

TECNOLOGÍA SOLAR APLICADA A LA PURIFICACIÓN DE AGUA

SOLAR TECHNOLOGY APPLIED TO WATER PURIFICATION

Juan Rodríguez¹, Clido Jorge², Patricia Zúñiga³, José Solís⁴, Walter Estrada⁵, Ruth Cristóbal⁶, Dora Maurtua⁷, Javier Garate⁸, Pedro Zanabria⁹.

RESUMEN

El agua potable es un bien sumamente escaso en el mundo. De los estimados 1.4 billones de kilómetros cúbicos de agua sobre la tierra, el 97.6 % es salada, 2.38 % está como hielos y glaciares y aproximadamente solo 0.024 % se encuentra sobre la superficie terrestre y por lo tanto puede ser destinada para el consumo humano. Ante esta situación, la falta de acceso al agua potable es un problema muy serio en el mundo y el Perú no es una excepción. De los 6 billones de personas que pueblan la tierra, más de un billón sufre de este problema. Sin embargo, cerca de 2.5 billones no tienen acceso a un adecuado servicio de saneamiento. Esto se traduce en que más de 6 millones de niños por año mueren por enfermedades que tienen su origen en el agua que consumen.

Palabras clave.- Purificación de agua, Tecnología solar.

ABSTRACT

Drinking water is extremely scarce good in the world. Of the estimated 1.4 billion cubic kilometers of water on earth, 97.6% is salt, 2.38% is like ice and glaciers and only about 0.024% is above the earth's surface and therefore may be destined for human consumption. In this situation, the lack of access to drinking water is a serious problem in the world and Peru is no exception. Of the 6 billion people who inhabit the land, over a billion suffer from this problem. However, about 2.5 billion lack access to adequate sanitation. This means that more than 6 million children a year die from diseases that are caused by the water they consume.

Keywords.- Water purification, Solar technology.

INTRODUCCION

Hoy en día 31 países, los cuales representan 2.8 billones de personas, tienen problemas de agua.

En Sudamérica, sólo el Perú afronta problemas de agua (ver Figura 1), con la agravante que cada 10 años nuestra población se eleva aproximadamente 15%.

¹Dr. Facultad de Ciencias, de la Universidad Nacional de Ingeniería, ²Facultad de Ciencias, de la Universidad Nacional de Ingeniería, ³Facultad de Ciencias, de la Universidad Nacional de Ingeniería, ⁴Dr. Facultad de Ciencias, de la Universidad Nacional de Ingeniería, ⁵Dr. Facultad de Ciencias, de la Universidad Nacional de Ingeniería, ⁶Departamento de Microbiología, de la Universidad Cayetano Heredia, ⁷Departamento de Microbiología, de la Universidad Cayetano Heredia, ⁸Centro de Capacitación para el Desarrollo, CECADE, Cusco, ⁹Centro de Capacitación para el Desarrollo, CECADE, Cusco.

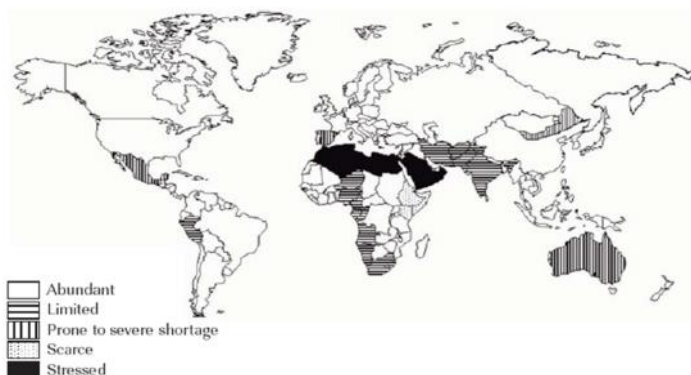


Fig. 1 Disponibilidad de agua en el mundo [1].

Según la OPS [2] en el Perú, el 81 % tiene acceso al agua potable mientras que el 62 % a servicios de saneamiento. Sin embargo, un desagregado de estos porcentajes nos da una idea más clara de la realidad en las zonas rurales, en las que sólo un 66 % tiene acceso al agua potable y no más del 33 % a servicios de saneamiento, con los problemas adicionales que un gran porcentaje de la población es abastecida intermitentemente y con sistemas de almacenamiento inadecuados.

Existe una relación directa entre la mortalidad infantil (por 1,000 nacidos vivos) versus acceso a agua y saneamiento (% de población) [2]; así, en los países de América donde el acceso al agua y saneamiento es de un 100 %, como es el caso de los Estados Unidos, la mortalidad infantil es alrededor de 7/1000; sin embargo, a medida que los servicios decrecen, como en el caso de Chile, a valores de 93.5 %, la mortalidad se incrementa ligeramente y es de 10/1000. En el caso del Perú se tiene una mortalidad infantil de 33/1000, valor sumamente alto y por encima de la media en el área de los países andinos que es 25.6 % o al promedio para América latina que es 24.9 %.

A esta situación hay que agregar el hecho que la contaminación de agua es un problema sumamente serio; sus efectos en la salud se observan a diario en la población que consume agua contaminada. La pérdida de calidad del agua es crítica en algunas regiones y se debe fundamentalmente a la contaminación por efluentes provenientes de las actividades productivas de la industria, sobre todo la industria minera-metalúrgica, y por los desechos domésticos y agroquímicos. También hay casos en que la

contaminación es natural, como la del arsénico en la zona sur del Perú y que se debe a factores geológicos, específicamente a la actividad volcánica [3]. La ingesta de arsénico por largos periodos de tiempo a través de la exposición al agua contaminada causa cáncer a la piel, cáncer glandular, cáncer al sistema urinario, cambios en la pigmentación de la piel, etc.

El problema se acentúa por la falta de técnicas bien establecidas para la potabilización. La incidencia de la diarrea infantil y de enfermedades endémicas fatales (hepatitis, fiebre tifoidea o cólera) es muy alta, por lo que la búsqueda de nuevas tecnologías que permitan atacar estos problemas es sumamente importante. Por ello, la tecnología solar aplicada a la degradación de contaminantes en agua ha sido un campo de gran atención científica en los últimos años [4-7], principalmente por su potencial aplicación en el tratamiento de agua en zonas rurales, caracterizadas por su poca densidad poblacional y falta de servicios básicos. Esta tecnología es sumamente promisoría debido a su bajo costo, fácil implementación y la posibilidad de usar efecto de la irradiación solar que es relativamente frecuente e intensa en el Perú, debido a su posición geográfica y de la cual se usa principalmente la componente UV-A (310-400 nm).

La fotocatalisis, que utiliza como fuente de energía la radiación solar, consiste en la promoción de reacciones químicas de oxidación y reducción por efecto de la irradiación de un semiconductor con energía comparable a su ancho de banda óptico; es un método eficiente de descontaminación del agua debido al gran poder oxidativo y reductor de lo

portadores de carga fotogenerados, ya que no se consume el catalizador.

Las nanopartículas de óxido de titanio, principalmente de fase anatasa, se vienen utilizando como fotocatalizadores debido a su eficiencia y gran área efectiva del catalizador.

METODOLOGIA DE EXPERIMENTAL

En este trabajo se hará una revisión de nuestros resultados en la desinfección y descontaminación de agua utilizando la energía solar. Se presentarán resultados de campo obtenidos durante el tratamiento de agua contaminada con arsénico y bacterias. Se presentarán resultados de dos lugares estudiados: el primero de ellos es Sama las Yaras, Tacna, que contiene agua contaminada con arsénico y el segundo es el río Yaurisque, en el Cusco, conteniendo agua contaminada con bacterias.

Los estudios microbiológicos fueron realizados utilizando el equipo Oxfam-Delagua, utilizando el método de membrana en el medio de cultivo LUREA BROTH. El sistema luego de 18 h de incubación a 37 °C permite el cultivo de E-coli y pseudomonas. Para los estudios en el laboratorio, las muestras de agua fueron tomadas en Trapiche, situado en la periferia de Lima, y para los estudios de campo se utilizó el agua del río Yaurisque en el Cusco. En este caso las evaluaciones se realizaron en el Centro de Capacitación para el Desarrollo (CECADE).

La medida de la radiación solar se realizó utilizando un radiómetro casero portátil que ha sido previamente calibrado con un radiómetro comercial Kipp & Zonen y que contiene un sistema automático de adquisición de datos.

Los estudios de campo de desinfección del agua se realizaron en Yaurisque, Cusco, utilizando las instalaciones del Centro de Capacitación para el desarrollo (CECADE), donde se realizaron los estudios de campo del reactor SOLWATER [8] y del reactor desarrollado mediante el proyecto CONCYTEC.

El prototipo SOLWATER, contiene 14 L de agua y está compuesto de cuatro tubos de vidrio sobre un reactor cilindro parabólico.

El agua del sistema fue bombeada utilizando una bomba alimentada eléctricamente por un panel fotovoltaico (Figura 2). Dos tipos de catalizadores fueron colocados axialmente y en serie dentro del reactor: el catalizador Ahlstrom (dos tubos) y un complejo de rutenio (dos tubos). El catalizador Ahlstrom está compuesto por un entramado de celulosa sobre la cual se han soportado nanopartículas de TiO_2 [9-11] y absorbe energías mayores a 3.2 eV. El catalizador basado en un complejo de rutenio, soportado sobre silicona porosa tiene una alta absorción en el rango visible [12] y genera oxígeno “singulete” de gran poder oxidante.



Fig. 2 Prototipo SOLWATER para la desinfección de agua, en el cual se muestran los dos catalizadores soportados utilizados.

En colaboración con “Rotoplas Peru” y con financiamiento del CONCYTEC, se ha desarrollado un sistema sencillo y económico para purificar agua, el cual se viene estudiando en

Yaurisque y se muestra en la Figura 3. Este dispositivo utiliza la energía solar como fuente de energía para la desinfección de agua y tiene una capacidad de tratar 350 L agua por vez.



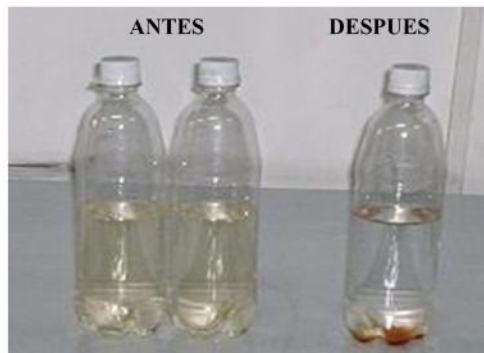
Fig. 3 Prototipo de desinfección de agua desarrollado

Por otro lado, los estudios de remoción de arsénico en el agua a través de la oxidación solar del As^{III} a As^V y posterior floculación, se han realizado utilizando una botella de plástico PET como

reactor, el cual contiene al agua contaminada, con unos gramos de alambre de hierro y algunas gotas de jugo de limón, Figura 4.



(a)



(b)

Fig. 4 (a) Modo de colocación de las botellas llenas con agua arseniosa, el alambre de hierro y algunas gotas de jugo (b) Botellas antes y después del tratamiento. Se observa el precipitado oscuro conteniendo al arsénico el cual se debe filtrar.

DESINFECCIÓN SOLAR DE AGUA

En los estudios de laboratorio se utilizó un prototipo similar al observado en la Figura 5, en el que se analizó la eficiencia y estabilidad de los fotocatalizadores bajo un flujo de agua de 12 L/min (papel con TiO_2 y cintas con complejo de rutenio).

Los estudios realizados fueron comparados con la sola influencia solar (fotólisis). Los resultados principales, se muestran en la Fig. 4. Se observa que para este flujo de agua, aún después del noveno uso, los catalizadores basados en TiO_2 son mejores que la sola fotólisis, o incluso el complejo de rutenio.

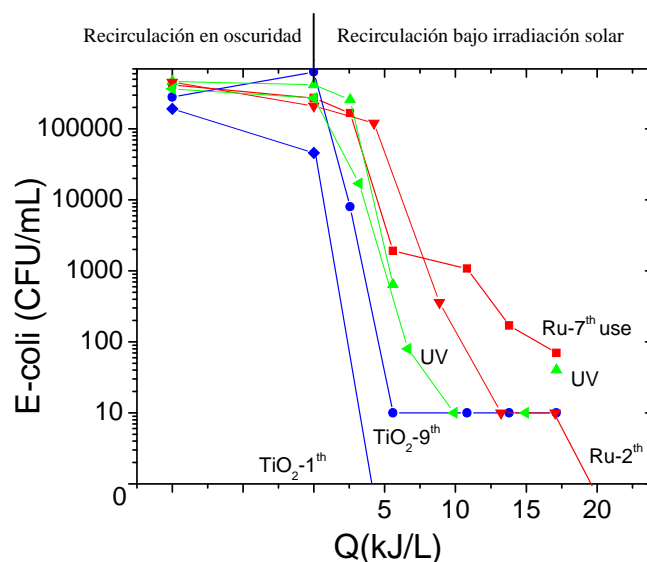


Fig. 5 Concentración de *E-coli* como función de la energía integrada recibida por el reactor fotocatalítico CPC que contiene en su interior loas catalizadores soportados (Obtenido a través del proyecto SOLWATER). Se muestran resultados para el TiO₂ primero y noveno uso, Complejo de rutenio primero, séptimo uso y solo fotólisis.

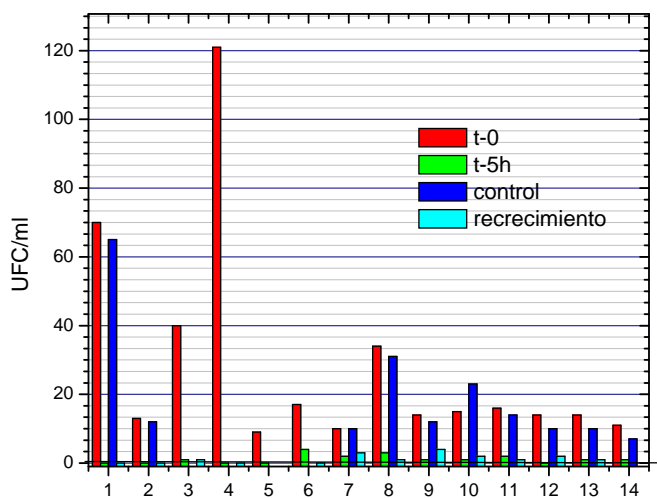
Para el estudio de desinfección de agua en el campo se utilizó el agua del río Yaurisque, contaminada con bacterias debido a las actividades antropomórficas propias de la zona (el agua es utilizada como cloaca por las comunidades de su rivera). El agua del río Yaurisque posee las propiedades fisicoquímicas mostradas en las Tabla 1.

Tabla 1. Propiedades fisicoquímicas del agua del río Yaurisque.

Característica fisicoquímica	Valor
PH	7,8
Dureza total CaCO ₃ mg/L	540
Alcalinidad total mg/L	150
Acidez CO ₂ mg/L	2,2
Cloruros Cl ⁻ mg/L	30
Sulfatos SO ₄ ⁻ mg/L	210
Turbidez NTU	3,0
Conductividad S/cm	620

El estudio del prototipo SOLWATER (Figura 2) en campo se efectuó mediante experimentos repetitivos de su eficiencia en la degradación de bacterias en agua y los resultados son mostrados en la Figura 6. En general se observa la reducción de la concentración bacteriana, obteniéndose en los primeros usos de catalizador la completa desinfección del agua. Sin embargo, después del sexto uso, algunas colonias de *E-coli* permanecen activas. Además es necesario puntualizar que cuando existe desinfección utilizando el TiO₂, no se ha observado recrecimiento bacteriano a las 24 h de finalizado el experimento. Sin embargo, las *seudomonas* en agua potable no son consideradas como indicativo de contaminación. Adicionalmente se realizaron estudios de la composición elemental del agua, utilizando la técnica de análisis por activación neutrónica y absorción atómica, los cuales son mostrados en la Tabla 2.

En general se observa en este caso que la concentración de los elementos presentes va decreciendo a medida que el experimento avanza, indicativo de la mineralización.



Número de veces utilizado el catalizador

Fig. 6 Concentración de colonias *E-coli* en agua al inicio (T-0), después de 5 h de tratamiento fotocatalítico del agua (t-5h). El control en la oscuridad después del experimento y del recrecimiento a las 24 h de haberse realizado el experimento también son mostrados.

Tabla 2. Elementos traza del agua en tres momentos del tratamiento fotocatalítico con el prototipo SOLWATER. Las medidas fueron realizadas por activación neutrónica y por absorción atómica(*).

Elemento	Unidad	Limite de detección	Muestra de agua a las 9:00 h	Muestra de agua a las 12:30 h	Muestra de agua a las 16:00 h
Al	µg /L	< 50	ND	ND	ND
Ag	µg /L	< 5	ND	ND	ND
As	µg/L	< 2	ND	ND	ND
Ba	µg/L		93 ± 36	44.4 ± 7.2	38.4 ± 0.44
Ca	mg/L		156.4 +/- 6.30	144.7 +/- 6.3	140.6 +/- 2.3
*Cd	µg/L		0.035 +/- 0.003	0.015 +/- 0.003	0.014 +/- 0.002
Cl	mg/L		64.1 ± 1.6	60.51 ± 0.82	62.5 ± 3.3
Co	µg/L		0.88 +/- 0.26	0.72 +/- 0.10	0.65 +/- 0.17
Mg	mg/L		6.9 ± 1.5	7.55 ± 0.79	6.2 ± 2.1
Mn	µg/L	< 10	ND	ND	ND
Mo	µg /L	< 10	ND	ND	ND
Na	mg/L		51.7 ± 0.86	49.55 ± 0.28	51.9 ± 3.9
*Pb	µg/L	< 0.05	ND	ND	ND
Sb	µg /L	< 5	ND	ND	ND
Se	µg/L	< 10	ND	ND	ND
Sr	mg/L		1.66	1.37 +/- 0.63	1.50 +/- 0.22
V	µg/L	< 5	ND	ND	ND

Estudios de envejecimiento realizados muestran que el catalizador es paulatinamente cubierto por

sedimentos, lo cual parece ser una de las razones del decrecimiento de su eficiencia.

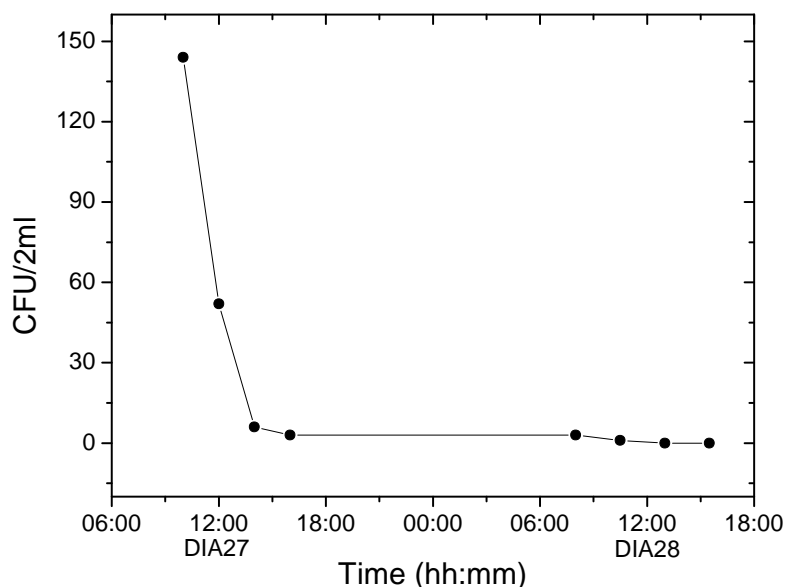


Fig. 7 Concentración de E-coli durante 5 h del tratamiento de desinfección.

Después del tratamiento para la desinfección del agua utilizando la fotocatalisis con óxido de titanio, se observó, en general, la reducción de la población bacteriana compuesta por E-coli. Sin embargo, cuando se llega a la desinfección del agua, no se observó recrecimiento de las bacterias E-coli a las 24 h de haber finalizado el tratamiento, pero un decrecimiento de la eficiencia ha sido observado tanto en laboratorio como en los estudios de campo.

Este decrecimiento en la eficiencia se asocia al envejecimiento y desprendimiento del soporte, así como al depósito de sedimentos sobre el catalizador. En casos en los cuales no se ha llegado a la desinfección del agua, se ha observado un recrecimiento limitado de las bacterias E-coli. Sin

embargo la *seudomona aeruginosa* y *seudomas SPP* parecen ser resistentes al tratamiento.

REMOCIÓN DE ARSÉNICO DEL AGUA CONTAMINADA UTILIZANDO IRRADIACIÓN SOLAR

Utilizando el procedimiento similar al mostrado en la Figura 4, se realizó el estudio de la remoción de arsénico por oxidación solar. Las Figuras 8(a) y 9(a) presentan la irradiación solar en W/m^2 , mientras que en las Figuras 8(b) y 9(b) la componente ultravioleta-A (310-400 nm) de esta irradiación. Figuras 8(c) y 9(c) presentan los resultados obtenidos a partir de la muestra irradiada durante 3 h de tratamiento, en la cual se realizó un muestreo con intervalos de una hora. Las concentraciones estudiadas fueron 200 ppb y 500 ppb de arsénico.

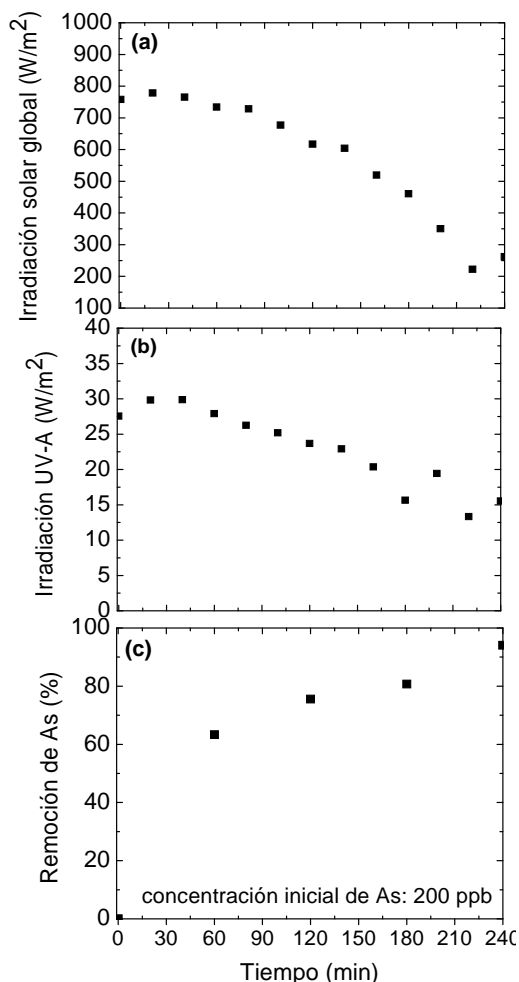


Fig. 8 (a) Irradiación solar global durante un experimento típico de remoción de arsénico del agua. (b) Componente ultravioleta de la radiación solar medida entre 310 y 400 nm (UV-A). (c) Remoción de arsénico mediante tratamiento con irradiación solar. La concentración inicial de arsénico en el agua es 200 ppb.

Los resultados indicaron que después de 3 h de tratamiento, 80 % del arsénico fue removido. Estos resultados sugieren también que en intervalos de tiempo mayores se puede obtener una razón de degradación mayor. Los resultados obtenidos muestran que luego de tres horas de tratamiento y luego de la decantación y posterior filtración, la concentración final de arsénico decrece a valores entre 40 y 60 ppb, partiendo de una concentración inicial de 200 y 500 ppb, respectivamente. Para el

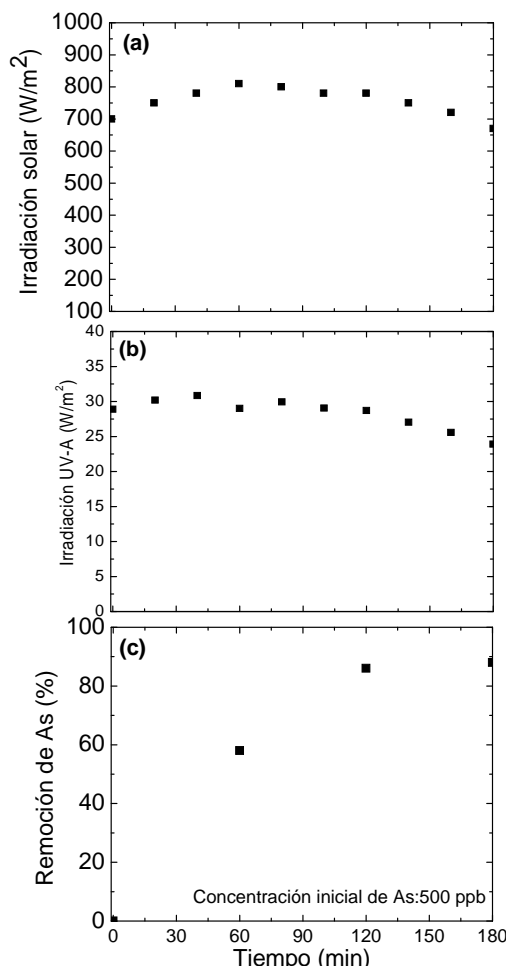


Fig. 9 (a) Irradiación solar global durante un experimento típico de remoción de arsénico del agua. (b) Componente ultravioleta de la radiación solar medida entre 310 y 400 nm (UV-A). (c) Remoción de arsénico mediante tratamiento con irradiación solar. La concentración inicial de arsénico en el agua es 500 ppb.

caso en el cual se utilizó una concentración inicial de 200 ppb, la concentración inicial fue menor a 10 ppb [10].

Los estudios de campo de la remoción de arsénico por oxidación solar se realizaron en Sama las Yaras, de acuerdo a la disposición mostrada en la Figura 4. El agua en “Sama las Yaras” fue caracterizada fisicoquímicamente por más de 2 años y los valores se muestran en la Tabla 3. Allí

se observa que la concentración de arsénico en el agua sobrepasa los niveles máximos permisibles de la norma técnica peruana que es 0.05 mg/L;

además, sólo un 10 % del arsénico total está compuesto por arsénico III, mientras que un 90 % es arsénico V.

Tabla 3. Características fisicoquímicas del agua en Sama las Yaras, Tacna.

Parámetros	"Sama las Yaras", Agua potable				
	Dec-2004	Feb-2005	Nov-2005	Jan-2006	Mar-2006
pH	7,16	7,1	7,15	7,0	7,54
Temperatura (°C)	26	27,5	20	21°C	20 °C
Alcalinidad mg HCO ₃ ⁻ /L	4,64	9,27	307,3	151,3	153,1
Dureza total CaCO ₃ /L	512	370	795	950	915
Sólidos totales (g/L)	2,701	6,411	3,467	2,635	2,622
Sólidos disueltos (g/L)	2,662	6,402	3,423	2,625	2,612
Turbidez (NTU)	<5	<5	-----	-----	-----
Cloruros (g/L)	0-466	0,477	-----	-----	-----
Conductividad (uS/cm)	3160	3000	2612	2420	3510
Arsénico total (mg/L)	0,160	0,143	0,173	0,149	0.126
Arsénico III (mg/L)	-----	-----	0,016	0,012	nd
(Arsénico total removido %)	-----	-----	>95	> 95	> 95
Después de 4 h de irradiación solar de botellas PET conteniendo 3 gotas de jugo de limón y 3 g de alambre de hierro.					

La Tabla 3 también muestra resultados para la remoción de arsénico en botella de plástico tereftalato de polietileno (PET) de 2.5 L. Se muestra que la remoción de Arsénico sobrepasa el 95%.

CONCLUSIONES

De los experimentos realizados, se concluye que las bacterias E-coli en el agua contaminada han sido degradadas utilizando radiación solar. Un estudio sistemático realizado utilizando repetidamente el catalizador mostró un decrecimiento de su eficiencia con el uso reiterado. A partir del veinteavo uso el catalizador soportado en celulosa perdió su estabilidad mecánica y comienza a decomponerse.

La remoción de arsénico del agua mediante tratamiento oxidativo con irradiación solar ha mostrado buenos resultados en las agua tratadas. En general la tecnología solar ha mostrado su potencialidad para promover la desinfección y descontaminación del agua y siendo esta una

energía que llega gratuitamente a todos los rincones del país, es muy importante, en la situación actual, lograr una implementación adecuada para lograr la provisión de agua segura en las zonas rurales de nuestro país.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido posible gracias al financiado parcial obtenido por los proyectos SOLWATER ICA4-CT-2002-10001, el proyecto OEA AE 141/2001, el proyecto Concytec 466 OAJ, Rotoplas- Perú y el International Science Programme (IPPS) de la Universidad de Uppsala. Se agradece a Pablo Mendoza y Patricia Bedregal por las medidas de caracterización elemental mediante las técnicas activación neutrónica y absorción atómica respectivamente.

REFERENCIAS

1. **Safe drinking water:** "the need , the problem and an action plan, Report of the third world academy of Sciences", 2002.

2. **Organización Panamericana de la Salud** "Situación de la Salud en las Américas", Indicadores Básicos, 2005.
3. **Castro de Esparza, M.**, "Presencia de arsénico en el agua de bebida en América latina y su efecto en la salud pública", Tercer Seminario Internacional sobre Evaluación y Manejo de las Fuentes de Agua de Bebida contaminadas con Arsénico, Universidad de Chile. Santiago, Chile, del 08 al 11 de noviembre de 2004.
4. "Eliminación de Contaminantes por Fotocatálisis Heterogénea", Cyted, Edited by M. A. Blesa, Mar del Plata, Argentina, 2001
5. **Rincón, A. G., Pulgarin, C.**, "Field solar E. coli inactivation in the absence and presence of TiO₂: is UV solar dose an appropriate parameter for standardization of water solar disinfection?" Sol. Energy, 77, 635-648, 2004.
6. **Carpio, E., Zúñiga, P., Ponce, S., Solís, J., Rodríguez, J., Estrada, W.**, "Photocatalytic degradation of phenol using TiO₂ nanocrystals supported on activated carbon, J. Molecular catalysis" A: Chemical, 228 (2005) 293-29.
7. **Quintana, M., Rodríguez, J., Solís, J., Estrada, W.**, "The influence of the ethanol/water molar ratio in the precursor solution on morphology and photocatalytic activity of Pyrolytic ZnO films", Photochemistry and Photobiology 81 (2005) pp. 783-788.
8. **Financiado por la Unión Europea** Prototipo construido con fondos del "Proyecto SOLWATER" ICA4-CT-2002-10001.
9. **Thu, H. B., Karkmaz, M., Puzenat, E., Guillard, C., Herrmann, J-M.**, 2005, "From the fundamentals of photocatalysis to its applications in environment and in solar purification of water in arid countries", Res. Chem. Intermed. 31 (2005) pp. 449-461.
10. **Fernández, P., Blanco, J., Sichel, C., Malato, S.**, "Water disinfection by solar photocatalysis using compound parabolic collectors", Catalysis Today, 101, 345-352, 2005.
11. **Malato, S., Blanco, J., Alarcón, D. C., Maldonado, M. I., Fernández-Ibáñez, P., Gernjak, W.**, "Photocatalytic Decontamination and Disinfection of water with Solar Collectors". Catalysis Today, submitted 2006.
12. **Grupo del Prof. Orellana, G.**, de la Universidad Complutense de Madrid a través del "proyecto SOLWATER".
13. **Wetzler, D. E., García-Fresnadillo, D., G., Orellana, G.**, "A Clean Well-Defined Solid System for Photosensitised ¹O₂ Production Measurements", Phys. Chem. Chem. Phys., 2006, doi:10.1039/b517756a.
14. **Jorge, C., Nieto, J., Ponce, S., Rodríguez, J., Solís, J., Estrada, W.**, "Remoción de Arsénico del agua mediante irradiación solar en Lima", Perú, Cap. 3 en Remoción de arsénico asistida por luz solar en comunidades rurales de América Latina, Ed. Marta Liter y Hector Mansilla, Bs. As. 2003 <http://www.cnea.gov.ar/xxi/ambiental/agua-pura/Raos-2003.pdf>

Correspondencia: jrodriguez@uni.edu.pe