

DETOXIFICACIÓN FOTOCATALÍTICA DE EFLUENTES INDUSTRIALES

JULIÁN BLANCO GÁLVEZ
Plataforma Solar de Almería

INTRODUCCIÓN

La gran experiencia de la Plataforma Solar de Almería (PSA), centro de investigación perteneciente al CIEMAT (Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas) con sistemas térmicos solares se está aprovechando para desarrollar y establecer sistemas eficaces, capaces de destruir compuestos tóxicos procedentes de residuos industriales mediante la radiación solar. El proceso, denominado Detoxificación mediante Fotocatálisis Solar, está siendo estudiado a nivel pre-industrial en estrecha colaboración con algunos de los científicos europeos más relevantes en este campo.

PROBLEMÁTICA GENERAL

Una de las características, generalmente olvidada, que mejor define la sociedad actual en lo que se entiende por países desarrollados es la producción de residuos. Prácticamente no hay actividad humana alguna, que no genere residuos existiendo además una relación directa entre la cantidad de residuos generados y el nivel de vida de una sociedad o país.

Según datos aportados por el Worldwatch Institute, fundación que anualmente publica el informe «El Estado de la Tierra», cada año los países miembros de la Unión Europea producen unos 2200 millones de Tm. de residuos (unos 18 kg. por persona y día). De esta cantidad unos 150 millones de Tm. son catalogados como residuos industriales y de estos a su vez, entre 20 y 30 millones de Tm. son residuos catalogados como tóxicos y peligrosos. En Estados Unidos esta cantidad se eleva a 275 millones de Tm. al año según datos de la Agencia de Protección Medioambiental.

Son estos últimos residuos los más preocupantes y problemáticos ya que muchas veces literalmente no se sabe qué hacer con ellos. Gran parte de ellos son actualmente directamente arrojados a cauces públicos a través de los efluentes de aguas residuales industriales, con la consiguiente contaminación de los mismos. Otra parte importante va a vertederos en los cuales en el mejor de los casos simplemente se almacena el problema cuando, no se producen fil-

tracciones progresivas de dichos residuos, que tarde o temprano acaban alcanzando los niveles freáticos y las aguas subterráneas, que son las habitualmente utilizadas para consumo humano.

Para llevar a cabo el tratamiento de estos contaminantes, se dispone en la actualidad de un amplio abanico de técnicas y tecnologías denominadas convencionales que, sin embargo, muchas veces se muestran claramente insuficientes o dan lugar a un costo adicional no soportable para ser llevado a cabo. Es por esto que, en este contexto, se presenta el proceso de **Detoxificación Solar** mediante fotocátalisis como un arma prometedor para el tratamiento y eliminación de residuos tóxicos disueltos en agua; la mejor prueba de ello la constituye el espectacular desarrollo que ha tenido esta aplicación del proceso a nivel mundial en los últimos años, así como el enorme interés que ha suscitado el tema en la comunidad científica internacional.

PROCESO DE FOTOCATÁLISIS

El proceso de Detoxificación mediante Fotocátalisis consiste en la utilización de la parte más energética del espectro solar como es la radiación ultravioleta (longitud de onda inferior a 385 nanómetros) para promover una reacción de oxidación muy enérgica. Esta reacción tiene lugar cuando dicha radiación ultravioleta activa un catalizador semiconductor en presencia de oxígeno. En estas circunstancias cualquier otra sustancia (tóxica o no) que se encuentre simultáneamente en el mismo medio es sometida a una enérgica reacción de oxidación.

Una característica intrínseca al proceso es la presencia de un catalizador, que normalmente suele ser el dióxido de titanio (TiO_2), producto no tóxico, abundante y barato que se utiliza como pigmento en la fabricación de pinturas. Un sistema fotocatalítico solar podemos decir entonces que consiste en partículas de semiconductor que, suspendidas en un disolvente, se encuentran iluminadas por radiación solar. Normalmente este disolvente es agua, aunque existen en la literatura numerosos ejemplos de reacciones de fotocátalisis en fase gaseosa.

El hecho fotoquímico primario es la absorción de la radiación por las partículas del catalizador. El dióxido de titanio es muy selectivo en su espectro de absorción de la radiación pues prácticamente no absorbe en el visible y sí en el ultravioleta y zonas próximas del espectro solar (longitud de onda < 385 nanómetros) que son las de contenido energético más elevado. Un semiconductor consiste en una banda de valencia, completa de electrones, y de una banda de conducción que contiene estados energéticos que se encuentran vacíos. El salto energético entre ambas bandas es lo que se denomina Energía de Banda Prohibida y precisamente es la radiación ultravioleta dentro del espectro solar la que posee la suficiente energía como para excitar el catalizador, provocar la generación de pares electrón/hueco y su separación entre la banda de conducción para los electrones, y la banda de valencia para los huecos. Estas partículas cargadas eléctricamente migran rápidamente a la superficie donde son atrapadas y promueven una enérgica reacción de oxidación-reducción (redox). En el caso del dióxido de titanio, su energía de banda prohibida es de 3.2 eV.

Muchos investigadores en el campo de la fotocátalisis, ya han demostrado que esta reacción puede destruir completamente compuestos disueltos en agua, en principio en baja concen-

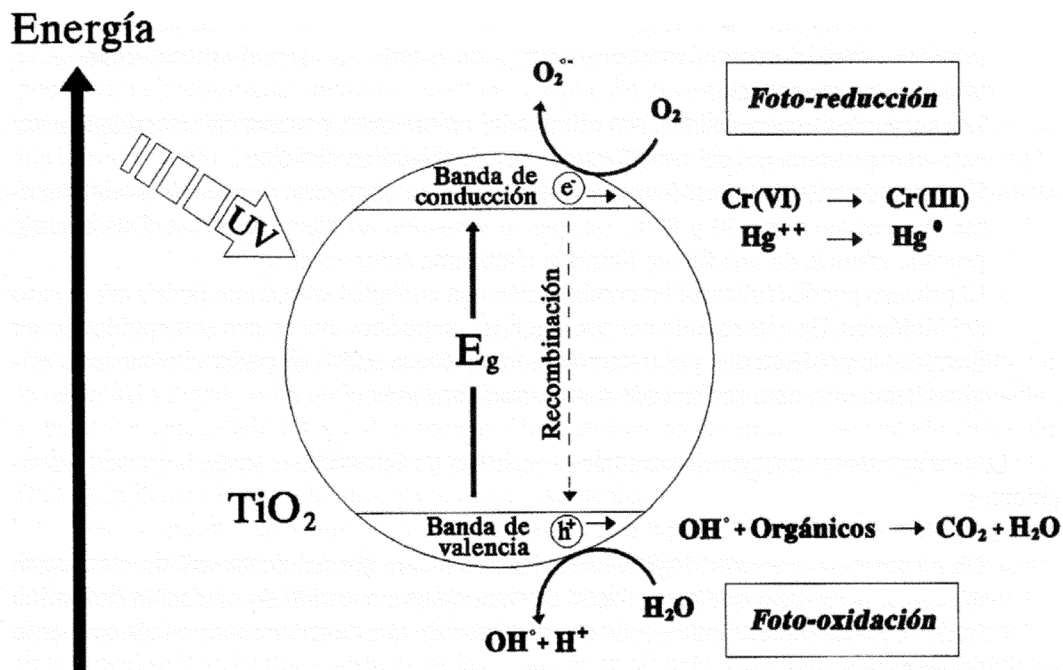


Fig. 1. Representación esquemática de la formación del par electrón/hueco en una partícula semiconductorora

tración, y recientemente se ha comenzado con éxito a ensayar la degradación de aguas residuales industriales con alto contenido en carbono orgánico. Además, el proceso también es válido en el caso de gases utilizando partículas de catalizador en suspensión, lo que permite vislumbrar un potencial de aplicación enorme en el campo de la descomposición y degradación de una gran cantidad compuestos. Este proceso ha sido amplia y extensamente estudiado a nivel de laboratorio en estos últimos años despertando un gran interés debido, por un lado, a los prometedores resultados obtenidos, y por otro, a que presenta además a la hora de su aplicación práctica una serie de ventajas que lo hacen realmente atractivo y único:

- Es el único método que realmente destruye sustancias tóxicas hasta compuestos totalmente inocuos. En el caso de sustancias orgánicas los subproductos que se obtienen son agua, CO_2 y simples ácidos inorgánicos. Otros procesos como el arrastre mediante aire o el carbón activo granular, tecnologías ambas bastante usadas, no constituyen ningún tipo de tratamiento real en sí, ya que su objeto es eliminar los contaminantes presentes en un determinado medio para transferirlos a otro.
- El proceso es capaz de destruir prácticamente cualquier tipo de sustancia orgánica incluidas mezclas complejas. En este sentido es capaz de descomponer incluso sustancias difíciles o peligrosamente tratables por otros métodos como es el caso de dioxinas, bifenilos policlorados (PCBs), disolventes, pesticidas, etc.

- La reacción también funciona en el caso de metales pesados, siendo posible reducir metales como el cromo, mercurio, etc, a un estado en el cual su toxicidad se ve sustancialmente reducida.
- Las sustancias contaminantes son eliminadas en un único proceso sin necesidad de ser extraídas previamente del medio en el que se encuentran disueltas.
- El aporte de energía necesario es muy pequeño pues el proceso tiene lugar a temperaturas que oscilan entre 30 y 80°C sin que su variación apenas si le afecte. Esta energía procede además de una fuente limpia y abundante como es el sol.
- El proceso puede realizarse en combinación con cualquier otro como podría ser el caso del biológico. En este sentido existen algunos compuestos que no son susceptibles de ser degradados por bacterias y el tratamiento fotoquímico podría degradar el compuesto original hacia otro para ser atacado por microorganismos.

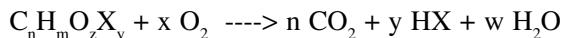
Los componentes necesarios para que la reacción de fotocatalisis tenga lugar son los siguientes:

- Un *elemento a degradar*, lógicamente. Este elemento normalmente será un compuesto orgánico, pero dado que en el fondo se trata de una reacción de oxidación-reducción (redox), puede tratarse también de un metal pesado que se reduce a un estado que suele ser de menor toxicidad.
- Un *elemento oxidante*. Este puede ser oxígeno, peróxido de hidrógeno (agua oxigenada) o bien simplemente aire. En toda reacción redox es necesaria la presencia tanto del elemento oxidante como del reductor.
- Un *medio continuo* en el que se tiene lugar todo el proceso; puede tratarse de un medio tanto acuoso como gaseoso. En el caso que nos ocupa vamos a centrar principalmente en el proceso que tiene lugar en agua.
- El *catalizador* que, como se ha indicado, el más comúnmente usado es el dióxido de titanio; sin embargo, también son usados algunos iones de hierro metálico y otras formas distintas del TiO_2 tanto cristalográficas como de tamaño de partícula.
- Y, finalmente, es necesaria una fuente de *luz ultravioleta* que es la única que da lugar a todo el proceso. Esta luz puede provenir tanto del sol como de lámparas que produzcan esta radiación específica.

TECNOLOGÍA PARA PROCESOS DE DETOXIFICACIÓN

Los sistemas de detoxificación solar de aguas se basan en un proceso químico de fotocatalisis, que conlleva una compleja serie de reacciones. Con la tecnología existente, los sistemas actuales se basan en concentradores cilindro-parabólicos o en colectores estáticos CPC (cilindro-parabólico compuestos), que concentran la luz solar sobre un tubo transparente de vidrio que se usa como receptor. Dentro de este fotorreactor y como ya se ha indicado, la porción ultravioleta del espectro solar activa un catalizador (TiO_2) en un proceso que acaba pro-

duciendo radicales hidroxilo (OH°). Con una exposición suficiente a dichos radicales hidroxilo, los contaminantes orgánicos sufren una progresiva ruptura de enlaces hasta concluir en compuestos no tóxicos como dióxido de carbono y agua. En el caso de compuestos clorados (cuya presencia se puede encontrar muy habitualmente en agua), se forman también diluidas concentraciones de ácido clorhídrico, HCl. En el caso de compuestos halogenados simples y complejos derivados de alcanos, alquenos, ácidos carboxílicos y sustancias aromáticas, la estequiometría general de mineralización es la siguiente:



Hasta el momento, la única molécula clorada resistente al inicial ataque fotocatalítico es la molécula saturada sin hidrógenos: tetracloruro de carbono. En cambio el ácido tricloroacético si puede ser degradado fotocatalíticamente. Otras sustancias orgánicas conteniendo elementos como fósforo, azufre o halógenos en general, se ha demostrado pueden ser oxidados a fosfatos (PO_4^{3-}), sulfatos (SO_4^{2-}) y haluros (X^-), respectivamente.

Los compuestos que contienen nitrógeno han dado lugar a los resultados más complejos. La conversión fotocatalizada de anillos conteniendo un único átomo de nitrógeno, da lugar a la aparición inicial de nitrógeno inorgánico como amoníaco y posteriormente como nitrato. Curiosamente, el amoníaco aparece como uno de los primeros productos de la oxidación, pero su producción se detiene poco después de la desaparición de todo el carbono orgánico. El nitrato, presumiblemente un producto secundario, aparece el último pero eventualmente domina el final del proceso.

En el estado actual de la tecnología, un esquema típico de lo que sería un sistema de detoxificación solar es el que aparece en la figura 2. En el puede apreciarse que los elementos típicos serían, en primer lugar, un pre-filtro que se encargaría de eliminar cualquier tipo de partícula que podría acumularse tanto sobre la superficie del catalizador como en las paredes del reactor, restando progresivamente eficiencia al sistema. A continuación un contactor gas-líquido cuyo objeto es asegurar la presencia del suficiente oxígeno disuelto en el agua para permitir la completa reacción de todos los contaminantes orgánicos.

El gas puede ser tanto oxígeno puro, como aire u otro elemento oxidante y ha de ser añadido o introducido en el sistema debido a que el oxígeno normalmente disuelto, en el agua no es suficiente para llevar a cabo el proceso de oxidación y, una vez consumido, este se detiene. El modo de operación puede ser tanto en continuo, con una única pasada a través del sistema (operación en flujo de pistón), o bien con algún porcentaje de realimentación o recirculación, dependiendo de los contaminantes presentes y los requerimientos de concentración a la salida del sistema. En caso de ser necesario, una pequeña cantidad de óxido cálcico puede ser añadido al agua antes del proceso de descarga con objeto de neutralizar los ácidos simples que se hayan podido producir en el reactor, así como algún otro aditivo en función del uso posterior que se le vaya a dar al agua.

Finalmente se tiene el concentrador solar o reactor en el cual tiene lugar todo el proceso y que es el encargado de proporcionar los fotones con energía suficiente para que la reacción tenga lugar.

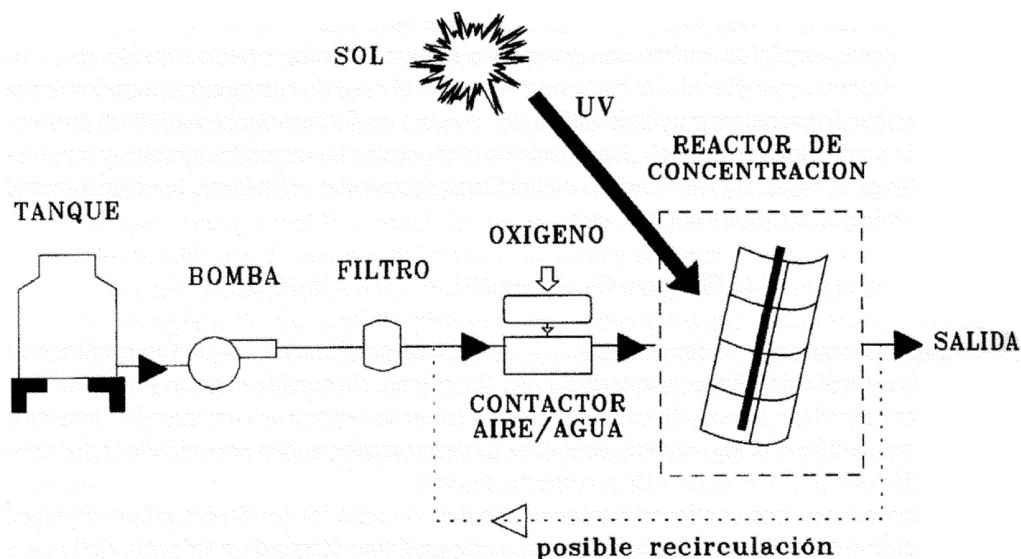


Fig. 2. Esquema típico de un Sistema de Detoxificación Solar de agua

FACTORES QUE INFLUYEN EN EL PROCESO

Dado que en el proceso de descontaminación de aguas el objetivo es la completa mineralización de los distintos compuestos orgánicos que se encuentren presentes, se ha dedicado una especial atención en todos los ensayos realizados en laboratorio, no sólo a seguir el proceso de desaparición de dichos compuestos orgánicos, sino también a la cinética de la aparición de dióxido de carbono. La evolución del CO_2 y la medida del Carbono Orgánico Total (TOC) permite seguir el proceso de degradación mediante el balance total de masa. Existe un gran número de parámetros que influyen tanto cualitativa como cuantitativamente en el proceso redox fotocatalizado, y que pueden ser determinantes para que el proceso sea realmente efectivo o no. A continuación se enumeran algunos de los más importantes.

Adsorción competitiva. Además del reactivo que se esté tratando, existe la posibilidad de que otras moléculas sean adsorbidas sobre la superficie del catalizador. Podría ser el caso del solvente, productos intermedios de la reacción, productos finales o cualquier otro reactivo que se encuentre en el medio. Esta adsorción paralela influirá necesariamente en la cinética de la reacción al tratarse ya de un proceso de degradación en un sistema multicomponente.

Cinética del oxidante. Existe un amplio consenso en la literatura acerca de la influencia del oxígeno: es absolutamente necesario en procesos de continuada y completa mineralización y no es competitivo con el reactivo durante la adsorción. Estudios recientes parecen demostrar que el proceso fotocatalítico es potenciado y acelerado con la adición de peróxido de hidrógeno, de acuerdo con la siguiente secuencia: $\text{O}_2 < \text{H}_2\text{O}_2 < (\text{H}_2\text{O}_2 + \text{O}_2)$.

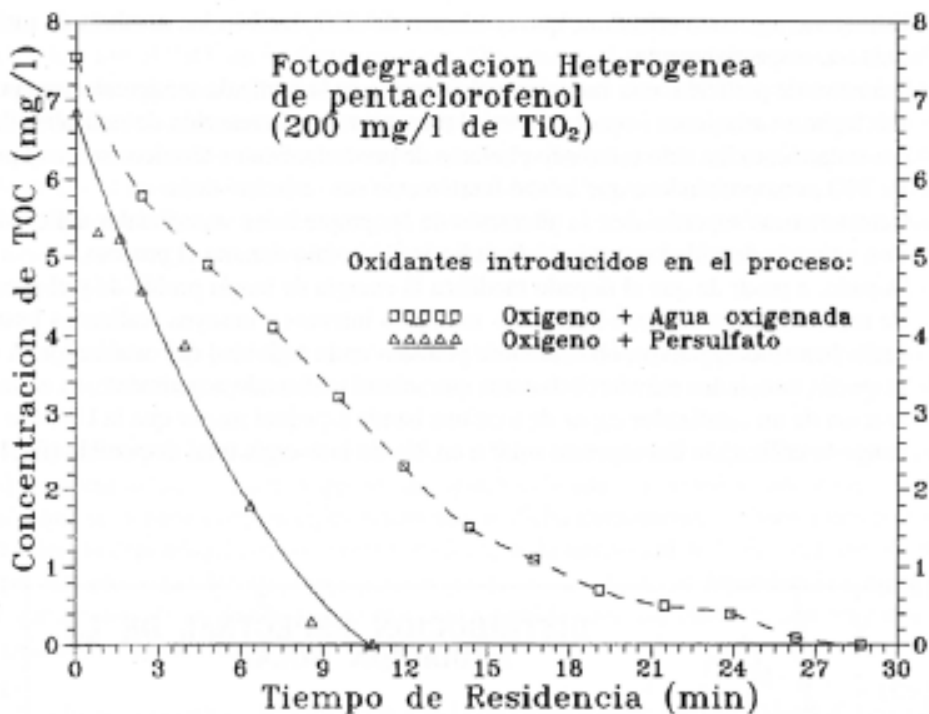


Fig. 3. Influencia de distintos oxidantes en la degradación del pentaclorofenol

Sin embargo, la adición de otros agentes oxidantes puede tener el efecto de incrementar significativamente la velocidad del proceso, mediante la generación bien de un mayor número de radicales OH° , o bien mediante la generación de otros radicales también oxidantes. Los resultados más espectaculares obtenidos en la planta piloto de la PSA, lo han sido ensayando la influencia del persulfato ($\text{S}_2\text{O}_8^{2-}$), que al producir radicales SO_4° es un oxidante muy activo (fig. 2). El persulfato en ausencia de luz se ha comprobado que no produce prácticamente degradación alguna, pero al ser mezclado con el TiO_2 e iluminado con radiación UV, aumenta de una manera considerable la velocidad de la reacción (hasta 15 veces la velocidad original en algunos casos).

pH. El pH de la solución puede afectar tanto a las propiedades superficiales del fotocatalizador como a la forma química del sustrato. TiO_2 tiene un carácter anfótero con un punto de carga cero alrededor de $\text{pH}=6$, y el sustrato puede ser afectado por una variación del equilibrio ácido-base. Consecuentemente, la adsorción del sustrato puede alterarse, afectando entonces fuertemente el proceso.

Características del catalizador. Entre las distintas características del catalizador que pueden influir en el proceso, podemos citar las siguientes:

- Estructura: amorfa o cristalina, que en el caso del TiO_2 reciben los nombres de rutilo y anatasa, respectivamente.
- Diámetro de partícula: una variación del diámetro de la partícula semiconductor puede dar lugar a variaciones importantes en el mecanismo de la reacción de radicales libres.
- Pre-tratamiento: ha sido estudiado el efecto de pre-tratamientos térmicos sobre el polvo de TiO_2 , comprobándose que inhibe fuertemente sus características.
- Características superficiales: la alteración de las propiedades superficiales del catalizador, altera la densidad superficial de radicales hidroxilo durante el proceso.
- Dopado: a pesar de que el dopado modifica la energía de banda prohibida y el proceso de recombinación electrón-hueco, los múltiples intentos y ensayos realizados hasta la fecha han sido negativos, obteniéndose pérdidas en la actividad del catalizador. A este respecto, uno de los mayores esfuerzos que se está realizando actualmente, es en la obtención de un catalizador capaz de usar una banda espectral mayor que la UV, que restringe la utilización del espectro solar a un 3% de la energía total disponible (fig.4).

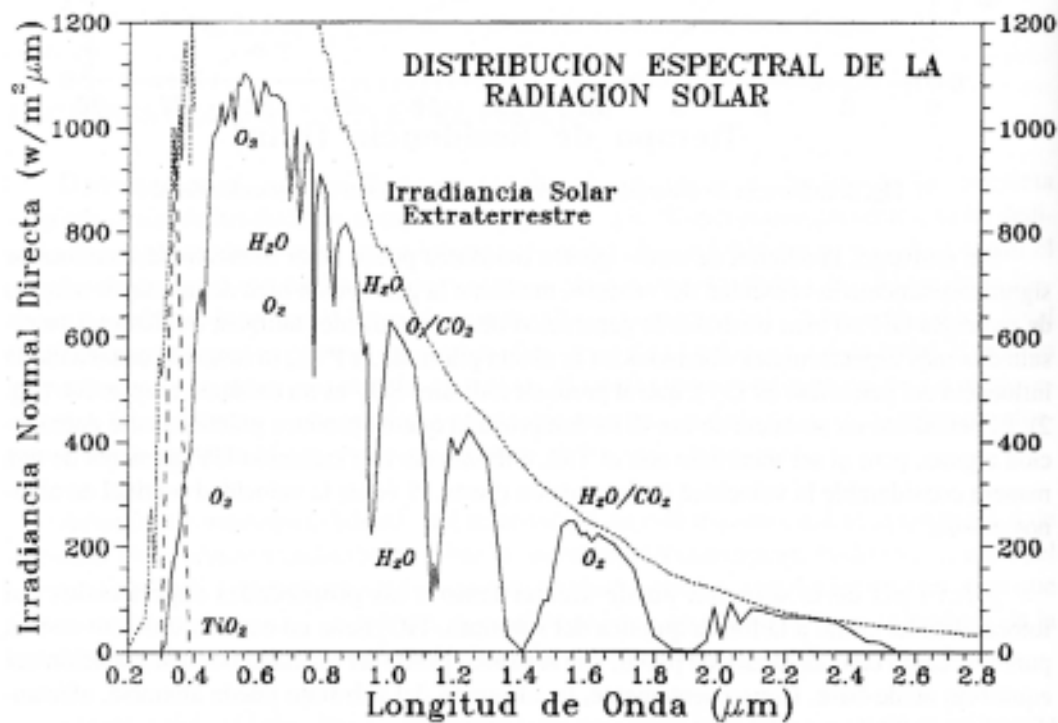


Fig. 4. Espectro de Irradiancia Solar sobre la superficie terrestre y franja aprovechable por el TiO_2 como catalizador

Hasta el momento, el catalizador más activo y estable después de largos períodos de irradiación ha sido el TiO_2 en su forma anatasa. Otro material muy activo como es el ZnO , ha mostrado un rango restringido de estabilidad en soluciones acuosas. Teóricamente, a mayor concentración del catalizador, se tendrá una probabilidad más alta de que se adsorba sobre la superficie del mismo una molécula de contaminante y posteriormente el conjunto intercepte un fotón de luz ultravioleta. A bajas concentraciones de catalizador un aumento en dicha concentración debe incrementar notablemente la eficiencia del proceso; sin embargo, a altas concentraciones, este incremento es mucho más reducido hasta alcanzar un punto en el que se tendrá una saturación.

Temperatura. Las investigaciones realizadas han mostrado, que apenas existe relación entre la variación de la temperatura y la disminución fotocatalizada del carbono orgánico total.

Intensidad de la radiación. Otro factor que influye es la intensidad de la iluminación; parece ser que, mientras que a flujos pequeños de iluminación (de 1 a 10 soles) los productos de reacción que se obtienen dependen directamente de dicha iluminación, a flujos intermedios (20 a 50 soles) la dependencia es con la raíz cuadrada de la intensidad de la luz. A flujos de iluminación elevados (más de 100 soles), parecer ser que no existe ya tal dependencia y no se aprecian variaciones en los productos de reacción obtenidos con incrementos aún mayores de la intensidad de iluminación.

Grado de concentración. Otro factor es la disyuntiva entre luz solar normal o concentrada. En el primer caso el número efectivo de fotones vendrá afectado siempre por el coseno del ángulo de incidencia (entre el rayo solar y el plano de apertura) pudiendo aprovechar, sin embargo, la radiación UV difusa. En el caso de radiación concentrada se tienen igualmente distintas pérdidas por rendimientos y reflectividades.

El grado o razón de concentración de un colector solar se define como la relación entre el área de apertura del mismo y el área total del tubo absorbente o receptor; a mayor razón de concentración, mayor intensidad lumínica se tendrá en el absorbedor, para una radiación solar dada (fig. 5).

Reactor. Finalmente los parámetros derivados del diseño y del tipo de reactor también juegan un papel importante en el resultado final de la reacción. En reactores de concentración, factores como, la geometría, la óptica, el soporte del catalizador, la hidráulica del sistema, el tipo de flujo, etc. van a influir necesariamente sobre el rendimiento final del mismo.

El conjunto de todos los factores anteriores da lugar a lo que se denomina un *sistema de reacción fotocatalítico heterogéneo*. Desde el punto de vista práctico, sus componentes esenciales que interaccionan entre sí podrían ser reducidos a tres:

- el campo de radiación (luz solar ultravioleta)
- el fotorreactor (colector solar)
- el medio de la reacción

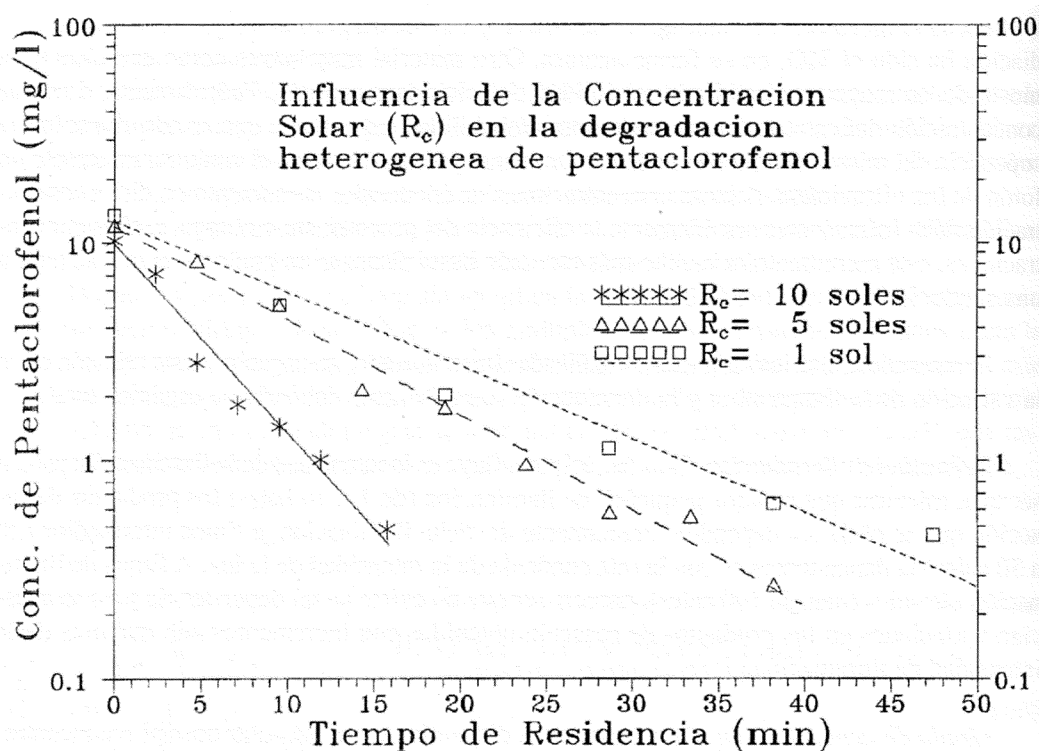


Fig. 5. Influencia del grado de concentración solar en la degradación del pentaclorofenol

Todos estos factores son intrínsecos de alguna manera al proceso y a la instalación en la que este tiene lugar, y que por lo tanto, no dependen de la sustancia o compuesto en sí que se esté degradando. Existen también otros factores que se podrían denominar secundarios, aunque no por ello son menos importantes, que si dependen fundamentalmente del compuesto que es sometido a degradación, como es el caso de su concentración, el pH, la existencia de otros compuestos en la fase líquida, la reducción de metales simultánea a la oxidación de compuestos orgánicos, etc.

DEGRADACIÓN DE CONTAMINANTES INDUSTRIALES

Existe por lo tanto un campo claro de aplicación potencial para los procesos de degradación fotocatalizada mediante TiO_2 . Una de las características más destacables de este proceso, como es el hecho de que tenga lugar en presencia de casi cualquier sustancia orgánica o con mezclas complejas de ellas, se traduce en que el número de aplicaciones potenciales del mismo sea elevadísimo. Entre los ejemplos de aplicación, por citar algunos, estarían la disminución del Carbono Orgánico Total en aguas residuales procedentes de actividades industriales,

y la casi completa mineralización en las aguas para consumo humano o usadas en aplicaciones farmacéuticas, microelectrónica, etc. Los mercados potenciales para la aplicación del proceso de detoxificación de aguas son los siguientes:

- Tratamiento de aguas subterráneas contaminadas
- Purificación de agua potable
- Tratamiento de aguas residuales industriales

Dentro de estos mercados, las prospecciones realizadas han demostrado que las primeras plantas solares que operen comercialmente han de estar caracterizadas por tratar un tipo de contaminante idóneo (por ejemplo, difícil tratamiento mediante métodos clásicos, pero fácilmente oxidable), baja concentración del contaminante, pequeña capacidad de tratamiento y localización en sitio de alta insolación. Posteriormente, al ir madurando la tecnología, costos cada vez menores de tratamiento permitirán a los sistemas solares ser cada vez más competitivos, sobre un abanico de aplicaciones también progresivamente más amplio.

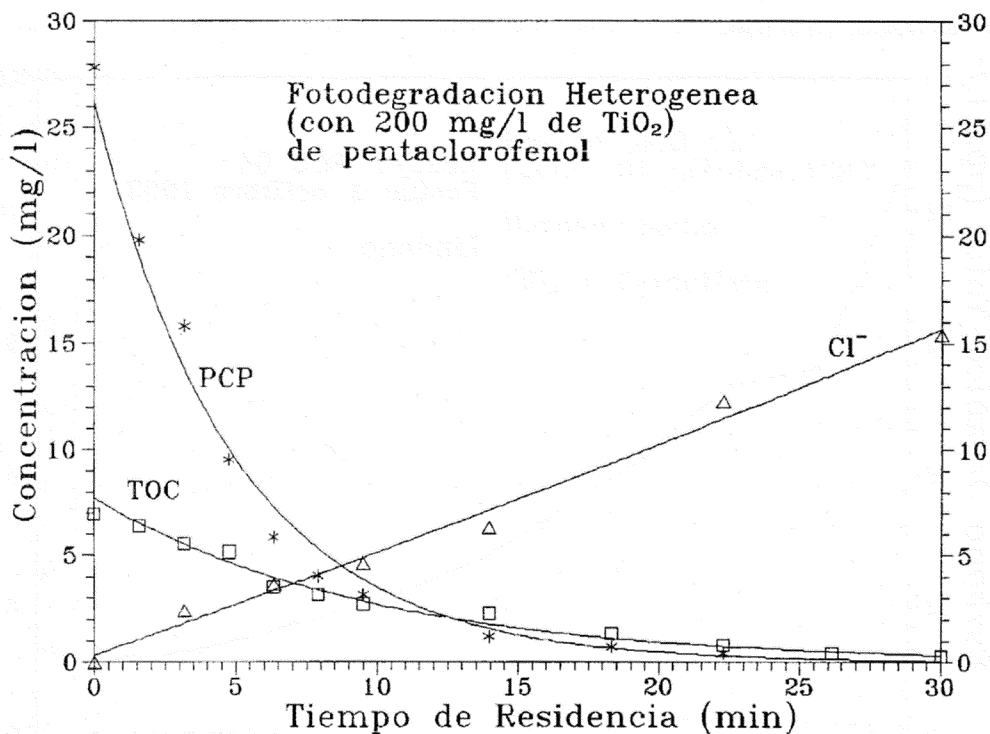


Fig. 6. Degradación de pentaclorofenol

Se puede afirmar además, que es bastante razonable esperar que en un futuro próximo el coste general del proceso sea sustancialmente mejorado, tanto desde el punto de vista de efi-

ciencia como de coste del mismo. Estas metas son objetivamente alcanzables a corto y medio plazo, aunque esto vendrá dado en función del apoyo y dedicación que reciba el tema. Una vez conseguido esto se podrá afirmar, sin duda alguna, que el proceso estará en condiciones de implantarse definitivamente y hacerse un sitio dentro de las tecnologías avanzadas de tratamiento de agentes contaminantes.

Un hecho que es preciso remarcar es que no se conoce exactamente cuáles son los límites máximos de concentraciones tratables mediante este sistema, en términos de una aplicación práctica del mismo. Inicialmente se pensaba que el proceso de detoxificación sería válido únicamente con concentraciones diluidas de contaminantes. Esto hizo que los esfuerzos iniciales se centrasen más en el tratamiento de aguas contaminadas y en la purificación de agua potable. Sin embargo, esto ha ido cambiando rápidamente al comprobarse que la adición de agentes oxidantes posibilitaba el tratar concentraciones cada vez más altas. Esto ha dado lugar a que hoy se vea que el campo más natural de aplicación sea el tratamiento de aguas residuales industriales, debido a las elevadas posibilidades de comercialización. Actualmente, y en particular el CIEMAT a través de la Plataforma Solar de Almería, está realizando intensas investigaciones en este campo, conjuntamente con todas aquellas industrias y empresas que se encuentran interesadas en el tema.

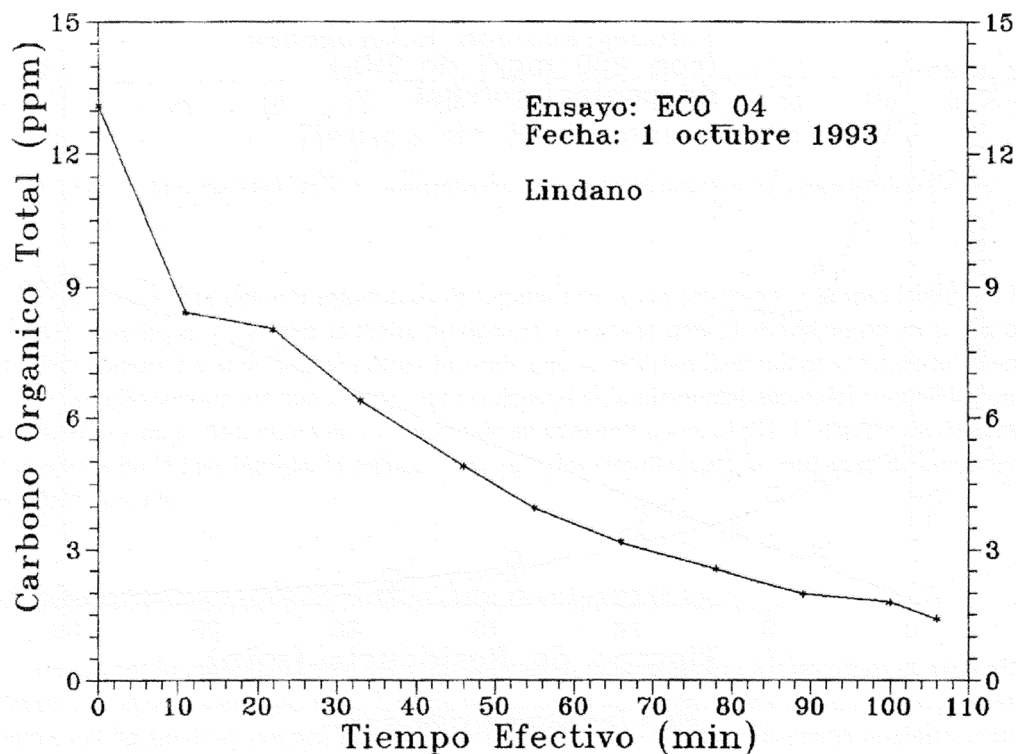


Fig. 7. Degradación de lindano (simulación de regeneración de suelo contaminado)

En cualquier caso y con la ayuda de agentes oxidantes como el persulfato, se está ya en condiciones de abordar el tratamiento de efluentes residuales industriales con concentraciones de orgánicos entre 200 y 500 ppm, valores normales de vertidos que muchas veces están por encima de los máximos permitidos. El uso del persulfato, por otro lado, no sufre ningún problema de regulación de vertidos desde el punto de vista de la generación de sulfatos (limitados a un máximo de 250 mg/l únicamente para el caso de aguas potables).

Este proceso de tratamiento, aunque a lo largo de esta exposición ha sido tratado como algo independiente, no puede abordarse como tal a la hora de una aplicación concreta, sino que ha de estar concebido como una etapa más, complementaria dentro de la cadena de procesos normales de tratamiento de una industria. Existen muchas aplicaciones y procesos industriales que generan residuos de muy difícil o muy costoso tratamiento posterior; es en estos casos donde el proceso de fotocátalisis (solar o mediante lámparas) podría ayudar a resolver el problema. Otras veces se podrían tener procesos de tratamiento biológico, pero la presencia de determinados compuestos muchas veces lo impide al ser nocivos para los lechos biológicos. En estos casos podría ser posible que un tratamiento fotocatalítico previo eliminase aquellas sustancias permitiendo abordar biológicamente el efluente resultante. Combinaciones como esta pueden existir muchísimas y, en este sentido será necesario realizar el estudio, caso por caso, con ob-

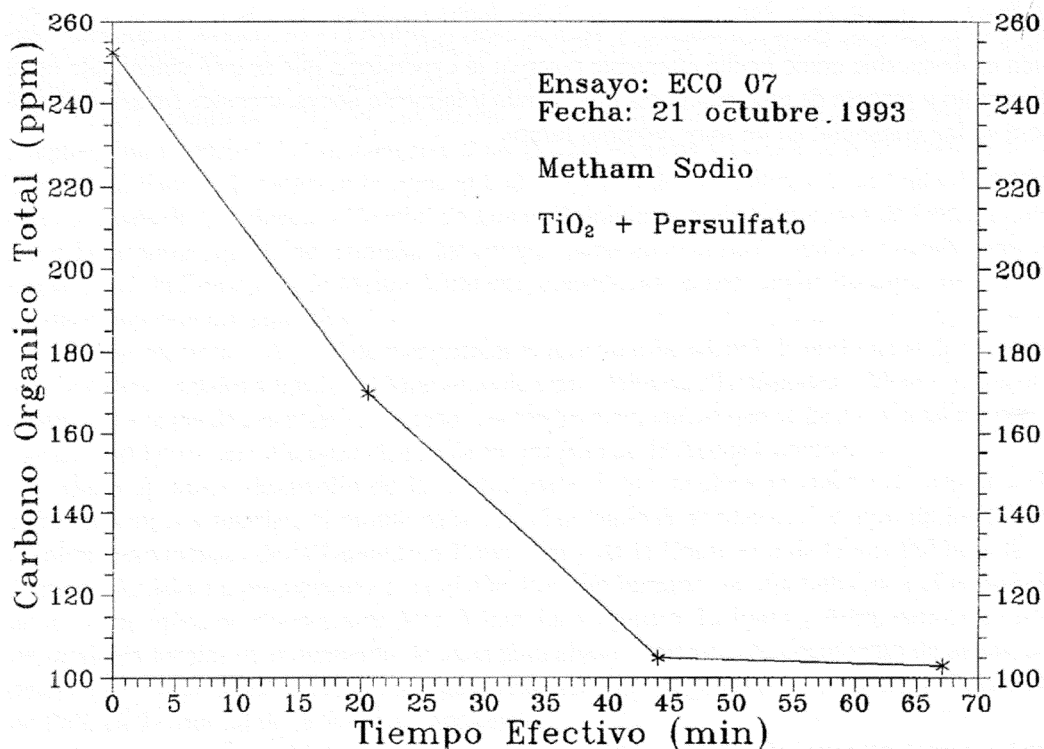


Fig. 8. Ensayo de degradación de 1358 ppm de metham sodio

jeto de conseguir la máxima efectividad, tanto técnica como económicamente de todos los procesos de tratamiento en cascada.

Sin embargo, aunque se ha demostrado suficientemente la viabilidad del proceso, hay que matizar que el proceso se haya actualmente en pleno desarrollo en cuanto a la tecnología necesaria para su aplicación óptima. Quedan todavía importantes puntos por resolver como son la fijación o no del catalizador mediante algún tipo de matriz o soporte en el reactor, la disyuntiva entre concentración o no desde el punto de vista del colector solar, mejorar la eficiencia del catalizador para posibilitar el uso de una franja espectral solar mayor, etc. En cualquier caso las estimaciones de coste realizadas con la tecnología existente basada en colectores cilindro-parabólicos, aunque contienen la incertidumbre propia de una tecnología en proceso de desarrollo, han sido realizadas desde un punto de vista conservador para la opción solar y muestran una economía clara del proceso en aquellos emplazamientos de irradiancia solar media-alta.

La cinética de la reacción determina la velocidad de descomposición y conocida esta, se puede dimensionar y calcular el reactor necesario para garantizar un determinado grado de degradación de un compuesto (o mezcla) en función de la concentración inicial del mismo, la radiación disponible y el caudal a tratar. Esta es la labor que se está llevando a cabo actualmente en la Plataforma Solar de Almería en estrecha colaboración con los laboratorios existentes en el Instituto de Energías Renovables - entidades ambas pertenecientes al Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT) - en Madrid. Finalmente también es destacable como hecho altamente positivo la experiencia que se está obteniendo en el desarrollo y manejo de una tecnología que, siendo totalmente nueva, creemos firmemente que verá su luz comercial en un muy próximo futuro.