

Aproximaciones biológicas y fisicoquímicas en el tratamiento de contaminantes: un resumen del aporte de la Universidad de los Andes¹

Biological and Physical-chemical Approaches for Pollutants Treatment: a Brief Review of the Universidad de los Andes Contribution

Recibido 21 de octubre de 2009, modificado 17 de diciembre de 2009, aprobado 10 de enero de 2010.

Jenny Dussán Garzón

Ph.D. Profesora asociada, Departamento de Ciencias Biológicas, Directora-Investigadora del Centro de Investigaciones Microbiológicas (CIMIC), Universidad de los Andes. Bogotá D.C., Colombia.

jdussan@uniandes.edu.co ✉

Martha Josefina Vives-Florez

Ph.D. Profesora asociada, Departamento de Ciencias Biológicas, Investigadora del Centro de Investigaciones Microbiológicas (CIMIC), Universidad de los Andes. Bogotá D.C., Colombia.

mvives@uniandes.edu.co ✉

Víctor Manuel Sarria

Ph.D. Profesor asociado, Departamento de Química, Director del grupo Procesos de Oxidación avanzada para la remediación ambiental (PROXAR), Universidad de los Andes. Bogotá D.C., Colombia.

vsarria@uniandes.edu.co ✉

Oscar Fernando Sánchez Medina

M.Sc. Profesor instructor, Departamento de Ingeniería Química, Investigador del Grupo de Diseño de Productos y Procesos (GDPP), Universidad de los Andes. Bogotá D.C., Colombia.

osanchez@uniandes.edu.co ✉

¹ Todos los autores aportaron en la misma proporción en el artículo.

Luis Fernando Delgado

Ph.D. Profesor asistente, Departamento de Ingeniería Química, Investigador del Grupo de Diseño de Productos y Procesos (GDPP), Universidad de los Andes. Bogotá D.C., Colombia.

lf.delgado430@uniandes.edu.co ✉

Sebastián Hernández Sierra

M.Sc. Profesor instructor, Departamento de Ingeniería Química, Investigador del Grupo de Diseño de Productos y Procesos (GDPP), Universidad de los Andes. Bogotá D.C., Colombia.

sebherna@uniandes.edu.co ✉

Andrés Fernando González Barrios

Ph.D. Profesor asistente, Departamento de Ingeniería Química, Investigador del Grupo de Diseño de Productos y Procesos (GDPP), Universidad de los Andes. Bogotá D.C., Colombia.

andgonza@uniandes.edu.co ✉

PALABRAS CLAVES

Bioremediación, micro-contaminantes, oxidación avanzada, hidrocarburos.

KEY WORDS

Bioremediation, micro-pollutants, advanced Oxidation, hydrocarbons.

RESUMEN

Este resumen pretende dar una visión global de los aportes de la Universidad de los Andes en el tratamiento de aguas y suelos con la presencia de compuestos de difícil degradación o tiempo de vida media prolongado, tales como fármacos (Ciclofosfamida), lodos aceitosos y derivados de la industria del petróleo (Tolueno, Xileno, Fenol) derivados de la industria textil, química y pesticidas (Bisphenol A, AMBI, Glifosato, Isoproturon y Metobromuron), usando tecnologías ya sea basadas en procesos biológicos (biorremediación y bioadsorción) o de oxidación avanzada (foto-Fenton).

ABSTRACT

This summary intends to give a global view of the Universidad de los Andes contributions related to the water and soil treatment in the presence of recalcitrant or long half-life aquatic pollutants such as drugs (Cyclophosphamide), oil sludge and petroleum (Toluene, Xylene and Phenol), textile, chemical (Bisphenol A, AMBI) and pesticides (Glyphosate, Isoproturon, and Metobromuron) industry derived products based on biological (bioremediation and bioadsorption) and advanced oxidation (Photo-Fenton) approaches.

INTRODUCCIÓN

La contaminación ambiental de ecosistemas que comprometen suelo, agua y aire son causados directa o indirectamente por los grandes centros urbanos. El derrame de petróleo, los pasivos ambientales generados durante la operación de extracción del mismo, la presencia de micro-contaminantes, tales como fármacos, y compuestos derivados de la industria, tales como tintas, son unos pocos ejemplos del amplio espectro, no solo en cantidad sino también en escala del tipo de contaminantes que Colombia necesita enfrentar en la próxima década. La Universidad de los Andes, consciente de la problemática, ha prestado atención a las dificultades que se avecinan tratando de salir del paradigma del uso de sistemas convencionales de tratamiento de efluentes de alta carga orgánica (aguas residuales domésticas) para proponer tecnologías que sean útiles en el tratamiento de compuestos recalcitrantes, los cuales pueden presentar menores emisiones pero cuyo el impacto ambiental puede ser igual o mayor que las fuentes de contaminación típicas. Estas tecnologías están basadas en aproximaciones biológicas (biorremediación o bioadsorción) o físicoquímicas (procesos de oxidación avanzada). El propósito de este resumen es el de describir de manera breve el trabajo de la Universidad de los Andes relacionado con el tratamiento de micro-contaminantes, hidrocarburos, metales pesados y derivados de la industria textil, con el objetivo de aumentar la red de trabajo tanto institucional como nacional e internacional. Es de esperarse que en cualquier resumen queden esfuerzos sin nombrar; por tanto, los autores piden disculpas por omitirlos y dejan claro que el acto no es intencional.

LA PROBLEMÁTICA DE LOS MICRO-CONTAMINANTES

Recientemente, se presta una atención creciente a la presencia de micro-contaminantes en el medio acuático y en las plantas de tratamiento de aguas residuales. Los micro-contaminantes son un tipo de contamina-

ción que pueden afectar el medio ambiente, incluso en bajas concentraciones. A menudo están presentes en el medio acuático en concentraciones muy bajas ($\mu\text{g/l}$, ng/L) en comparación con otros contaminantes (mg/L). La presencia de micro-contaminantes en el medio acuático en su forma inicial o metabolizada porta el doble problema de la cuantificación de su toxicidad y las posibles formas de su eliminación. Hoy, esta preocupación no está sujeta a ninguna legislación ni en Colombia ni en cualquier otro lugar del mundo; incluso algunos países desarrollados están empezando a mostrar interés (Ejemplo: la misión de la Agencia Francesa de Seguridad Sanitaria de Medio Ambiente y trabajos en curso sobre el cáncer, AFS-SET). Los micro-contaminantes abarcan una gran familia de compuestos químicos ampliamente utilizados en las ciudades (hospitales, hogares, industria) tales como detergentes, productos de limpieza, aditivos para plásticos, hidrocarburos, plaguicidas, herbicidas, cosméticos, perfumes, medicamentos, hormonas y sus metabolitos. Una atención especial es prestada a los compuestos farmacéuticos dada su especificidad: éstos son puestos en el mercado después de una rigurosa selección y se comercializan los compuestos biológicamente más activos. Para algunos medicamentos, los niveles de consumo por país no superan unos pocos cientos de kilogramos, para otros, sin embargo ascienden a cientos o miles de toneladas [1].

El riesgo potencial asociado a la presencia de productos farmacéuticos a concentraciones bajas en medios acuáticos es actualmente un tema de debate. Hasta el momento, no existen reportes sobre el estudio *in situ* que permitan evaluar objetivamente el rol de la presencia de medicamentos sobre perturbación de organismos o de comunidades, salvo en el caso de hormonas esteroides en medio acuático; sin embargo, no se puede excluir, sobre la base de conocimientos actuales, que a largo término, la presencia continua de moléculas farmacéuticas en los ecosistemas acuáticos y terrestres no sean una fuente de peligro [1]: la exposición crónica a estos compuestos puede afectar una variedad de organismos en diferentes estados de

desarrollo, para los cuales no se conoce ninguna acción farmacológica.

La presencia de compuestos farmacéuticos en diversas matrices acuáticas ha sido reportada en varios estudios [2, 3, 4, 5]. La mayoría de los tratamientos biológicos de aguas residuales no son capaces de eliminar efectivamente estos compuestos farmacológicamente activos [6]. Esto, sumado a una deficiente eliminación de medicamentos caducados, contribuye a la contaminación de los ambientes acuáticos de agua dulce con productos farmacéuticos [5]. Por otra parte, el hecho de que estas moléculas están continuamente vertidas en el medio acuático les confiere una aparente persistencia incluyendo aquéllos con una vida media corta [4, 5]. La eliminación de estos compuestos, en particular para el tratamiento de agua potable, es difícil y costosa. Por lo tanto, es necesario considerar otras formas de tratamiento más eficaces para eliminarlos [2].

En la actualidad, varios estudios son llevados a cabo para analizar y optimizar la eliminación de productos farmacéuticos por biorreactores con membrana (BRM). Un BRM resulta del acoplamiento entre el tratamiento biológico y una separación líquido/sólido a través de una membrana. Los BRM suelen operar a altas edades de lodos y altas concentraciones de biomasa, lo que permite la intensificación de los procesos biológicos y así favorecer la eliminación de los contaminantes con características específicas, tales como su baja bio-degradabilidad y baja concentración. La aplicación de tecnología de BRM para evaluar su potencial de degradación de un medicamento contra el cáncer, ha sido estudiada por el profesor Luis Delgado del Grupo de Diseño de Productos y Procesos (GDPP) [7, 8]. La molécula objetivo elegida durante este estudio, la ciclofosfamida (CP), se utiliza principalmente en los tratamientos del cáncer y tiene propiedades genotóxicas de cualquier organismo individual o de vida [2]. La eliminación de la CP y de su metabolito 4-ceto-CP ha sido de un 80% para ambos compuestos. El estudio permitió demostrar la viabilidad de los BRM para tratar contaminaciones a

bajas concentraciones que causan alteraciones en la biodegradación.

Sin embargo, la remoción no es total, por lo que un tratamiento terciario es necesario si se precisa una completa eliminación de la toxicidad de compuestos citostáticos.

DESARROLLOS EN PROCESOS DE BIORREMEDIACIÓN

BIORREMEDIACIÓN DE COMPUESTOS DERIVADOS DEL PETRÓLEO

En 1989 tras el derrame petrolero del buque Exxon Valdes en Alaska, la biorremediación de suelos y aguas contaminadas con pasivos y activos ambientales ha tenido como eje fundamental el conocimiento y utilización de la diversidad de microorganismos, tanto de bacterias como de hongos, para bioprospectarlos como candidatos en tecnologías limpias y amigables con los diferentes ecosistemas donde ellos se encuentran. [9].

Es así como en Colombia, en los diferentes pisos térmicos (desde zonas de los Llanos Orientales, pasando por la Orinoquía, por la zona sur y por la costa Atlántica), el Centro de Investigaciones Microbiológicas-CIMIC, particularmente el grupo de Microbiología Ambiental y Bioprospección (MAB) ha aislado durante más de 15 años microorganismos de ambientes contaminados con niveles mayores de 400.000 ppm de hidrocarburos totales petróleo (TPH's) en lodos aceitosos provenientes de la industria petrolera [9, 10,11].

El potencial de biodegradación de los diferentes compuestos de hidrocarburos del petróleo como tolueno, xileno, fenol, naftaleno, diesel, gasolina entre otros [12], ha sido determinado por técnicas cualitativas y cuantitativas utilizando técnicas como presión de selección con sustrato limitante y cromatografía de gases. Todos los trabajos se han complementado con herramientas moleculares, de tal forma que la determinación por PCR de los genes responsables

de las rutas catabólicas [13] y determinación de proteínas implicadas en el proceso de degradación [14], han llevado a la identificación de un grupo relevante de microorganismos como *Pseudomonas*, *Acinetobacter*, *Ralstonia*, *Bacillus*, y *Chrysobacterium*, entre los más diversos en términos de riqueza y abundancia. De tal forma que la base de datos robusta de genes caracterizados, rutas metabólicas expresadas bajo sustratos específicos, ha sido la base fundamental para bioprospectarlos en primera instancia en pruebas piloto, de campo y, posteriormente, en zonas de tratamiento tanto intensivo como extensivo [15]. Hoy por hoy, tres aislamientos del grupo *Pseudomonas* de la región de Tame, Arauca, son empleados continuamente en biorremediación de lodos aceitosos y un consorcio de 10 bacterias pertenecientes a los grupos de *Bacillus*, *Flavobacterium*, *Acinetobacter* y *Pseudomonas* son bioaumentados y estimulados para tratamientos continuos de lodos aceitosos provenientes de crudo con grado °API pesado-medio y liviano (°API 12 hasta °API 35) en la región del Casanare [16, 17, 18]. Con estas dos metodologías, la biorremediación ha sido exitosa en un plazo de 45 días y una disminución del contaminante de 400.000 ppm a límites inferiores a la norma colombiana (menos de 10.000 ppm).

Dado que generalmente los lodos aceitosos vienen acompañados de otros contaminantes como metales pesados, el CIMIC inició hace seis años una línea de investigación en la tolerancia-resistencia de microorganismos a cuatro metales pesados que son los más frecuentes en lodos aceitosos: Arsénico, Cromo, Plomo y Mercurio [19, 20, 21]. Por las técnicas anteriormente descritas se logró caracterizar en algunos aislamientos sistemas de bombas de eflujo para cromo, canales de acumulación en el caso particular del plomo, responsables de la resistencia a valores mayores de 5mM de acetato de plomo (Figura 1), proteínas implicadas en la adsorción de mercurio, generando una resistencia de 35 mg/l de cloruro de mercurio, características específicas de la membrana de bacterias como *Bacillus sphaericus* cepas CBA34 en tolerancia a arsénico, permitiendo tolerar concentraciones

mayores de 200 mM de arsenato de sodio y proteínas asociadas a la pared y características asociadas a la membrana en los grupos de bacterias pertenecientes a los géneros *Bacillus* y *Pseudomonas* [20, 21]. Por lo tanto, la gran diversidad de microorganismos descrita en términos de riqueza, abundancia y versatilidad metabólica muestran el potencial que tenemos en Colombia para implementar procesos de biorremediación de compuestos aromáticos-alifáticos-poliaromáticos y de metales pesados, desarrollando así una práctica amigable con el ecosistema, sin necesidad de introducir especies foráneas o emplear otras técnicas que actualmente se debaten como la desorción térmica que aumentaría la concentración de CO₂ y, por ende, el efecto invernadero y el calentamiento global.

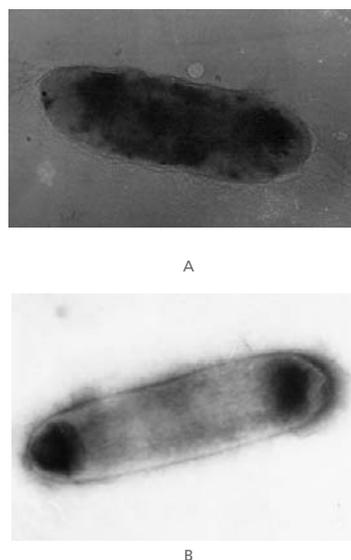


Figura 1. Microscopía electrónica de transmisión del aislamiento GNO4-*Pseudomonas* sp crecido bajo presencia de 30mM de plomo (A) y en ausencia del metal (B).

HONGOS EN BIORREMEDIACIÓN DE AMBIENTES CONTAMINADOS CON HIDROCARBUROS

Las bacterias han sido tradicionalmente los microorganismos escogidos para la remoción del ambiente de contaminantes tipo hidrocarburos del petróleo [22]. No obstante, la experiencia ha mostrado que las capacidades degradadoras de las bacterias más frecuentemente reportadas se restringen en gran me-

dida a alcanos y aromáticos simples, y deja intactos compuestos más complejos y que permanecen como contaminantes en el ambiente [23]. Recientemente se ha propuesto el uso de hongos que, con sus extensas capacidades metabólicas, puedan realizar la degradación de las fracciones recalcitrantes y pesadas del petróleo y de lodos aceitosos [24]. El Grupo de Microbiología Ambiental y Bioprospección (MAB) de la Universidad de los Andes adelanta investigaciones que permitan aprovechar la diversidad microbiana nativa colombiana para realizar procesos de bioremediación más completa, al usar inóculos combinados y secuenciales de bacterias y hongos aislados de cada localidad. El MAB completa ya 20 años de experiencia en bioremediación con bacterias pero hace poco se inició la exploración de la diversidad de hongos nativos presentes en estos ambientes. Los datos preliminares obtenidos por el grupo, con la participación de estudiantes de pregrado y maestría del Departamento de Ciencias Biológicas, son promisorios en diversidad y utilidad. A partir de tres zonas localizadas en el Casanare contaminadas con lodos de producción de petróleo, se logró obtener un número considerable de aislamientos de hongos que presentaban crecimiento activo en el suelo contaminado [25]. El microorganismo más frecuente fue identificado como *Aspergillus terreus*, seguido por *Paecilomyces* spp. Las evaluaciones preliminares realizadas mostraron que la bioaumentación de hongos nativos en sistemas microcosmos mejoró la remoción de hidrocarburos aromáticos y asfálticos; partiendo de valores iniciales cercanos a 35.000 ppm, los hidrocarburos aromáticos disminuyeron a 20.000 ppm en 31 días de tratamiento, mientras que en los microcosmos controles (no bioaumentados) los valores de concentración de aromáticos presentaron mayor variación, detectándose hasta 28.000 ppm. Más interesante fue la disminución de hidrocarburos asfálticos, que disminuyeron de 20.000 ppm a cerca de 11.000 ppm, mientras que en los controles no bioaumentados los valores mínimos fueron de 15.000 ppm [25]. También se ha obtenido evidencia de la capacidad de estos hongos para

producir enzimas como lacasa y peroxidasa [25, 26], lo que pone de presente la importancia de estudiar a fondo estos organismos, especialmente teniendo en cuenta que las capacidades enzimáticas de los hongos son aplicables no sólo a la degradación de contaminantes sino también de residuos lignocelulósicos (de interés en producción de biocombustibles de segunda generación).

USO DE ENZIMAS PARA DEGRADACIÓN DE SUBPRODUCTOS INDUSTRIALES

En la línea de Biorremediación, el GDPP ha evaluado la producción de la enzima lacasa mediante el cultivo del hongo *Trametes pubescens*, hongo de la putrefacción blanca. La lacasa es una enzima oxidoreductasa producida por muchos organismos, que se ha encontrado en plantas, bacterias, insectos y hongos [27]. Actualmente se emplea en la industria alimenticia, papelera y textil, se usa también en nanobiotecnología, bioremediación, síntesis química y cosmética. Esta enzima se caracteriza por tener un centro catalítico conservado en todos los organismos, compuesto por cuatro átomos de cobre que le confieren color azul, propiedad que la hace perteneciente a la familia de las cuproproteínas azules. En la reacción que cataliza, se produce agua a partir de oxígeno molecular y la oxidación de un sustrato reducido. La especificidad de esta enzima en general es baja y puede utilizar muchos sustratos como fuente de electrones. Se ha reportado actividad sobre orto- y para- difenoles, amino-fenoles, poli-fenoles, poli-aminas, lignina y algunos iones inorgánicos [28]. Una ventaja particular de la lacasa, observada durante el estudio del mecanismo de acción de la enzima es que, a pesar de tener un potencial redox inferior a algunas sustancias, puede modificarlas mediante el uso moléculas que actúan como transportadoras de electrones. Este mecanismo permite la degradación de compuestos no fenólicos con un potencial redox superior al de la enzima. De esta manera, se amplía el rango de sustratos sobre los que puede actuar y permite ser aplicada en más actividades como oxidación de contaminantes orgánicos, desarrollo de biosensores y celdas de biocombustible [28].

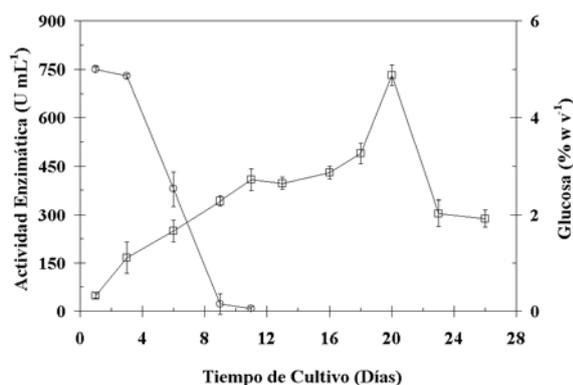


Figura 2. Perfil de actividad enzimática (□) y concentración de glucosa (○) en un cultivo sumergido de *T. pubescens* empleando aserrín como residuo industrial.

Las lacasas son producidas como múltiples isoenzimas [29]. Esta enzima se produce principalmente como metabolito secundario y de forma extracelular en la fase estacionaria de su crecimiento tras el agotamiento de nutrientes esenciales para el hongo, como la glucosa. Wong y Yu [30] encontró experimentalmente una relación entre el agotamiento de glucosa y la formación de lacasa en un cultivo del hongo de putrefacción blanca *T. versicolor*, el cual produce pequeñas cantidades de la enzima durante la fase de crecimiento en la que el microorganismo dispone de glucosa suficiente. En la medida que la glucosa es agotada, la producción de lacasa se incrementa a 20 U L⁻¹. Una vez el hongo ha llegado a la fase estacionaria de su metabolismo y se ha agotado la glucosa, la concentración de lacasa en el líquido de cultivo alcanza las 100 U L⁻¹. La especie *T. pubescens* presenta un comportamiento similar a *T. versicolor* en la producción de lacasa durante las etapas de su metabolismo.

El empleo de residuos agroindustriales se ha difundido ampliamente como fuente de carbono para el crecimiento del hongo y la producción de la enzima. Así, se han reportado estudios empleando cáscara de mandarina y banano, entre otros [31, 32, 33]. Dentro de los diferentes estudios realizados con la lacasa en la línea de Bioprocesos en la Universidad de Los Andes, se han evaluado residuos de la industria maderera y agroindustriales como el aserrín, la cáscara de soya,

la cáscara de café y la tusa obtenida de la Palma de Aceite para la producción de la enzima. Los resultados obtenidos hasta el momento muestran el aserrín y la cáscara de soya como una alternativa para la producción de la lacasa, al lograr actividades enzimáticas hasta de 750 U mL⁻¹ (Figura 2). Adicionalmente se ha evaluado la degradación de compuestos clorofenólicos mediante el acople del proceso biológico con procesos de oxidación avanzada empleando TiO₂/UV.

LOS PROCESOS DE OXIDACIÓN AVANZADA: UNA ALTERNATIVA EN LA DEGRADACIÓN DE COMPUESTOS RECALCITRANTES

La legislación actual y las acciones ambientales en el mundo ponen de manifiesto un énfasis mayor en la eliminación de componentes orgánicos no deseados en el aire y en el agua. Sin embargo, las tecnologías utilizadas actualmente en las empresas que producen este tipo de desechos establecen unas condiciones de tratamiento que exigen el uso masivo de productos de neutralización, oxidación y aglomeración, por decir algunos, que las hacen poco sostenibles en el mediano plazo. Esto hace que las empresas no las apliquen constantemente y que muchas de ellas ni siquiera las implementen, lo cual genera, además del impacto ambiental, un problema de tipo ético, al diluir los efluentes en agua de proceso, si es acuoso o con las salidas de chimenea, si es gaseoso.

Los Procesos de Oxidación Avanzada, POA, son metodologías relativamente nuevas, desarrolladas a partir del año 1975 [34] y son procedimientos útiles como alternativas o complementos a técnicas convencionales. Estas tecnologías se basan en métodos catalíticos químicos, foto químicos o electroquímicos que involucran la generación de especies transitorias de gran poder oxidante, principalmente hidroxilos (OH•) que poseen un efecto muy alto en la oxidación de la materia orgánica [35].

En Colombia, hasta el momento, se han hecho pocos estudios que tengan en cuenta efluentes reales para la

degradación por oxidación avanzada; dichos estudios, se enfocan principalmente en: evaluación de la degradación de los compuestos, estudio cinético, desarrollo de soportes para catalizadores, diseño de reactores, entre otros. Dentro de las investigaciones realizadas están la degradación fotocatalítica y el proceso foto-Fenton ya que ambas permiten realizar transformaciones en contaminantes tóxicos poco susceptibles a la oxidación para la posterior formación de productos inorgánicos [35]. Se ha comprobado que la degradación fotocatalítica es efectiva y viable para la destrucción del contaminante con el catalizador TiO_2 . Los procesos de fotocatalisis heterogénea permiten la transformación de contaminantes sobre TiO_2 bajo la radiación de luz UV [36]. Teniendo un proceso con luz UV y catalizador simultáneamente, se han alcanzado conversiones de casi el 100% [36].

Los pasos iniciales involucrados en la fotocatalisis, consisten en la generación de pares electrón-hueco por la excitación del catalizador TiO_2 con luz UV-A. La absorción de la luz permite que se produzcan transiciones electrónicas, para así degradar cualquier compuesto orgánico [37] y los huecos formados reaccionan para formar radicales hidroxilo (oxidación). Las moléculas de oxígeno adsorbidas aceptan electrones (reducción) previniendo la reducción de la eficiencia cuántica del proceso [38]. El radical hidroxilo posee alta efectividad para la oxidación de la materia orgánica, por ser una especie altamente reactiva contribuyendo a incrementar la velocidad de oxidación [39].

El proceso foto-Fenton, el primer POA, se basa en la generación de radicales hidroxilo en presencia de peróxido de hidrógeno e iones de Fe^{+2} en condiciones de pH ácido y temperaturas moderadas. Las ventajas de este método son: el hierro (II) es abundante y no tóxico, el peróxido de hidrógeno es sencillo de manipular y ambientalmente benigno y dada su corta vida media no se forman compuestos clorados ni existen limitaciones relativas a la transferencia de masa, por tratarse de un sistema homogéneo; por último, el diseño de sistemas de reacción para su aplicación también es sencillo. En contraposición, se requiere

una adición continua y estequiométrica de hierro y peróxido, lo que deriva en altas concentraciones de hierro que son muy complejas de remover, así este compuesto no represente un problema ambiental. Éste y otros factores asociados a la operación, hacen que este proceso sea costoso, en comparación a un sistema de tratamiento secundario (biológico) [40].

En el caso de la fotocatalisis, se ha demostrado que los costos de operación y equipos para la degradación fotocatalítica, resultan ser menores comparados con los tratamientos térmicos y de adsorción [41]. Sin embargo, ambos procesos pueden utilizarse como pretratamientos de un tratamiento secundario, lo que disminuiría los costos operativos asociados y permitirían que estos compuestos recalcitrantes, sean transformados en biodegradables.

En los estudios realizados hasta el momento por el GDPP y el grupo de Procesos de Oxidación Avanzada para la Remediación Ambiental (PROXAR), los POA han demostrado su efectividad en la degradación de compuestos orgánicos volátiles en fase gas por fotocatalisis [42, 43], lo cual concuerda con los resultados obtenidos por el grupo de Procesos Industriales de la Universidad de Antioquia y el aumento de la biodegradabilidad en tintas por foto-Fenton [44].

Estos estudios están hasta ahora en una etapa preliminar y uno de los obstáculos encontrados ha sido su escalamiento y evaluación directa, debido principalmente a criterios económicos y de voluntad de trabajo por parte de los actores involucrados en la toma de decisiones. Lo anterior se fundamenta en que como los procesos tradicionales funcionan en la mayoría de rangos aplicados, son éstos los que se normalizan y convalidan sin tener en cuenta las pérdidas económicas asociadas a este tipo de tratamientos por parte de los empresarios que los implementan, que derivan en el no cumplimiento de la reglamentación, las no conformidades en las certificaciones a que se tenga lugar o, en el peor de los casos, en la implementación de prácticas poco éticas con el fin de cumplir normativas.

El trabajo de PROXAR en el área ambiental se orienta al estudio de sistemas de oxidación avanzada y su acople con tratamientos biológicos para el tratamiento de aguas contaminadas con compuestos no-biodegradables y tóxicos [45]. Se destacan los trabajos realizados sobre los contaminantes de la industria química (degradación de 97% de la concentración inicial de soluciones acuosas de Bisphenol A) [46], de la industria textil (degradación de 98% de la concentración inicial del colorante AMBI y colorantes directos) [47, 48], pesticidas (degradación superior al 90% de glifosato, isoproturon y metobromuron) [49, 50].

CONCLUSIONES

La investigación interdisciplinaria desde la base biológica y química utilizando técnicas no convencionales ha mostrado resultados prometedores para abordar en corto tiempo la implementación en campo a nivel piloto y continuar con el desarrollo a nivel industrial. Por otra parte, las líneas de investigación de cada uno de los tres grupos (CIMIC-MAB; GDPP Y PROXAR) que desarrollan proyectos transversales en conocimiento tanto a nivel básico como aplicado en bacterias, hongos y procesos fisicoquímicos permitirá, por ejemplo, conocer rutas metabólicas puntuales de hongos promisorios para biorremediación. Los resultados hasta ahora obtenidos son alentadores, se ha recorrido un largo camino que ha dejado un gran número de experiencias; por ejemplo, un balance entre las dos tecnologías (biológicas o fisicoquímicas) permite afirmar que ambas presentan ventajas y desventajas y que cada problema debe ser abordado de manera diferente. Los procesos biológicos en general son tecnologías más limpias que los fisicoquímicos (bajo algunas restricciones ambientales) pero, por otro lado, presentan percances desde el punto de vista catalítico ya que son más sensibles a cambios medioambientales, lo que trae como consecuencia una disminución en la conversión o nivel de mineralización de los contaminantes. Por otro lado los procesos físicoquímicos son más fáciles de controlar debido a

la simplicidad del grafo reactivo (comparado con el proceso biológico), por lo que se pueden alcanzar conversiones más altas, sin embargo, estos procesos deben usar catalizadores que pueden generar problemas colaterales: su tratamiento.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] **M. Joyeux.**
“Résidus médicamenteux et risques sanitaires d'origine hydrique”. *Environ. Risques & Santé*. Vol. 5, No. 4, juillet-août 2006, pp. 301-306.
- [2] **M. Bernhard, J. Müller and T.P. Knepper.**
“Biodegradation of persistent polar pollutants in wastewater: Comparison of an optimised lab-scale membrane bioreactor and activated sludge treatment”. *Water Res.* Vol. 40, No. 18, October 2006, pp. 3419-3428.
- [3] **I.J. Buerge, H.R. Buser, T. Poiger and M.D. Müller.**
“Occurrence and fate of the Cytostatic Drugs Cyclophosphamide and ifosfamide in Wastewater and surface”. *Water Environ. Sci. Technol.* Vol. 40, No. 23, September 2006, pp. 7242-7250.
- [4] **C. Daughton and T.A. Ternes.**
“Pharmaceuticals and personal care products in the environment: Agents of subtle change?” *Environ. Health Persp.* Vol. 107, No. S6, December 1999, pp. 907-938.
- [5] **E. Zuccato, D. Clamari, M. Natangelo and R. Fanelli.**
“Presence of therapeutic drugs in the environment”. *Lancet Vol.*, Vol. 355, No. 9217, pp. 1789-1790.
- [6] **S. Castiglioni, R. Bagnati, R. Fanelli, F. Pomati, D. Calamari, E. Zuccato.**
“Removal of pharmaceuticals in sewage treatment plants in Italy”. *Environ. Sci. Technol.* Vol. 40, No. 1, 2006, pp. 357-363.

- [7] **L.F. Delgado, C. Dorandeu, B. Marion, C.V. Gonzalez, Faucet-Marquis, S. Schetrite, C. Albasi.**
“Removal of a cytostatic drug by a membrane bioreactor”. *Desalination water treat.* Vol. 9, 2009, pp. 1-7.
- [8] **L.F. Delgado, S. Schetrite, C. Gonzales, C. Albasi.**
“Effect of cytostatic drugs on microbial behaviour in membrane bioreactor system”. *Biores. Technol.* Vol. 101, No 2, January 2010, pp. 527-536.
- [9] **J. Dussán.**
“Biprospección de microorganismos nativos de Colombia. Investigaciones del CIMIC”. *Aproximación al estado actual de la Bioprospección en Colombia.* Melgarejo, C. Editorial Cargraphics. S.A., 2002, pp. 217-225.
- [10] **J. Dussán, P. Vargas, R. Cuellar.**
“Biorremediación de residuos de petróleo”. *Hipótesis, Apuntes Científicos Uniandinos.* Vol. 2, 2004, pp. 42-49.
- [11] **M.L. Gómez, C. Hurtado, J. Dussán, J. P. Parra, S. Narváez.**
“Determinación de la capacidad de degradación de compuestos orgánicos persistentes por bacterias marinas aisladas de sedimentos en el Caribe colombiano”. *Actual Biol.* Vol. 28, No. 85, 2006, pp. 115-127.
- [12] **L. Zubiría.**
Diversidad molecular de genes que codifican para mPH, C12O y fenol monooxigenasa en bacterias degradadoras de fenol aisladas de lodos base aceite y corte calado. Tesis de Maestría. Microbiología Ambiental Molecular, 2006.
- [13] **L. Chitiva, J. Dussán.**
“Evaluación de matrices para la inmovilización de Pseudomonas spp. en biorremediación de fenol”. *Rev. Colom. Biotec.* Vol. 5, No, 2, Diciembre 2003, pp 5-10.
- [14] **A. Córdoba, P. Vargas, J. Dussán.**
“Chromate reduction by Arthrobacter CR47 in biofilm packed bed reactors”. *J. Hazardous Materials.* Vol. 151, No. 1, February 2008, pp. 274-279.
- [15] **A. Caro.**
Acumulación de plomo en aislamientos de bacterias nativas degradadoras de hidrocarburos utilizando un reactor de lecho empacado. Tesis de Maestría, Microbiología Ambiental Molecular, 2004
- [16] **J. Dussán.**
Consortio bacterias Cravo Sur. Biotratamiento de 443 barriles de lodos aceitosos col 834002915. Biointech. E.U. Perenco Colombia Limited Secreto Industrial, 2007.
- [17] **J. Dussán.**
Consortio bacterias Capachos. Biotratamiento de 95 barriles de lodos aceitosos col 830003705. Biointech. E.U. Perenco Colombia Limited. Secreto Industrial, 2006
- [18] **J. Dussán.**
Consortio bacterias LG. Biotratamiento de 1143 barriles de lodos aceitosos col 830004484. Biointech. E.U. Perenco Colombia Limited. Secreto Industrial, 2005
- [19] **M.F. Villegas.**
Efectos Moleculares y Fisiológicos del Arsenato en Microorganismos nativos cultivable. Tesis de Maestría (Laureada). Microbiología Ambiental Molecular, 2007.
- [20] **C.M. Castillo.**
Caracterización molecular de la resistencia a mercurio mercúrico de bacterias nativas colombianas Tesis de Maestría. Microbiología Ambiental Molecular, 2007.
- [21] **L. Velásquez, J. Dussán.**
“Biosorption and bioaccumulation of heavy metals on dead and living biomass of Bacillus sphaericus”. *J. Hazardous Materials.* Vol. 167, No. 1-3, August 2009, pp. 713-716.
- [22] **C.H. Chaineau, G. Rougeux, C.J. Yéprémian.**
“Effects of nutrient concentration on the biodegradation of crude oil and associated microbial populations in the soil”. *Soil Biol. & Biochem.* Vol. 37, No. 8, 2005, pp. 1490-1497.

- [23] **P.V.O. Trindade, L.G. Sobral, A.C.L. Rizzo, S.G.F. Leite, A.U. Soriano.**
 “Bioremediation of a weathered and a recently oil-contaminated soils from Brazil: a comparison study”. *Chemosphere*. Vol. 58, No. 4, January 2005 pp. 515–522.
- [24] **A. D’Annibale, F. Rosetto, V. Leonardi, F. Federici, M. Petruccioli.**
 “Role of autochthonous filamentous fungi in bioremediation of a soil historically contaminated with aromatic hydrocarbons”. *Applied and Environ. Microbiol.* Vol. 72, No. 1, 2006, pp. 28–36.
- [25] **M. F. Vasco-Cardenas, M. J. Vives-Florez.**
Native soil mitosporic fungi with potential hydrocarbon bioremediating capability. Tesis de Maestría en Ciencias Biológicas. Universidad de los Andes, 2008.
- [26] **N. Cardona Álvarez, M.J. Vives.**
Producción de lacasa en cultivos en estado sólido por cepas nativas colombianas de Fusarium spp. y Trichoderma spp. Tesis pregrado Microbiología, Universidad de los Andes, 2008.
- [27] **P. Baldrian.**
 “Fungal Laccases occurrence and properties”. *FEMS Microbiology Review*. Vol. 30 No. 2, 2006, pp. 215-42.
- [28] **S. Rodríguez, J. Toca.**
 “Industrial and biotechnological applications of laccases: A review”. *Biotechnol. adv.* Vol. 24, No. 5, September-October 2006 pp. 500-13.
- [29] **C. Galhaup, S. Goller, C. Peterbauer, J. Strauss, D. Haltrich.**
 “Characterization of the major laccase isoenzyme from *Trametes pubescens* and regulation of its synthesis by metal ions”. *Microbiol.* Vol. 148, No.7, 2002 pp. 2159-69.
- [30] **Y. Wong, J. Yu.**
 “Laccase-catalyzed decolorization of synthetic dyes”. *Water Res.* Vol. 33, No. 16 November 1999, pp. 3512-3520.
- [31] **J. Osma, V. Saravia, J. Herrera, S. Couto.**
 “Mandarin peelings: the best carbon source to produce laccase by static cultures of *Trametes pubescens*”. *Chemosphere*. Vol. 67 No. 8, April 2007, pp. 1677-80.
- [32] **J. Osma, J. Toca, S. Rodríguez.**
 “Banana skin: A novel waste for laccase production by *Trametes pubescens* under solid-state conditions. Application to synthetic dye decolouration”. *Dyes and Pigments*. Vol., 75, No. 1, 2007, pp. 32-37.
- [33] **J. P. Essien, E. J. Akpan, E. P. Essien.**
 “Studies on mould growth and biomass production using waste banana peel”. *Biores. Technol.* Vol. 96, No. 13, September 2005, pp. 1451-6.
- [34] **O. Legrini, E. Oliveros.**
 “Photochemical Processes for Water Treatment”. *Chemical Reviews*. Vol. 93, No. 2, 1993, pp. 671-698.
- [35] **X. Doménech, W. Jardim y M. Litter.**
Eliminación de Contaminantes por Fotocatálisis Heterogénea: Procesos Avanzados de Oxidación para la eliminación de contaminantes. Comisión Nacional de Energía Atómica CYTED, 2003, Disponible en: <http://www.cnea.gov.ar/xxi/ambiental/CYTED/>
- [36] **A. Vorontsov, E. Savinov, L. Davydov, P. Smirniotis.**
 “Photocatalytic destruction of gaseous diethyl sulfide over TiO_2 ” *Boriskov Institute of Catalysis*. Vol. 32, 2001, pp. 11-24.
- [37] **B. Lee, N. Fukami, M. Yosida, T. Kazuo, M. Hosomi.**
 “Photocatalytic degradation of gaseous perchloroethylene: products and pathway”. *Chemosphere*. Vol. 42, No. 4, February 2001, pp. 345-350.
- [38] **R. Bauer, S. Hager, G. Kudielka**
 “Photocatalytic Oxidation of gaseous chlorinated organics over titanium dioxide”. *Chemosphere*. Vol. 41, No. 8, October 2000, pp. 1219-1225.

- [39] **O. Alfano, A. Arancibia, E. Bandala.**
“Eliminación de Contaminantes por Fotocatálisis Heterogénea”. Programa Iberoamericano de ciencia y tecnología para el desarrollo CYTED. 2001.
- [40] **M. Rodríguez, V. Sarria, S. Esplugas y C. Pulgarín.**
“Photo – Fenton treatment of a biorecalcitrant wastewater generated in textile activities: biodegradability of the photo – treated solution”. *J. Photochem, Photobiol. A: Chemistry*. Vol. 151, No 1-3, 2002, August pp. 129-135.
- [41] **J. Moreno.**
Adaptación del diseño de un fotorreactor en fase gaseosa para la degradación de Percloroetileno. Proyecto de Grado. Departamento de Ingeniería Química, Universidad de los Andes, 2009.
- [42] **J. Marín, J. Navio, L. Ríos, G. Restrepo.**
“Soporte de nuevas películas de TiO₂ y TiO₂/SiO₂ sobre gránulos de Poliéster para aplicación en Fotocatálisis”. *Información Tecnológica*. Vol. 19, No. 6, 2008 pp. 9-20.
- [43] **S. Hernández.**
Estudio de la biotratibilidad de las aguas residuales de tintorería por medio de un proceso avanzado de oxidación. Tesis de Magíster Departamento de Ingeniería Ambiental, Universidad de los Andes, 2008.
- [44] **V. Sarria, S. Kenfack, O. Guillod, C. Pulgarín.**
“An innovative coupled solar-biological system at field pilot scale for the treatment of biorecalcitrant pollutant”. *J. Photochem. Photobiol.* Vol. 159, 2003 pp. 89-99.
- [45] **V. Gomez, L. Sarria.**
“Foto degradación heterogénea de Bisfenol A en agua con Dióxido de Titanio”. *Química Nova*. Vol. 32, No. 5, 2009 pp. 1164-1169.
- [46] **V. Sarria, M. Deront, P. Péringer, C. Pulgarín.**
“Degradation of a biorecalcitrant dye precursor present in industrial wastewaters by a new integrated iron(III) photoassisted- biological treatment”. *Applied Catalysis B: environ*, Vol. 40, No. 3, 2003 pp. 231-246.
- [47] **S. Kenfack, V. Sarria, J. Wéthé, G. Cissé, A. H Maïga H., A. Klutse, C. Pulgarín.**
“From laboratory studies to the field applications of advanced oxidation processes: a case study of technology transfer from Switzerland to Burkina Faso on the field of photochemical detoxification of non biodegradable chemical pollutants in water”. *International J. Photoenergy*. 2009.
- [48] **R. Torres, V. Sarria, P. Peringer, C. Pulgarín.**
“Electrochemical Treatment of industrial wastewater containing 5-amino-6-methyl-2-benzimidazole: Toward an electrochemical-biological coupling”. *Water Res.* Vol. 37, 2003, pp. 3118-3124.
- [49] **E. Sierra, V. Sarria, M. Cortés.**
“Electrooxidación de Glifosato sobre electrodos de níquel y cobre”. *Química Nova*. Vol., 31, No. 2, 2008, pp. 220-226.
- [50] **S. Parra, V. Sarria, S. Malato, P. Peringer, C. Pulgarín.**
“Photochemical versus coupled photochemical–biological flow system for the treatment of two biorecalcitrant herbicides: metobromuron and isoproturon”. *Applied Catalysis B: Environ*. Vol. 27, 2000 pp. 153-168.