

DESINFECCIÓN CON REACTORES SOLARES: EXPERIENCIA OPERATIVA

Dr. Pilar Fernández Ibáñez
pilar.fernandez@psa.es

Plataforma Solar de Almería –CIEMAT
Ministerio de Educación y Ciencia
www.psa.es



Índice

1. Introducción
2. Desinfección de aguas con fotocatalisis heterogénea
3. Mecanismos de desinfección
4. Metodología de trabajo
5. Experiencia con reactores solares
6. Conclusiones

1. Introducción

* Se basan en oxidantes

* Capaces de estabilizarse totalmente

* Los más

* Se producen oxidativamente compuestos

| <i>Especie</i> | <i>Potencial de oxidación ref. HgCl₂ (V)</i> |
|--------------------------|---|
| Flúor | 2.23 |
| Radical hidroxilo | 2.06 |
| Oxígeno atómico | 1.78 |
| Peróxido de hidrógeno | 1.31 |
| Radical peróxido | 1.25 |
| Permanganato | 1.24 |
| Ácido hipobromoso | 1.17 |
| Cloro dióxido | 1.15 |
| Ácido hipocloroso | 1.10 |
| Cloro | 1.00 |
| Bromo | 0.80 |
| Iodo | 0.54 |

ertemente

elevada generalizados

(•OH).

degradación de los

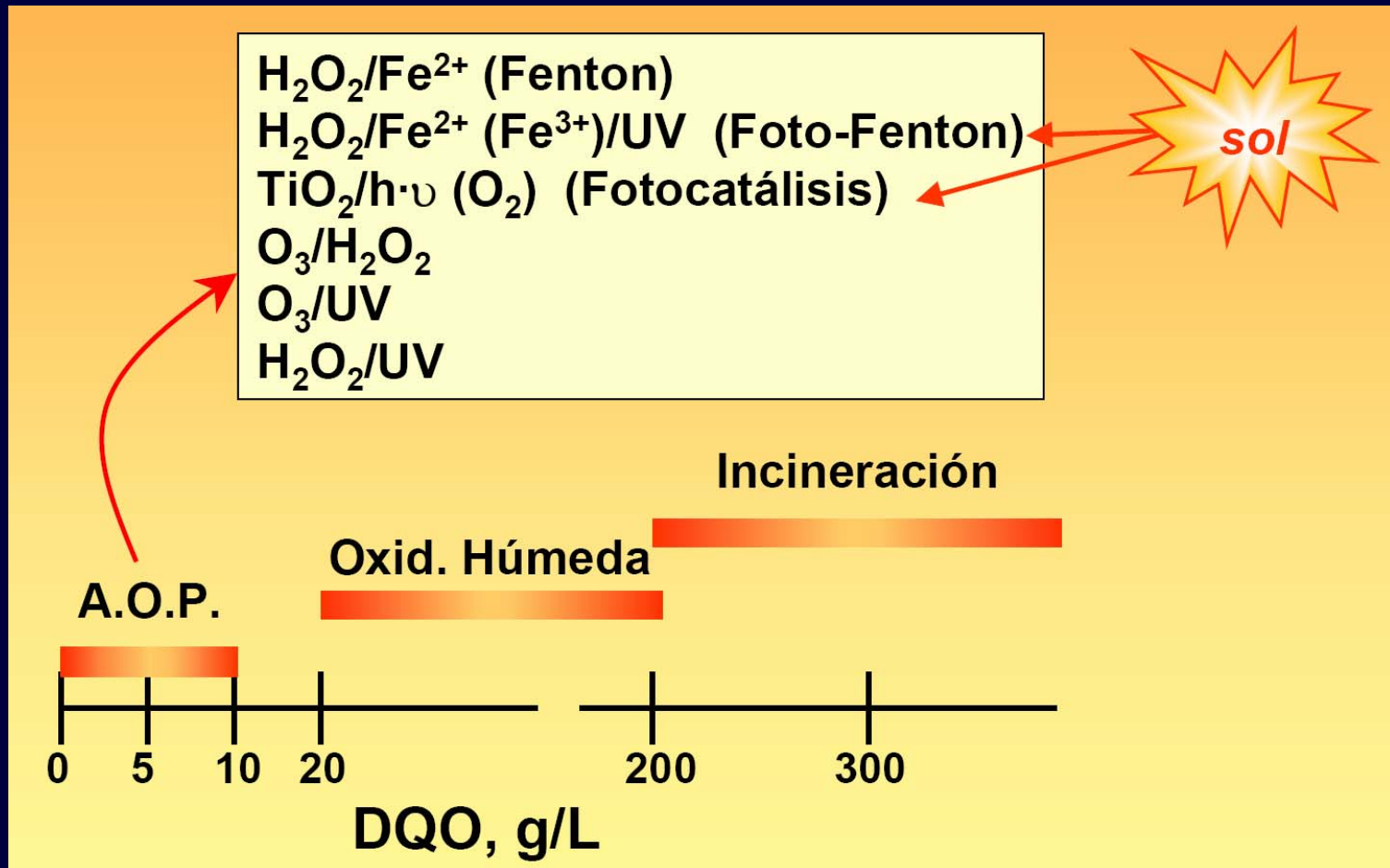
$C_n H_m$

$W H_2 O$

1. Introducción



PROCESOS DE OXIDACIÓN AVANZADA CON $\cdot OH$

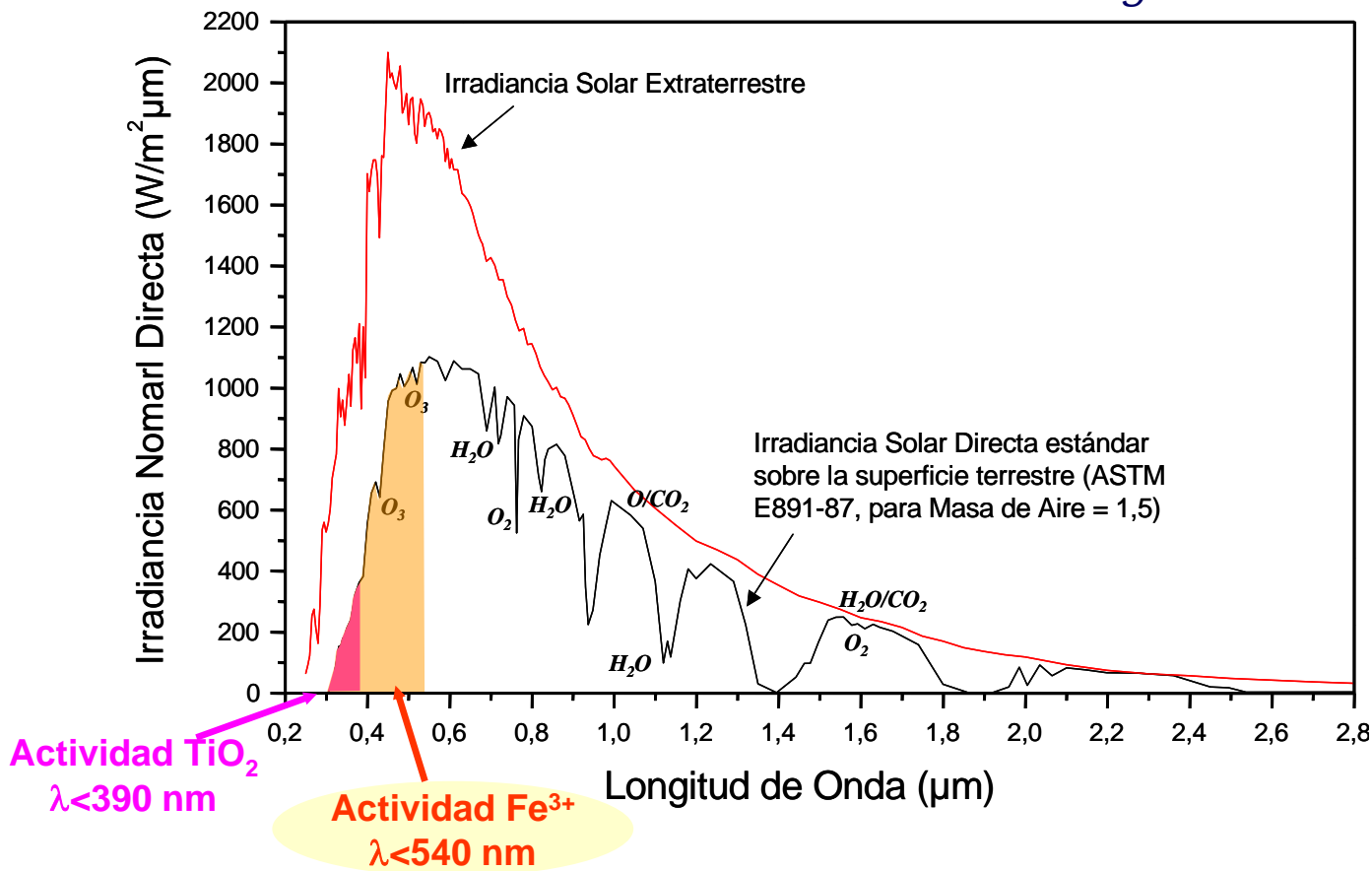


1. Introducción



FOTOCATÁLISIS SOLAR

Espectros terrestre y extraterrestre con el Sol a 48.2° de ángulo cenital



1. Introducción



PATÓGENOS DE TRANSMISIÓN HÍDRICA

VIRUS

- *Poliovirus*
- *Hepatitis A*
- *Parvovirus*
- *Adenovirus*
- *Rotavirus*

BACTERIAS

- *Salmonella*
- *Shigella*
- *Campylobacter*
- *Vibrio*
- *Escherichia coli*

PROTOZOOS

- *Giardia lamblia*
- *Entamoeba histolytica*
- *Cryptosporidium*

HELMINTOS

- *Taenia saginata*
- *Ascaris lumbricoides*
- *Schistosoma*

1. Introducción



TÉCNICAS DE DESINFECCIÓN

(Clasificación
EPA, 1999)

Retirada física del
microorganismo

Desactivación (muerte)
del microorganismo

✓ *Coagulación y sedimentación*

✓ *Filtración*

- *Filtración rápida*
- *Filtración en medio granular*
- *Filtración con carbón activo*
- *Filtración con membrana*

✓ **Uso muy extendido**

× **Caros**

× **No resuelven el problema**

✓ *Cloración*

✓ *Ozonización*

✓ *Desinfección UV*

✓ *Tecnologías en fase de estudio*

▪ *Fotocatálisis*

▪ *Electrofotocatálisis*

▪ *Fotosensibilización*

▪ *Solar water disinfection*

1. Introducción

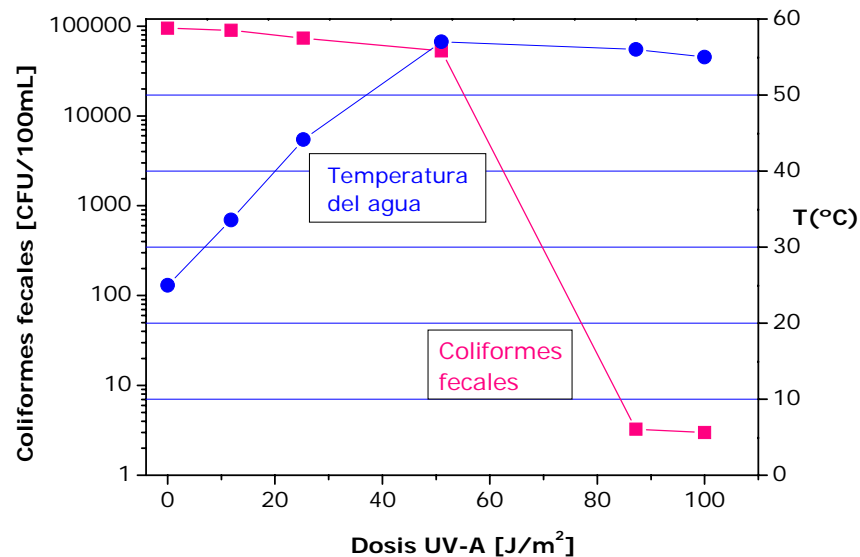
DESINFECCIÓN SOLAR DE AGUA

La radiación solar por sí misma no tiene capacidad suficiente de desinfección de agua.

300-500 nm

*Inhibición de la reproducción
Mecanismos de foto-reparación*

Aplicación de la desinfección solar de agua (SODIS):



3

Índice

1. Introducción



2. **Desinfección de aguas con fotocatalisis heterogénea**

3. Mecanismos de desinfección

4. Metodología de trabajo

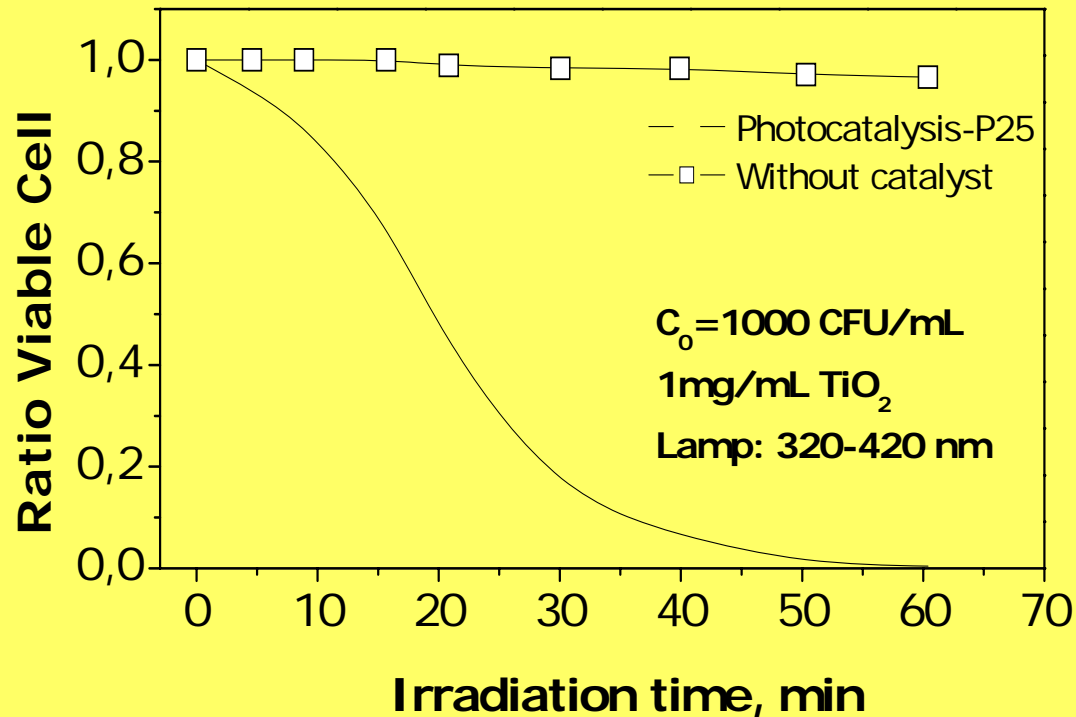
5. Experiencia con reactores solares

6. Conclusiones

2. Desinfección con fotocatalísis

El primer trabajo de desinfección de agua mediante fotocatalísis con TiO_2 fue publicado por Matsunaga en 1985.

Actualidad:

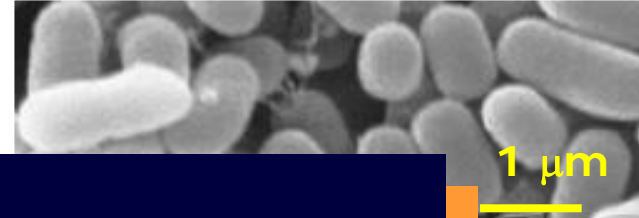
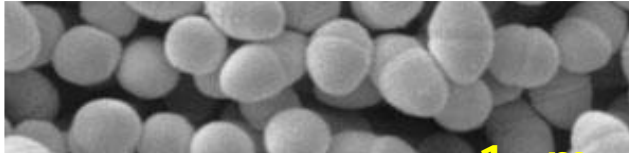


M. Bekbölet, Water Science & Technology 35, 95-100, 1997.

2. Desinfección con fotocatalisis

FOTO-DESTRUCCIÓN DE MICROORGANISMOS CON TiO_2

BACTERIAS: *Enterococcus faecalis* (Gram+) *Eschericia coli* (Gram-)



La tendencia actual en este campo se dirige hacia la foto-inactivación con TiO_2 de bacterias más resistentes, de protozoos patógenos como *Giardia lambia* y *Cryptosporidium* o de algas resistentes.

VIRUS Y BACTERIÓFAGO)

CÉLULAS CAPSULADAS)

HONGOS Y LEVEDURAS)

Saccharomyces Cerevisiae


Conidias de *Neurospora crassa*

teriófago)

T24
).

"Advanced Oxidation Processes for Water and Wastewater Treatment" IWA Publishing, 2004.

Índice

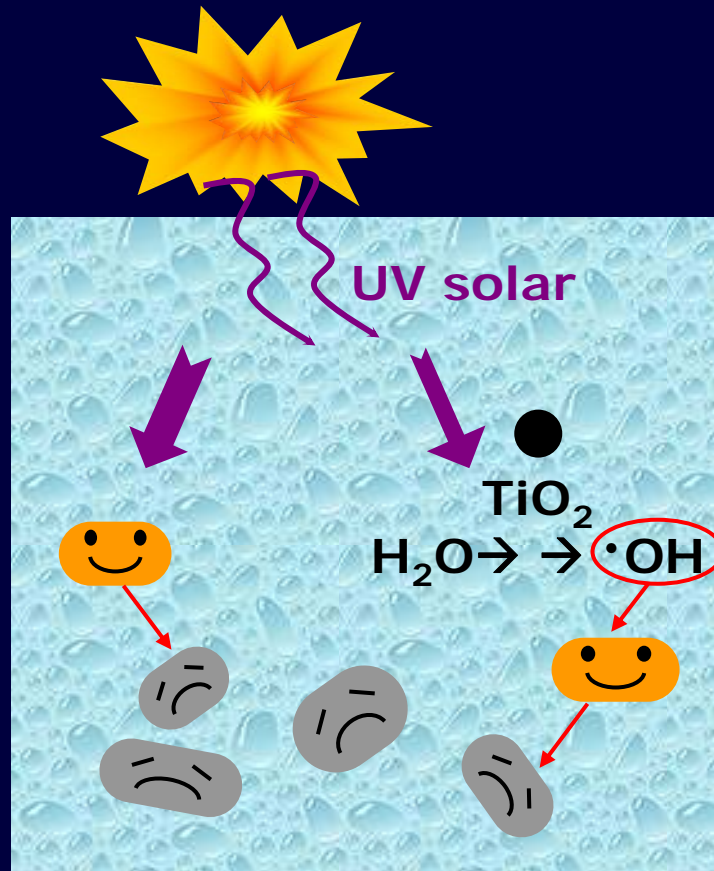
1. Introducción
2. Desinfección de aguas con fotocatalisis heterogénea
-  3. **Mecanismos de desinfección**
4. Metodología de trabajo
5. Experiencia con reactores solares
6. Conclusiones

3. Mecanismos de desinfección



INACTIVACIÓN DE BACTERIAS MEDIANTE LUZ SOLAR

Acción directa
Absorción de la radiación UV por las moléculas de DNA de los microorganismos



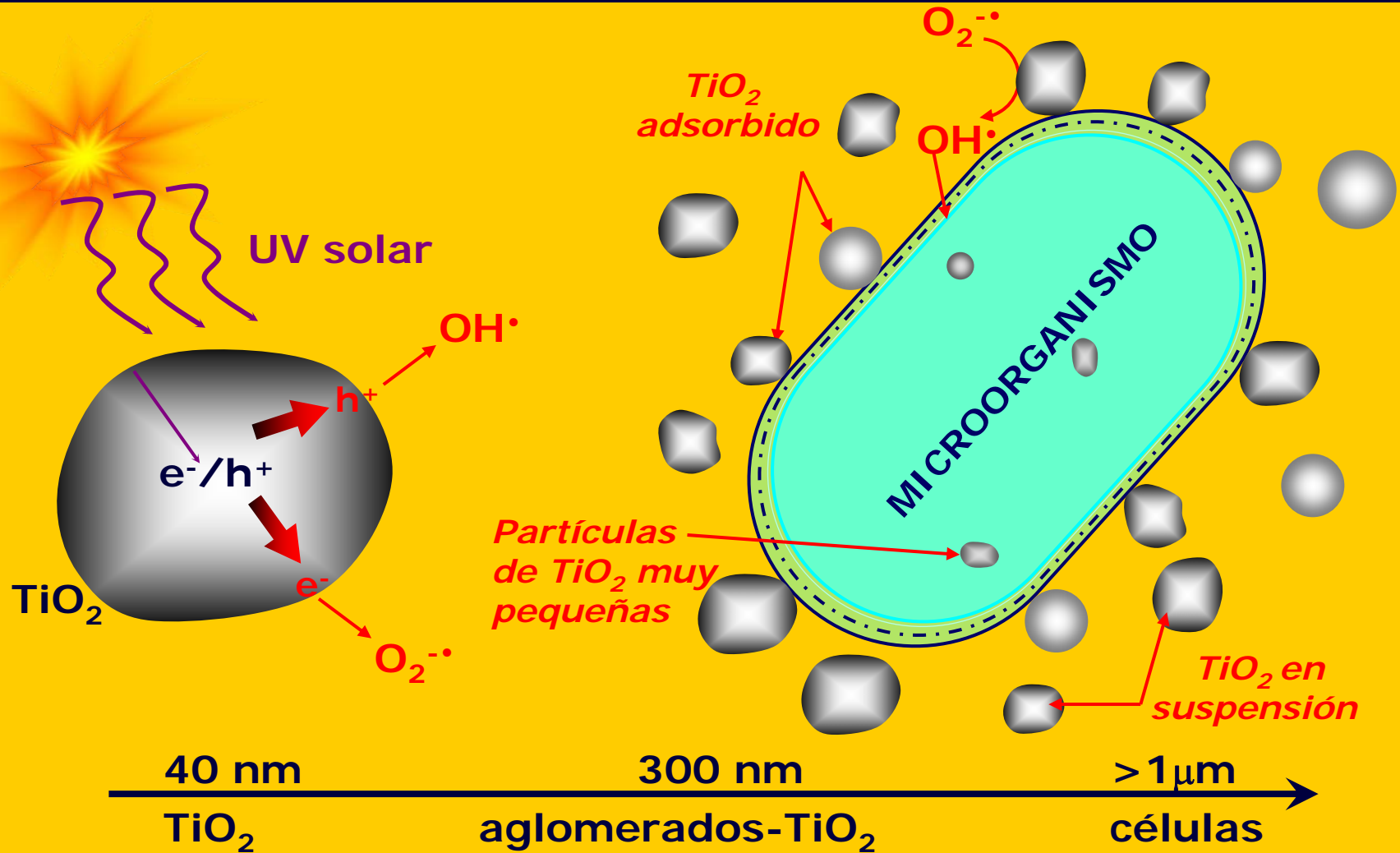
Acción indirecta

El TiO_2 fotoactivado ataca la membrana celular.

Reducción por fotooxidación de los niveles de Coenzima-A (respiración) que provoca la muerte celular.

13

3. Mecanismos de desinfección



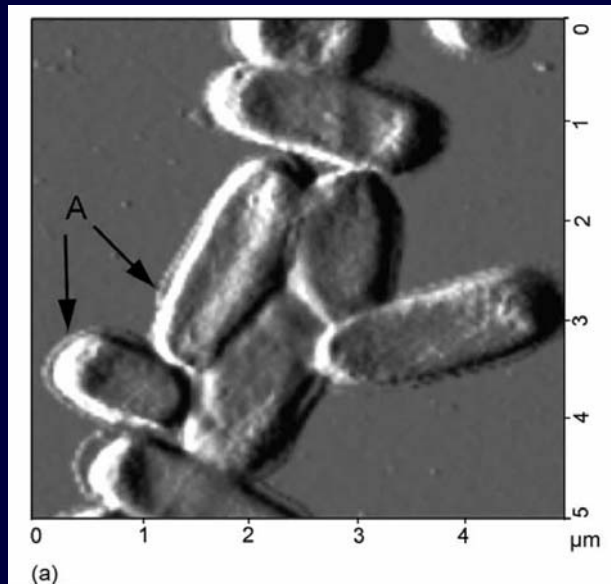
3. Mecanismos de desinfección



IMÁGENES AFM DE CÉLULAS DE E. COLI SOBRE UN FILM DE TiO_2

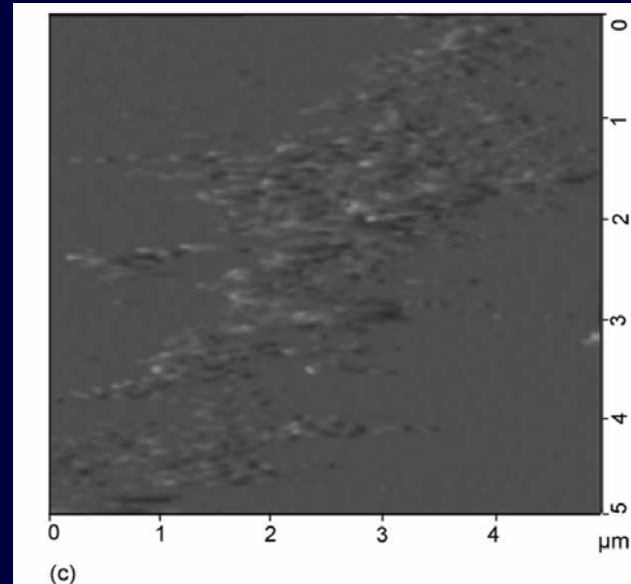
Intensidad de la luz: 1.0 mW/cm^2

Sin iluminación



Forma cilíndrica
Tamaños $\sim 1-2.5 \mu\text{m}$

6 días de iluminación



Descomposición
celular completa.

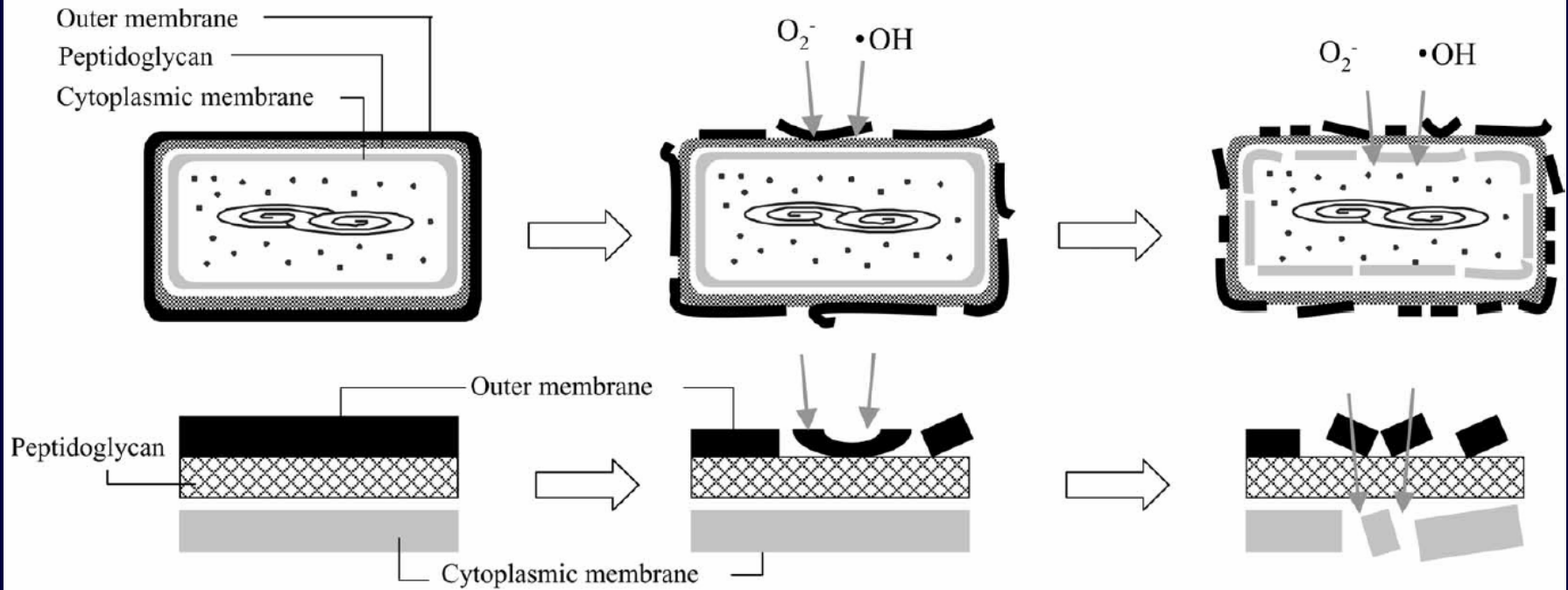
15

K. Sunada et al. J. Photochemistry and Photobiology A: Chemistry 6221 (2003) 1-7

3. Mecanismos de desinfección



ILUSTRACIÓN DEL PROCESO DE FOTODESTRUCCIÓN SOBRE TiO_2



1) *Destrucción parcial de la membrana externa: pérdida de viabilidad parcial.*


2) *Las especies reactivas llegan a la membrana citoplasmática.*

3) *Las especies reactivas llegan a la membrana lipídica: muerte celular.*

16

K. Sunada et al. J. Photochemistry and Photobiology A: Chemistry 6221 (2003) 1–7

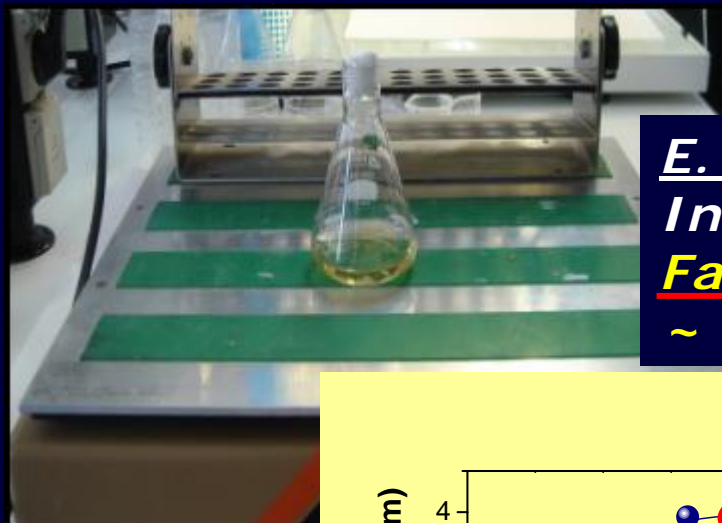
Índice

1. Introducción
2. Desinfección de aguas con fotocatalisis heterogénea
3. Mecanismos de desinfección
-  4. **Metodología de trabajo**
5. Experiencia con reactores solares
6. Conclusiones

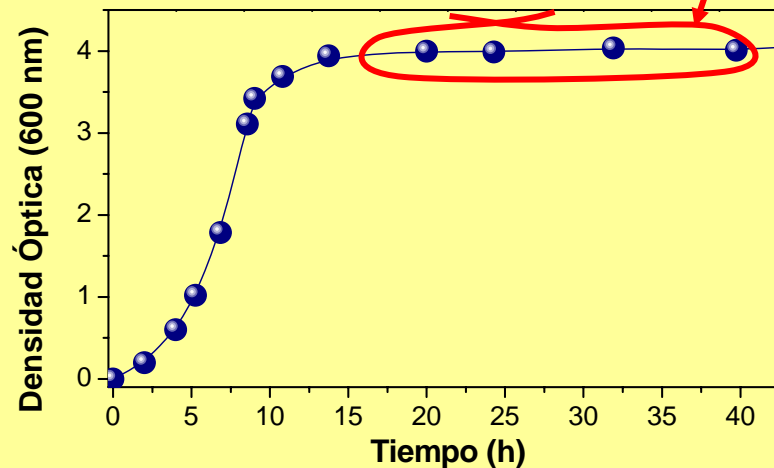
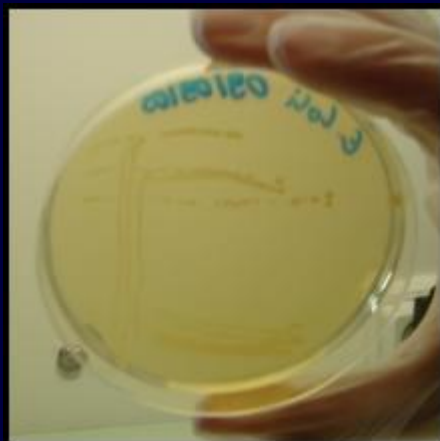
4. Metodología de trabajo



ELABORACIÓN DE CULTIVOS



E. Coli
Incubación: 18-20 h.
Fase estacionaria
~ 10⁹ CFU/mL



4. Metodología de trabajo



PREPARACIÓN DE EXPERIMENTOS



1. Preparación del catalizador.
2. Tapar el colector solar.
3. Inoculación de cultivo & recirculación.
4. Adición de TiO_2 dispersado en un pequeño volumen de agua esterilizada.
5. Descubrir el colector.
6. Comienza el experimento con la toma de muestras.
7. Medida de la energía radiante UV solar por unidad de tiempo y superficie ($W_{UV} \cdot m^{-2}$) que incide sobre el colector.

4. Metodología de trabajo



MANIPULACIÓN DE MUESTRAS

Trabajar en **condiciones de esterilidad** (cabina de flujo laminar, llama)



Número más probable

Conteo de colonias



Utilizar un método de **detección y enumeración** de indicadores de microorganismos adecuado

4. Metodología de trabajo



EVALUACIÓN DE CINÉTICAS DE DESINFECCIÓN

Desinfección por irradiación

$$C_t = C_0 \exp - k [It]$$

El sol como fuente de fotones

$$Q_{UV,n} = Q_{UV,n-1} + (t_n - t_{n-1}) \cdot UV_{G,n} \cdot A_r / V_t$$

Cinéticas de procesos de fotocatalisis solar heterogénea


$$C_t = C_0 \exp - k' \cdot Q_{UV}$$

$$r_Q = - dC_t / dQ_{UV}$$

21

Malato, S. et al. Applied Catalysis B: Environ. 28, 163, 2000.

Índice

1. Introducción
2. Desinfección de aguas con fotocatalisis heterogénea
3. Mecanismos de desinfección
4. Metodología de trabajo
-  5. **Experiencia con reactores solares**
6. Conclusiones

5. Experiencia con reactores solares



DISPOSICIÓN DEL CATALIZADOR

MEJORAR LA EFICIENCIA FOTOCATALÍTICA

- ✓ Dopado con metales
- ✓ Acoplamiento a otros semiconductores
- ✓ Optimización del área superficial
- ✓ Forma cristalográfica adecuada

RESOLVER LA SEPARACIÓN Y RECUPERACIÓN

- ✓ Catalizador inmovilizado sobre matriz
- ✓ Partículas de mayor tamaño

ABARATAR COSTES

- ✓ Producción elevada (comercial)

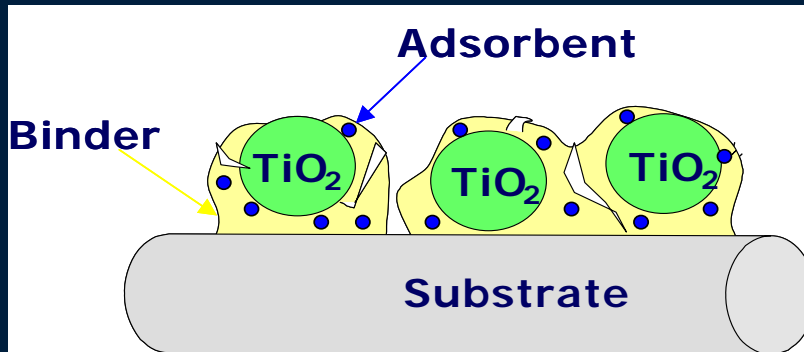
23

5. Experiencia con reactores solares

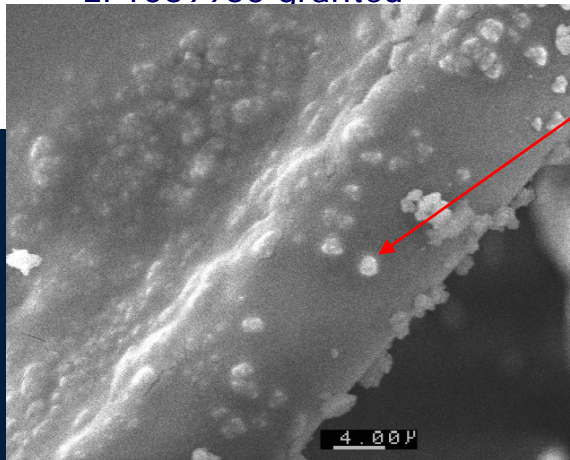


CATALIZADOR INMOVILIZADO SOBRE MATRIZ INERTE

TiO₂ sobre fibra, Ahlstrom©



Ahlstrom patent
EP1069950 granted



Reactor CPC (soporte coaxial)

5. Experiencia con reactores solares



Requisitos para un reactor solar de fotocátalisis solar

- * Resistencia química al medio acuoso sin alterarse por el tipo de reactivo ni los distintos pHs.
- * Garantía de flujo con la mínima presión y máxima homogeneidad posibles.
- * Transmisión eficaz de la radiación UV que llega desde el colector solar.
- * Resistencia a temperaturas ligeramente altas (40-50°C).
- * Robusto y resistente a la intemperie.
- * Fácil limpieza por fuera y por dentro.
- * Operación y mantenimiento fácil (modular).
- * Económico y accesible.

25

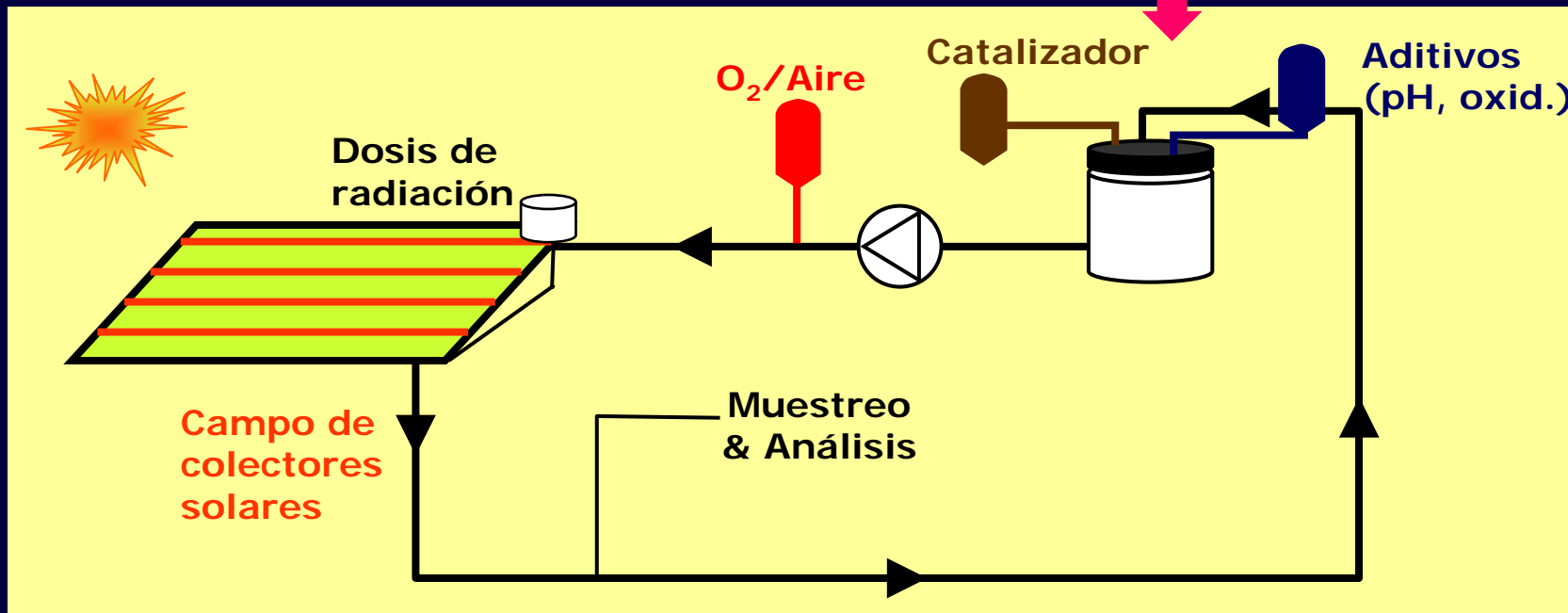
5. Experiencia con reactores solares



PLANTA PILOTO DE FOTOCATÁLISIS SOLAR

AGUA CONTAMINADA

PRE-TRATAMIENTO



POST-TRATAMIENTO

AGUA TRATADA

5

5. Experiencia con reactores solares



FOTO-REACTOR SOLAR (tipo CPC)

➤ Experiencias piloto:

- Radiación solar
- Colector solar
- Tanque
- Aire
- Sonda
- Bomba
- Aditivos
- Catalizador



*Proyecto SOLWATER, INCO Programme, European Commission
(2002-2005)*

5. Experiencia con reactores solares

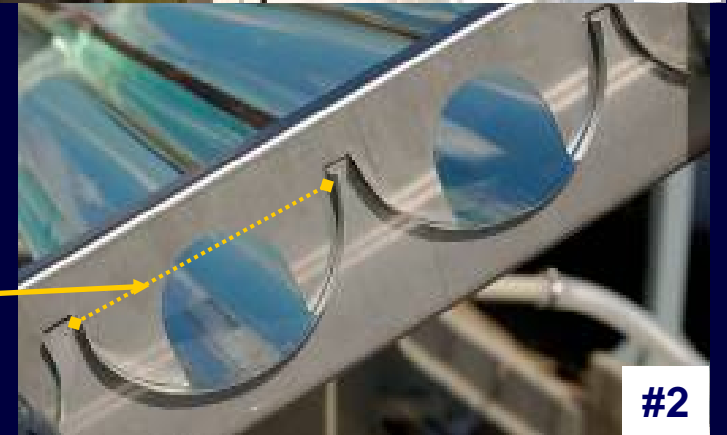
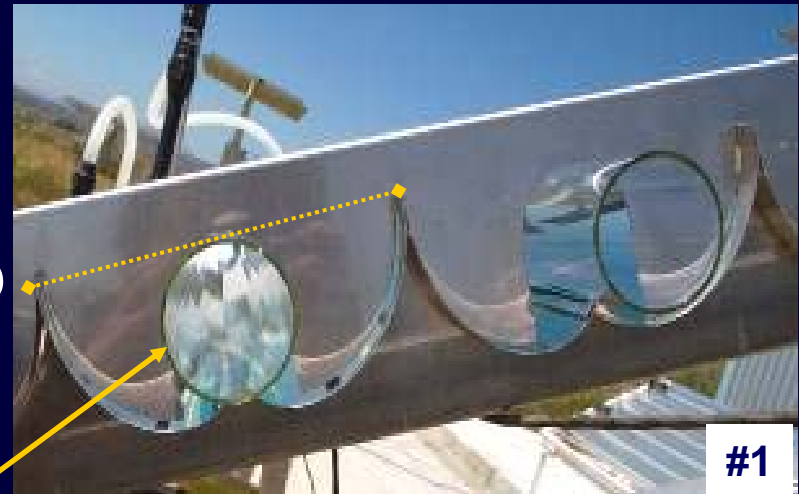


FOTO-REACTOR SOLAR (CPC – catalizador fijo)

Glass tubes External diameter = 50 mm
Thickness = 1.8 mm
Length = 1500 mm
Irradiated length = 1280 mm
Material = Borosilicate (3.3 hard)

Collector Length (irr.) = 1280 mm
Aperture₁ = 160 mm /CPC
Irr. Area₁ = 0.21 m² /CPC
V_{irr.1} = 1.13 L / tube
Aperture₂ = 107 mm /CPC
Irr. Area₂ = 0.14 m² /CPC
V_{irr.1} = 1.97 L / tube

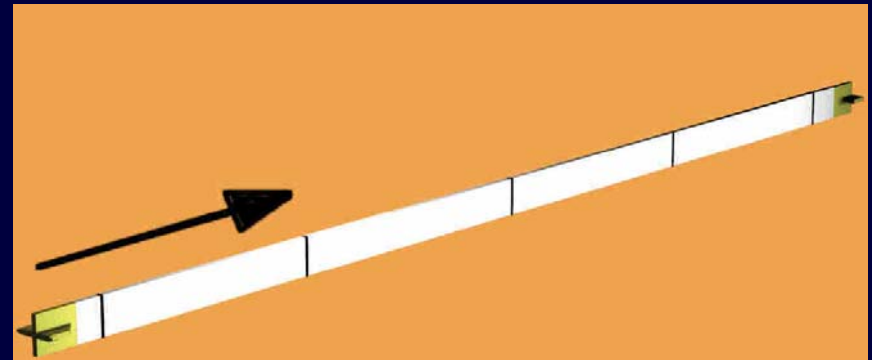
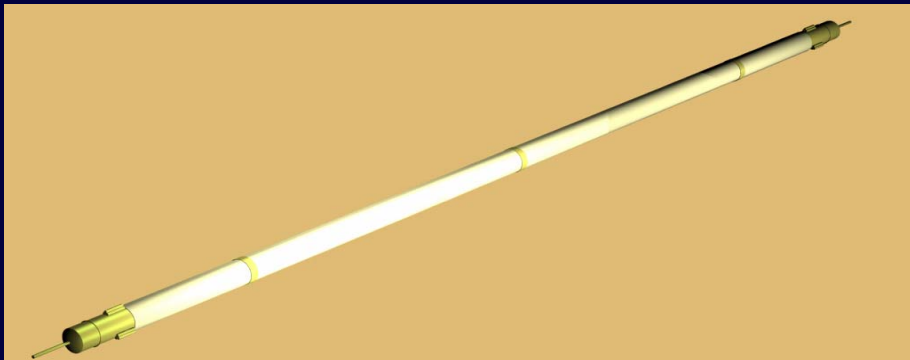
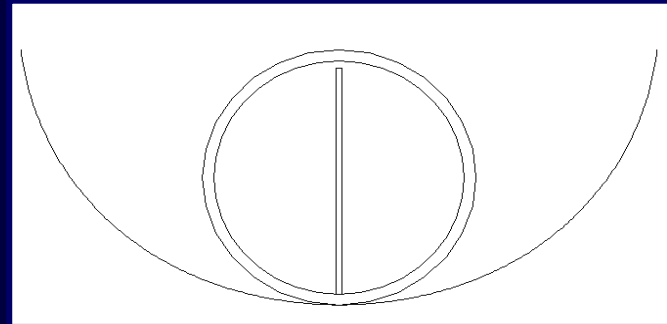
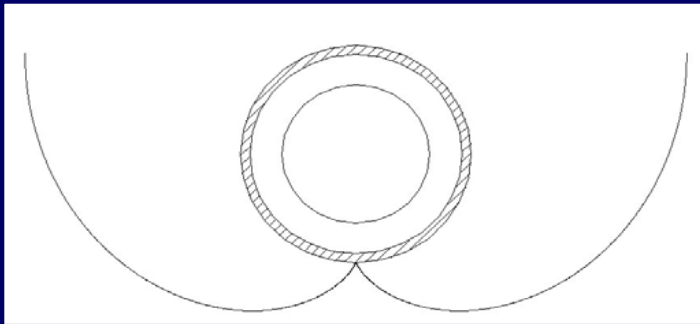
“PROTOTYPES 1&2”



5. Experiencia con reactores solares



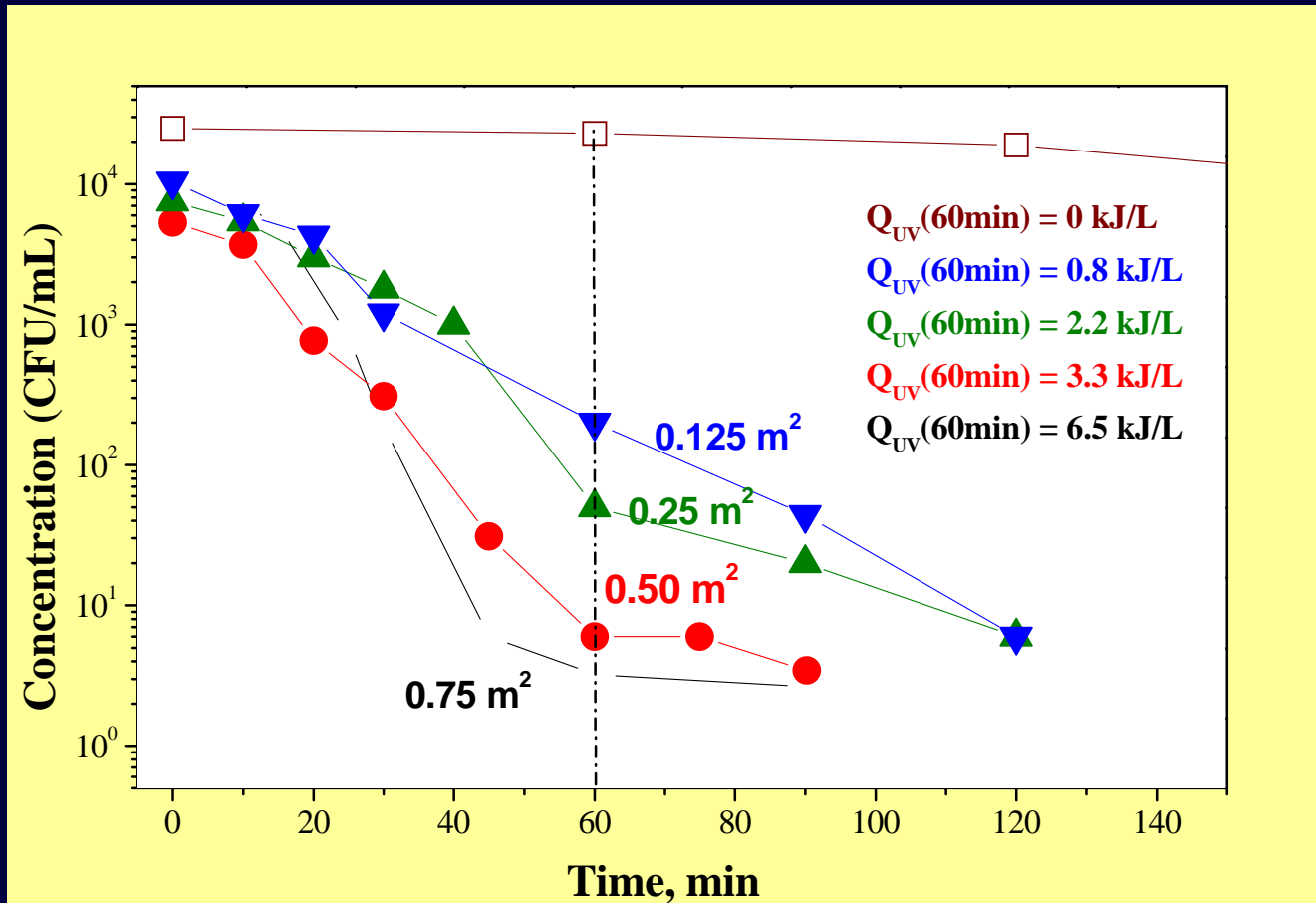
SOPORTES PARA FOTOCATALIZADOR



5. Experiencia con reactores solares



DESACTIVACIÓN CON RADIACIÓN SOLAR DE *E. coli* (CPC)



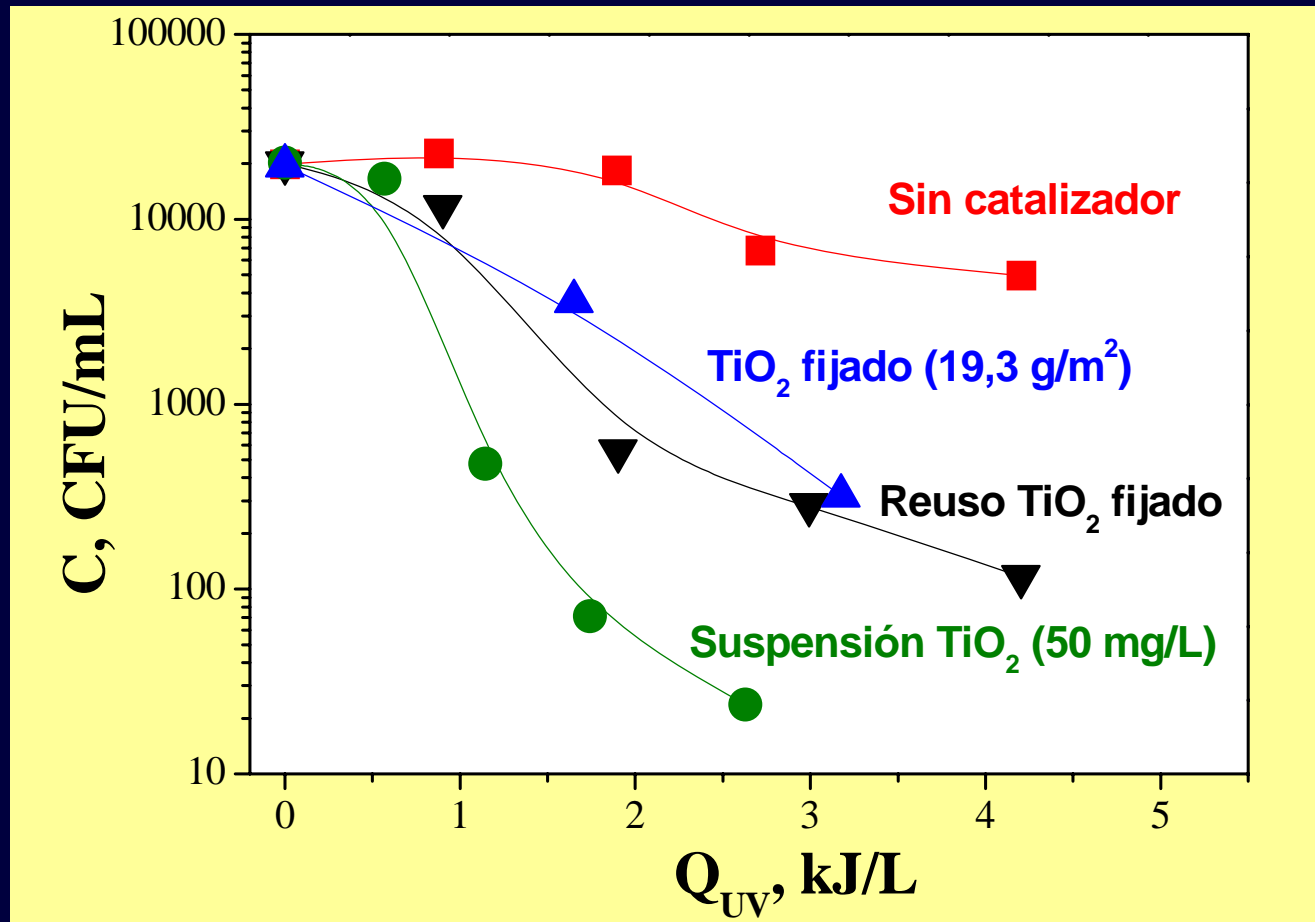
30

A mayor área iluminada, mayor eficacia del proceso de inactivación.

5. Experiencia con reactores solares



DESACTIVACIÓN CON TiO_2 DE *E. coli* EN UN REACTOR CPC



La inactivación de *E. coli* es más eficiente con TiO_2 que sin catalizador.

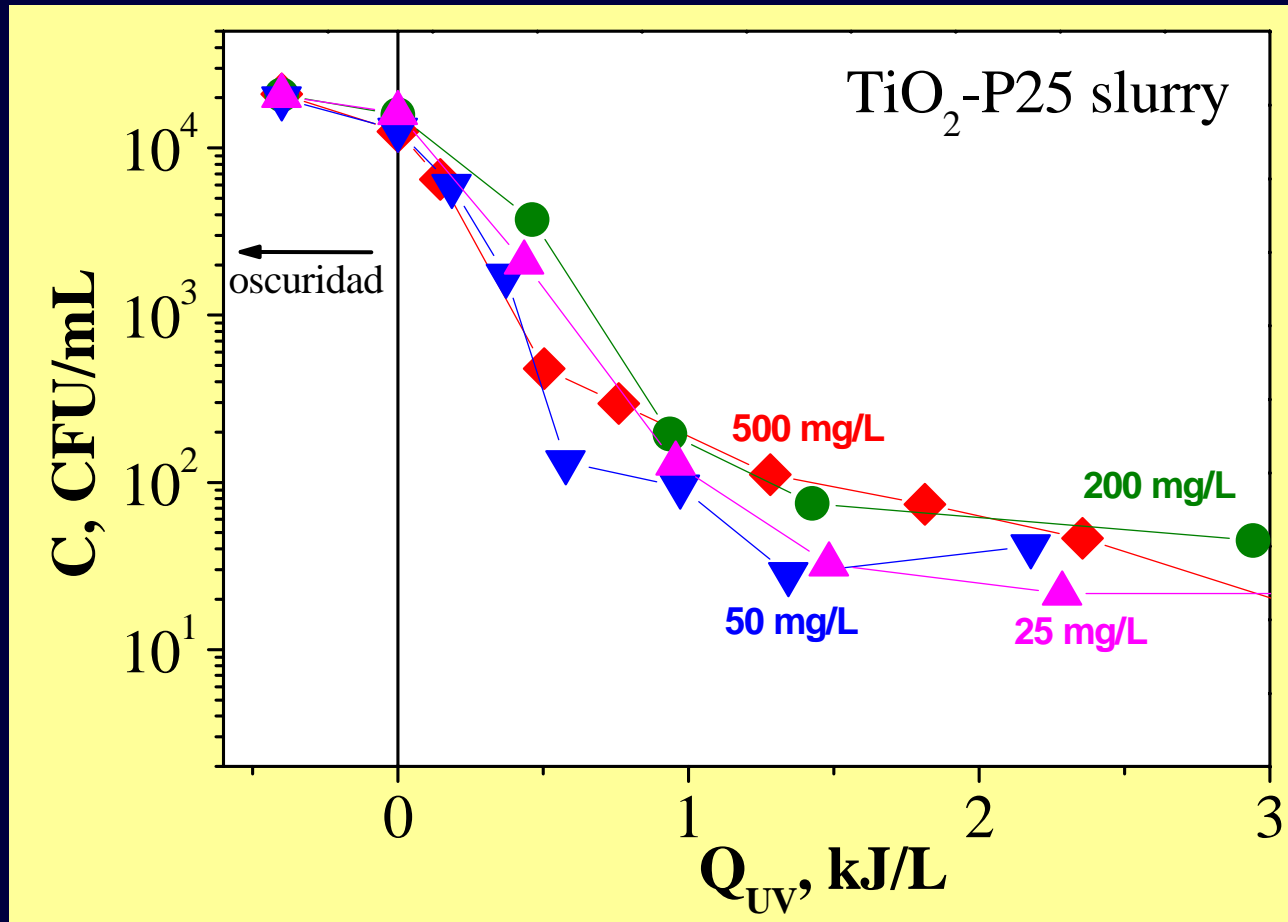
La suspensión de TiO_2 actúa de forma más rápida y eficaz que el TiO_2 fijado.

31

5. Experiencia con reactores solares



DESACTIVACIÓN DE *E. coli* CON SUSPENSIONES DE TiO_2

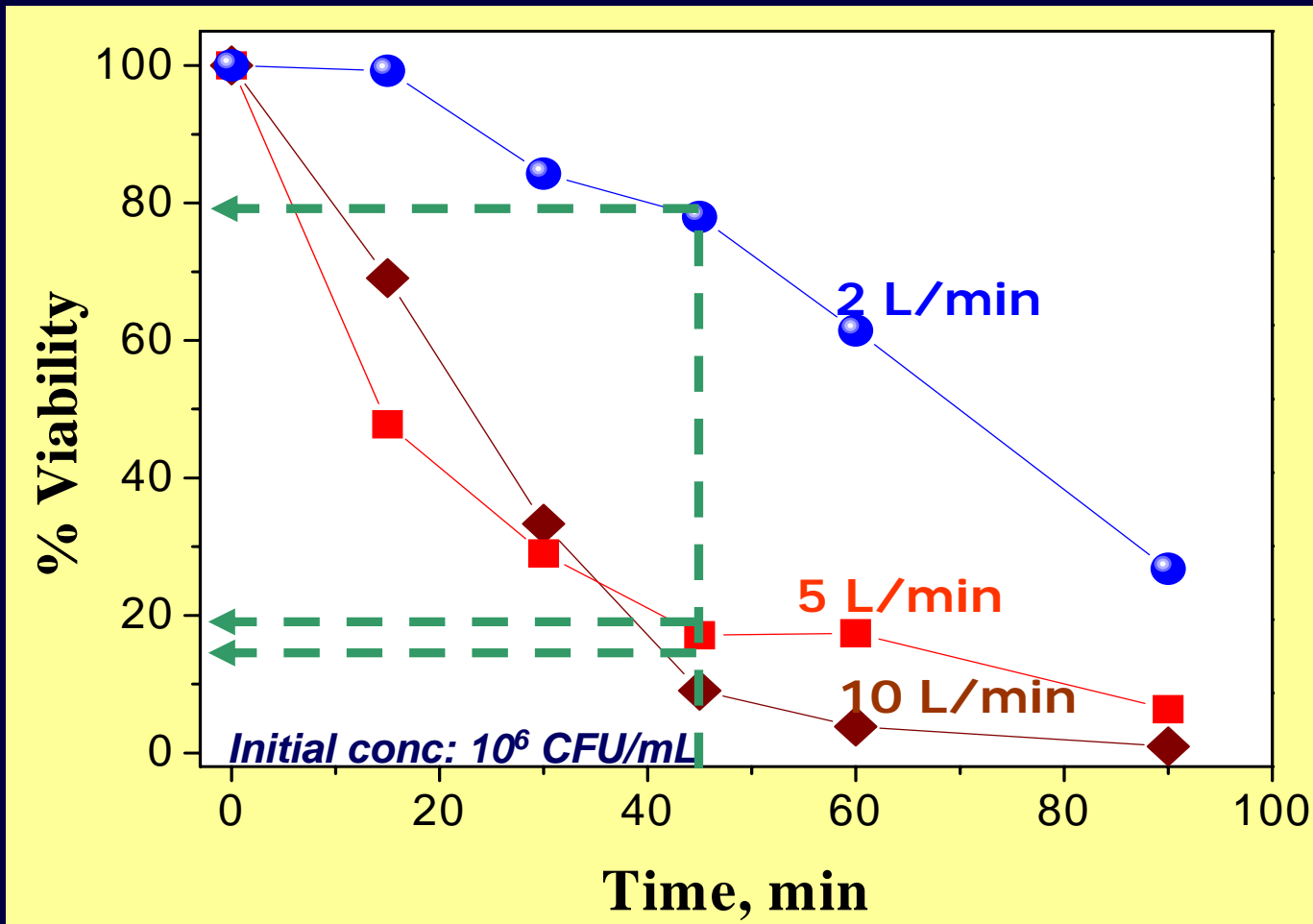


Existe una ligera tendencia de saturación del proceso a concentraciones de TiO_2 superiores a 50mg/L.

5. Experiencia con reactores solares



EFFECTO DEL CAUDAL (I)

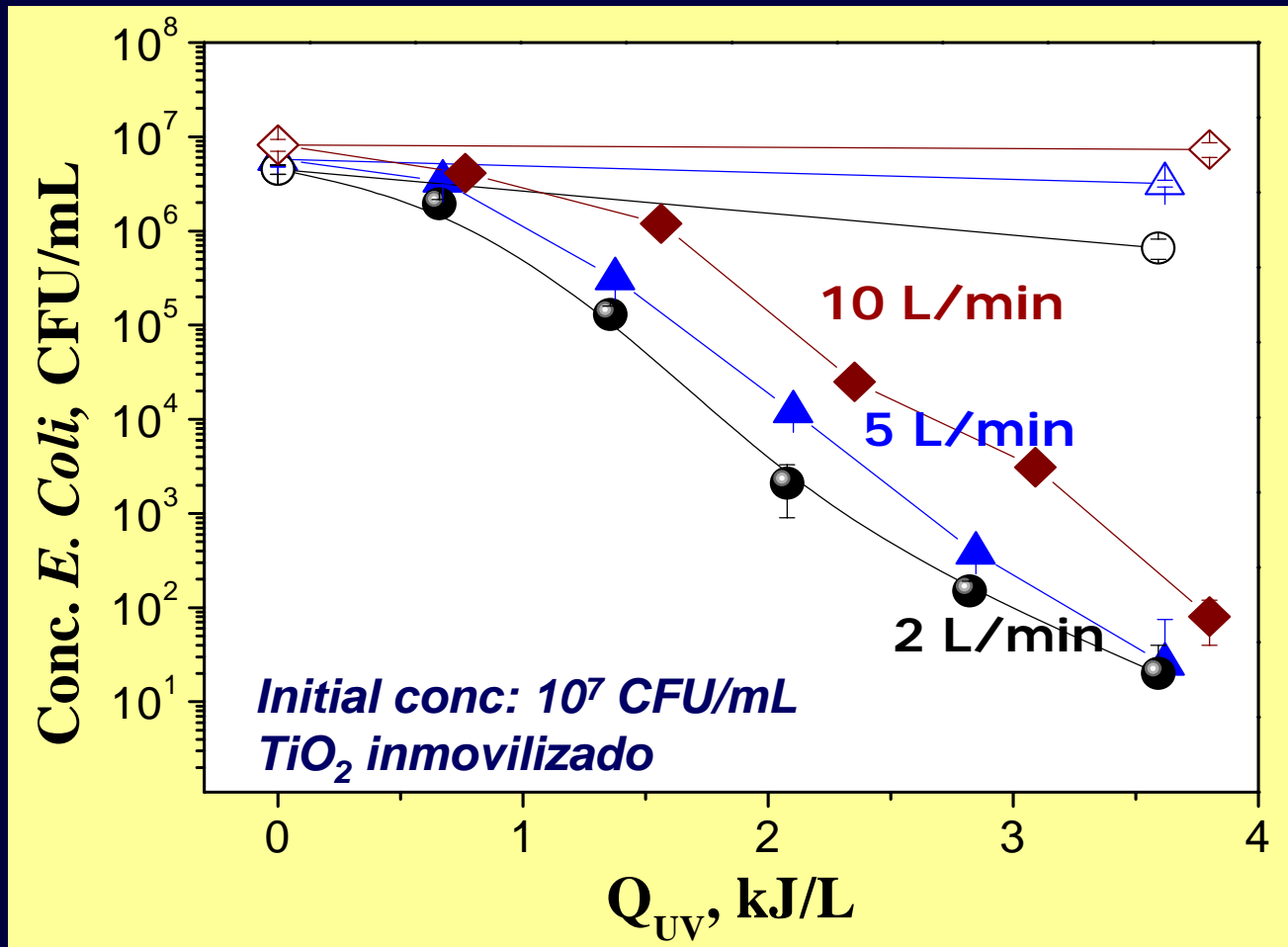


La viabilidad de las bacterias en oscuridad (sin catalizador) en el fotoreactor a distintos caudales muestra el efecto del estrés mecánico sobre la bacteria *E. Coli*.

5. Experiencia con reactores solares



EFFECTO DEL CAUDAL (II)

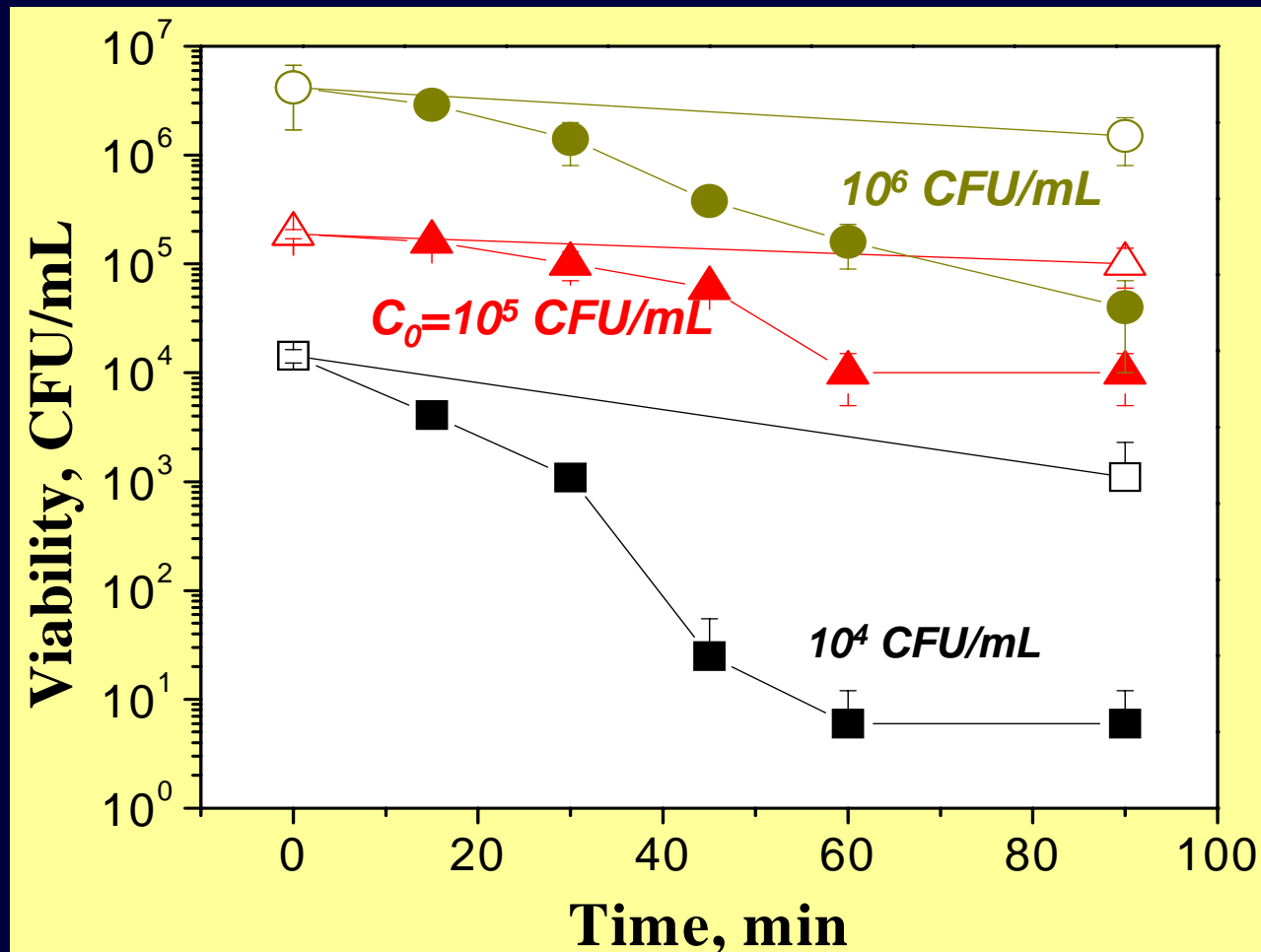


De forma opuesta, la desactivación fotocatalítica solar con TiO₂ inmovilizado es más efectiva al caudal más bajo evaluado.

5. Experiencia con reactores solares



CONCENTRACIÓN INICIAL DE BACTERIA (I)

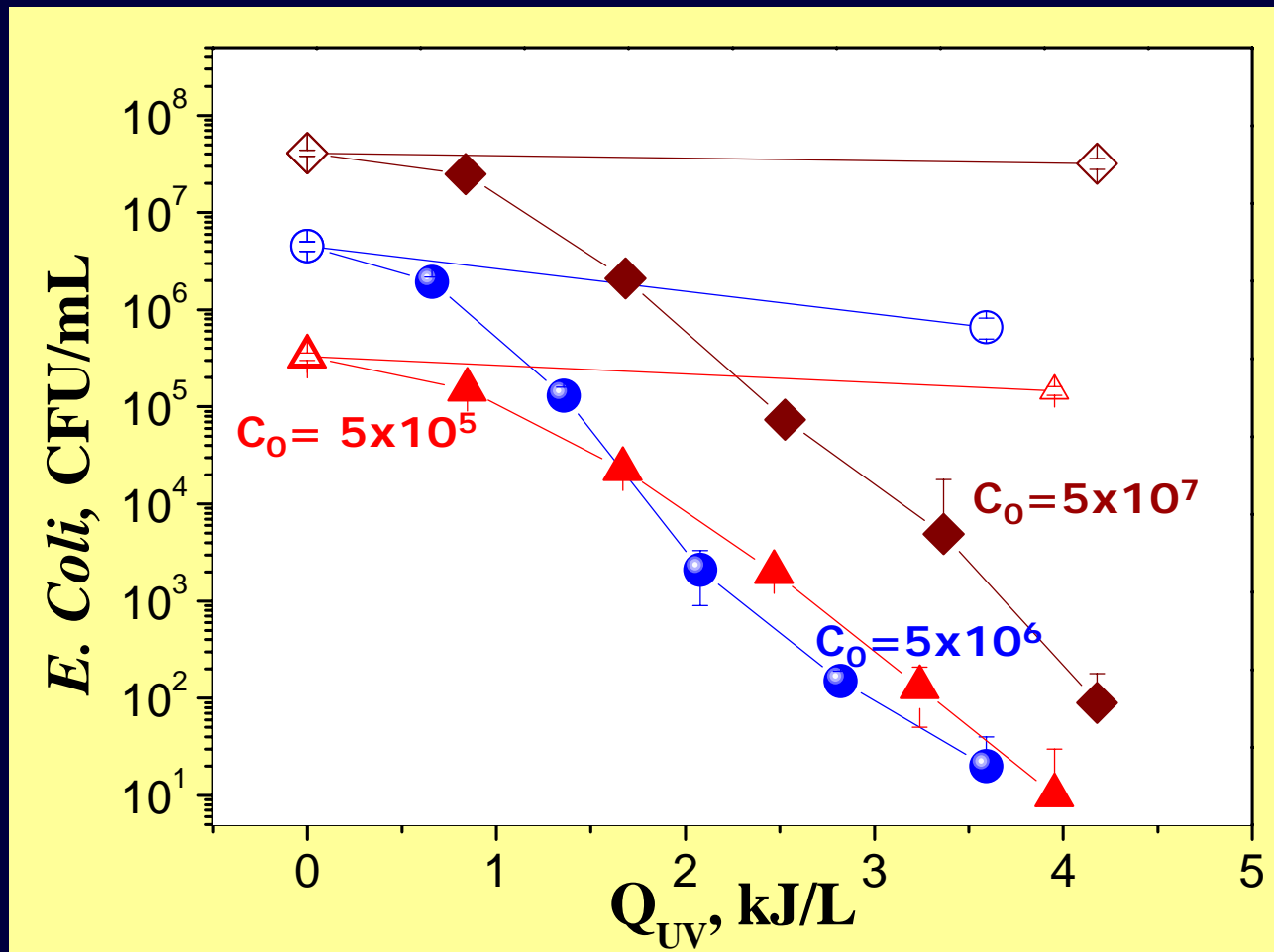


En oscuridad (10 L/min), la viabilidad de las suspensiones de E. Coli depende la concentración inicial de bacterias.

5. Experiencia con reactores solares




CONCENTRACIÓN INICIAL DE BACTERIA (II)



La eficiencia fotocatalítica con catalizador inmovilizado es proporcional a la concentración inicial de bacterias.

Índice

1. Introducción
2. Desinfección de aguas con fotocatalisis heterogénea
3. Mecanismos de desinfección
4. Metodología de trabajo
5. Experiencia con reactores solares
-  6. Conclusiones

6. Conclusiones



Agradecimientos

Comisión Nacional de Energía Atómica

EU Specific Support Action "SOLARSAFEWATER"
(INCO-CT-2004-510603)

EU Project "SOLWATER" (ICA-CT-2002-10001)

