



## Fotocatálisis heterogénea para el abatimiento de tensoactivos aniónicos en aguas residuales

*Juan Sebastián Carvajal Muñoz<sup>1</sup>*

***Heterogeneous photocatalysis for the abatement of anionic surfactants in waste water***

***Fotocatálise heterogênea para a redução de tensoativos aniônicos em águas residuais***

### RESUMEN

La fotocatalisis heterogénea es un proceso efectivo para la degradación y mineralización de tensoactivos aniónicos presentes en aguas residuales provenientes de fuentes variables. Esta se ha empleado en forma conjunta con otras técnicas convencionales, logrando incrementos en la cinética química y mayor eficiencia de remoción de contaminantes. El tratamiento convencional de las aguas residuales con tensoactivos se adelanta, por lo general, por acción biológica durante la sedimentación primaria. No obstante, se han explorado otras alternativas para su tratamiento como procesos de fotocatalisis. En el presente artículo se revisan las principales investigaciones asociadas y se mencionan algunas de las ventajas frente a otros sistemas de tratamiento.

**Palabras clave:** fotocatalisis heterogénea, tensoactivos aniónicos, tratamiento de aguas residuales.

### ABSTRACT

Heterogeneous photocatalysis is an effective process for degrading and mineralizing of pollutants in waste water from several sources. It has been used along with other conventional techniques, achieving increases in chemical kinetics and a more efficient pollution removal. Conventional water treatments with surfactants are made by a biological action during the

<sup>1</sup>Estudiante de grado Ingeniería Ambiental y Sanitaria. Investigador Grupo de Investigación en Residuos Peligrosos y Sólidos Urbanos (GIRPSU). Estudiante de Ingeniería Civil. Octavo semestre. Investigador Grupo Integrado de Investigación en Ingeniería Civil (GIIC). Universidad del Magdalena, Santa Marta, Magdalena, Colombia

Correspondencia: Juan Sebastián Carvajal Muñoz, e-mail: [ing.juancarvajal@gmail.com](mailto:ing.juancarvajal@gmail.com); [ing.juancarvajal@yahoo.com](mailto:ing.juancarvajal@yahoo.com)

Artículo recibido: 20/10/2011 ; Artículo aprobado: 15/11/2011

primary sedimentation. However, other possible treatments such as advanced oxidation processes have been explored. This article revises the most important investigations related to the subject and mentions some of the advantages photocatalysis has if compared to other systems.

**Key words:** heterogeneous photocatalysis, anionic surfactants, waste water treatment.

## RESUMO

Fotocatálise heterogênea é um processo eficaz para a degradação e mineralização dos poluentes presentes nas águas residuais a partir de fontes variável. Isso tem sido usado em conjunto com outras técnicas convencionais, conseguindo aumentos de cinética química e eficiência de remoção de contaminantes. Tratamento convencional de águas residuais com surfactantes está à frente por ação biológica durante a sedimentação primária. No entanto, outras alternativas foram exploradas para o tratamento e os processos de oxidação avançada. Neste artigo vamos rever os principais investigações e são algumas das vantagens da fotocatalise sobre outros sistemas.

**Palavras importante:** fotocatalise heterogênea, tensoativos aniônicos, tratamento de águas residuais.

## INTRODUCCIÓN

La generación de efluentes con presencia de tensoactivos aniónicos en la industria y actividades domésticas ha incrementado en años recientes como resultado de las necesidades de limpieza, higiene y calidad de los procesos productivos. Este tipo de actividades producen efluentes con proporciones variables de sustancias y carga orgánica, y los detergentes y materia fecal son sus principales constituyentes<sup>1,2</sup>.

Los tensoactivos constituyen la materia activa de los detergentes. La familia más utilizada de los tensoactivos son los de tipo aniónico. De este grupo, los sintéticos más utilizados son los alquilbenzeno sulfonatos lineales (LAS), los alcoholes etoxilados sulfatos (AES) y los alquil sulfatos (AS)<sup>3</sup>.

Los investigadores Harkins y Langmuir, en 1917, hicieron el descubrimiento de estas sustancias sintéticas similares a los jabones, con propiedades de acumularse en las superficies de forma preferencial. Los investigadores describieron el comportamiento de estas sustancias en términos de su estructura polar (con afinidad al agua) y apolar (con afinidad a las grasas). Por esta razón, los tensoactivos tienen mayores concentraciones en la superficie que en el seno del líquido que los contiene. Inicialmente se les asignó el nombre de agentes de superficie. No obstante, con el paso del tiempo han pasado a ser denominadas surfactantes, tensoactivos o tensioactivos<sup>4</sup>.

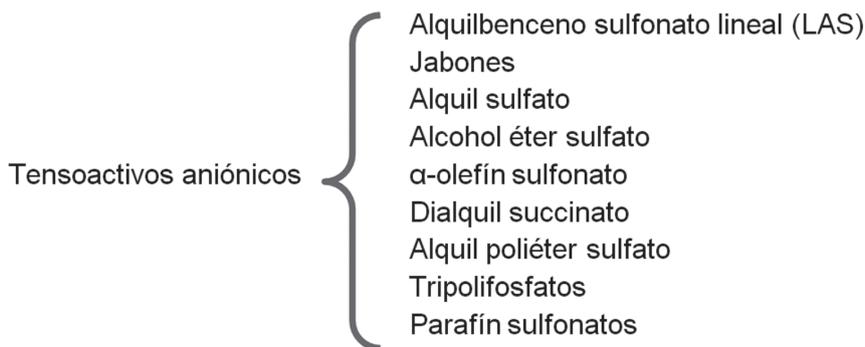
Este tipo de sustancias han sido de especial interés en temas de tratamiento de aguas residuales, por cuanto sus concentraciones tienden a ser altas y sus propiedades afectan el desarrollo de las etapas de tratamiento convencional, además de afectar procesos de tipo biológico en cuerpos de agua receptores.

Por lo general, una vez son empleados los tensoactivos llegan a las estaciones depuradoras de aguas residuales (EDAR) a través de las redes domésticas e industriales. En ciertos casos son vertidos directamente en cuerpos de agua receptores superficiales (i. e. ríos, lagos, lagunas, mar) o aguas subterráneas<sup>3,4</sup>.

El presente documento suministra información sobre el tratamiento convencional y avanzado de aguas residuales con tensoactivos aniónicos. Se hace una revisión exhaustiva de las investigaciones más recientes en el campo de fotocatalisis heterogénea para el tratamiento de este tipo de efluentes, teniendo en cuenta las ventajas técnicas, económicas y ambientales, y se esboza el potencial para minimizar costos y tiempos de tratamiento.

## Tensoactivos aniónicos

Los tensoactivos aniónicos son sales de sodio que al ionizarse producen iones positivos (sodio  $\text{Na}^+$ ) y negativos (surfactante activo). Los más comunes son el *sulfonato de alquil benceno (ABS)*, *sulfonato de alquilo lineal (LAS)* y *sodio tripolifosfato (TPP)*, que se diferencian por su configuración molecular, biodegradabilidad y toxicidad (ver figura 1). El ABS posee una estructura molecular ramificada y es poco biodegradable; LAS posee estructura lineal, es mayormente biodegradable pero mucho más tóxico<sup>1</sup>. El TPP, además de ser insumo para la producción de detergentes y jabones, es empleado para dulcificar aguas duras (i. e. disminuir la dureza), en metalurgia, explotación minera, producción de papel y tratamiento de agua.



**Figura 1. Tipos de tensoactivos aniónicos<sup>4</sup>**

Fuente: elaboración propia

Actualmente existen variados sustitutos y/o coadyuvantes del TPP y de ciertos surfactantes, tales como la zeolita sódica; sales sódicas de ácidos hidroxicarboxílicos; sales sódicas del ácido nitrilo acético (NTA); sales sódicas del ácido cítrico (CT-Na); carbonato sódico. Este tipo de sustitutos se caracterizan por mayores tasas de biodegradabilidad, menores niveles de toxicidad y, en consecuencia, mayores niveles de aceptación por parte de las entidades de regulación ambiental y sanitaria<sup>5,6</sup>.

Los tensoactivos son ionizados cuando están en solución acuosa, quedando cargado negativamente el grupo hidrófobo. Desde el punto de vista estructural están compuestos por una cadena de tipo alquílico, que puede ser lineal o ramificada (con 10 o 14 átomos). En el extremo polar de la molécula se ubica un anión. Las principales sustancias de este grupo de tensoactivos son derivadas del ión sulfato o de sulfonatos (e. g. dodecil sulfato de sodio, dodecil benceno sulfonato de sodio)<sup>3,4</sup>.

Los tensoactivos aniónicos revisten especial interés en la actualidad, debido a que constituyen una fuente importante de deterioro de la calidad de aguas superficiales y subterráneas. Estos compuestos inhiben la degradación biológica de otras sustancias presentes en el agua, disminuyen la capacidad de autodepuración y alteran las concentraciones de azufre, fósforo y nitrógeno que pueden generar, por ejemplo, procesos de eutrofización<sup>1</sup>. Este fenómeno acelera el crecimiento de plantas acuáticas y ciertas especies animales que consumen oxígeno disuelto y hacen que sus niveles sean menores a los necesarios para la vida de especies animales y vegetales.

Como resultado de la disminución de oxígeno disuelto (OD) se propician condiciones anaerobias que producen malos olores, sabores en el agua y desprendimiento de  $\text{SH}_2$  (sulfuro de hidrógeno),  $\text{NH}_3$  (amoníaco),  $\text{CH}_4$  (metano) y otros gases de interés sanitario (i. e. perjudiciales para especies animales y el ser humano). Algunos de los efectos en el ser humano son: irritación en los ojos y mucosas, asfixia, pérdida del conocimiento, pérdida de funciones motoras, dolor de cabeza prolongado, edema pulmonar, quemaduras<sup>7</sup>.

## Impactos ambientales de los tensoactivos

Como consecuencia de la descarga de tensoactivos aniónicos en fuentes hídricas y ecosistemas acuáticos se pueden presentar algunos de los siguientes efectos<sup>4</sup>:

- a) Incremento del pH de las aguas, a valores superiores a 12 unidades. Ello implica alteración de los ciclos de vida de especies acuáticas, disminución de la capacidad de asimilación de otras sustancias e incremento de la alcalinidad de las aguas.
- b) Eutrofización del agua con consecuente proliferación de algas y malos olores por efecto del fósforo, principal secuestrante de las fórmulas de detergentes.
- c) Iones pesados como plomo, cromo o mercurio pueden ser solubilizados, ocasionando daños de tipo genético en las especies y alteración de la cadena trófica por procesos de bioacumulación y biomagnificación.
- d) La concentración de cloro y compuestos organoclorados puede incrementar, constituyéndose en una amenaza por el potencial carcinogénico y mutagénico de estos.
- e) La degradación natural de los componentes de los detergentes demanda oxígeno del medio, lo cual puede conllevar a consumos excesivos de la especie química, provocando condiciones de anoxia y muerte de especies animales y vegetales.
- f) Algunos componentes de los detergentes tienen efectos tóxicos sobre el metabolismo de especies acuáticas y otros organismos superiores.
- g) Los procesos de coagulación, floculación y sedimentación en las plantas de tratamiento de aguas se ven afectados por la concentración de estas especies químicas.
- h) Los tensoactivos son considerados contaminantes de aguas subterráneas e indicadores de otros tipos de contaminación.
- i) La generación de espumas en los cuerpos de agua induce a cambios en los procesos de dilución de oxígeno y procesos termodinámicos. Además, afecta la calidad estética del paisaje.

## TRATAMIENTO CONVENCIONAL DE TENSOACTIVOS EN AGUAS RESIDUALES

La producción de detergentes y otros productos de higiene y aseo ha incrementado ostensiblemente en las últimas décadas como respuesta a la necesidad de mayores condiciones de asepsia para labores en el hogar, la industria, sectores de la salud y otros. Algunos de los productos son elaborados con insumos de baja toxicidad y alta biodegradabilidad, atendiendo a los estándares internacionales y regulaciones normativas aplicables para su fabricación<sup>4,6</sup>.

Para el tratamiento de los efluentes industriales y domésticos con altas cantidades de detergentes y surfactantes se han empleado diversas técnicas fisicoquímicas (i. e. adsorción, absorción, ósmosis inversa, incineración, floculación, coagulación, sedimentación, decantación, flotación, oxidación)<sup>8-11</sup>.

De otro lado, las técnicas electroquímicas han sido ampliamente utilizadas para eliminar estas sustancias de aguas residuales industriales y domésticas<sup>9</sup>. La actividad microbiana también se ha contemplado para la degradación de tensoactivos aniónicos en medio acuoso. En algunos casos, los procesos de tratamiento biológico se adelantan por medio de pool de microorganismos, de forma que mejora la actividad de degradación de especies químicas por los grupos bacterianos y la velocidad de las reacciones<sup>2,3</sup>.

Las metodologías convencionales de tratamiento permiten remover porcentajes significativos de tensoactivos contenidos en los efluentes, incrementar la biodegradabilidad, y disminuir porcentajes de

color y DQO (i. e. demanda química de oxígeno). No obstante, se presentan dificultades relacionadas con altos costos de inversión, largos tiempos de tratamiento, necesidad de personal especializado, requerimientos de capacidad instalada, entre otras limitaciones<sup>10, 11</sup>.

Las etapas principales para el tratamiento convencional de aguas residuales se presenta en la tabla 1<sup>4</sup>:

**Tabla 1. Etapas principales para el tratamiento convencional de aguas residuales**

Etapas	Procesos
<b>Tratamiento primario</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Desbaste</li> <li>• Sedimentación</li> <li>• Flotación</li> <li>• Separación de aceites</li> <li>• Neutralización</li> </ul>
<b>Tratamiento secundario</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Proceso de lodos activados</li> <li>• Proceso de aireación extendida (u oxidación total)</li> <li>• Estabilización por contacto</li> <li>• Modificación del proceso de lodos activados convencional</li> <li>• Lagunas de aireación</li> <li>• Lagunaje</li> <li>• Filtros percoladores</li> <li>• Tratamiento anaerobio</li> </ul>
<b>Tratamiento terciario o avanzado</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Microfiltración</li> <li>• Precipitación y coagulación</li> <li>• Adsorción (carbón activado)</li> <li>• Intercambio iónico</li> <li>• Ósmosis inversa</li> <li>• Electrodialisis</li> <li>• Procesos de eliminación de nutrientes</li> <li>• Cloración y ozonación</li> <li>• Procesos avanzados de oxidación</li> </ul>

Fuente: adaptado de Rodríguez<sup>4</sup>

## TÉCNICAS AVANZADAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

Las características de algunos tensoactivos hacen, de estas, sustancias nocivas por sí mismas para algunas especies animales, al igual que para la calidad de los recursos hídricos. Algunos insumos para la fabricación de detergentes no son biodegradables, por lo que es necesario adelantar procesos de tratamientos no convencionales para el tratamiento de las aguas residuales que los contengan. Como consecuencia, la comunidad científica ha desarrollado metodologías avanzadas de tratamiento que permiten la degradación y mineralización de estas sustancias en tiempos relativamente cortos y con costos de tratamiento inferiores a los requeridos por otros procesos.

Se han desarrollado importantes esfuerzos en términos de investigación e innovación sobre tratamiento avanzado de aguas residuales. En este sentido, países como Canadá, España, Australia, Inglaterra, Argentina han logrado importantes avances en la formulación de nuevas metodologías de tratamiento y estrategias de control de residuos peligrosos y de efluentes con cargas orgánicas altas, toxicidad variable y poca biodegradabilidad. Como resultado, han surgido técnicas como la oxidación avanzada de especies químicas. Actualmente, al conjunto de estas metodologías se les ha denominado AOP.

Los procesos de oxidación avanzada (AOP, por sus siglas en inglés) se caracterizan por su efectividad para el tratamiento de efluentes de tipo doméstico e industrial de composiciones variadas, por ser novedosos, viables desde el punto de vista tecnológico y ambiental, y por permitir la minimización de costos de ciertos métodos de tratamiento<sup>8, 12-14</sup>.

Los AOP son técnicas de tratamiento que abarcan una amplia gama de sustancias y compuestos como metales, colorantes, detergentes, insecticidas, pesticidas, germicidas, compuestos orgánicos, hidrocarburos, entre otros<sup>15, 16</sup>. De acuerdo con investigaciones recientes, los procesos de oxidación avanzada permiten incrementar la biodegradabilidad de aguas residuales, disminuir la toxicidad de efluentes tanto industriales como domésticos, eliminar contaminantes con eficiencias de remoción del 80-95%; coadyuvar en procesos de tratamiento preliminares o complementarios de aguas para fines industriales, agrícolas o domésticos, o para el consumo humano<sup>17, 18</sup>.

Los AOP pueden emplearse de forma individual o acoplados a tratamientos complementarios<sup>19, 20</sup> de efluentes contaminados (e. g. tratamiento preliminar, primario, secundario, terciario)<sup>21-24</sup>. De esta manera, pueden coadyuvar en procesos de purificación de aguas, tratamiento de aguas residuales, métodos de eliminación o degradación de gases tóxicos en efluentes gaseosos. Asimismo, son susceptibles de acoplarse a métodos biológicos usados para diferentes tipos de contaminantes de interés sanitario<sup>25-28</sup>.

Adicionalmente, procesos como la fotocatalisis heterogénea-homogénea, foto-fenton, ozonólisis, han sido empleados para el tratamiento de aguas residuales con presencia de colorantes de la industria textil y papelera<sup>29, 30, 31, 32, 33, 34</sup>; para el tratamiento de efluentes gaseosos con concentraciones variables de compuestos orgánicos volátiles –COV-, formaldehído y otras sustancias con características de peligrosidad<sup>15, 35, 36, 37</sup>.

La fotocatalisis también ha demostrado ser eficiente para el tratamiento de compuestos y efluentes derivados de petróleo o empleados para su tratamiento<sup>1, 38, 39</sup>, inactivación microbiana y destrucción de partículas proteicas infecciosas<sup>17, 40, 41</sup>; en el tratamiento de compuestos orgánicos persistentes (COP, e. g. herbicidas, insecticidas y plaguicidas)<sup>14, 16, 18, 33</sup>; el tratamiento de compuestos explosivos. Igualmente la utilidad de este tipo de tratamiento se ha verificado para compuestos sintéticos<sup>42, 43</sup>; metales pesados como el cromo hexavalente y el mercurio<sup>44, 45</sup> y aceites en emulsión tanto sintéticos como semisintéticos y biodegradables<sup>46</sup>.

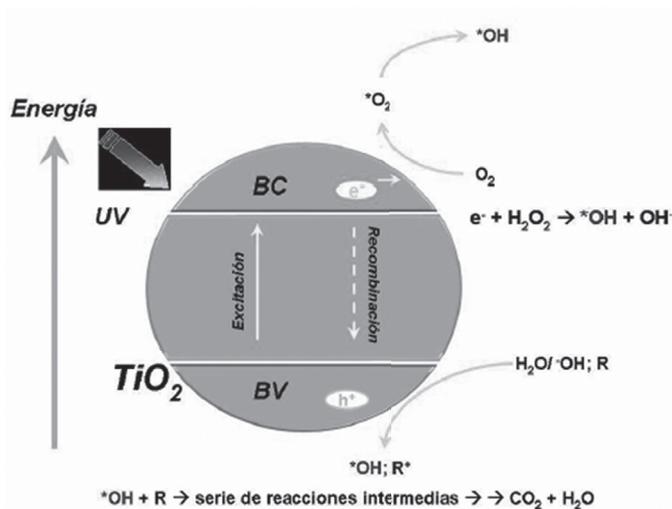
### Fotocatálisis heterogénea

La fotocatalisis heterogénea es un proceso de oxidación avanzada que utiliza la capacidad catalizadora de la luz UV (natural o artificial) para excitar un material semiconductor (e. g.  $\text{TiO}_2$ , dióxido de Titanio) que impulse reacciones de óxido-reducción mediante pares electrón-hueco en su superficie. En combinación con un agente de alta capacidad oxidante (e. g. peróxido de hidrógeno ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ), el ozono ( $\text{O}_3$ )) se generan radicales libres, que inducen la oxidación directa de los contaminantes por contacto o indirecta por radicales hidroxilo ( $\text{OH}^\bullet$ ) liberados por los procesos de disociación característicos en estos agentes<sup>7</sup>.

La fotocatalisis heterogénea ha sido empleada desde hace más de dos décadas alrededor del globo (e. g. Chile, Argentina, Estados Unidos, Canadá, Australia, España, Suiza, Brasil) para el tratamiento de efluentes de variada carga orgánica, composición y biodegradabilidad provenientes de actividades industriales, domésticas, hospitalarias, entre otras. En términos generales, esta técnica es empleada para el abatimiento de sustancias de baja o nula biodegradabilidad, de tipo recalcitrante, xenobiótico y de toxicidad variable<sup>13, 47-50</sup>.

En la fotocatalisis, se emplean catalizadores, que pueden ser sólidos, en suspensión acuosa o gaseosa; radiación ultravioleta –luz solar o fuentes artificiales-; y algunos coadyuvantes del proceso de oxidación como el peróxido de hidrógeno  $\text{H}_2\text{O}_2$ . Por lo general, se emplean  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{ZnO}$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  y  $\text{TiO}_2$  como catalizadores. El más empleado es el dióxido de titanio  $\text{TiO}_2$  Degussa P-25, que se caracteriza por ser muy estable, no tóxico, económico, tener amplia superficie de adsorción, mayor actividad fotocatalítica y tener un ciclo de vida superior a los otros catalizadores<sup>51-53</sup>.

La fotocatalisis heterogénea permite la degradación, e incluso la mineralización, de gran variedad de compuestos orgánicos según el proceso siguiente (ver figura 2)<sup>7</sup>.



**Figura 2. Esquema del proceso de fotocatalisis heterogénea**

Fuente: Mera et. al.; 2008

El fotocatalizador (FC) tiene la característica de ser súper hidrofílico, por lo que atrae las moléculas de agua.

Cuando un *quantum* de luz incide en la superficie del FC se libera un electrón ( $e^-$ ) desde la banda de valencia (BV) hacia la banda de conductividad (BC); este electrón ataca al oxígeno molecular ( $\text{O}_2$ ) convirtiéndolo en un súper anión ( $\text{O}_2^*$ ). Por su parte, el espacio ( $h^+$ ) dejado por el electrón ataca la molécula del agua convirtiéndola en un radical hidroxilo ( $^*\text{OH}$ ).

En conjunto el  $\text{O}_2^*$  y  $^*\text{OH}$  por su elevado poder óxido-reductor, ante la presencia de cualquier molécula óxido-reductora, ya sea esta orgánica o inorgánica, producirán una enérgica reacción fotoquímica de óxido-reducción que favorece la degradación de especies químicas y mineralización bajo ciertas condiciones de tratamiento.

### **Variables de la fotocatalisis heterogénea**

Las principales variables que afectan el proceso de fotocatalisis heterogénea, en términos cuantitativos y cualitativos son<sup>51</sup>:

*Concentración inicial del contaminante:* incide directamente sobre la selección del tipo de tratamiento.

*Tipo de catalizador y su concentración:* existe una amplia gama de sustancias con alto poder oxidante que aceleran los procesos de degradación, de acuerdo con su estructura cristalina, propiedades químicas y físicas.

*Cantidad de oxígeno:* el oxígeno participa en las reacciones de degradación y mineralización de las especies químicas.

*Calidad del agua a tratar:* las características físico-químicas y microbiológicas del agua facilitan la selección de tratamientos apropiados.

*Tipo de reactor:* los reactores tipo Batch o cilindro-parabólicos son empleados de acuerdo con las condiciones experimentales, disponibilidad de espacio, recursos y facilidad de operación<sup>20, 54</sup>.

*Temperatura:* las bajas temperaturas reducen la velocidad de las reacciones involucradas en la degradación de las especies químicas. Altas temperaturas podrían desencadenar liberación de especies no deseadas o alteración de las condiciones de equilibrio del sistema.

*Potencial de hidrógeno (pH):* es una de las variables mayormente controladas para procesos de oxidación química. Interviene en las reacciones químicas entre los catalizadores, matriz acuosa y sustancia a tratar.

*Longitud de onda e intensidad de la luz:* la luz puede provenir de fuentes artificiales (e. g. lámparas de vapor de mercurio) o de radiación directa del sol (especialmente utilizada en zonas tropicales). La correcta selección de la longitud de onda favorece la degradación de ciertas especies químicas.

### **Ventajas de la fotocatalisis heterogénea**

Algunas de las ventajas de esta tecnología frente a los métodos convencionales son<sup>55</sup>:

- Facilita la transformación química de una amplia gama de sustancias contaminantes.
- Permite la destrucción total de los contaminantes a través de mineralización.
- Permite la eliminación de contaminantes recalcitrantes que no pueden serlo por otros medios de tratamiento.
- La generación de lodos es nula.
- Puede ser empleado para tratamiento de contaminantes con concentraciones traza, del orden de partes por billón (*ppb*)
- La formación de *by-products* o, subproductos de reacción es muy baja.
- Las propiedades organolépticas del agua (i. e. color, olor, sabor) son mejoradas con el tratamiento.
- El consumo de energía es considerablemente menor al demandado por otros métodos de tratamiento.
- La vida útil de los sistemas de tratamiento fotocatalíticos es superior a la de otros sistemas.
- Desde la perspectiva ambiental, es un tratamiento viable con bajos impactos negativos.
- Los costos asociados al tratamiento son menores al de otros sistemas convencionales.
- La aplicación de las metodologías es sencilla.

## **EFICIENCIA DEL TRATAMIENTO FOTOCATALÍTICO DE TENSOACTIVOS ANIÓNICOS**

El tratamiento de aguas residuales industriales (e. g. constituidas por concentraciones variadas de tensoactivos, detergentes, compuestos de baja biodegradabilidad y alta toxicidad) por medio fotocatalisis heterogénea es un tema ampliamente estudiado por la comunidad científica como respuesta a la necesidad de mitigar los impactos ambientales causados por estas sustancias sobre los cuerpos de agua, equilibrio de los ecosistemas y el bienestar del ser humano.

A continuación, se presentan algunos resultados del tratamiento fotocatalítico de aguas residuales con presencia de tensoactivos aniónicos.

Gallego y Polanía evaluaron el proceso de degradación vía Foto-Fenton de 4,4'-bis(1,3,5-triazinilamino)-estilbeno-2,2'-disulfonato, que es un compuesto empleado como blanqueador óptico derivado de la

triazina-estilbeno. Se empleó la radiación UV de una lámpara germicida de 36 W, peróxido de hidrógeno  $H_2O_2$  como agente oxidante y hierro trivalente  $Fe^{3+}$  como catalizador. A lo largo del tratamiento se analizó la variación de la demanda química de oxígeno (DQO) de la sustancia blanqueadora y las absorbancias relativas. Los porcentajes de degradación y mineralización obtenidos fueron 72% y 65%, respectivamente. Las condiciones óptimas de tratamiento obtenidas fueron: pH 2,8; 4 ppm de  $Fe^{3+}$  y 500 ppm de  $H_2O_2$ .

Oyama T. et al., emplearon fotocatalisis heterogénea con  $TiO_2$  para degradar un detergente comercial en condiciones de dispersión acuosa del fotocatalizador. El detergente, compuesto principalmente por surfactante aniónico y agentes blanqueadores, fue tratado en presencia de aire e irradiación solar directa. Los mejores porcentajes de degradación se obtuvieron con las condiciones experimentales siguientes: 6 g/L de dióxido de titanio, 4,91 L/min para la tasa de circulación y 4,9 unidades de pH. El seguimiento de la cinética de reacción permitió identificar el primer orden. En adición, el estudio incluyó la evaluación de los efectos causados por el pH, cantidad de fotocatalizador, y la tasa de circulación sobre la cinética de reacción global del detergente.

Por otra parte, Amat et al., analizaron el proceso de degradación de surfactantes comerciales por medio de fotocatalisis heterogénea y foto-Fenton. Los ensayos fueron realizados en una planta piloto solar. Los surfactantes comerciales (dodecilsulfato sódico)  $SDS^{TM}$  y (dodecilmencensulfonato de sodio)  $DBS^{TM}$  fueron degradados bajo condiciones de irradiación solar directa y adición de dióxido de titanio  $TiO_2$  como fotocatalizador. Para el proceso foto-Fenton se empleó la forma divalente  $Fe^{2+}$  y trivalente  $Fe^{3+}$  de hierro y el cromo trivalente  $Cr^{3+}$ . Luego del tratamiento, se obtuvieron porcentajes de degradación iguales y superiores al 80%, para tiempos de residencia inferiores a 3 horas. Los autores concluyeron que la eficiencia de degradación de surfactantes  $SDS$  y  $DBS$  por medio de las técnicas fotocatalíticas es alta, y que la adición de sales ferrosas como fotocatalizadores del proceso Foto-Fenton es crucial. Finalmente, se esbozaron las ventajas de los procesos avanzados de oxidación para el abatimiento de compuestos surfactantes comerciales como alternativa viable desde la perspectiva ambiental y económica.

Con el tratamiento de soluciones acuosas Cleentex<sup>®</sup>, champú automotriz individual, champú automotriz con Wax<sup>®</sup>, Sulforokanol L – 327<sup>®</sup> y Sulfapol 35<sup>®</sup>, provenientes de drenajes en un lavadero de automóviles y de muestras comerciales, Perkowski J. et al., reportaron porcentajes de remoción del orden 35-60% de demanda química de oxígeno (DQO). El método de tratamiento empleado consistió de la combinación radiación UV+dióxido de titanio  $TiO_2$ + oxígeno  $O_2$ . Durante los experimentos se controlaron las variables: i) concentración de fotocatalizador, ii) acidez del medio acuoso, iii) adsorción de surfactantes, iv) foto-oxidación y v) tipo de fuente ultravioleta empleada. Las eficiencias más altas resultaron de condiciones de pH=8,9 y  $1,5g/dm^3$  como dosis de  $TiO_2$ . Adicionalmente, se determinó que la reducción de carbono orgánico total (COT) fue ligeramente inferior (10%) a la de DQO. Finalmente, los autores concluyeron sobre las numerosas ventajas que ostenta la fotocatalisis, en términos de costos y operatividad. Al respecto, reportaron que no es necesario el uso de costosos oxidantes como el ozono o peróxido de hidrógeno y que el empleo de la energía radiante del sol minimiza costos. Además, la alta replicabilidad de las investigaciones por efecto de la alta selectividad del grupo hidroxilo  $HO^*$  ofrece ventajas competitivas de este tratamiento sobre otros tratamientos convencionales.

Arias L. desarrolló una investigación en la que obtuvo porcentajes de degradación del orden 67,7% y 64% de mineralización de 2,2'-estilbeno disulfonato, 4,4'-bis (4-anilino-6-morfolino-s-triazinil) amino. Este es un blanqueador óptico empleado en la industria papelera, textilera, como ingrediente de algunos detergentes y para el blanqueado de polímeros. Arias logró verificar la utilidad de la fotocatalisis heterogénea bajo condiciones de nula biodegradabilidad de la sustancia. Las condiciones óptimas de tratamiento pH, concentración del catalizador, concentración de peróxido de hidrógeno permitieron

hacer seguimiento al proceso de degradación. Para este efecto, se empleó la espectrometría ultravioleta y la demanda química de oxígeno (DQO) como variables de respuesta de eficiencia. Adicionalmente, se evaluó la solubilidad y comportamiento del compuesto bajo condiciones variables de pH. Las condiciones que favorecieron mejores resultados de eficiencia fueron 0,05g/L del blanqueador, pH 5.5 o 7.0, 0,7g/L de dióxido de titanio  $\text{TiO}_2$  y  $2.8 \times 10^{-4}$  Molar de peróxido de hidrógeno  $\text{H}_2\text{O}_2$ .

Los tratamientos de compuestos surfactantes también han sido efectuados en matrices gaseosas con concentraciones relativamente bajas. Hassan y Metcalfe estudiaron la oxidación catalítica del sulfonato de alquilbenzeno lineal (LAS) en aire seco. La variable principal de respuesta fue la temperatura, oscilando en el rango  $180^\circ\text{C}$ - $220^\circ\text{C}$  por tiempos de tratamiento de 120 minutos y presión parcial de oxígeno constante de 1,5 MPa –Mega pascales-. El catalizador  $\text{CuO.ZnO/Al}_2\text{O}_3$  permitió obtener mayores porcentajes de degradación (65%) del LAS. Este favoreció la oxidación de algunos subproductos de reacción como ácidos grasos volátiles (VFA, por sus siglas en inglés). En efecto, se concluyó que la lixiviación de metales durante el proceso fue poco significativa bajo las condiciones experimentales y que el catalizador permitió obtener mayores porcentajes de degradación de LAS, disminución de demanda química de oxígeno COD y carbono orgánico total TOC.

Díaz, J. evaluó la eliminación del surfactante *dodecilbensulfonato sódico* por medio de técnicas fisicoquímicas y fotoquímicas. Su investigación valoró la degradación del compuesto por medio de adsorción con carbón activado, ozonización catalizada y foto-oxidación. El estudio se basó en comparar la eficiencia de técnicas convencionales de oxidación y procesos de oxidación avanzada. Se emplearon sustancias altamente oxidantes como perclorato de sodio, dióxido de cloro, permanganato de potasio y ozono. Las combinaciones de sistemas fueron: i) ozono/peróxido de hidrógeno, ii) ozono/carbón activado, iii) hierro divalente/peróxido de hidrógeno, iv) luz ultravioleta/peróxido de hidrógeno y v) luz ultravioleta/tiosulfato de potasio. Las variables pH, concentración del agente oxidante y tipo de radiación constituyeron las variables de interés. El autor concluyó que los sistemas de oxidación avanzada permiten la degradación de los compuestos surfactantes con altas eficiencias (superiores al 70%), hasta compuestos de baja o nula toxicidad.

La remoción de sodio dodecil sulfato (SDS) fue evaluada por medio de un sistema cíclico de aireación extendida. El estudio fue desarrollado por Mortazavi et al., de la Universidad Modares Tarbiat (Irán). En la investigación se evaluó el porcentaje de remoción del surfactante aniónico SDS de aguas residuales. La metodología, denominada ICEAS (Intermittent Cycle Extended Aeration System) fue reportada como novedosa para este tipo de tratamientos. La concentración de surfactante osciló entre 20 y 400mg/L y la demanda química de oxígeno fue 260 mg/L. De acuerdo con los autores, el tiempo de tratamiento que conduce a porcentajes de remoción cercanos al 98% es 2 horas.

Paschoal F. et al. reportaron porcentajes de reducción de carbono orgánico total –COT- del 94% en un tiempo de tratamiento fotoelectrocatalítico de 90 minutos con el surfactante comercial Tamol™ en medio acuoso (constituido por 0,1 mol/L de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ). Las condiciones experimentales adecuadas durante el experimento fueron de  $E=+1,0\text{ V}$  y pH 2,0. Adicionalmente, se evaluó la degradación del surfactante en presencia del colorante ácido rojo 151, y se obtuvo reducción de coloración de 98% y 81% de COT durante 90 minutos de tratamiento. Los autores manifestaron que las tasas de degradación obtenidas en su estudio son superiores a las reportadas para técnicas convencionales de tratamiento en tiempos relativamente cortos. Por ello, este constituye una técnica potencialmente aplicable para el tratamiento de surfactantes aniónicos con bajas concentraciones.

Por otro lado, Gregory Loraine evaluó el proceso de oxidación e incremento de la biodegradabilidad de aguas residuales industriales compuestas por los surfactantes etoxilato y polivinilpirrolidona. Estos dos compuestos dificultan los procesos de tratamiento biológico de las aguas residuales, por ello, es necesario emplear técnicas no convencionales de tratamiento. En la investigación, se empleó fotoca-

tálisis heterogénea, con luz ultravioleta UV (proveniente de lámparas de vapor a baja presión de Mercurio), peróxido de hidrógeno  $H_2O_2$  y carbón activado granular GAC como medio de soporte. Las concentraciones de peróxido e intensidad de UV fueron modificadas durante los experimentos para obtener las condiciones idóneas de tratamiento. Los autores concluyeron sobre la viabilidad económica del pretratamiento UV/  $H_2O_2$ , el incremento de biodegradabilidad del agua residual y eliminación de concentraciones de PVP, con base en la eficiencia del tratamiento, en el rango 60-85%.

## PERSPECTIVAS FUTURAS

Se espera que el tratamiento de efluentes contaminados con altas concentraciones de tensoactivos aniónicos sea desarrollado por medio de técnicas avanzadas de oxidación y tratamientos que minimicen costos y favorezcan mayor rapidez y eficiencia.

La inversión de capital para investigación y dotación de centros de investigación en universidades y centros académicos será crucial para avanzar en la comprensión de los procesos fotocatalíticos de tratamiento de los tensoactivos aniónicos.

Las modificaciones de los procesos industriales de fabricación de detergentes deberán ser ejecutadas con miras a minimizar los impactos ambientales ocasionados por los actuales tensoactivos y favorecer tratamientos menos costosos y más rápidos de las aguas residuales que los contengan.

El tratamiento fotocatalítico de aguas residuales compuestas por tensoactivos aniónicos supone grandes cambios en los niveles gerencial, técnico y ambiental que sólo pueden ejecutarse bajo esquemas de inversión de capital y apoyo a la investigación, tecnología e innovación.

Finalmente, la participación del sector privado es fundamental para el impulso de iniciativas enfocadas a identificar las aplicaciones potenciales de la fotocatalisis heterogénea con sus respectivas ventajas en el ámbito social, ambiental y económico.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los resultados citados en el presente artículo son consistentes con la necesidad de incrementar eficiencias de degradación y mineralización de tensoactivos aniónicos contenidos de aguas residuales tanto industriales como domésticas. No obstante, es necesario el desarrollo de iniciativas (i. e. proyectos, planes, estrategias, programas) basados en investigaciones para reproducir los sistemas de tratamiento en condiciones geográficas, climáticas, comerciales y económicas diversas. Para ello es necesario manipular variables del proceso, hacer ajustes, calibraciones, para, posteriormente, analizar la viabilidad económica y ambiental de los procesos de oxidación avanzada a fin de brindar solución a problemas actuales asociados a costos y tiempos de tratamiento de efluentes de este tipo.

Para lograr tal fin, es necesario el compromiso de las autoridades ambientales competentes en el desarrollo de proyectos de saneamiento básico y mejoramiento de los sistemas empleados para el tratamiento de las aguas residuales en las zonas de su jurisdicción. Además, se requiere de inversiones económicas importantes en investigación y desarrollo tecnológico que permitan el avance de este tipo de tecnologías innovadoras de tratamiento y facilite su incorporación en el mediano y largo plazo en diferentes zonas del planeta.

La fotocatalisis se postula como una alternativa viable para el tratamiento de aguas residuales con presencia de tensoactivos aniónicos. La implementación de la técnica en la industria requiere de investigaciones más profundas sobre las condiciones óptimas para el tratamiento, al igual que del impulso global de nuevas tecnologías.

Finalmente, se espera que la presente investigación contribuya a la construcción de un marco de referencia sobre el tratamiento fotocatalítico de efluentes industriales que sea de utilidad para quienes

deseen replicar las metodologías empleadas y proponer nuevas soluciones para el tratamiento de aguas residuales de orígenes variables.

## AGRADECIMIENTOS

El autor agradece a la química Adriana Mera y al estudiante de Ing. Ambiental y Sanitaria Uwer Berdugo por el apoyo brindado durante la estancia en el Grupo de Investigación en Residuos Peligrosos y Sólidos Urbanos (GIRPSU). Se expresan agradecimientos a Víctor Adrian Santafé Torres, Ingeniero de Sistemas de la Universidad del Magdalena, por las sugerencias de forma y estilo para la presentación del artículo. Igualmente, a la Universidad del Magdalena, por facilitar el acceso a las bases de datos científicas Scielo®, Science Direct®, Proquest® y Ebrary®.

## REFERENCIAS

1. FORERO, J.; et al. Aplicación de procesos de oxidación avanzada como tratamiento de fenol en aguas residuales industriales de refinería. *En: CT&F - Ciencia, Tecnología y Futuro*. 2005. Vol. 3, no. 1.
2. HOSSEINI, F.; MALEKZADEH, F.; AMIRMOZAFARI, N.; GHAEMI, N. Biodegradation of anionic surfactants by isolated bacteria from activated sludge. *En: International Journal of Environmental Science and Technology*. 2006. Vol. 4, no. 1. p. 127-132.
3. ZAMUDIO, Evelyn. Tratamiento biológico de las aguas residuales generadas en el lavado de suelos contaminados con hidrocarburos del petróleo. Tesis Maestría en Bioprocesos. México D.F: Instituto Politécnico Nacional. Unidad profesional interdisciplinaria de biotecnología. 2010. 118 p.
4. RODRÍGUEZ, Manuel. Contribución al estudio de la degradación anaerobia de tensoactivos aniónicos: alquilbencensulfonatos lineales, alquil sulfatos y alcoholes etoxilados sulfatos. España: Tesis de Doctorado Ingeniería Química. Universidad de Alicante. 1996. 279 p.
5. IBRAHIM, M. Anionic surfactants as MBAS (Methylene Blue Active Substances). *En: Laboratory Section of the Division of Water Quality, N.C. Department of Environmental and Natural Resources*. 2007. p. 1-20.
6. RUÍZ, Francisco. Comportamiento ambiental de tensoactivos comerciales aniónicos y no iónicos. Tesis Máster Universitario en Ciencia y Tecnología de Coloides e Interfases. España: Facultad de Ciencias. Departamento de Ingeniería Química. Granada. Septiembre de 2010. 238 p.
7. MUÑOZ, A. Nuevas aportaciones al desarrollo de metodologías en química verde: eliminación fotocatalítica de contaminantes fenólicos; preparación de fotocatalizadores mediante procesos químicos suaves. *En: Tesis de doctorado*. Universidad Autónoma de Barcelona. Departamento de Química. 2007. CARMONA, O. Tratamiento fisicoquímico de aguas residuales. [PDF]. [Citado 20 de marzo 2009]. URL disponible en: <<http://www.cepis.org.pe/bvsaidis/tratagua/mexicon/R-0196.pdf>>
8. WANG, B.; KONG, W.; MA, H.; GU, L. Electrochemical treatment of anionic surfactants in synthetic wastewater with three dimensional electrodes. *En: Journal of Hazardous Materials*. 2006. BB137. p. 1532-1573.
9. SAYADI, S.; ALOUI, F.; KCHAOU, S. Physicochemical treatment of anionic surfactants wastewater: Effect on aerobic biodegradability. *En: Journal of Hazardous Materials*. 2009. Vol. 164. p. 353-359.

10. YAACOUBI, A.; BAUDU, M.; SOUABI, S.; ABOULHASSAN, M. Removal of surfactant from industrial wastewaters by coagulation flocculation process. En: International Journal of Environmental Science and Technology. 2006. Vol. 3, no. 4. p. 327-332.
11. AMAT, A.; ARQUES, A.; MIRANDA, M.; SEGUI, S. Photo-Fenton reaction for the abatement of commercial surfactants in a solar pilot plant. En: Solar Energy New York. 2004. Vol. 77, no. 5, p. 559.
12. PAVAS, E. Fotocatálisis: una alternativa viable para la eliminación de compuestos orgánicos. En: Universidad Eafit. 2002. Vol. 127, p. 59-64.
13. CANDELA, R. Evolución de la toxicidad y biodegradabilidad de contaminantes persistentes en medios acuosos durante un proceso de fotocatálisis solar empleando diferentes técnicas analíticas. En: Universidad Politécnica de Valencia. Tesis Doctoral. 2007. 220 p.
14. MARÍN, J. Degradación de naranja de metilo en un nuevo fotorreactor solar de placa plana con superficie corrugada. En: Scientia et Technica. 2007. Vol. 13, no.34, p. 435-440.
15. YASSUMOTO, L.; OSAJIMA, J. y TAKASHIMA, K. Efeitos de oxidantes e sais inorgânicos na degradação fotocatalítica do herbicida imazetapir mediada por dióxido de titânio. En: Eclét. Quím. 2007. Vol. 32, no. 1, p. 27-32.
16. BANDALA, E.; et al. Aplicación de procesos avanzados de oxidación en la desactivación secuencial de microorganismos resistentes en agua. En: Ciencia...Ahora. 2007. Vol. 20, no.10.
17. RUBIANO, C. y LAGUNA, A. Estudio sobre las posibilidades de aplicación de la fotocatálisis heterogénea a los procesos de remoción de fenoles en medio acuoso. En: Tesis de Pregrado. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Minas. Escuela de Procesos y Energía. 2004.
18. XING, H.; WANG, Y.; HU, C. Characterization and evaluation of a novel exalting round- plate photocatalytic reactor. En: Water Environment Research. 2001. Vol. 73, no. 6, p. 655.
19. CESCINETTO, G.; SAUER, T.; JOSE, H.; MUNIZ, R.; HUMERES, E. Evaluation of Relative Photonic Efficiency in Heterogeneous Photocatalytic Reactors. En: Journal of the Air & Waste Management Association. 2004. Vol. 54, no. 1, p.77-82.
20. MORRIS, R.; KRIKANOVA, E.; SHADMAN, F. Photocatalytic membrane for removal of organic contaminants during ultra-purification of water. En: Clean Technologies and Environmental Policy. 2004 Vol. 6, no. 2, p. 96-104.
21. HERNÁNDEZ, F.; GEISSLER, G. Photooxidative Treatment of Sulfurous Water for Its Potabilization. En: Photochemistry and Photobiology. 2005. Vol. 81, no.3, p.636-640.
22. MORAIS, J.; SIRTORI, C. y PERALTA, P. Tratamento de chorume de aterro sanitário por fotocatalise heterogênea integrada a processo biológico convencional. En: Quím. Nova. 2006. Vol. 29, no. 1, p. 20-23.
23. KUMAR, A.; SAROJ, D.; TARE, V.; BOSE, P. Treatment of Distillery Spent-Wash by Ozonation and Biodegradation: Significance of pH Reduction and Inorganic Carbon Removal Before Ozonation. En: Water Environment Research. 2006. Vol. 78, no. 9, p. 994-1004.
24. MERA, A.; et al. Fotocatálisis heterogénea para el tratamiento de desechos líquidos, utilizando dióxido de titanio E-171 y Degussa P-25. En: Revista RE'TAKVN. 2008. Vol. 1, no. 1.
25. DEMEESTERE, K.; DEWULF J.; LANGENHOVE, H. Heterogeneous Photocatalysis as an Advanced Oxidation Process for the Abatement of Chlorinated, Monocyclic Aromatic and

- Sulfurous Volatile Organic Compounds in Air: State of the Art. En: *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*. 2007. Vol. 37, no. 6, p. 489-538.
26. SATTLER, M. y LILJESTRAND, H. Method for Predicting Photocatalytic Oxidation Rates of Organic Compounds. En: *Journal of the Air & Waste Management Association*. 2003. Vol. 53, no. 1, p. 3-12.
  27. GÓMEZ, H.; et al. Study of phenol photodegradation with TiO<sub>2</sub>/-WO<sub>3</sub> coupled semiconductors activated by visible light. En: *J. Chil. Chem. Soc.* 2006. Vol. 51, no. 4, p. 1006-1009.
  28. PASCOAL, S.; et al. Aplicação de radiação UV artificial e solar no tratamento fotocatalítico de efluentes de curtume. En: *Quím. Nova*. 2007. Vol. 30, no. 5, p. 1082-1087.
  29. SOARES, E.; LANSARIN, M.; y MORO, C. A study of process variables for the photocatalytic degradation of rhodamine B. En: *Braz. J. Chem. Eng.* 2007. Vol. 24, no. 1, p. 29-36.
  30. KAHMARK, K.; UNWIN, J. Pulp and paper effluent management. En: *Water Environment Research*. 1997. Vol. 69, no. 4, p. 641.
  31. SILVA, M.; MARQUES, R.; MACHADO, N.; y SANTOS, O. Evaluation of Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> and Ag/Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> in the photocatalytic degradation of dyes from textile industries. En: *Braz. J. Chem. Eng.* 2002. Vol. 19, no. 4, p. 359-363.
  32. WANG, J.; CHEN, S.; QUAN, X.; ZHAO, H.; ZHAO, Y. Enhanced Photodegradation of PNP on Soil Surface under UV Irradiation with TiO<sub>2</sub>. En: *Soil & Sediment Contamination*. 2007. Vol. 16, no. 4, p. 413-421.
  33. GIL, E.; QUINTERO, L.; RINCÓN, M.; RIVERA, D. Degradación de colorantes de aguas residuales empleando UV/TiO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/Fe<sup>2+</sup>. En: *Universidad Eafit*. 2007. Vol. 43.
  34. ASAHIR, R.; et al. Visible-Light Photocatalysis in Nitrogen-Doped Titanium Oxides. En: *Science*. 2001. Vol. 293, no. 269.
  35. CHEMWENO, M.; CERNOHLAVEK, L.; JACOBY, W. Deactivation of Titanium Dioxide Photocatalyst by Oxidation of Polydimethylsiloxane and Silicon Sealant Off-Gas in a Recirculating Batch Reactor. En: *Journal of the Air & Waste Management Association*. 2008. Vol. 58, no. 1, p. 12-18.
  36. KU, Y.; CHEN, J.; CHEN, H. Decomposition of Benzene and Toluene in Air Streams in Fixed-Film Photoreactors Coated with TiO<sub>2</sub> Catalyst. En: *Journal of the Air & Waste Management Association*. 2007. Vol. 57, no. 3, p. 279-285.
  37. SANTOS, F.; AZEVEDO, E.; SANTANNA, J.; y DEZOTTI, M. Photocatalysis as a tertiary treatment for petroleum refinery wastewaters. En: *Braz. J. Chem. Eng.* 2006. Vol. 23, no. 4, p. 451-460.
  38. BRITTO, J. y RANGEL, M. Processos avançados de oxidação de compostos fenólicos em efluentes industriais. En: *Quím. Nova*. 2008. Vol. 31, no. 1, p. 114-122.
  39. RODRÍGUEZ, C.; ZIOLLI, R. y GUIMARAES, J. Inactivation of *Escherichia coli* in water by TiO<sub>2</sub>-assisted disinfection using solar light. En: *J. Braz. Chem. Soc.* 2007. Vol. 18, no. 1, p. 126-134.
  40. FERREIRA, I. y DANIEL, L. Fotocatálise heterogênea com TiO<sub>2</sub> aplicada ao tratamento de esgoto sanitário secundário. En: *Eng. Sanit. Ambient.* 2004. Vol. 9, no. 4, p. 335-342.
  41. VALENTE, J.; et al. Síntese e caracterização textural do catalisador CeO<sub>2</sub>/TiO<sub>2</sub> obtido via sol-gel: fotocatalise do composto modelo hidrogenoftalato de potássio. En: *Eclét. Quím.* 2005. Vol. 30, no. 4, p. 7-12.

42. SUKLA, D.; TYAGI, V. Anionic gemini surfactants: a distinct class of surfactants. En: Journal of Oleo Science. 2006. Vol. 55. p. 215-226.
43. TAPIA, J.; et al. Estudio de reducción fotocatalizada de cromo hexavalente. En: Bol. Soc. Chil. Quím. 2002. Vol. 47, no. 4, p. 469-476.
44. CRISTANTE, V.; et al. Enhanced photocatalytic reduction of Hg(II) in aqueous medium by 2-aminothiazole-modified TiO<sub>2</sub> particles. En: J. Braz. Chem. Soc. 2006. Vol. 17, no.3, p. 453-457.
45. ARAÚJO, A.; et al. Photodegradation of soluble and emulsive cutting fluids using TiO<sub>2</sub> as catalyst. En: J. Braz. Chem. Soc. 2006. Vol. 17, no.4, p.737-740.
46. NOGUEIRA, R. y JARDIM, W. A fotocatalise heterogênea e sua aplicação ambiental. En: Quím. Nova. 1998. Vol. 21, no. 1, p. 69-72.
47. LORAINE, G. Oxidation of Polyvinylpyrrolidone and an Ethoxylate Surfactant in Phase-Inversion Wastewater. En: Water Environment Research. 2008. Vol. 80, no. 4, p. 373-379.
48. WINTERBOTTOM, J.; KHAN, Z.; BOYES, A.; RAYMAHASAY, S. Photocatalyzed oxidation of phenol in water using a Cocurrent Downflow Contactor Reactor (CDCR). En: Environmental Progress. 1997. Vol. 16, no. 2, p. 125.
49. KHARE, P.; RAO, N.; KAUL, S. Adsorption Integrated Photocatalytic Degradation of Navinon and Foron Class Disperse Dyes. En: SESI Journal :Journal of the Solar Energy Society of India. 2004. Vol. 14, no.1, p.19-24.
50. GIRALDO, L.; FRANCO, E.; ARANGO, J. La fotocatalisis como alternativa para el tratamiento de aguas residuales. En: Revista Lasallista de Investigación. 2004. Vol. 1, no.1, p. 86.
51. Memorias del II Simposio Latinoamericano de Procesos Avanzados de Oxidación y sus combinaciones con otros procesos: principios y aplicaciones. Universidad de Medellín, Medellín, Colombia. 2008.
52. MERA, A.; et al. Alternativa para la segregación de residuos químicos generados en el Laboratorio de Ingeniería Ambiental y Sanitaria de la Universidad del Cauca. En: Producción + Limpia. 2007. Vol. 2, no. 1.
53. MORTAZAVI, B.; KHAVANIN, A.; MOUSSAVI, G.; AZHDARPOOR, A. Removal of sodium dodecyl sulfate in an intermittent cycle extended aeration system. En: Pakistan Journal of Biological Sciences. 2008. Vol. 11, no. 2, p. 290-293.
54. LITTER, M.; DOMÈNECH X. y MANSILLA H. Remoción de contaminantes metálicos, en: Eliminación de Contaminantes por Fotocatálisis Heterogénea, Segunda edición, editores B. Sánchez Cabrero y M.A. Blesa, Editorial CIEMAT, Madrid. ISBN 84 84-7834-489-6. 2004. Capítulo 6, p. 163-183.
55. GALLEGO, C. y POLANÍA, M. Degradación fotocatalítica de un derivado del 4,4'-bis(1,3,5-triazinilamino)-estilbeno-2,2'-disulfonato en solución acuosa por el proceso foto-fenton (Uv/ Fe<sup>3+</sup>/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>). En: Scientia et Technica. 2004. Vol. X, no. 24.
56. OYAMA, T.; AOSHIMA, A.; HORIKOSHI, S.; HIDAHA, H. Solar photocatalysis, photodegradation of a commercial detergent in aqueous TiO<sub>2</sub> dispersions under sunlight irradiation. En: Solar Energy. 2004. Vol. 77, no. 5, p. 525.
57. PERKOWSKI, J.; BZDON, S.; BULSKA, A.; JÓŹWIAK, W. Decomposition of Detergents Present in Car-Wash Sewage by Titania Photo-Assisted Oxidation. En: Polish J. of Environ. Stud. 2006. Vol. 15, no. 3, p. 457-465.

58. ARIAS, Lina. Degradación del 2,2' – estilbeno disulfonato, 4,4' – bis ((4 – anilino – 6 – morfolino - s – triazinil) amino, por fotocatalisis. En: Scientia et Technica. 2006. Vol. 12, no.32.
59. HASSAN, M. y METCALFE, I. Catalytic wet air oxidation of linear alkylbenzene. En: Journal of Chemical and Natural Resources Engineering. 2007. Vol. 1, no.1, p. 1-14.
60. DÍAZ, J. Eliminación del surfactante dodecilsulfonato sódico de las aguas mediante adsorción en carbones activados, ozonización catalizada y fotooxidación. En: Tesis doctoral. Universidad de Granada. Facultad de ciencias. Departamento de Química Inorgánica. 2008. ISBN: 978-84-691- 4425-1
61. PASCHOAL, F.; ANDERSON, M.; y ZANONI, V. Photoelectrocatalytic Oxidation of Anionic Surfactant used in Leather Industry on Nanoporous Ti/TiO<sub>2</sub> Electrodes. En: J. Braz. Chem. Soc. 2008. Vol. 19, no. 4, p.803-810.
62. RODRÍGUEZ, J.; MEDINA, S.; JÍMENEZ, I. Propiedades, aplicaciones y producción de biotensoactivos. En: Revista Internacional de Contaminación Ambiental. 2010. Vol. 26, no. 1. p. 65-84