatos, sustancias psicoactivas, dioxinas y furanos, tetracloroetileno, difenileteres polibromados (PBDE) y perfluorocarburos perjudiciales para el medio ambiente debido a su carácter tóxico; frente a 22 artículos de tipo internacional donde se contempla un barrido completo de los contaminantes emergentes relacionados en la tablas 3 y 1. Esto conlleva a un

## PROCESOS AVANZADOS DE OXIDACIÓN

desconocimiento de los tipos de contaminantes presentes en aguas residuales industriales, domésticas y crudas y el tipo de afectación ocasionado a la flora, fauna y ser humano.

A nivel nacional se logró identificar el fuerte impacto que generan las grandes industrias del sector petrolero, farmacéutica, textil, agroindustria y metalmecánica; la tabla 4 mostró el grupo de sustancias químicas a nivel nacional identificando su principal aporte en los plaguicidas, sustancias inorgánicas y orgánicas presentes principalmente por la débil regulación y monitoreo de las sustancias mencionadas.

Dentro de los estudios asociados a la normatividad vigente, se destaca la 2115 de 2007 para el control y vigilancia de calidad del agua para consumo humano y resolución 0631 de 2015 donde se establecen los límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y sistemas de alcantarillado. Aunque esto demuestra el avance por vigilar la presencia de sustancias tóxicas en las fuentes hídricas, es relevante mencionar que algunas sustancias mencionadas en la resolución 0631, como: Compuestos semivolátiles fenólicos, sustancias activas al azul de metileno (SAAM), BTEX (benceno, tolueno, etilbenceno y xileno), Compuestos Orgánicos Halogenados Adsorbibles (AOX) e Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos no estipulan valores límites máximos permisibles, ya que la única exigencia para su descarga es análisis y reporte. De aquí la necesitan de mejorar nuestro sistema regulatorio, por medio de la implementación de normas más estrictas y establecimiento de entidades que realicen seguimiento a las industrias generadoras de residuos.

Un estudio con bastante peso y relevancia fue realizado por (Jaimes, 2016) donde se realizó una aproximación al desarrollo de nuevas tecnologías de remediación ambiental, utilizando condiciones suaves de trabajo para síntesis de catalizadores y test catalítico, acompañado de técnicas de caracterización, así como la puesta de nuevos catalizadores que

## PROCESOS AVANZADOS DE OXIDACIÓN

mejoran la velocidad de reacción, reflejado en la obtención de sustancias más simples como CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O y disminución del impacto ambiental.

## CONCLUSIONES

La revisión bibliográfica evidenció que existen esfuerzos investigativos en el área de Contaminantes Emergentes, aunque son pocos, existe un potencial para realizar dichos estudios de importancia para el país. La mayoría son realizados en grandes ciudades como Bogotá, Cali y Medellín debido a su crecimiento industrial.

Los contaminantes emergentes se encuentran de manera recurrente en las diferentes matrices ambientales, reflejando que los sistemas de tratamiento convencionales no ejercen un efecto importante cuando las concentraciones son muy altas y la naturaleza química de las sustancias son desconocidas. Por esto, se deben generar estrategias de monitoreo, control y normatividad y continuar con investigaciones enfocados en Procesos Avanzados de Oxidación y tratamientos más limpios que puedan dar solución a la problemática ambiental.

Los proyectos de investigación que se formulen y ejecuten en este campo deben dirigirse a la búsqueda del entendimiento de los mecanismos para la degradación CE, buscando siempre una relación entre la eficiencia de remoción y las propiedades fisicoquímicas del agente contaminante, así como las distintas metodologías y ensayos analíticos durante su tratamiento.

## PROCESOS AVANZADOS DE OXIDACIÓN

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agustina, T. E., Ang, H. M., & Vareek, V. K. (2005). A review of synergistic effect of photocatalysis and ozonation on wastewater treatment. *Journal of Photochemistry & Photobiology C: Photochemistry Reviews*, 6(4), 264. doi:10.1016/j.jphotochemrev.2005.12.003
- Asghar, A., Abdul Raman, A. A., & Wan Daud, Wan Mohd Ashri. (2015). Advanced oxidation processes for in-situ production of hydrogen peroxide/hydroxyl radical for textile wastewater treatment: A review. *Journal of Cleaner Production*, 87, 826. doi:10.1016/j.jclepro.2014.09.010
- Azbar, N., Yonar, T., & Kestioglu, K. (2004). Comparison of various advanced oxidation processes and chemical treatment methods for COD and color removal from a polyester and acetate fiber dyeing effluent. *Chemosphere*, 55(1), 35-43. doi:https://doi.org.ezproxy.umng.edu.co/10.1016/j.chemosphere.2003.10.046
- Busca, G., Berardinelli, S., Resini, C., & Arrighi, L. (2008). Technologies for the removal of phenol from fluid streams: A short review of recent developments. *Journal of Hazardous Materials*, 160(2-3), 265-288. doi:rg/10.1016/j.jhazmat.2008.03.045
- Canizares, P., Garcia-Gomez, J., Lobato, J., & Rodrigo, M. A. (2003). Electrochemical oxidation of aqueous carboxylic acid wastes using diamond thin-film electrodes. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 42(5), 956-962. doi:rg/10.1021/ie020594+
- Chen, G. (2004). Electrochemical technologies in wastewater treatment. *Separation and Purification Technology*, 38(1), 11-41. doi:rg/10.1016/j.seppur.2003.10.006
- Clemente, A. R., Chica Arrieta, E. L., & Peñuela Mesa, G. A. (2013). Procesos de tratamiento de aguas residuales para la eliminación de contaminantes orgánicos emergentes. *Revista Ambiente*

## PROCESOS AVANZADOS DE OXIDACIÓN

*E Agua*, 8(3), 93. doi:10.4136/ambi-agua.1176

Díaz-Arriaga, F. A. (2014). Mercurio en la minería del oro: Impacto en las fuentes hídricas destinadas para consumo humano. *Revista De Salud Pública*, 16(6), 947-957.

doi:10.15446/rsap.v16n6.45406

Diego F. Bedoya-Ríos, Jaime A Lara-Borrero, Andrés M. Enríquez- Hidalgo. (2018).

*Ocurrencia de contaminantes emergentes en el ciclo urbano del agua, caso bogotá*. . Bogotá.

Esparza, E., & Gamboa, N. (2001). Contaminación debida a la industria curtiembre. *Revista de Química*, XV(1), 1-24. Retrieved from

<http://revistas.pucp.edu.pe/index.php/quimica/article/view/4756>

Farré, P., Kantiani, & Barceló Damià. (2008). Fate and toxicity of emerging pollutants, their metabolites and transformation products in the aquatic environment. *Trends in Analytical Chemistry*, 27(11), 991. doi:10.1016/j.trac.2008.09.010

Gil, M. J., Soto, A. M., Usma, J. I., & Gutiérrez, O. D. (2012). Contaminantes emergentes en aguas, efectos y posibles tratamientos. *Producción Más Limpia*, 7(2), 52. Recuperado de:

<https://dialnet-unirioja-es.ezproxy.umng.edu.co/servlet/catart?codigo=4333973>.

Hiago de O. Gomes , Jorge Marcell C. Menezes, José Galberto M. da Costa, Henrique Douglas

M. Coutinho, , Raimundo Nonato P. Teixeira, Ronaldo F. do Nascimento. (2020). A socio-

environmental perspective on pesticide use and food production. *Ecotoxicology and*

*Environmental Safety*, 197(110627), 1-5. doi:rg/10.1016/j.ecoenv.2020.110627

Idarraga, E. (2013). *El consumo de agua en bogotá: Una revisión comparativa con otras*

*ciudades principales de américa latina*. Trabajo de grado: Universidad Militar Nueva Granada.

Idrovo, A., Hurtado, N., Blanco, L., Bermúdez, J., & Jaimes, D. (2012). *Diagnostico de salud*

*ambiental compilado* . (). Colombia: Recuperado

## PROCESOS AVANZADOS DE OXIDACIÓN

de:<https://www.minsalud.gov.co/sites/rid/Lists/BibliotecaDigital/RIDE/INEC/IGUB/Diagnostico%20de%20salud%20Ambiental%20compilado.pdf>

Jaimes, L. (2016). *Remoción de fenol utilizando catalizadores tipo hidrotalcita de Mg-Al, modificados con Co, Cu y Zn*. Tesis presentada para obtener el título de: Químico, 1-57: UDCA.

Kitamura, S., Suzuki, T., Sanoh, S., Kohta, R., Jinno, N., Sugihara, K., . . . Ohta, S. (2005). Comparative study of the endocrine-disrupting activity of bisphenol A and 19 related compounds. *Toxicological Sciences*, 84(2), 249. doi:10.1093/toxsci/kfi074.

Lonappan, L., Brar, S. K., Das, R. K., Verma, M., & Surampalli, R. Y. (2016). Diclofenac and its transformation products: Environmental occurrence and toxicity - A review. *Environment International*, 96, 127-138. doi:<https://doi.org.ezproxy.umng.edu.co/10.1016/j.envint.2016.09.014>

López, A., Suárez, O., Hoyos martha, & Montes, c. (2012). *Perfil nacional de sustancias químicas en colombia 2012*. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible:Recuperado de:[https://www.minambiente.gov.co/images/AsuntosambientalesySectorialyUrbana/pdf/sustancias\\_qu%C3%ADmicas\\_y\\_residuos\\_peligrosos/Perfil\\_Nacional\\_de\\_Sustancias\\_Quimicas\\_en\\_Colombia\\_2012.pdf](https://www.minambiente.gov.co/images/AsuntosambientalesySectorialyUrbana/pdf/sustancias_qu%C3%ADmicas_y_residuos_peligrosos/Perfil_Nacional_de_Sustancias_Quimicas_en_Colombia_2012.pdf).

López Cisneros, R., Gutarra Espinoza, A., & Litter, M. I. (2002). Photodegradation of an azo dye of the textile industry. *Chemosphere*, 48(4), 393-399. doi:[https://doi.org/10.1016/S0045-6535\(02\)00117-0](https://doi.org/10.1016/S0045-6535(02)00117-0).

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2015). *Decreto 1076 de 2015*. Colombia.

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MDAS) y el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). (2018). *Reporte de avance de estudio*

## PROCESOS AVANZADOS DE OXIDACIÓN

- nacional del agua 2018*. (). Bogotá: Recuperado de:<http://www.ideam.gov.co/documents/24277/76321271/Cartilla+ENA+2018+WEB+actualizada.pdf/ba353c39-b15d-4a76-8ed4-3814c4c35239>
- Murray, K. E., Thomas, S. M., & Bodour, A. A. (2010a). Prioritizing research for trace pollutants and emerging contaminants in the freshwater environment. *Environmental Pollution*, 158(12), 3462-3471. doi:<https://doi-org.ezproxy.umng.edu.co/10.1016/j.envpol.2010.08.009>
- Neyens, E., & Baeyens, J. (2003). A review of classic fenton's peroxidation as an advanced oxidation technique. *Journal of Hazardous Materials*, 98(1-3), 33. doi:[rg/10.1016/S0304-3894\(02\)00282-0](https://doi.org/10.1016/S0304-3894(02)00282-0)Get rights and content.
- O'Neil, William Maurer, Martin Polanía, Doris. (1992). Contaminación industrial en colombia. vol. XXII, no. 4. *Coyuntura económica. análisis y perspectivas de la economía colombiana* (pp. 151-175). Bogotá, Colombia.: Fedesarrollo. Recuperado de:<https://www.repository.fedesarrollo.org.co/handle/11445/2319>
- Pi, Y., & Wang, J. (2006). The mechanism and pathway of the ozonation of 4-chlorophenol in aqueous solution. *Science in China, Series B: Chemistry*, 49(4), 379. doi:[rg/10.1007/s11426-006-0379-4](https://doi.org/10.1007/s11426-006-0379-4)
- Poyatos, J. M., Muñio, M. M., Almecija, M. C., Torres, J. C., Hontoria, E., & Osorio, F. (2010). Advanced oxidation processes for wastewater treatment: State of the art. *Water, Air, and Soil Pollution*, 205(1-4), 187-204. doi:[10.1007/s11270-009-0065-1](https://doi.org/10.1007/s11270-009-0065-1)
- Ramírez-Duarte, W. F., Rondón-Barragán, I. S., & Eslava-Mocha, P. R. (2005). Surfactantes asociados a herbicidas: Efectos sobre organismos acuáticos. *Red De Revistas Científicas De América Latina, El Caribe, España Y Portugal*, 9(2), 45-59. Recuperado de:

## PROCESOS AVANZADOS DE OXIDACIÓN

<https://www.redalyc.org/pdf/896/89690207.pdf>

Resolución número 2115 de 2007 por la cual se señalan características, instrumentos básicos y frecuencias del sistema de control y vigilancia para la calidad del agua para consumo humano.

Resolución U.S.C. (2007). Recuperado

de:[https://www.minsalud.gov.co/sites/rid/Lists/BibliotecaDigital/RIDE/DE/DIJ/Resoluci%C3%B3n\\_2115\\_de\\_2007.pdf](https://www.minsalud.gov.co/sites/rid/Lists/BibliotecaDigital/RIDE/DE/DIJ/Resoluci%C3%B3n_2115_de_2007.pdf).

Richardson, S. D., & Kimura, S. Y. (2017). Emerging environmental contaminants: Challenges facing our next generation and potential engineering solutions. *Environmental Technology & Innovation*, 8, 40-56. doi:<https://doi-org.ezproxy.umng.edu.co/10.1016/j.eti.2017.04.002>

Rubiano Hernández, C. M., Laguna, C., Alejandro, W., Zapata Sánchez, C. E., & Marín Sepúlveda, J. M. (2005). Estudio sobre las posibilidades de aplicación de la fotocatalisis heterogénea a los procesos de remoción de fenoles en medio acuoso. *Escuela De Geociencias Y Medio Ambiente*, 8(1), 105-121. Recuperado de: <http://bdigital.unal.edu.co/53851/>

Soto, C., Gutierrez, S., Rey-Leon, A., & Gonzalez-Rojas, E. (2010). Biotransformacion de metales pesados presentes en lodos ribereños de los rios Bogota y Tunjuelo. *NOVA*, 8(14), 195-205. doi:[rg/10.22490/24629448.450](https://doi.org/10.22490/24629448.450) Retrieved from <https://hemeroteca.unad.edu.co/index.php/nova/article/view/450/1101>

Teijon, G., Candela, L., Tamoh, K., Molina-Díaz, A., & Fernández-Alba, A. R. (2010). Occurrence of emerging contaminants, priority substances (2008/105/CE) and heavy metals in treated wastewater and groundwater at depurbaix facility (barcelona, spain). *Science of the Total Environment*, 408(17), 3584. doi:[10.1016/j.scitotenv.2010.04.041](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2010.04.041)

Tranfield, David; Denyer, David; Smart, Palminder (2003). "Towards a methodology for developing evidence informed management knowledge by means of systematic review". British

## PROCESOS AVANZADOS DE OXIDACIÓN

journal of management, v. 14, n. 3, pp. 207-222. <https://www.cebma.org/wp-content/uploads/Tranfield-et-al-Towards-a-Methodology-for-Developing-Evidence-Informed-Management.pdf> <https://doi.org/10.1111/1467-8551.00375>

Vargas-Berrones, K., Bernal-Jácome, L., Díaz de León-Martínez, L., & Flores-Ramírez, R.

(2020). Emerging pollutants (EPs) in latin américa: A critical review of under-studied EPs, case of study -nonylphenol-. *Science of the Total Environment*, 726, 138493. doi:[https://doi-org.ezproxy.umng.edu.co/10.1016/j.scitotenv.2020.138493](https://doi.org.ezproxy.umng.edu.co/10.1016/j.scitotenv.2020.138493)

Wilkinson, J., Hooda, P. S., Barker, J., Barton, S., & Swinden, J. (2017). Occurrence, fate and transformation of emerging contaminants in water: An overarching review of the field.

*Environmental Pollution*, 231, 954-970. doi:<https://doi-org.ezproxy.umng.edu.co/10.1016/j.envpol.2017.08.032>