

Fotocatálisis:

Una alternativa viable para la eliminación de compuestos orgánicos

Edison Gil Pavas

Fecha de recepción: 6 de noviembre de 2001 Fecha de aceptación: 31 de enero de 2002

RESUMEN

En el siguiente trabajo se presenta la fotocatalisis como una tecnología simple, económica, eficaz e innovadora, para el tratamiento de aguas fenoladas encontradas en los efluentes de varios procesos industriales. El atractivo de esta tecnología radica en su rentabilidad, facilidad de implementación y uso, y la inversión requerida de capital es mínima, en comparación con otras tecnologías. La radiación UV proveniente del sol o de fuentes artificiales (lámparas UV), se usa para activar el catalizador (TiO_2) y con él, destruir muchos de los contaminantes orgánicos presentes en efluentes líquidos.

ABSTRACT

The basic idea of this project is to present photocatalysis as a simple, economic, effective and innovative technology, for the treatment of phenolic waters found in the effluents from several industrial processes, by determining the optimum conditions of operation and by identifying the parameters that govern the process. The attractiveness of this technology is based on its profitability, easy of implementation and use. The required capital investment is minimal in comparison with other technologies. The UV radiation from the sun or artificial sources (lamps), is used to activate the catalyst (TiO_2) to destroy the organic pollutants present in liquids effluent. The process was carried out continuously with using pH, catalyst (TiO_2) concentration and recirculation time as variables.

PALABRAS CLAVES

•Fotocatálisis • Aguas residuales.

INTRODUCCIÓN

La actividad agrícola e industrial genera un significativo número de contaminantes que son liberados al medio ambiente a través de las aguas de desecho, las cuales contaminan las aguas superficiales y subterráneas. Muchas de estas sustancias contaminantes son altamente tóxicas y difíciles de ser degradadas por la naturaleza. En América Latina, con tantos años de negligencia en este tipo de problemas, se presentan niveles dramáticos en áreas rurales y zonas cercanas a complejos industriales. Las descargas resultan particularmente peligrosas para la salud humana y devastadoras para el medio ambiente. (Herrman: 1993, pp. 7-10).

Las tecnologías tradicionales que se utilizan para la separación de sustancias orgánicas del agua tratada, están basadas en procesos de adsorción con carbón activado o desorción con aire. Sin embargo, dichos procesos sólo transfieren los contaminantes de su fase acuosa, a otra que resulta también contaminada, por lo que el problema persiste.

Actualmente, existe un grupo de tecnologías basadas en procesos de destrucción de los contaminantes por medio de sustancias químicas conocidas como radicales hidroxilos, las cuales tienen la propiedad de ser altamente oxidantes. En estas tecnologías llamadas "procesos avanzados de oxidación" (PAO), los radicales reaccionan con el contaminante y lo transforman en compuestos inofensivos al medio ambiente. (Glaze: 1987, p. 35).

Una de las tecnologías de este tipo que resulta atractiva para la descontaminación de aguas con sustancias orgánicas tóxicas, es la degradación fotocatalítica basada en el uso de dióxido de titanio (TiO_2 en forma cristalina) como fotocatalizador y luz ultravioleta (UV) solar de baja energía (320-390 nanómetros). La generalidad del método ha sido probada a escala de laboratorio desde mediados de los 80 para hidrocarburos, tales como compuestos organoclorados y fosforados contenidos en pesticidas y herbicidas, colorantes y surfactantes. La fotocatalisis puede también ser aplicada en la separación y deposición de metales tóxicos (plomo, mercurio, cadmio, entre otros) así como, de metales preciosos (oro, plata, platino). (Villaseñor: 1998, p. 105).

El desarrollo industrial de los países requiere de constante investigación dirigida hacia la implementación de una

tecnología actualizada y adecuada a las necesidades que se plantean en cada momento, tanto de carácter económico, social y ambiental.

A los desechos generados por muchas industrias, se les ha dedicado especial atención y esfuerzo científico en los últimos años, debido a la importancia que poseen tanto desde el punto de vista del aprovechamiento de recursos disponibles, como de la protección del medio ambiente. De esta forma, está cobrando un auge especial la implementación de procesos de descontaminación ambiental cuyo objetivo final, es realzar la calidad de vida, evitando que el desarrollo tecnológico se vea frenado por motivos de salud pública. (Hidaka: 1992, p. 247).

En el presente trabajo se evalúa la fotodegradación de fenoles en agua, lo que permite establecer la fotocatalisis como una alternativa que presenta ventajas sobre los procesos químicos y biológicos en la descontaminación de aguas residuales, ya que es el único método que destruye realmente sustancias tóxicas y en general cualquier sustancia orgánica haciendo uso de una fuente altamente energética y pura. El oxígeno necesario para la reacción se obtiene de la atmósfera y el catalizador a emplear es económico y reutilizable. (Fox: 1993, pp. 341-357).

La actividad agrícola e industrial genera un significativo número de contaminantes que son liberados al medio ambiente a través de las aguas de desecho, las cuales contaminan las aguas superficiales y subterráneas. Muchas de estas sustancias contaminantes son altamente tóxicas y difíciles de ser degradadas por la naturaleza.

A continuación se mostrarán los impactos académico, tecnológico, ambiental y social de la solución del problema planteado.

- **Académico:** Adquirir conocimientos prácticos sobre procesos de tratamiento de aguas residuales, aplicando los conocimientos teóricos adquiridos en la formación como ingenieros, fomentando así la investigación y el raciocinio creativo.
- **Tecnológico:** Actualmente se están realizando importantes esfuerzos con el objetivo de encontrar diversas

formas y métodos efectivos para el uso de la energía solar. Una aplicación de gran interés es el empleo de la energía solar, para la eliminación de agentes contaminantes en aguas residuales mediante el uso de un fotocatalizador adecuado. Este sistema permite aprovechar directamente la energía solar que llega a la superficie terrestre para provocar una serie de reacciones químicas, sin ninguna etapa intermedia, que den lugar a la eliminación en un solo paso de la materia orgánica y metales pesados disueltos en las aguas de vertidos urbanos, industriales y agrícolas.

- **Ambiental:** La gran necesidad de conservar el ambiente ha llevado a la búsqueda de métodos altamente eficientes que permitan la eliminación de sustancias químicas contaminantes generadas por las diversas actividades que realiza el hombre. La contaminación del agua reviste gran importancia ya que los contaminantes pueden acumularse y ser transportados en arroyos, ríos, lagos, afectando el equilibrio silvestre y por ende la salud humana.
- **Social:** El vertido incontrolado de residuos industriales y municipales, a ríos y lagos está causando serios problemas a los recursos hídricos de muchas regiones, poniendo en peligro en muchos casos el equilibrio de los distintos ecosistemas y la salud pública de los habitantes.

El creciente aumento de la sensibilidad de la opinión pública ante el problema de la contaminación de las aguas generado por las industrias, ha hecho que el control de los residuos sea más exigente día a día y que se estén introduciendo normas cada vez más restrictivas sobre el contenido permitido de compuestos tóxicos o peligrosos en los vertidos industriales. De manera que, ante el dilema que plantea la protección de la salud pública frente al progreso, se está haciendo imprescindible la incorporación de tecnologías más

o menos sofisticadas para la depuración de las aguas residuales de muchas industrias.

Al crecimiento industrial va asociado un aumento de la carga contaminante generada por los procesos productivos. Como carga contaminante se pueden considerar un sin número de compuestos, entre los cuales y para el caso de este proyecto se mencionará el fenol.

MATERIALES Y MÉTODOS

El catalizador empleado en el presente estudio fue TiO₂ Degussa P25 en forma anatasa 99% y en forma rutilo 1%. El TiO₂ se utilizó en forma acuosa en suspensión en un reactor tubular, el cual se diseñó de acuerdo con especificaciones recomendadas en la literatura. (Vallardas, 2000).

Con base en el análisis de la información bibliográfica recopilada, se realizó a escala de laboratorio un estudio piloto, con el objetivo de eliminar fenoles en fase acuosa. Para esto se planteó un diseño experimental siguiendo el modelo de box – Beckhen (modelo de superficie de respuesta) (Montgomery, 1996), muy útil para el modelamiento y análisis de los resultados obtenidos en aplicaciones en donde la respuesta de interés, está influenciada por diferentes variables y el objetivo es optimizar dicha respuesta. Su ventaja principal, comparado con otros modelos que relacionan una variable a tres niveles, es que entrega el número mínimo de corridas experimentales (15 experimentos), lo que lo hace un diseño económico desde el punto de vista de reactivos, para cuantificación de muestras, pago de chequeos externos, energía, entre otros.

Para el diseño experimental se tuvieron en cuenta las siguientes variables: pH, tiempo de recirculación y concentración del catalizador (g/L de solución), las cuales de acuerdo con la literatura, afectan la eficiencia del proceso.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados de los ensayos a escala de laboratorio se presentan en la tabla 1.

TABLA 1
Resultados de las corridas experimentales

No.	pH ₀	TiO ₂ (g)	Tiempo (min.)	CF Fenol (mg/L)	% del contaminante removido
1	6,5	0,15	15	1,087	95%
2	4	0,09	15	2,584	87%
3	6,5	0,09	30	6,502	67%
4	9	0,09	15	4,712	76%
5	9	0,03	30	5,196	74%
6	9	0,09	45	5,890	71%
7	6,5	0,09	30	5,781	71%
8	4	0,09	45	6,703	66%
9	4	0,15	30	2,183	89%
10	6,5	0,03	15	6,402	68%
11	6,5	0,03	45	3,909	80%
12	6,5	0,15	45	3,836	81%
13	4	0,03	30	5,406	73%
14	9	0,15	30	6,100	69%
15	6,5	0,09	30	6,425	68%

TABLA 2
Tabla ANOVA

Factor	Suma de Cuadrados	Grados de libertad	Media de los cuadrados	Prueba F	Valor P
pH(A)	3,15256	1	3,15256	20,11	0,0463
TiO ₂ (B)	7,42473	1	7,42473	47,37	0,0205
Tiempo(C)	3,85448	1	3,85448	24,59	0,0383
AB	4,25803	1	4,25803	27,16	0,0349
BB	6,52828	1	6,52828	41,65	0,0232
BC	6,86964	1	6,86964	43,83	0,0221
CC	4,29033	1	4,29033	27,37	0,0346
Error	0.31350	2	0.15670		
TOTAL	43,3322	14			

• $R^2 = 82.3258 \%$

El análisis estadístico se fundamentó en los resultados obtenidos a partir del diseño experimental, los cuales se pueden apreciar en la tabla 1. Las variables son el pH, la cantidad de catalizador (TiO₂) y el tiempo de recirculación.

Para el análisis estadístico, se empleó el programa "StatGraphics", versión 5.0 (1999). Después de suministrar cada uno de los valores de las diferentes corridas, se hizo un análisis de varianza. A partir de ellos se obtuvo la tabla ANOVA, el Diagrama de Pareto y el valor óptimo de cada uno de los factores, que minimicen el valor de la concentración final de fenol.

La tabla ANOVA particiona la variabilidad de la concentración final de fenol, en partes separadas para cada uno de los efectos. Luego, prueba la incidencia estadística de cada efecto, comparando la media cuadrada contra la estimación del error experimental. Allí puede verse cuales son los factores más significativos dentro del diseño experimental, en este caso, todos los factores tienen un valor P inferior a 0.05, indicando que el efecto que tienen sobre la variable dependiente, presentan un 95% de confiabilidad. (Montgomery, 1996).

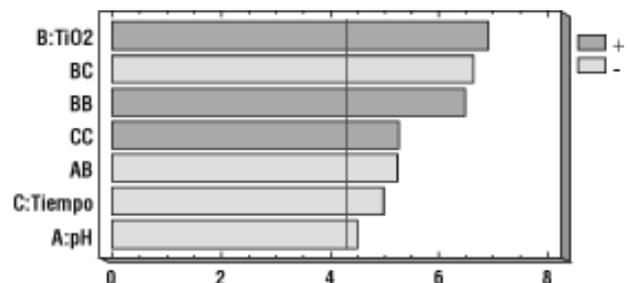
El valor de R^2 , indica que el modelo utilizado explica en un 82.3258% la variabilidad de la concentración de fenol, (Variable dependiente).

El programa permite optimizar cada uno de los factores, con el fin de minimizar la variable de respuesta, concentración final de fenol, reportando los siguientes valores:

- Cantidad de catalizador (TiO₂): 0.14761 gramos
- Tiempo de recirculación: 17 minutos
- pH de la solución: 4.2

A continuación, se presenta el diagrama de Pareto de los efectos (figura 1) .

FIGURA 1
Diagrama de Pareto



Las barras en dicho gráfico que superan la línea vertical localizada entre los valores 4 y 5, indican los factores e interacciones que afectan significativamente a la variable de respuesta.

CONCLUSIONES

- Con base en los resultados obtenidos, es posible concluir que, las tecnologías de detoxificación solar puede proporcionar a la industria una poderosa herramienta para destruir desechos perjudiciales para el ambiente, haciendo uso de una fuente de energía limpia, como lo es la energía solar. La detoxificación solar es una tecnología útil por enfocarse en tratamiento de contaminantes no-biodegradables, los cuales no pueden ser tratados fácilmente usando tecnologías convencionales a concentraciones de varios cientos de ppm. (Blanco: 2001).
- Los ensayos experimentales llevados a cabo, permiten demostrar, que es posible alcanzar un alto grado de mineralización del fenol en medio acuoso, dando como resultado una aplicación potencial de los procesos de degradación fotocatalítica mediante dióxido de TiO_2 a escala industrial.
- Los resultados experimentales concuerdan efectivamente con los citados por la literatura [9]). La técnica de fotocatalisis, destruye los contaminantes presentes en efluentes acuosos, lo que la diferencia de las otras tecnologías convencionales (filtración, sedimentación, incineración, adsorción, intercambio iónico, entre otros), en las cuales el contaminante no es destruido sino que es transferido de una fase a otra.
- Experimentalmente se encontró que todos los factores (pH, cantidad de catalizador y tiempo de recirculación) afectan la eficiencia del proceso.
- Como resultado del análisis estadístico realizado por el modelo de superficie de respuesta [8], se encontraron que las condiciones óptimas para fotodegradar el fenol son: pH 4.2, tiempo de recirculación 17 minutos y concentración del catalizador (TiO_2) 0.9841 g/L, obteniendo una concentración final de fenol de 0.0 ppm.
- Con respecto al fotoreactor utilizado, la recomendación principal sería proporcionarle un mayor diámetro interno. Esto aumentará el paso óptico, reducirá el "efecto pantalla" y permitirá alcanzar regímenes de flujo turbulento.

BIBLIOGRAFÍA

- Blanco, J. y Malato, S. (2001). Solar detoxification. <http://www.unesco.org/science/wsp/publications/SDch910.pdf>. [4 de Abril del 2001].
- Fox, M.A. and Dulay, M.T. (1993). *Chem. Rev.* **No. 93**. pp. 341-357.
- Glaze, W. H., Kang, J.H. and Chapin, D.H. (1987). *Ozone Science And Technology.* **No. 4**, p. 335.
- Herrmann, J.M; Guillard, C. and Pichat, P. (1993). *Catalysis Today.* **No. 17**, 7-20.
- Hidaka, H., Nohara, K. And Zhad, J. (1992). *J. Photochem. Photobiol A: Chem.* **No. 64**, p. 247
- Montgomery D.; Runger G. (1996). Probabilidad y estadística aplicadas a la ingeniería. México : McGraw Hill.
- Statgraphics Plus for Windows 5.0 [CD – ROM]. [United States]: Statistical Graphics Corp, 1994 –1999. ID number : 465004111.
- Vallardas, J.E. (2000). Fotocatalisis y energía solar en la detoxificación de aguas contaminadas : Aplicaciones Potenciales. <http://www.mty.itesm.mx/dgi/transferecia/Transferencia44/eli-05.htm>. [28 de agosto de 2000].
- Villaseñor, J., Reyes, P. and Pecchi, G. (1998). *J.Chem. Technol. Biotechnol.* **No. 72**, 105. 1998.