



UNSAM

UNIVERSIDAD
NACIONAL DE
SAN MARTÍN

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN MARTÍN
INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN E INGENIERÍA AMBIENTAL

“APLICACIONES DE LA RADIACIÓN SOLAR UV EN TRATAMIENTO DE AGUAS”

Trabajo de Tesis para optar por el título de
Doctor en Ciencia y Tecnología Mención Química

Por: Christian Navntoft

Director de Tesis: Dr. Miguel A. Blesa

Co-directora: Lic. Laura Dawidowski

Lugar de Trabajo: Comisión Nacional de Energía Atómica

Índice de contenidos

Introducción	7
Referencias	9
Capítulo I- Procedimientos para evaluar la disponibilidad de radiación solar UV para sistemas de tratamiento de aguas por fotocátalisis heterogénea y SODIS.	11
1.1 Introducción	11
1.1.1 Objetivos del presente capítulo	23
1.2 Materiales y métodos	24
1.2.1 Selección de la banda de 380nm	24
1.2.2 Análisis de la relación entre las irradiancias a 380nm y UV-A mediante el modelo de transferencia radiativa TUV 4.1	24
1.2.3 Mediciones de UV-A y 380 nm en Buenos Aires, Argentina.	25
1.2.4 Mediciones de UV-A y 380 nm en Almería, España	26
1.2.5 Mediciones de global (300-3000 nm) en Buenos Aires, Argentina	27
1.3 Resultados	28
1.3.1 La relación entre UV-A y 380 nm, comparación de modelo con mediciones	28
1.3.1.1 Simulaciones con el modelo TUV 4.1	28
1.3.1.2 Evaluación de la correlación con datos medidos en Argentina	29
1.3.1.3 Evaluación de la correlación con datos medidos en España	31
1.3.2 Discusión	33
1.3.3 La relación empírica entre 380 nm, UV-A y Global para la ciudad de Buenos Aires.	34
1.3.3.1 La relación empírica 380/UV-A para la ciudad de Buenos Aires.	34
1.3.3.2 La relación empírica UV-A/Global para la ciudad de Buenos Aires.	37
1.3.4 Discusión	40
1.4 Conclusiones	42
1.5 Referencias	44
Capítulo II - Diseño, construcción y validación de un reactor solar para desinfección de agua por fotocatalisis heterogenea y fotosensibilizacion	47
2.1 Introducción	47
2.1.1 El proyecto SOLWATER	50
2.1.2 Objetivos del presente capitulo.	51
2.2 Materiales y Métodos	52
2.2.1 Reactor Experimental SOLWATER	52
2.2.1.1 Fotocatalizador y fotosensibilizador	54
2.2.1.2 Tubos de vidrio	55
2.2.1.3 Concentración por espejos CPC	56
2.2.1.4 Diámetro del soporte cilindrico utilizado.	59
2.2.2 Análisis de la degradación del papel Ahlstrom	61
2.2.2.1 Evaluación del papel en condiciones de operación	61
2.2.2.2 Evaluación del papel en condiciones de laboratorio	63
2.2.3 Evaluación en campo del prototipo SOLWATER	64
2.2.3.1 Selección de localidad de evaluación	64
2.2.3.2 Disponibilidad de radiación solar	65
2.2.3.3 Medición de radiación solar	66
2.2.3.4 Planificación de Ensayos	66

2.2.3.5 Parámetros Físicoquímicos.	67
2.2.3.6 Parámetros bacteriológicos.	68
2.2.3.7 Temperatura y Caudal	68
2.2.3.8 Registro de Datos	68
2.2.3.9 Fotoreactor de ensayos de campo: Prototipo final	68
2.2.3.10 Selección de la bomba de recirculación	69
2.2.3.11 Dimensionamiento fotovoltaico	70
2.2.3.12 Adaptación estructural	73
2.3 Resultados	76
2.3.1 Mejoras realizadas en el prototipo experimental SOLWATER	76
2.3.1.1 Rotura de tubos de vidrio	76
2.3.1.2 Posicionamiento del soporte tipo aleta dentro de los tubos de vidrio.	78
2.3.2 Evaluación del papel en condiciones de operación	79
2.3.2.1 Análisis por carbono orgánico total	79
2.3.2.2 Análisis por espectrofotometría	80
2.3.3 Evaluación del papel en condiciones de laboratorio	80
2.3.3.1 Análisis por espectrofotometría	80
2.3.3.2 Análisis por gravimetría	82
2.3.3.3 Análisis por SEM.	83
2.3.4 Discusión	85
2.3.5 Evaluación en campo del prototipo SOLWATER	85
2.3.5.1 Análisis bacteriológicos	85
2.3.5.2 Análisis físicoquímicos	88
2.3.6 Discusión	91
2.4 Conclusiones	91
2.5 Referencias	93
Capítulo 3.-Diseño, construcción y evaluación de un reactor para desinfección solar por radiación solar UV (SODIS).	96
3.1 Introducción	96
3.1.1 Objetivos del presente capítulo.	97
3.2 Materiales y métodos.	99
3.2.1 Bacterias, cultivo, siembra y muestreo.	99
3.2.2 Agua utilizada en los ensayos.	100
3.2.3 Radiación solar	100
3.2.4 Sistemas experimentales	101
i) Tubos de vidrio de borosilicato o sistemas batch	101
ii) Reactor solar CPC con recirculación de 14 Litros.	101
iii) Reactor solar CPC con recirculación de 70 Litros	104
iii) Reactor de un solo paso de 14 Litros.	104
3.2.4.2 Espejos CPC	106
3.2.5 Experimentos realizados	109
3.2.5.1 Resistencia térmica de <i>E. coli</i> .	109
3.2.5.2 Comparación entre sistemas batch	109
3.2.5.3 Influencia del caudal de recirculación.	109
3.2.5.4 Influencia del área iluminada en sistemas con recirculación	110
3.2.5.5 Influencia de los espejos CPC.	110
3.2.5.6 Influencia de la intensidad de radiación solar.	110
3.2.5.7 Análisis de la eficiencia de un reactor de un solo paso.	111
3.3 Resultados	113

3.3.1 Resistencia térmica de <i>E. coli</i> .	113
3.3.2 Comparación entre sistemas batch con tubos de vidrio de borosilicato y botellas PET	114
3.3.3 Influencia del caudal de recirculación	114
3.3.4 Influencia del área expuesta en sistemas con recirculación.	115
3.3.5 Influencia de los espejos CPC	116
3.3.6 Influencia de la intensidad de radiación solar y su relación con la energía total depositada.	117
3.3.7 Análisis de la eficiencia de un reactor de un solo paso.	123
3.3.8 Análisis de los resultados	124
3.3.9 Implicancias de los resultados para SODIS	128
3.3.10 El reactor SODIS	129
3.4 Conclusiones	134
3.5 Referencias.	135
Conclusiones de la tesis	140
Anexo I	145
Anexo II	147

Introducción

Casi la mitad de los habitantes de los países subdesarrollados sufren enfermedades provocadas directa o indirectamente por el consumo de agua o alimentos contaminados [UNESCO, 2006]. Los niños son las principales víctimas y se estima que en el 88% de los casos estas enfermedades son atribuibles a la imposibilidad de acceso a agua potable. Cada año más de 2.2 millones de personas, la mayoría niños menores de 5 años, mueren debido a enfermedades asociadas con la falta de agua potable, saneamiento adecuado e higiene [WHO, 2000].

A medida que la población crece y aumentan los ingresos se requiere más agua, que se transforma de esta manera en un elemento esencial para el desarrollo. Según UNESCO [2006], la insuficiencia de agua potable se debe, principalmente, a un abastecimiento ineficaz vinculado a la gestión del recurso y no a un déficit del mismo.

En el continente americano la cobertura total de agua potable es del 90%, incluyendo conexiones domiciliarias y sistemas naturales de fácil acceso, mientras que en América Latina y el Caribe la cobertura es del 84%. Esta región presenta además una marcada desigualdad entre áreas urbanas y rurales, con coberturas del 92% y 62% respectivamente [Cirelli Fernández, 2005], más vinculada a la localización que a los ingresos de la población.

Además de considerar el desafío político que representa un enfoque integrado del manejo del recurso existe un desafío técnico, del que poco se habla, vinculado a lograr sistemas de potabilización efectivos, de bajo costo y que al mismo tiempo no impongan daños sobre el medio ambiente. Todos los tratamientos tienen limitaciones y tanto sus ventajas como sus desventajas son los que definen su campo de aplicación. Existen tratamientos físicos, químicos, biológicos y combinaciones de ellos que permiten la potabilización. La mayoría de los sistemas convencionales de tratamiento de aguas tienen algún punto en donde necesitan un ingreso de energía eléctrica o requieren el agregado de alguna sustancia química.

En la Argentina el uso sistemas convencionales de tratamiento de aguas en regiones rurales aisladas, enfrenta el inconveniente de la no disponibilidad de energía eléctrica de red, y la dificultad asociada a las grandes distancias que separan estos sitios de los centros de abastecimiento de reactivos químicos. Existen muchas poblaciones de este tipo que carecen de sistemas de tratamiento de aguas de consumo así como también industrias de pequeña o mediana escala que no tienen posibilidad económica o técnica de realizar tratamiento de efluentes alguno. Si bien la adición de reactivos químicos muchas veces se presenta como la opción más viable, posee la desventaja de la generación de compuestos secundarios que se forman como sub-producto de las reacciones químicas, y cuyas consecuencias en general no se evalúan. De esta manera, existe en el país una necesidad de contar con sistemas de tratamiento eficientes y de bajo costo que puedan responder a las necesidades planteadas y que además no constituyan un peligro al medio ambiente.

Las tecnologías de tratamiento de aguas basadas en el uso de energía solar constituyen una de las soluciones viables y ambientalmente sustentables para países en desarrollo [Sánchez Cabrero y Blesa, 2004; Litter, 2005]. En pequeñas y medianas escalas la

variabilidad del recurso solar puede ser absorbida de manera precisa permitiendo que la eficiencia del sistema no sufra consecuencias.

En virtud de las necesidades expuestas, en este trabajo se presentan los resultados del diseño, desarrollo, construcción y evaluación de dos sistemas que utilizan la radiación solar UV para el tratamiento de aguas.

De esta manera, este trabajo se presenta organizado en varias secciones.

En el capítulo 1 se presentan varias metodologías de cálculo de la radiación UV a partir de mediciones en otro rango del espectro solar. Las mismas permiten calcular este recurso en distintas localidades de la Argentina con vistas a su aplicación en los sistemas solares de tratamiento de aguas que utilizan el rango espectral solar UV para llevar a cabo el proceso.

En el capítulo 2 se describen los análisis realizados a un fotocatalizador soportado en fibras sintéticas y las tareas realizadas en el diseño, construcción y evaluación en campo de un reactor autónomo para desinfección de aguas en comunidades rurales aisladas cuyo principio de funcionamiento está basado en el uso de fotocatálisis heterogénea y fotosensibilización solar. La fotocatálisis heterogénea solar es un proceso por el cual se degradan los contaminantes, especialmente orgánicos, integrando la acción de la luz solar y las propiedades de un semiconductor. Generalmente, el semiconductor se encuentra hidratado y tiene adsorbidos en su superficie iones hidróxido o moléculas de agua. Estos iones se transforman en radicales hidroxilo ($\bullet\text{OH}$) mediante la captura de huecos fotogenerados de la banda de valencia. Este nuevo radical puede atacar a compuestos adsorbidos en la superficie del semiconductor o difundir una corta distancia hacia el medio acuoso y oxidar compuestos en solución. El proceso será óptimo si se logra la mineralización total del contaminante [Sánchez Cabrero y Blesa, 2004; Fernández Ibañez y col., 2004]. La fotosensibilización es otro proceso oxidante que integra la acción de la luz solar y las propiedades de un fotosensibilizador. Bajo iluminación solar, el mismo genera oxígeno singulete ($^1\text{O}_2$), una especie oxidante altamente reactiva. Esta especie puede atacar a los compuestos orgánicos o a los microorganismos presentes en el agua a tratar. La diferencia fundamental entre ambos procesos que se da en la etapa de adsorción. El contaminante no se adsorbe en el fotosensibilizador, mientras que sí lo hace en el fotocatalizador. De esta manera, si el fotosensibilizador se halla en solución con el efluente, el proceso se da en la fase líquida, es decir, es una reacción homogénea. Si el fotosensibilizador está fijado, la eficiencia del mismo estará definida por la distancia que tienen que migrar los agentes oxidantes generados hasta atacar una molécula de contaminante [García Fresnadillo, 2005].

En el capítulo 3, se describen las investigaciones realizadas para mejorar la eficiencia de del uso de la radiación solar para desinfección solar de las aguas. También se exponen las tareas de diseño y construcción de un reactor mediante para tratar volúmenes de agua suficientes para abastecer una vivienda. La desinfección solar de agua, conocida como SODIS (del inglés, SOLar DISinfection) es una tecnología que permite utilizar la radiación solar para inactivar y en algunos casos destruir los microorganismos patógenos presentes en el agua [SANDEC, 2006; Mc Guigan y col., 1998; Malato y col., 2007]. El tratamiento consiste en forma básica en llenar recipientes transparentes con agua y exponerlos al sol hasta lograr la desinfección. El sol calienta el agua de la

botella y este calentamiento en conjunto con la radiación UV que atraviesa la misma son las responsables de la muerte de los microorganismos.

Finalmente se exponen las conclusiones de las tareas llevadas a cabo y los caminos que quedan por recorrer.

En el Anexo I, se describen las publicaciones en congresos y en revistas científicas que surgieron como producto de esta tesis.

En el Anexo II, se describen otros trabajos realizados en forma paralela a esta tesis y que fueron resultado de la aplicación de los conocimientos adquiridos en el transcurso de la misma.

Referencias

- [1] Cirelli Fernández A., Du Mortier C., 2005. *Evolución de la condición del agua para consumo humano en Latinoamérica*. Capítulo 1 en Blesa, M. A., Blanco Gálvez, J. *Tecnologías solares para la desinfección y descontaminación del agua*. Ed. UNSAM, Argentina.
- [2] Fernández Ibáñez P., de las Nieves López J., Malato Rodríguez S., 2004. *Propiedades coloidales de partículas de TiO₂: aplicación al tratamiento fotocatalítico solar de aguas*. Ed. CIEMAT, España.
- [3] García Fresnadillo D., 2005. *Fotosensibilización y el sensibilizador: síntesis, propiedades y limitaciones*. Capítulo 14 en Blesa, M. A., Blanco Gálvez, J., *Tecnologías solares para la desinfección y descontaminación del agua*. Ed. UNSAM, Buenos Aires, Argentina.
- [4] Litter M., 2005. *Tecnologías avanzadas de oxidación: Tecnologías solares*. Capítulo 5 en Blesa, M. A., Blanco Gálvez, J., 2005. *Tecnologías solares para la desinfección y descontaminación del agua*. Ed. UNSAM, Argentina.
- [5] Malato S., Blanco J., Alarcón D. C., Maldonado M. I., Fernández-Ibáñez P., Gernjak W., 2007. *Photocatalytic Decontamination and Disinfection of water with Solar Collectors*. Cat. Today, Volume 122, Issues 1-2, págs. 137-149.
- [6] McGuigan K. G., Joyce T.M., Conroy R. M., Gillespie J. B. and Elmore-Meegan M., 1998. *Solar disinfection of drinking water contained in transparent plastic bottles: characterizing the bacterial inactivation process*. Journal of Applied Microbiology, 84, págs. 1138-1148.
- [7] Sánchez Cabrero B., Blesa, M. A., 2004. *Eliminación de contaminantes por fotocatalisis heterogénea*. Editorial CIEMAT, España.
- [8] SANDEC Report 06/2, 2006. *Solar Water Disinfection: A guide for the application of SODIS*.
- [9] UNESCO, 2006. Informe de Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos en el mundo. “*El agua: una responsabilidad compartida*”. disponible en: http://www.unesco.org/water/wwap/index_es.shtml.
- [10] WHO, 2000. *Global Water Supply and Sanitation Assessment*. Disponible en: http://www.who.int/water_sanitation_health/monitoring/globalassess/en/.