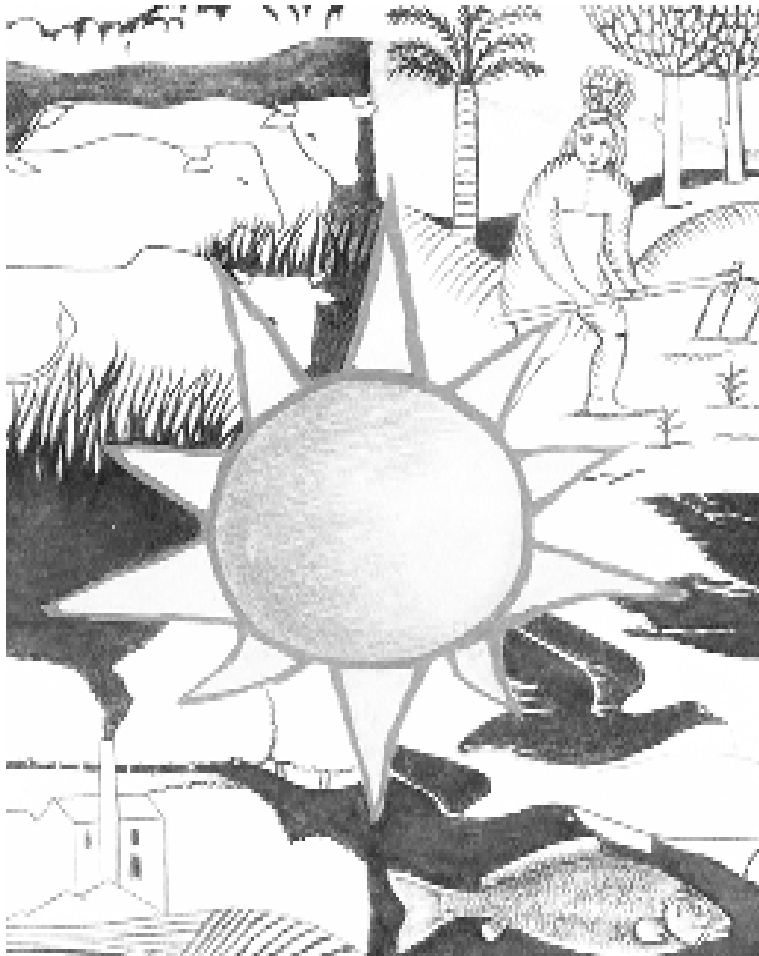


**AVANCES EN LA DESINFECCION DE AGUA DE RIEGO POR  
FOTOCATALISIS SOLAR: DESARROLLO EXPERIMENTAL Y  
RESULTADOS PRELIMINARES\***

Advances in irrigation water disinfection by solar photocatalysis:  
experimental development and preliminary results

*F. De la Hoz<sup>1</sup>, D. Rivera<sup>1</sup>, J. L. Arumi<sup>1</sup> & H. Mansilla<sup>2</sup>*



<sup>1</sup>Departamento de Recursos Hídricos, Facultad de Ingeniería Agrícola, Universidad de Concepción, Chile. <sup>2</sup>Facultad de Ciencias Químicas, Universidad de Concepción, Chile.

## RESUMEN

El mejoramiento de la calidad microbiológica del agua de riego, permite satisfacer los estándares de calidad requeridos por los mercados internacionales. La fotocatalisis, un Proceso Avanzado de Oxidación, es una tecnología de desinfección y degradación de los agentes contaminantes, mejorando la calidad del agua. Su eficacia ha sido probada, así como su inocuidad, bajo costo de operación y alta capacidad de remediación, pero no se han reportado aplicaciones para las aguas agrícolas. Por estas razones, el foco principal de esta investigación es el uso de la fotocatalisis solar heterogénea para disminuir la carga microbiológica de aguas de riego, usando un fotocatalizador soportado en la superficie de canales y activado por la radiación solar UV. Se realizaron pruebas de laboratorio en reactores estáticos de bajo volumen y de recirculación, además de pruebas en condiciones de operación controladas en un canal prototipo de 104 metros en longitud. La prueba de bajo volumen demostró la eliminación del 90% para la *Escherichia Coli ATTCC 25922* con una energía de radiación acumulada de  $10.000 \text{ J m}^{-2}$ , alcanzando los niveles regulatorios chilenos para la calidad del agua de riego. Para el canal prototipo, la eliminación fue de un 85% en 50 m y el 90% en el final del canal. Estos resultados preliminares, indican que el uso de esta tecnología en la desinfección del agua de riego, es factible y a bajos costos. Sin embargo, es necesario avanzar en el desarrollo de una metodología de diseño para aplicaciones a escala real en el marco de las Buenas Practicas Agrícolas.

Palabras claves: agricultura, aguas de riego, desinfección, coliformes fecales, fotocatalisis solar.

## ABSTRACT

The improvement of microbiological quality of irrigation water, allows the fulfill of quality standars required by international markets. Photocatalysis, an Advanced Oxidation Process, is a technology for disinfection and pollutants degradation, improving water quality. Their effectiveness is verified, as well as their harmlessess, low cost of operation and high remediation capacity, but there is not reported applications for agricultural waters. For these reasons, the main focus of this research is the application of heterogeneous solar phocatalysis using a phocatalyst supported in channel's lining and activated by sunligh UV radiation to decrease microbiological load. Laboratory tests were made in static reactors of both low volume and recirculation, in addition to tests in controlled conditions of operation in a prototype channel of 104 meters in length. Low volume test showed 90 % elimination for *Escherichia Coli ATTCC 25922* with a cummulative radiation energy of  $10.000 \text{ J m}^{-2}$ , reaching Chilean regulatory levels for irrigation water quality. For prototype channel, elimination was a 85 % at 50 m and 90 % at the end of the channel. These preliminary results, indicate that the use of this technology in the irrigation water disinfection is feasible and low costs. Nevertheless, it is necessary to advance in the development of a design methodology for real-scale applications in a Good Agricultural Practices framework.

Key-words: Agriculture, irrigation water, disinfection, fecal coliform, solar photocatalysis.

## INTRODUCCIÓN

El desarrollo de una agricultura intensiva sustentable, exige no sólo optimizar los procesos productivos desde el punto de vista económico, sino a la vez, manejar y controlar estos procesos, procurando no generar efectos negativos sobre el medioambiente.

Mundialmente, existe una gran preocupación por la contaminación que producen las ciudades, industrias y en particular los residuos derivados de labores o procesos agrícolas. En Chile, la normativa por la cual se rigen los niveles permitidos de calidad de aguas para riego es la Norma Chilena 1.333. Sin embargo, bajo las características globales de los mercados, los productores no sólo deben cumplir los estándares nacionales, sino también, los impuestos por los mercados internacionales (e.g., EUREPGAP en la Unión Europea).

### *Definición del problema*

En particular, dos de los agentes patógenos que más afectan la producción agrícola son los coliformes fecales y los nemátodos. En efecto, Claret et al. (2003) analizaron muestras tomadas en 92 pozos en el secano mediterráneo de Chile, de las cuales el 78,3 % (72 pozos) contenía coliformes fecales y el 88 % contenía coliformes totales (81 pozos), sobrepasando el límite microbiológico establecido por la Normativa Chilena para consumo humano ( 0 Unidades Formadoras de Colonias UFC/ 100mL). En la cuenca agrícola del río Chillán, el Centro EULA de la Universidad de Concepción reportó que la contaminación por bacterias fecales es uno de los problemas más serios de la cuenca del río Chillán (EULA 2002).

Entre las desventajas producidas por la utilización de aguas de riego contaminadas con patógenos, se pueden mencionar: baja en los rendimientos por infección por nemátodos, li-

mitación para producir hortalizas de calidad para el mercado nacional, amenaza de restricciones en la producción de frutas regadas con agua contaminada con bacterias fecales, peligro de enfermedades de los trabajadores agrícolas y peligro para la población rural.

En general la contaminación por bacterias fecales es más frecuente en los canales derivados que atraviesan muchas propiedades agrícolas, encontrando a su paso fuentes de contaminación puntuales como descargas clandestinas de aguas servidas, o difusas como infiltraciones provenientes de crianza de animales. Sin embargo, la contaminación difusa, fecal y por nemátodos, en las aguas de riego es difícil de controlar, por lo cual los agricultores constantemente enfrentan la necesidad de desinfectar el agua.

Dado lo anterior, el objetivo de este trabajo es analizar la factibilidad técnica en la aplicación de la fotocatálisis heterogénea utilizando catalizador inmovilizado en revestimientos de mortero de cemento y activados por radiación solar para la reducción de carga microbiana del agua utilizada en la agricultura.

## ESTADO DEL ARTE

### *Tecnologías de tratamiento*

En la actualidad existe un gran número de tecnologías para el tratamiento de efluentes, cuya factibilidad depende de condiciones de operación y de naturaleza de los contaminantes. Las aguas contaminadas por la actividad humana, en general, pueden ser procesadas eficientemente por plantas de tratamiento biológico, por adsorción de carbón activado u otros adsorbentes, como también por tratamientos químicos convencionales (e.g., oxidación térmica, cloración, ozonización, oxidación mediante permanganato de potasio) (Doménech et al. 2004). En la agricultura, la

búsqueda de tecnologías de tratamiento para la desinfección de aguas tanto en su captación como en puntos de devolución, ha adquirido en los últimos años gran importancia, debido principalmente a las exigencias tanto nacional como de los mercados extranjeros para la exportación de los productos agrícolas. Una prueba de lo anterior es el aumento en los recursos para la investigación de nuevas tecnologías de desinfección (e.g., instrumentos de financiamiento de la Comisión Nacional de Riego e INNOVA).

La disminución y mitigación de la contaminación microbiológica puede ser abordada por el sector agrícola mediante el desarrollo de tecnologías de desinfección, que cumplan con bajos costos de implementación y mantenimiento, de forma tal que sea asequible a la mayoría de los productores, independiente de su escala de producción. En este sentido, una de las alternativas más atractivas es la utilización de la fotocatalisis para la desinfección de aguas de uso agrícola.

### *Fotocatalisis*

La fotocatalisis es un proceso avanzado de oxidación que utiliza principalmente dióxido de titanio ( $\text{TiO}_2$ ) como fotocatalizador. Uno de los principales usos de esta tecnología esta en el tratamiento microbiológico del agua, dado su efecto bactericida. El  $\text{TiO}_2$  es también ampliamente utilizado como pigmento blanco para pinturas, cosméticos y productos alimenticios, dada su inocuidad (Fujishima et al. 1999).

Serpone & Emeline (2002) definen la fotocatalisis como la aceleración de una fotoreacción por la acción de un catalizador. Las fuentes de emisión de fotones van de lámparas de mercurio de xenón hasta radiación solar. La eficiencia del proceso de tratamiento depende principalmente de la fuente de iluminación (espectro e intensidad) y de la forma

de inclusión del catalizador. En la fotocatalisis se tienen dos tipos de técnicas: Procesos heterogéneos, los cuales son mediados por un semiconductor como catalizador, obteniendo dos fases de interacción y los procesos homogéneos o procesos mediados por compuestos férricos, en donde el sistema es usado en una sola fase (Gil et al. 2005).

La fotocatalisis heterogénea tiene lugar en una superficie de frontera entre dos fases (sólido-líquido, sólido-gas, líquido-gas). En este esquema, cuando una molécula de agua es adsorbida en la superficie del catalizador, se generan radicales hidroxilos de gran capacidad de oxidación de los distintos contaminantes presentes en el agua (Benedix et al. 2000).

### *Fotocatalisis solar*

La fotocatalisis solar es el uso de la radiación solar en la producción de radicales hidroxilos (Malato et al. 2002). Algunos ejemplos de aplicación son el tratamiento de aguas residuales con contenidos de formaldehídos provenientes de laboratorios veterinarios (Araña et al. 2004), y el tratamiento de efluentes provenientes de plantas papeleras (Machado et al. 2003). Casos interesantes de mencionar son las experiencias en la Plataforma Solar de Almería (PSA, España) utilizando fotocatalisis solar para el tratamiento del agua; el desarrollo de dióxido de titanio modificado (Xie & Yuan 2004) y el acople de tecnologías basadas en luz solar con tratamientos biológicos (Sarria et al. 2003). Un caso destacado son las experiencias desarrolladas en el marco del proyecto OEA AE 141/2001 de la Agencia Interamericana para la Cooperación y el Desarrollo (2003) sobre desinfección solar y remoción de arsénico de aguas en comunidades rurales de América Latina (Litter & Mansilla 2003). Una buena revisión del desarrollo de la fotocatalisis en la descontaminación y des-

infección del agua por colectores solares, puede encontrarse en (Malato et al. 2007).

### *Desinfección fotocatalítica*

Los efectos bactericidas de la fotocatalisis comenzaron a ser estudiados por Ireland et al. (1993) utilizando cultivos puros de coliformes fecales, específicamente, *Escherichia Coli* (EC). Ireland et al. (1993), para concentraciones iniciales de entre 1.000 a 10.000 UFC/100 mL y tiempos de exposición de entre 5 a 30 minutos a TiO<sub>2</sub> inmovilizado en una placa cerámica, obtuvieron conteos de coliformes inferiores a 10 UFC/100 mL. Wei et al. (1994) corroboraron los efectos sobre la desinfección de agua utilizando TiO<sub>2</sub>; en efecto, las tasas de sobrevivencia de las colonias de EC es inferior al 50% después de 15 minutos de exposición.

El mecanismo de acción de los sistemas de desinfección de aguas se basa en la promoción de la oxidación de los fosfolípidos poliinsaturados componentes de la membrana, produciendo un desorden celular en la EC por fallas en su membrana (Maness et al. 1999). Nadochenko et al. (2004) siguieron los cambios químicos y en la estructura de la EC inducidos por la fotocatalisis mediante ATR-FTIR (Attenuated total reflection Fourier transform infrared spectroscopy) y AFM (Atomic force microscopy). Estas fallas llevan a la muerte de los microorganismos por problemas de la actividad respiratoria.

Gumy et al. (2006), compararon el poder de abatimientos de EC con diferentes catalizadores, encontrando que el mejor de ellos es el TiO<sub>2</sub> Degussa P-25.

### *Aplicabilidad en la agricultura*

Los sistemas basados en desinfección mediante fotocatalisis heterogénea usando radiación

solar tiene variadas ventajas, como: (1) El no consumo de agentes oxidantes de alto valor y la alta producción de TiO<sub>2</sub>; (2) Debido a que la radiación ultravioleta necesaria para la activación del fotocatalizador puede ser obtenida de la radiación solar, este tipo de sistemas consume energías mínimas de mantención y nulo consumo energético externo en la operación; (3) Los oxidantes producidos son de alto poder y no discriminan, con el potencial de eliminar la mayoría de los microorganismos y la degradación o mineralización de la mayoría de contaminantes orgánicos; (4) Puede ser aplicable en zonas rurales o de difícil acceso, ya que otras tecnologías similares, como la irradiación con UV o la aplicación de ozono necesitan una fuente externa de energía.

Sin embargo, aún considerando estos antecedentes, esta tecnología no ha sido aplicada a problemas de calidad de agua de riego en la agricultura bajo condiciones de manejo tradicional. Pero cabe destacar, que se han realizado avances en la utilización de la fotocatalisis en la inactivación de hongos patógenos presentes en los sustratos utilizados en cultivos hidropónicos, reportándose significativos niveles de inactivación en las especies fusarium evaluadas (Sichel et al. 2007). La aplicación de esta tecnología supone el desarrollo de un método de desinfección de aguas para riego ambientalmente amigable, inocuo y de bajo costo.

Considerando que la tecnología de desinfección usando fotocatalisis heterogénea constituye un nicho de investigación y desarrollo de tecnologías aplicables a la agricultura en el marco de producción limpia y de calidad, se considera de gran importancia abordar esta línea de investigación; mas aún, si se considera que los problemas de mitigación y prevención son un objetivo fundamental de la Política de Estado para la Agricultura Chilena, además de la innovación, investigación y el fomento para la calidad.

## DESARROLLO EXPERIMENTAL

Las investigaciones de la Unidad de Fotocatálisis de la Facultad de Ingeniería Agrícola, están orientadas al mejoramiento en la calidad de las aguas utilizadas en la agricultura. Los proyectos que se encuentran en desarrollo son: (a) desarrollo de un proceso de desinfección de aguas de riego usando fotocatalizadores activados por radiación solar e inmovilizados en revestimiento de canales; y (b) desarrollo de un reactor de bajo volumen para desinfección de agua mediante fotocátalisis solar heterogénea para zonas rurales.

### *Desinfección de agua en canales*

Para el desarrollo de este proyecto, se consideraron cuatro etapas de trabajo. En la primera, se realizaron trabajos exclusivamente en laboratorio, buscando definir la mejor técnica de inmovilización del catalizador en mortero de cemento, y la evaluación de éste en el abatimiento de coliformes fecales, mediante pruebas en un reactor de bajo volumen con fuente de luz artificial (Fig. 1). En la segunda etapa se ejecutaron pruebas en un canal prototipo en condiciones de terreno; además, se controlaron y monitorearon en el canal las variables de mayor incidencia en el proceso de desinfección. En la tercera etapa, a partir de los resultados obtenidos anteriormente, se está trabajando en identificar y definir los procesos y subprocesos que intervienen en la desinfección fotocatalítica en un canal en condiciones de terreno, junto con la caracterización de la interacción de las variables de mayor influencia en la eficiencia de desinfección. La última etapa considera contar con un modelo conceptual y un modelo funcional, a partir de la síntesis de los procesos involucrados.

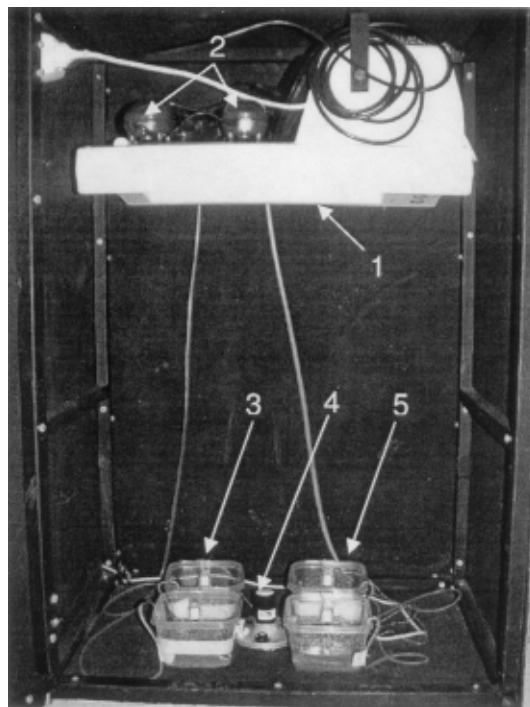


FIGURA 1. ESQUEMA DE CONFIGURACIÓN DEL REACTOR DE BAJO VOLUMEN: 1: FUENTE DE RADIACIÓN UV-A, 2: BOMBAS DE AIREACIÓN, 3: MOTORES DE AGITACIÓN, 4: SENSOR DE RADIACIÓN UV-A, 5: RECIPIENTES PLÁSTICOS.

Schematic configuration for low volume reactor: 1: source of UV-A radiation, 2: aeration pump, 3: agitation engines, 4: sensor radiation UV-A, 5: plastic containers.

### *Ensayos de laboratorio*

Los distintos ensayos que se realizaron en el reactor de bajo volumen, fueron de gran importancia para el estudio básico de la factibilidad del proceso fotocatalítico en la desinfección de agua para riego. En el fondo de recipientes plásticos, se depositaron losetas de hormigón con distintas concentraciones del fotocatalizador. El reactor puede contener cuatro recipientes plásticos, manteniendo en forma homogénea la intensidad de radiación UV-A en cada recipiente.

### Tratamientos

Se evaluaron cuatro concentraciones de catalizador inmovilizado en mortero de cemento. La inmovilización del catalizador, se realizó mediante la incorporación de éste, en la etapa de mezclado para la preparación de la pasta de cemento. Las concentraciones de catalizador utilizadas como tratamiento, son función de porcentaje de peso de cemento utilizado en la preparación de la pasta de cemento, definidas como  $T1 < T2 < T3 < T4$ . La pasta de cemento fue depositada en el fondo de recipientes plásticos de 900 mL de capacidad, obteniéndose losetas en el fondo de los recipientes con secciones de  $11 \times 11 \text{ cm}^2$  y 0,5 cm de espesor. Para el control de la humedad de las losetas en las etapas de fraguado y endurecimiento, se sellaron los recipientes con tapas a presión, evitando de esta manera la deshidratación de las losetas.

### Reactor

El reactor estático o de bajo volumen esta conformado por una caja de perfiles metálicos con un revestimiento de tableros de OSB (Oriented Strand Board) de 6mm de espesor y pintado de negro en su interior con óleo opaco. Este reactor, cuenta con un solarium (Philips, Decollete Studio HB 311), como fuente de UV con longitudes de onda concentradas en los 360 nm. Las pruebas o tratamientos se realizaron en recipientes plásticos de 900 mL de capacidad, que cuentan con un sistema de aireación mediante dos bombas (Sera, Air 110). La homogenización del volumen de agua contenido en cada recipiente se logra mediante un sistema de agitación que esta compuesto por un conjunto de motores de tres volts, con control de potencia. Estos motores poseen en su extremo un mini rotor, el cual genera un vórtice que permite una completa homogenización

y aireación del agua en cada recipiente.

La intensidad de radiación emitida por la fuente, es registrada por un sensor de radiación UV-A (Skye, 420). Las longitudes de onda que registra el sensor están entre los 315 y 380 nm, que corresponde a la zona UV-A electromagnético. Para realizar una normalización de la intensidad de radiación incidente por unidad de área ( $\text{w/m}^2$ ) registrada en cada ensayo, se determinó la energía acumulada por unidad de volumen tratado  $Q_{UV}$  (Rincón & Pulgarin 2004). Para ello, se utiliza la siguiente expresión:

$$Q_{UV,n} = Q_{UV,n-1} + \Delta t_n \cdot UV_{G,n} \cdot A_L/V_T \quad (1)$$

donde,  $\Delta t_n = t_n - t_{n-1}$ ,  $t_n$  es el tiempo de monitoreo,  $UV_{G,n}$  es el promedio de la radiación UV global durante  $t_n$ ,  $A_L$  es el área de la loseta con el tratamiento ( $12,1 \times 10^{-3} \text{ m}^2$ ),  $V_T$  es el volumen de la muestra a tratar (270 mL) y  $Q_{UV,n}$  es la energía acumulada incidente sobre cada muestra por unidad de volumen (kJ/L).

### Preparación de la solución con bacteria

El caldo de cultivo utilizado en todos los ensayos, es suministrado por el Laboratorio de Microbiología de la Facultad de Medicina Veterinaria de la Universidad de Concepción, Campus Chillán. El caldo de bacterias con una concentración de  $10^5 \text{ UFC/100mL}$  es diluido en agua destilada para alcanzar concentraciones que van de los 3.000 a 10.000 UFC/100mL. Estos valores de concentración, son comúnmente encontrados en los canales de riego de nuestro país (DGA 2003). La solución final obtenida de la dilución, es vertida en los recipientes que contienen los distintos tratamientos, controlando que todos ellos contengan la misma altura de agua sobre las losetas.

### Muestreo y monitoreo del ensayo

Para el muestreo del ensayo se utilizan placas Petrifilm para *E. coli* (3M, *E. coli* /coliformes). Este método ha sido validado para el control microbiológico de alimentos y se ha reportado una excelente respuesta en la medición de calidad de aguas (Beloti et al. 2003, Silva, et al. 2004). La toma de muestras se realizó a intervalos de tiempo de cinco minutos, utilizando una micropipeta para la extracción de 1 mL. Luego de inocular las placas Petrifilm, estas son incubadas a una temperatura de 35°C por un periodo de 24-48 hr (método oficial 991.14. de la AOAC. Finalizado el periodo de incubación, se procede al conteo de colonias formadas en las placas. Estas colonias se caracterizan por la coloración azul y por la generación de burbujas de gas a su alrededor (Fig. 2).

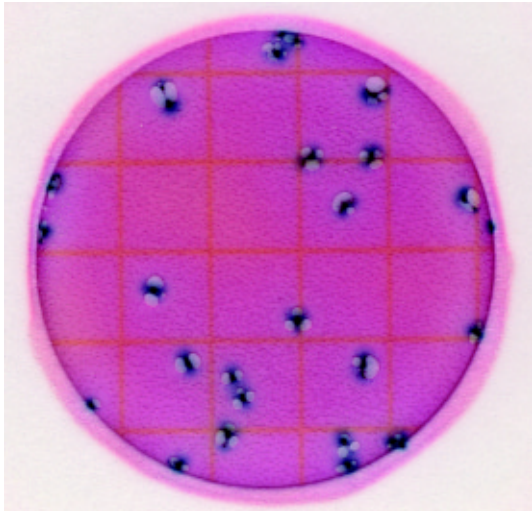


FIGURA 2. PLACA PETRIFILM CON *E. coli* ATCC 25922 DE COLOR AZUL MAS BURBUJAS DE GAS EN SUS CONTORNOS.

Petrifilm plate with *E. coli* ATCC 25922 of blue color more gas bubbles in his outlines.

El monitoreo en tiempo real del funcionamiento de la fuente de radiación UV y de los oxigenadores, se realiza mediante un computador. Otras variables como la temperatura y el pH, son medidos al inicio de las pruebas (Extech, ExStik™ pH Meter).

### Canal prototipo

El diseño consideró dos áreas de desarrollo: hidráulica-constructiva e inmovilización-eliminación. Respecto al diseño hidráulico-constructivo, se consideraron los criterios básicos de diseño de canales revestidos de hormigón. El modelo matemático utilizado, corresponde a la ecuación de Chèzy-Manning (Potter et al. 2002), con la siguiente expresión:

$$V = a/n \cdot A \cdot R_h^{2/3} \cdot S^{1/2} \quad (2)$$

$$R_h = A/P \quad (3)$$

donde,  $V$  es la razón de flujo en el canal en  $m^3/s$ ,  $a$  es una constante dimensional igual a  $1 m^{1/3}/s$ ,  $n$  es el coeficiente de rugosidad de la superficie del canal,  $R_h$  es la relación entre el área de conducción  $A$  y el perímetro mojado  $P$  de la sección del canal y  $S$  es la pendiente del canal. A partir de esta expresión, se definió una sección de flujo trapezoidal, considerando un caudal máximo de escurrimiento de 16 L/s, con una pendiente del 1/1.000 para maximizar el tiempo de residencia en el canal.

Los materiales utilizados para la construcción del canal fueron: soleras, placas prefabricadas, mortero de pega y hormigón H5 para emplantillado (Fig. 3). La longitud considerada en el diseño del canal fue de 104 m, permitiendo disponer de un largo efectivo de tratamiento de 100 m. Se consideró una cámara de mezcla al inicio del canal, para la incorporación del caldo de bacterias y una segunda cá-



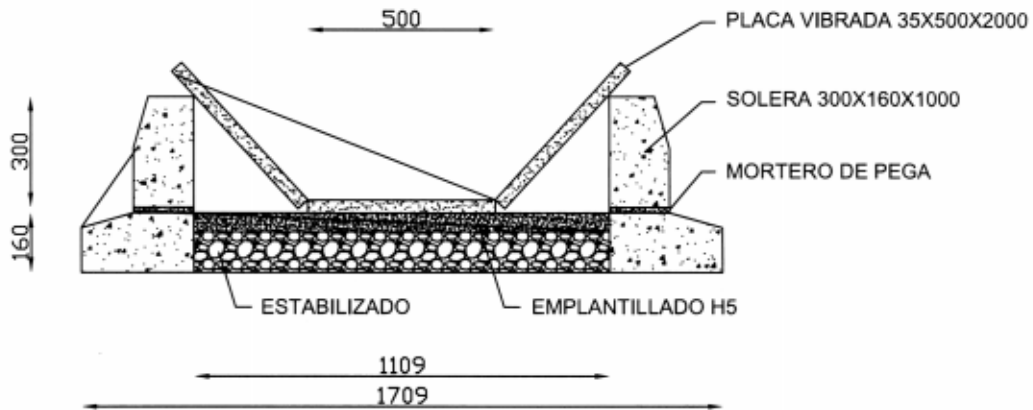


FIGURA 3. ESQUEMA DE LA SECCIÓN DEL CANAL PROTOTIPO Y MATERIALES UTILIZADOS (UNIDADES EN MM.).

Schematic for channel prototype section and materials used (units in mm).

mara al final del canal para el control de descarga (Fig. 4a). Para el suministro constante de agua al canal durante los ensayos, se dispone de una piscina de acumulación de 56 m<sup>3</sup> (Fig. 4b). Para el abastecimiento de agua desde la piscina al canal, se dispone de dos bombas eléctricas de alto caudal.

En lo referente al diseño inmovilización-eliminación, se utilizaron losetas para la aplicación del tratamiento. Este método facilita evaluaciones posteriores de distintas concentraciones del catalizador, sin la necesidad de incurrir en la modificación física del canal prototipo. Estas losetas se diseñaron considerando la inmovilización del catalizador en la matriz del mortero. Se determinó que el tamaño idóneo para una fácil manipulación de estas placas es de 50X50 cm<sup>2</sup> con un espesor de mortero no superior a 5 mm, para minimizar la masa de catalizador adicionado al mortero.

La inyección de caldo de bacterias se realizó mediante una manguera conectada a la matriz de alimentación del canal. El caldo se

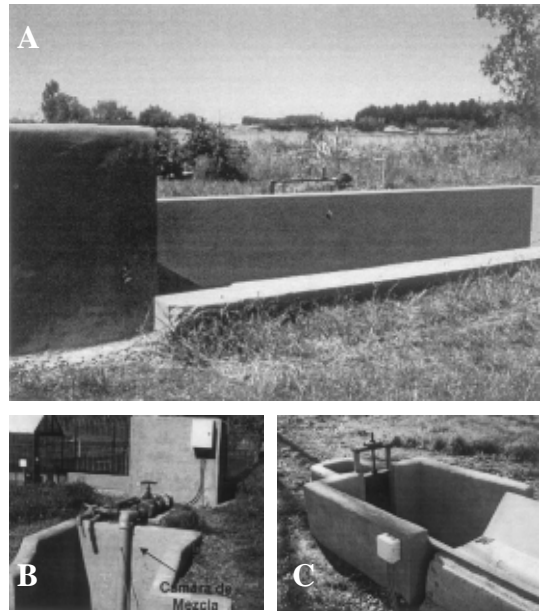


FIGURA 4. A: PISCINA DE ACUMULACIÓN, B: CÁMARA DE MEZCLA Y C: CÁMARA DE DESCARGA.

A: pit accumulation, B: mixing chamber, C: discharge chamber.

inyecta gravitacionalmente desde un estanque rotulado.

Para la verificación del funcionamiento del canal, se realizaron pruebas de abatimiento de bacterias *E. Coli* ATCC 25922 con concentraciones de hasta  $2 \times 10^6$  UFC/mL. y con un caudal de flujo de 1 L/s. Las variables de interés fueron monitoreadas mediante sensores y por extracción de muestras de agua para el posterior análisis de laboratorio. Para el análisis microbiológico se utilizaron placas Petrifilm.

## RESULTADOS PRELIMINARES

### *Reactor de bajo volumen*

El efecto del proceso fotocatalítico en la cinética de abatimiento de la bacteria (Fig. 5a), muestra una mayor eficiencia los tratamientos con T3 y T4. Los niveles de abatimiento alcanzados con estos dos tratamientos, son del orden de dos unidades logarítmicas con tiempos de exposición de 30 minutos. La intensidad de radiación UV-A fue de  $34 \text{ W/m}^2$ , que corresponde a una radiación total de  $700 \text{ W/m}_m$  en condiciones naturales. Estos niveles de abatimiento, permiten obtener concentraciones bajo la Norma Chilena 1.333, con tiempos de exposición de 17 minutos. Otras experiencias<sup>1</sup> en desinfección de aguas, han obtenido niveles de abatimiento de hasta 5 unidades logarítmicas con tiempos de exposición de cuatro horas, bajo niveles de radiación similares a los utilizados en este proyecto

La similitud en las respuestas de abatimiento, entre los tratamientos T3 y T4, se explica en que alcanzado un determinado grado de concentración de catalizador en la superficie, se produce una recombinación acelerada de los pares electro-hueco. Esta rápida recombinación,

limita la capacidad de emigración de las cargas en la solución con la cual se encuentra en contacto la superficie del catalizador, disminuyendo la capacidad de interacción con las bacterias que se encuentran en el medio acuoso. Es por ello que a partir de estos resultados, se determinó que la concentración recomendada de catalizador para la utilización de esta técnica de inmovilización es cercana a T3 en función al peso del cemento utilizado en la confección de las losetas.

En los distintos ensayos de laboratorio, se utilizaron diversas concentraciones iniciales de bacterias en suspensión, registrándose mayores eficiencias de abatimiento para concentraciones iniciales más altas. La relación entre eficiencia de abatimiento y concentraciones de bacterias tiene una explicación probabilística. En efecto, al existir un mayor número de bacterias en el volumen de agua a tratar, existe mayor probabilidad que alguna de éstas entre en contacto con la superficie de las loseta en la cual se produce la reacción fotocatalítica, por lo que a medida que la concentración disminuye, también disminuye la probabilidad de contacto de la bacteria con el catalizador. Un ejemplo de la diferencia de eficiencia según la concentración inicial de bacterias, se presenta en la Fig. 5b. Este resultado tiene una importante implicancia en el diseño de canales de riego revestidos con catalizador, ya que para bajos niveles de carga microbiológica es necesario generar altos niveles de turbulencia en la sección del canal por donde se conduzca el agua, de tal manera de aumentar la probabilidad de contacto entre las bacterias con la superficie del catalizador.

### *Canal prototipo*

Los resultados obtenidos de los ensayos preliminares realizados en el canal prototipo, se muestran en la Fig. 6. Para uno de los ensayos no fue posible alcanzar conteos de *E. Coli* in-

---

<sup>1</sup>Texto colectivo elaborado por la red CYTED VIII-G, 2001

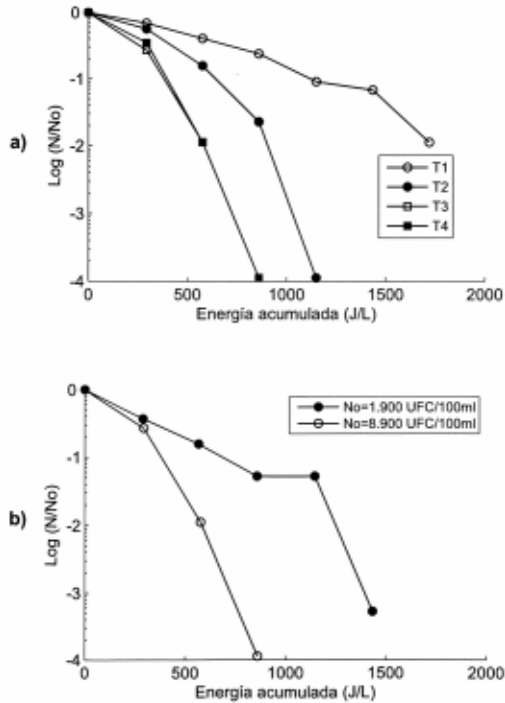


FIGURA 5. A: CINÉTICA DE ABATIMIENTO DE BACTERIA ATCC 25922, EN FUNCIÓN DE LA ENERGÍA ACUMULADA DE RADIACIÓN UV-A, PARA LOS TRATAMIENTOS T1, T2, T3 Y T4, B: CINÉTICA DE ABATIMIENTO DE BACTERIA ATTCC 25922, PARA EL TRATAMIENTO T3, UTILIZANDO DIFERENTES CONCENTRACIONES INICIALES DE BACTERIAS PARA CADA PRUEBA.

A: Abatement kinetics for bacterium atcc 25922, depending on the accumulated energy of uv-a radiation, for t1, t2, t3 and t4, B: abatement kinetics for bacterium atcc 25922, for the treatment t3, using different concentrations of bacteria for each test.

feriores a 1.000 UFC/100 mL, que es el límite para riego irrestricto según la normativa chilena, debido a que el largo del canal (tiempo de exposición) no fue suficiente para abatir la concentración inicial cercana a  $10^6$  UFC/100 mL. Sin embargo, se observa que para los dos ensayos, el mayor porcentaje de eliminación se produjo en los primeros 50 m de tratamien-

to en el canal. En efecto, al existir un número mayor de bacterias en suspensión, mayor es la probabilidad de que una de ellas entre en contacto con la superficie del fondo del canal donde se encuentra inmovilizado el catalizador. De esta manera se justifica el decrecimiento en magnitud de la eliminación a lo largo del canal.

A partir de los resultados obtenidos se realizó una identificación preliminar de las variables que estarían involucradas en la desinfección fotocatalítica en el canal prototipo. Para ello se realizó una clasificación de los procesos y subprocesos, según la naturaleza de ellos. Esta clasificación esta conformada por cuatro grupos: hidráulicos, microbiológicos, químicos y ópticos. Esto permitirá disponer de un mejor ordenamiento para la definición de interacción entre estos cuatro grupos. Cada grupo esta subdividido en tres niveles o zonas de análisis, en las cuales se realiza la caracterización de los procesos y subprocesos.

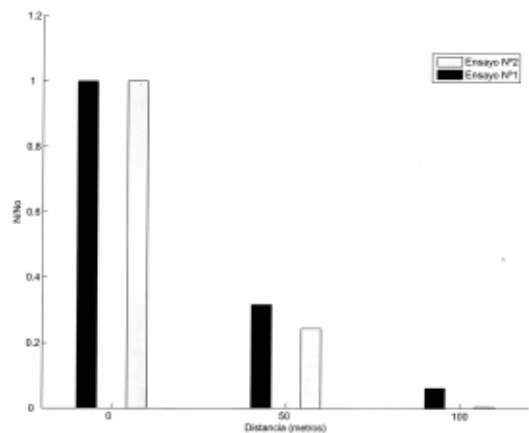


FIGURA 6. ABATIMIENTO EN CONCENTRACIÓN DE BACTERIAS A LO LARGO DEL CANAL PROTOTIPO.

Abatement in concentration of bacteria along the canal prototype..

## CONCLUSIONES

Basado en los resultados, tanto en las pruebas de laboratorio como en el canal prototipo, puede concluirse que la fotocatalisis solar heterogénea, es factible de ser aplicada en el tratamiento de desinfección de aguas de riego, siendo necesario a su vez, la realización de un mayor número de ensayos en condiciones de terreno, que permita contar con una amplia base de datos, para mejorar los métodos de diseño y dimensionamiento de reactores en condiciones de campo.

## LITERATURA CITADA

- ARAÑA J, JL MARTÍNEZ, JA HERRERA MELIÁN, JM DOÑA RODRÍGUEZ, GONZÁLEZ O DÍAZ, J PÉREZ, O BERGASA, C ÁLVAREZ & J MÉNDEZ (2004) Photocatalytic degradation of formaldehyde containing wastewater from veterinarian laboratories. *Chemosphere* 55 (6): 893-904.
- BELOTI V, J APARECIDA, M FERREIRA, L AUGUSTO, M RODRIGUES, V VIEIRA & L BILIA (2003) Evaluation of Petrifilm™ EC e HS for total coliforms and *Escherichia coli* enumeration in water. *Brazilian Journal of Microbiology* 34 (4): 301-304.
- BENEDIX R, F DEHN, J QUAAS & M ORGAZ (2000) Application of titanium dioxide photocatalysis to create self-cleaning building materials. Disponible en [http://www.uni-leipzig.de/~massivb/institut/lacer/lacer05/I05\\_19.pdf](http://www.uni-leipzig.de/~massivb/institut/lacer/lacer05/I05_19.pdf)., Fecha de consulta 20 de Diciembre de 2005.
- CLARET M, R URRUTIA, R ORTEGA, M ABARZUA, C PÉREZ & M PALACIOS (2003) Estudio de la contaminación en agua de pozo destinada a consumo humano y su expresión espacial en el secano mediterráneo de Chile. Disponible en: [http://www.medioambienteonline.com/site/root/resources/case\\_study/2076.html](http://www.medioambienteonline.com/site/root/resources/case_study/2076.html). Fecha de consulta 23 de Diciembre de 2005.
- DGA (2003) Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad. Informe final proyecto P-1940.
- DOMÉNECH X, W JARDIM & M LITTER (2004) Procesos avanzados de oxidación para la eliminación de contaminantes. Eliminación de contaminantes por fotocatalisis heterogénea, Colección documentos Ciemat 7-34.
- EULA (2002) Desarrollo de una metodología para la evaluación y mitigación de la contaminación de aguas y suelos: aplicación de la cuenca del río Chillán. Informe final proyecto SAG VIII4-36-0199.
- FUJISHIMA A, K HASHIMOTO & T WATANABE (1999) *TiO<sub>2</sub> photocatalysis: fundamentals and applications*. Best Knowledge Center (BKC), Tokyo, Japan.
- GILE, M CAMARGO, C CASTRO & T PINEDA (2005) Oxidación fotocatalítica de cianuro. Documento 29-042005, Grupo de investigación procesos ambientales y biotecnológicos (GIPAB), Universidad EAFIT.
- GUMY D, C MORAIS, P BOWEN, C PULGARIN, S GIRALDO, R HAJDU & J KIWI (2006) Catalytic activity of commercial *TiO<sub>2</sub>* powders for the abatement of the bacteria (*E. coli*) under solar simulated light: Influence of the isoelectric point. *Applied Catalysis B: Environmental* 63 (1-2): 76-84.
- IRELAND J, P KLOSTERMANN, E RIVE & R CLARK (1993) Inactivation of *Escherichia coli* by titanium dioxide photocatalytic oxidation. *Applied and Environmental Microbiology* 59 (5): 1668-1670.
- LITTER M & H MANSILLA (eds) (2003a) Desinfección solar de aguas en comunidades rurales de América Latina. Agencia Interamericana para la Cooperación y el Desarrollo. Proyecto OEA AE 141/2001. Documento Técnico.
- LITTER M & H MANSILLA (eds) (2003b) Remoción de arsénico asistida por luz solar en comunidades rurales de América Latina. Agencia Interamericana para la Cooperación y el Desarrollo. Proyecto OEA AE 141/2001. Documento Técnico.
- MACHADO A, J DE MIRANDA, R DE FREITAS, E THOMAS, F DUARTE, L FERREIRA, Y ALBUQUERQUE, R RUGGIERO, C SATTLER & L DE OLIVEIRA (2003) Destruction of the organic matter present

- in effluent from a cellulose and paper industry using photocatalysis. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry* 155 (1-3): 231-241.
- MALATO S, J BLANCO, A VIDALA & C RICHTER (2002) Photocatalysis with solar energy at a pilot-scale: an overview. *Applied Catalysis B: Environmental* 37: 1-15.
- MALATO S, J BLANCO, D ALARCÓN, M MALDONADO, P FERNÁNDEZ-IBÁÑEZ & W GERNJAK (2007) Photocatalytic decontamination and disinfection of water with solar collectors. *Catalysis Today* 122 (1-2): 137-149.
- MANESS P, S SMOLINKSKI, D BLAKE, Z HUANG, E WOLFRUM & W JACOBY (1999) Bactericidal activity of photocatalytic TiO<sub>2</sub> reaction: toward and understanding of its killing mechanism. *Applied and Environmental Microbiology* 65 (9): 4094-4098.
- NADTOCHENKO VA, AG RINCÓN, SE STANCA & J KIWI (2004) Dynamics of *E. coli* membrane cell peroxidation during TiO<sub>2</sub> photocatalysis studied by ATR-FTIR spectroscopy and AFM microscopy. *Journal photochemistry and photobiology A: Chemistry* 169 (2): 131-137.
- POTTER M, D WIGGERI, M HONDZO & T SHIH (2002) *Mecánica de fluidos*. Tercera edición. Cengage Learning Editores: 417-426.
- RINCÓN AG & C PULGARIN (2004) Field solar *E. coli* inactivation in the absence and presence of TiO<sub>2</sub>: is UV solar dose an appropriate parameter for standardization of water solar disinfection?. *Solar Energy* 77(5): 635-648.
- SARRIA V, S KENFACK, O GUILLOD & C PULGARIN (2003) An innovative coupled solar-biological system at field pilot scale for the treatment of biorecalcitrant pollutants. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry* 159 (1): 89-99.
- SERPONE N & A EMELINE (2002) Suggested terms and definitions in photocatalysis and radiocatalysis. *International Journal of Photoenergy* 4 (3): 91-131.
- SICHEL C, M DE CARA, J TELLO, J BLANCO & P FERNANDEZ-IBÁÑEZ (2007) Solar photocatalytic disinfection of agricultural pathogenic fungi: *Fusarium* species. *Applied Catalysis B: Environmental* 74 (1-2): 152-160.
- SILVA J, L RAMÍREZ, A ALFIERI, G RIVAS & M SÁNCHEZ (2004) Determinación de microorganismos indicadores de calidad sanitaria. Coliformes totales, coliformes fecales y aerobios mesófilos en agua potable envasada y distribuida en San Diego, estado Carabobo, Venezuela. *Revista de la Sociedad Venezolana de Microbiología* 24 (1-2): 46-49
- WEI CH, W LIN, Z ZAINAL, N WILLIAMS, K ZHU, A KRIZIC, R SMITH & K RAJESHWAR (1994) Bactericidal activity of TiO<sub>2</sub> photocatalysis in aqueous media: toward a solar-assisted water disinfection system. *Environmental Science and Technology* 28: 934-938.
- XIE Y & CH YUAN (2004) Photocatalysis of neodymium ion modified TiO<sub>2</sub> sol under visible light irradiation. *Applied Surface Science* 221 (1-4): 17-24.