



Margarita del V. Hidalgo,<sup>1</sup> María C. Apella,<sup>1,2,3</sup> Marta I. Litter,<sup>3,4,5</sup> Miguel A. Blesa<sup>3,4,5\*</sup>

<sup>1</sup> Centro de Investigaciones y Transferencia en Química Aplicada, Facultad de Ciencias Naturales e Instituto Miguel Lillo, Universidad Nacional de Tucumán, Prov. de Tucumán, Argentina

<sup>2</sup> Centro de Referencia para Lactobacilos (CERELA), Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Prov. de Tucumán, Argentina

<sup>3</sup> CONICET

<sup>4</sup> Unidad de Actividad Química, Centro Atómico Constituyentes, Comisión Nacional de Energía Atómica, Prov. de Buenos Aires, Argentina; [miblesa@cnea.gov.ar](mailto:miblesa@cnea.gov.ar)

<sup>5</sup> Escuela de Posgrado, Universidad Nacional de General San Martín, Prov. de Buenos Aires, Argentina

En el momento de publicarse este artículo hemos recibido la noticia de que el Dr Miguel A. Blesa fue distinguido con el premio de química 2004 otorgado por la Academia de Ciencias del Mundo en Desarrollo (TWAS) por su trabajo sobre óxidos inorgánicos (metálicos) en medios acuosos: mecanismos de disolución y reprecipitación, adsorción y desorción, y reacciones catalizadas en la interfaz sólido/agua.

## TECNOLOGIAS ECONOMICAS DE POTABILIZACION SOLAR DE AGUA EN ZONAS AISLADAS DE LATINOAMERICA

### Resumen

Dentro del marco del proyecto OEA/AE/141 de la Agencia Interamericana para la Cooperación y el Desarrollo (AICD) de la Organización de Estados Americanos (OEA), un grupo de expertos en tratamiento de aguas por tecnologías solares de seis países—Argentina, Brasil, Chile, México, Perú y Trinidad & Tobago—está trabajando desde 2002 en el desarrollo y validación de tecnologías de bajo costo para tratar aguas para consumo humano en botellas de plástico, las cuales se espera sean utilizadas en localidades aisladas y carenciadas. Las tecnologías ofrecidas son: (a) la desinfección solar en unidades individuales (DSAUI-SODIS), (b) la remoción de arsénico por oxidación solar (RAOS-SORAS) y (c) la fotocatalisis heterogénea solar con dióxido de titanio (FH).

Estas tecnologías prácticamente no usan insumos químicos y se basan en el aprovechamiento directo de la luz del Sol como única fuente de energía. Los procedimientos son, además, muy económicos y de implementación muy sencilla, por lo que el proyecto posee una gran potencialidad para contribuir eficazmente a la resolución de problemas sociales muy importantes. El desarrollo de estas tecnologías implica: (a) uso de herramientas y conceptos químicos de avanzada para comprender y validar los procesos; (b) implementación de métodos de uso sumamente sencillos y que sean aceptables para la población involucrada; (c) transferencia a la comunidad, en colaboración con las autoridades locales. La labor realizada incluye, pues, actividades de investigación básica, desarrollo y difusión social para impulsar las metodologías.

### El uso de la energía solar en América Latina

El aprovechamiento de la energía solar puede lograrse mediante diversas tecnologías. La más desarrollada es la conversión de energía solar en electricidad mediante paneles fotovoltaicos. Otras opciones son:

- las tecnologías de colectores cilíndrico-parabólicos (concentradores de foco lineal), que concentran la luz solar con el fin de calentar fluidos y con éstos generar electricidad;
- las tecnologías de receptor central, que usan campos de heliostatos con posicionamiento automático que concentran la energía en un foco ubicado en la torre, alcanzando temperaturas muy elevadas;
- los sistemas Disco-Stirling, que concentran la energía con un gran espejo parabólico en un motor Stirling ubicado en su foco.

Los países desarrollados llevan adelante activas políticas de promoción de estas tecnologías de aprovechamiento de la energía solar, tratando de transformarlas en alternativas económicamente viables y adecuadamente competitivas frente a métodos convencionales de generación de energía a partir de fuentes no renovables y de suministro finito. Es de prever que la contribución de estas tecnologías se irá volviendo cada vez más importante.

En América Latina son mucho menos frecuentes las acciones destinadas a proteger tecnologías incipientes para alentarlas e incentivarlas frente a las tradicionales. En consecuencia, aunque la energía solar es más abundante que en muchos países avanzados, el desarrollo de las tecnologías que involucran la utilización de la energía del Sol es muy limitado. El gran desafío regional es encontrar alternativas de tecnologías económicas que permitan que las poblaciones rurales dispersas puedan satisfacer necesidades básicas utilizando energía solar en forma directa. Lograr este objetivo implica el uso de ideas y conceptos científicos tal vez más elaborados que los requeridos por las tecnologías convencionales.

Dentro de los posibles usos directos de la energía solar, tal vez la necesidad más urgente es el desarrollo de procedimientos solares para el tratamiento de aguas para consumo humano—procedimientos compatibles con su uso en condiciones socio-económicas desfavorables—. Los métodos aquí discutidos se basan en una comprensión detallada de los mecanismos de las reacciones químicas mediadas por absorción de fotones (reacciones fotoquímicas). Los métodos solares permiten, por un lado, la desinfección de las aguas (destrucción de microorganismos patógenos) y, por otro, la destrucción de contaminantes orgánicos y la remoción de contaminantes metálicos (descontaminación).

### La radiación solar

La energía del Sol es la base de todo el funcionamiento de nuestro ecosistema. En particular, permite la fotosíntesis e impulsa el ciclo hidrológico. En última instancia, todas nuestras fuentes de energía, con contadas excepciones, se originan en la radiación solar recibida por la Tierra (las excepciones son la energía nuclear, la geotérmica y, en cierto grado, la mareomotriz).

La radiación electromagnética emitida por el Sol abarca un amplio espectro de longitudes de onda, que incluye radiación ionizante (rayos X y rayos  $\gamma$ ) y no ionizante (ultravioleta, visible e infrarrojo). La radiación ionizante es altamente nociva para los organismos vivos, pero la misma no alcanza a atravesar la atmósfera de la Tierra (es retenida esencialmente en la ionosfera). La fracción más energética dentro de la radiación ultravioleta (UV) (la de longitud de onda más corta) es también nociva para los organismos por su capacidad de generación de radicales libres; la misma es esencialmente retenida en la estratosfera, debido a que es absorbida por el ozono.

La radiación solar global recibida sobre la superficie terrestre consiste en radiación UV (la fracción que pudo atravesar la atmósfera), visible e infrarrojo (IR). Dicha radiación global llega en forma directa (radiación directa) o después de sufrir múltiples cambios de dirección por acción de las moléculas y partículas de la atmósfera (radiación difusa). La intensidad de la radiación global a nivel del suelo varía con la latitud, la ubicación geográfica, la estación del año, el cubrimiento de nubes, la contaminación atmosférica, la elevación con respecto al nivel del mar y la altitud. Las contribuciones porcentuales a la energía solar total de las fracciones IR, visible y UV a nivel del mar son del orden de 53, 44 y 3 %, respectivamente. La componente UV no excede el 5% de la radiación total incidente a nivel del mar bajo un cielo totalmente despejado pero, a grandes alturas, es significativamente más alta.

### El problema del agua en América Latina

La Organización Mundial de la Salud (OMS) ha establecido que el agua es no sólo un recurso natural limitado y un bien público sino un *derecho humano*, como lo expresó en 2002 el Comité de las Naciones Unidas sobre Derechos Económicos, Sociales y Culturales [1]. En efecto, sin agua segura se comprometen la esencia de la vida y la dignidad humana. La provisión de agua potable a pobladores carenciados es una de las medidas que ayudan a paliar los problemas sociales, económicos y de salud. Alrededor de 1.200.000.000 de personas en el mundo carecen de acceso adecuado al agua potable; de ellos, las dos terceras partes viven en zonas rurales en condiciones de vida muy inferiores a las de las poblaciones urbanas [2]. Según la OMS, en Latinoamérica mueren unos 80.000 niños cada año debido a enfermedades transmitidas generalmente por agua insalubre (cuadros gastrointestinales, hepatitis, fiebre tifoidea o cólera). Se estima que un 30% de la población de la región bebe agua de ríos, vertientes, pozos, estanques y otras fuentes muchas veces contaminadas. Los plaguicidas y agroquímicos en general y la presencia de arsénico en aguas subterráneas (este último especialmente en Argentina, México y Chile) contribuyen a aumentar el riesgo de la ingesta de agua sin tratar. En las localidades donde se consume agua que contiene arsénico puede aparecer el síndrome conocido como hidroarsenicismo crónico regional endémico (HACRE), que se manifiesta primero a través de alteraciones de la piel (como melanodermia, leucodermia y/o queratosis palmoplantar) y que en etapas más tardías puede llevar a diversas formas de cáncer. Esta enfermedad fue descrita ya a principios del siglo XX como 'enfermedad de Bell Ville', en referencia a la localidad de la provincia de Córdoba (Argentina) donde se caracterizaron sus manifestaciones clínicas y se dilucidó su etiología. En Argentina las fuentes del arsénico son naturales; en otros países el arsénico proviene de la actividad minera [3]. En el norte de Chile (Arica) el origen es mixto, es decir, el arsénico proviene tanto de fuentes naturales

como de la minería del cobre [4].

Para enfrentar estos problemas es necesario desarrollar nuevas estrategias de tratamiento de agua del tipo conocido como 'tecnologías de punto de uso', las que no requieren de una red de distribución de agua, la cual es tratada en el mismo lugar de consumo. El método más tradicional es hervir el agua. Pero debido al consumo de energía asociada y a que en determinados casos se pueden concentrar los contaminantes, este procedimiento, tiene importantes limitaciones. Para resolver estas limitaciones se han diseñado destiladores solares, lo que constituye un interesante avance [5]. Las tecnologías aquí propuestas se inscriben en esta línea y buscan disminuir los costos y aumentar la versatilidad. Estas nuevas tecnologías, además de ser simples, eficientes y de bajo costo, deben ser aceptables para la población. Si bien el producto tecnológico final es extremadamente sencillo, su desarrollo y validación requiere el uso de conocimientos científicos-tecnológicos de avanzada. En definitiva, se busca ampliar la oferta de métodos disponibles por las autoridades a cargo de la provisión de agua a las poblaciones más carenciadas, con el fin de disminuir la degradación de la calidad de vida a la que estos sectores susceptibles están expuestos.

### **El proyecto 'Tecnologías económicas de potabilización solar de agua en zonas aisladas de Latinoamérica'**

Los días 8 y 9 de noviembre de 2004, los expertos del proyecto 'Tecnologías económicas para la desinfección y descontaminación de aguas en zonas rurales de América Latina' se reunieron en un encuentro abierto para debatir los alcances y las limitaciones de las tecnologías propuestas: (a) la desinfección solar (DSAUI-SODIS), (b) la remoción de arsénico por oxidación solar (RAOS-SORAS), y (c) la fotocatalisis heterogénea solar con dióxido de titanio (FH). Estas tecnologías pueden usarse solas o en combinación, son socio-culturalmente aceptables por las comunidades rurales y no requieren equipamiento o desarrollos tecnológicos complejos o caros, ni altos costos de energía. Su mayor ventaja es que son dependientes únicamente de la energía solar y aplicables a regiones con alta incidencia de radiación diurna, es decir, más de 3000 horas de sol en promedio por año, como es posible encontrar en algunas zonas de América Latina de climas tropicales (con intensidades luminosas que pueden llegar, en algunos lugares, a  $5-6 \text{ kW h}^{-1} \text{ m}^{-2}$ ). Estas metodologías se inscriben en la línea de los destiladores solares de agua desarrollados por el Instituto de Investigaciones en Energías No Convencionales de la Universidad de Salta [5] y constituyen un avance por su versatilidad y facilidad de implementación.

Una de las limitaciones para la implementación regional de metodologías solares de purificación de aguas es la escasez de bases de datos sobre energía solar global y, en particular, sobre energía UV, que es la que se requiere para los procesos de potabilización. Por ese motivo estamos elaborando modelos de disponibilidad de radiación UV que aprovechan los datos generados por las redes solarimétricas regionales (por ejemplo, la Red Iberoamericana de Solarimetría, RISOL [6]) para predecir la disponibilidad del recurso en cada sitio potencial de aplicación [7].

Es posible afirmar que, en la actualidad, la tecnología SODIS se encuentra en condiciones de ser transferida a la comunidad y las tecnologías RAOS y FH han demostrado poseer una capacidad potencial muy grande, aunque aún resta completar el desarrollo de los procedimientos. Como la propuesta involucra la participación de países latinoamericanos de muy diferentes características sociales, geográficas y económicas, la labor no es únicamente científico-tecnológica, sino que debe realizarse a la vez una tarea social para impulsar estas metodologías.

El trabajo del grupo busca también la adaptación del procedimiento FH solar en otras aplicaciones de mayor grado de complejidad tecnológica. El procedimiento puede ser útil para el tratamiento de pequeños volúmenes de aguas residuales domésticas e industriales. Mediante el desarrollo de reactores solares muy sencillos, puede servir para potabilizar agua en situaciones de aislamiento, esparcimiento (campamentos turísticos o vacacionales) e, incluso, en emergencias.

## **Descripción de las tecnologías**

### **La desinfección solar (DSAUI-SODIS)**

La tecnología de desinfección solar (DSAUI-SODIS) fue propuesta inicialmente por Acra y col. [8]; Wegelin y colaboradores confirmaron su eficiencia en la remoción de indicadores de contaminación bacteriológica [2, 9] y la aplicaron con bastante éxito en Bolivia, Colombia, Tailandia, México y Bangladesh. El agua para consumo humano se obtiene exponiendo al sol por algunas horas el agua contaminada en botellas de plástico transparente de poli(tereftalato de etileno), PET. La acción sinérgica de la radiación UV-A (315-400 nm) y de la infrarroja calienta el agua a unos  $50-55^{\circ}\text{C}$  e inactiva bacterias y virus (incluyendo al *Vibrio cholerae*). No se conocen bien los mecanismos involucrados, pero se cree que el proceso induce cambios en los ácidos nucleicos de los microorganismos [10]. Como las botellas de plástico son fácilmente accesibles a la población y el agua puede consumirse desde las mismas botellas, el método es extremadamente viable. Si es necesario acortar los tiempos de irradiación o si la radiación solar disponible no es suficientemente alta, se puede colocar la botella para su irradiación sobre una base semicilíndrica forrada con papel de aluminio, o se puede pintar de negro la parte inferior externa de la botella. La figura 1 muestra un esquema de esta sencilla tecnología.

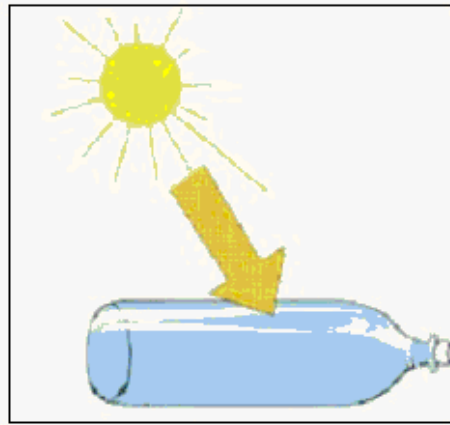


Figura 1. Esquema de la tecnología de desinfección solar (DSAUI-SODIS).

### La remoción de arsénico por oxidación solar (RAOS-SORAS)

Para abatir la contaminación por arsénico en zonas aisladas se propuso otra tecnología muy simple: la remoción de arsénico por oxidación solar (RAOS) [3]. El método es una variante de las tecnologías bien conocidas de remoción de arsénico con flóculos de hidróxidos de aluminio o de hierro. Para que la remoción sea eficaz, es necesario que el arsénico se encuentre en su forma oxidada, el arseniato  $\text{AsO}_4^{3-}$ , y no en su forma reducida, el arsenito  $\text{AsO}_3^{3-}$ . RAOS busca generar el flóculo de hidróxido de hierro por oxidación solar de sales de hierro en presencia de citrato y de aire. Las reacciones fotoquímicas que tienen lugar no sólo generan el precipitado de hidróxido de hierro, sino que simultáneamente promueven la formación de especies muy activas que oxidan el arsénico a arseniato, el cual se adsorbe en el flóculo. El citrato se agrega en forma de jugo de limón al agua (que generalmente ya posee hierro) contenida en botellas plásticas que se exponen al sol por algunas horas, tal como en el método DSAUI. Durante la noche las botellas se colocan en posición vertical. Así, el hierro y el arsénico floculan y el agua purificada se decanta de las partículas o se filtra a través de simples paños textiles.

RAOS es un procedimiento especialmente atractivo para la provincia de Tucumán, que combina problemas de hidroarsenicismo con una muy importante producción de cítricos. (La Argentina es el segundo exportador mundial de limones, luego de India [11].) En la figura 2 se muestra un esquema de los procesos químicos promovidos por la luz solar en el método RAOS.

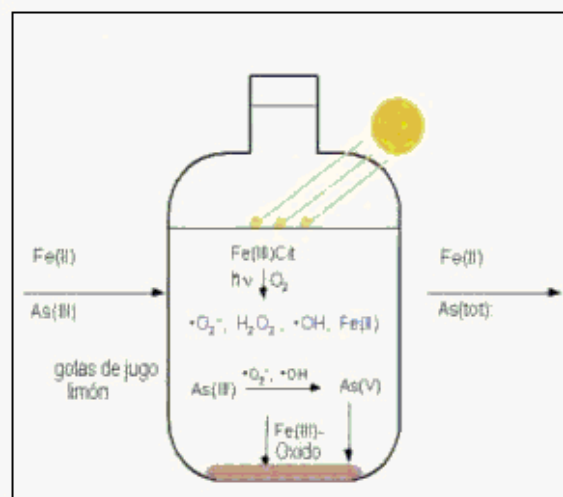


Figura 2. Esquema de oxidación de arsénico (III) a arsénico (V) mediante luz solar (adaptado de [3b]).

### La fotocatalisis heterogénea solar con dióxido de titanio (FH)

La fotocatalisis heterogénea con dióxido de titanio,  $\text{TiO}_2$  (FH) [12] es uno de los métodos de purificación de aguas conocidos como 'tecnologías avanzadas de oxidación', los cuales tienen en común la generación de radicales libres y otras especies químicas altamente oxidantes capaces de destruir la materia orgánica. El  $\text{TiO}_2$  tiene una estructura electrónica que le permite absorber la componente UV del Sol y transferir con ello un electrón desde su nivel normal (la banda de valencia) a un nivel de mayor energía (la banda de conducción). Se genera así un hueco en la estructura electrónica de la banda de valencia, y un electrón de alta energía en la banda de conducción. Ambas especies son capaces de difundir hacia la superficie de la partícula y, en contacto con el agua, se generan los radicales libres oxidantes altamente reactivos que promueven la transformación química de contaminantes. La Figura 3 muestra un esquema del proceso fotocatalítico. El electrón reduce a los aceptores de electrones A y el hueco oxida a los donadores de electrones D. Este último proceso es el principal responsable de la oxidación de la materia orgánica, a la que también contribuyen los radicales formados por la reacción del electrón con el oxígeno disuelto (en especial,  $\text{HO}^\cdot$ )

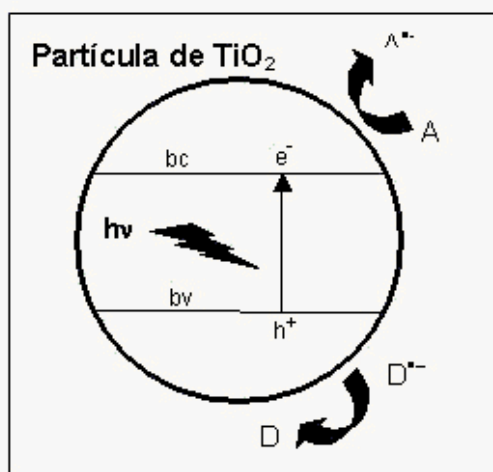


Figura 3. Esquema del proceso fotocatalítico.

Los atractivos de esta tecnología son muchos: puede alimentarse con energía solar o con lámparas, destruye totalmente el contaminante orgánico y emplea una sustancia barata, reutilizable y no tóxica: el dióxido de titanio. Tiene la capacidad de eliminar compuestos orgánicos pero también inorgánicos tóxicos tales como cromo o arsénico y destruye bacterias y virus con resultados alentadores [13, 14].

Uno de los problemas de la FH es la operación adicional necesaria para eliminar el semiconductor del agua tratada. Como es un polvo muy fino, su uso en suspensión requeriría una etapa de filtración por membranas de muy estrecho diámetro de poro, muy caras o no disponibles en las localidades de aplicación. Por ello, el catalizador debe introducirse en las botellas convenientemente soportado: la fijación efectiva del  $\text{TiO}_2$  es un aspecto crucial en el desarrollo de esta tecnología.

En la actualidad, el proyecto 'Tecnologías económicas de potabilización solar de agua en zonas aisladas de Latinoamérica' se encuentra en una fase avanzada. Se han llevado a cabo los estudios de laboratorio de investigación, desarrollo, puesta a punto y validación de las tecnologías DSAUI, RAOS y FH, se ha establecido una red regional de laboratorios con capacidad en FH (fundamentalmente solar), se han puesto en marcha laboratorios de referencia y facilidades fotocatalíticas demostrativas, se han capacitado recursos humanos en tecnologías solares de tratamiento de aguas y en materiales para su utilización y se ha realizado ya un estudio de campo para elegir las localidades donde se están llevando a cabo las pruebas piloto. Estas pruebas piloto han sido en general muy positivas y permiten creer que dentro un plazo no muy extendido será posible transferir la batería de procedimientos a la comunidad y a las autoridades de aplicación.

#### Referencias

- [1] United Nations Committee on Economic, Social and Cultural Rights, *International Covenant on Economic, Social and Cultural Rights* (26/11/2002), article 11. Disponible en: <http://www.citizen.org/cmep/Water/humanright/articles.cfmID= 8610>.
- [2] Wegelin, M., 'Back to the Household-Also in Water Treatment', *EAWAG News*, 48 (2000): 11-12.
- [3] (a) Hug, S., 'Arsenic Contamination of Ground Water: Disastrous Consequences in Bangladesh', *EAWAG News*, 49, 18-20,

diciembre 2000; b) Wegelin, M., Gechter, D., Hug, S., Mahmud, A., Motaleb, A. SORAS- a simple arsenic removal process, disponible en: <http://www.sandec.ch/WaterTreatment/Documents/SORAS.pdf>.

[4] Litter, M. I. (ed.), *Relevamiento de Comunidades Rurales de América Latina para la aplicación de Tecnologías Económicas para Potabilización de Aguas, Proyecto OEA/AE141* (La Plata: Digital Grafic, 2002). Disponible en: <http://www.cnea.gov.ar/xxi/ambiental/agua-pura/default.htm>.

[5] *Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo, CYTED, Memoria 2001-2002* ([www.cyted.org](http://www.cyted.org)).

[6] *Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo, CYTED, Memoria 2001-2002* ([www.cyted.org](http://www.cyted.org)).

[7] Navntoft, C., Dawidowski, L., Paladini, A., Blesa, M. A., 'Assessment of a simple UV radiation model for applications in photocatalytic systems in Argentina', *12<sup>th</sup>. Solar PACES Int. Symp.*, Oaxaca (México), octubre 2004.

[8] Acra, A., Jurdi, M., Mu'Allem, H., Karahagopian, Y., Raffoul, Z., 'Water Disinfection by Solar Radiation, Assessment and Application', Technical Study 66e, (1990). Disponible en <http://www.idrc.ca/library/document/041882/>. IDRC Library: Documents, Ottawa, Canada, 1998.

[9] *Water & Sanitation in Developing Countries*, EAWAG-SANDEC. Disponible en: <http://www.sodis.ch>.

[10] Wegelin, M., Canonica, S., Mechsner, K., Fleischmann, T., Pesaro, F., Metzler, A., 'Solar water disinfection: scope of the process and análisis of radiation experiments', *J. Water SRT-Aqua* 43 (1994): 154.

[11] Economic Research Service, USDA Fruit and Tree Nuts Outlook/FTS-310/May 26, 2004. Disponible en: <http://www.ers.usda.gov/Briefing/FruitAndTreeNuts/fruitnutpdf/lemon.pdf>.

[12] Blesa, M. A. (ed.), *Eliminación de contaminantes por fotocátalisis heterogénea. Texto colectivo elaborado por la Red CYTED VIII-G* (La Plata: Digital Grafic, 2001). Disponible en: <http://www.cnea.gov.ar/xxi/ambiental/CYTED/default.htm>.

[13] Ibáñez, J. A., Litter, M. I., Pizarro, R. A., 'Photocatalytic bactericidal effect of TiO<sub>2</sub> on Enterobacter cloacae. Comparative study with other Gram (-) bacteria', *J. Photochem. Photobiol. A: Chem.* 157 (2003) 81.

[14] Pacheco, J. E., Yellowhorse, L., *Summary of Engineering-Scale Experiments for the Solar Detoxification of Water, Project SAND92-0385* (Albuquerque, NM: Sandia National Laboratories, 1992).