



LIFE PureAgroH2O

# La investigación en el tratamiento de regeneración de aguas: estado actual

Prof. Dr. Sixto Malato  
Plataforma Solar de Almería  
[sixto.malato@psa.es](mailto:sixto.malato@psa.es)



GOBIERNO  
DE ESPAÑA

MINISTERIO  
DE CIENCIA  
E INNOVACIÓN

**Ciemat**

Centro de Investigaciones  
Energéticas, Medioambientales  
y Tecnológicas



## DESARROLLO INDUSTRIAL



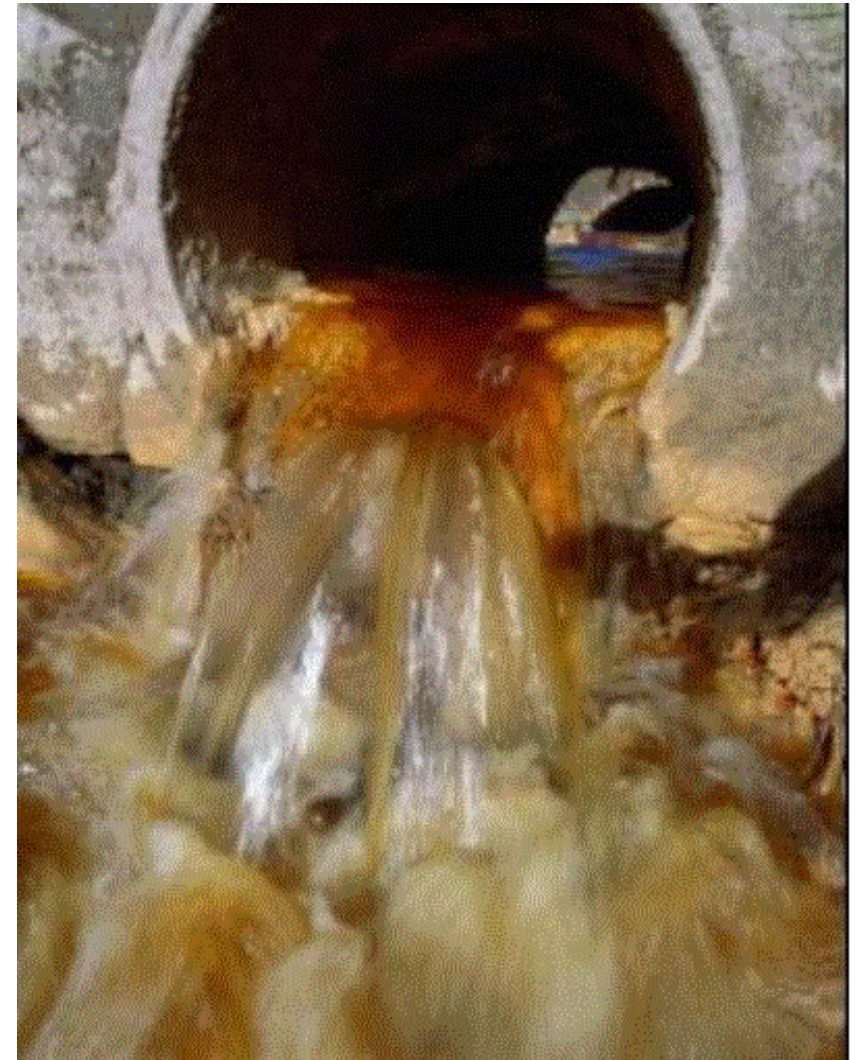
- ✓ La actividad industrial representa el 20% del consumo de agua
- ✓ Fuente de contaminación: vertidos industriales
- ✓ Tan solo el 20% de los vertidos de agua es tratado a nivel mundial
- ✓ Transición a una economía circular

**La economía circular:** modelo de producción y consumo que implica compartir, **reutilizar**, reparar, renovar y reciclar materiales y productos existentes todas las veces que sea posible para crear un valor añadido. De esta forma, **el ciclo de vida de los productos se extiende, minimizando la explotación de los recursos** y reduciendo la emisión de residuos contaminantes.



- Nitro y halofenoles.
- Metales pesados.
- Residuos de la industria farmacéutica.
- Lixiviado de vertederos.
- Disolventes (clorados, VOCs, etc).
- Colorantes.
- Residuos industria papelera.
- Alpechín.
- Plaguicidas.

(mg/L)



# PLAGUICIDAS



## Sustancias biodegradables:

- Biofiltros/ fangos activados

## Las sustancias NO biodegradables pueden ser

- No-tóxicas / inertes al tratamiento
- Tóxicas de manera instantánea (aguda)



## Sustancias biodegradables:

- Biofiltros/ fangos activados

## Las sustancias NO biodegradables pueden ser

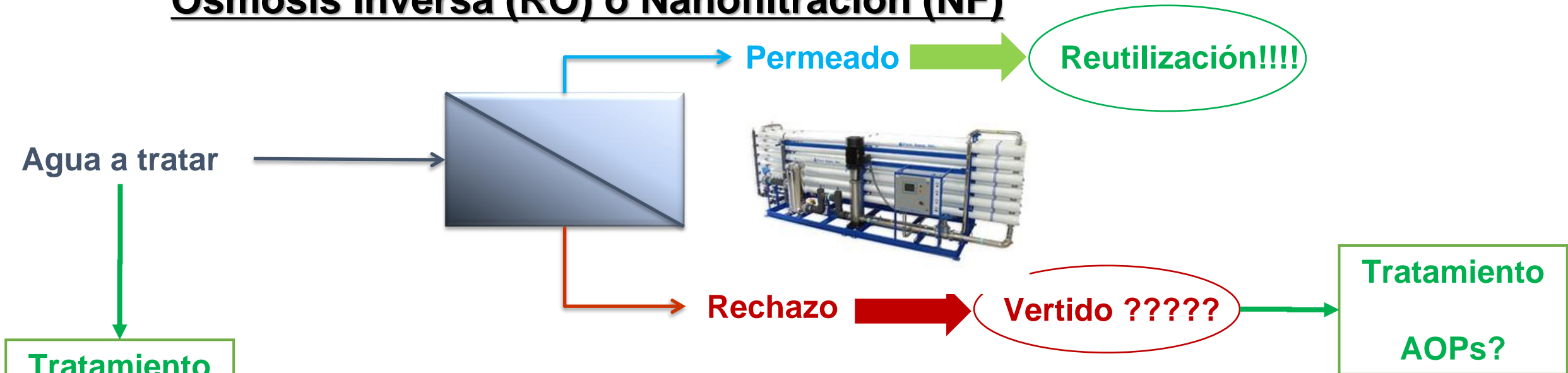
- No-tóxicas / inertes al tratamiento
- Tóxicas de manera instantánea (aguda)
- Tóxicas a largo plazo (crónicas)

Tratamientos  
alternativos

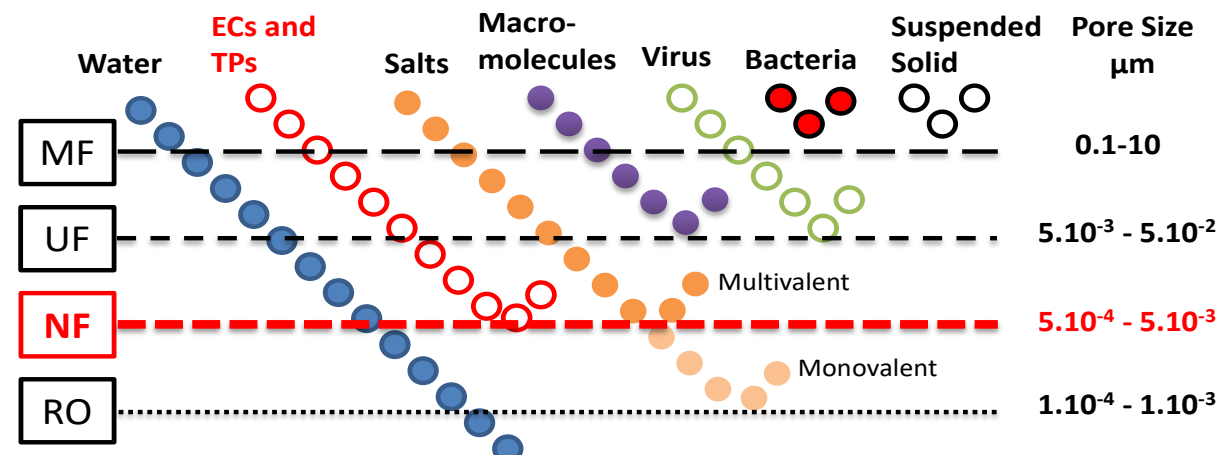


- I. Agua no biodegradable conteniendo grandes macromoléculas que son persistentes por su tamaño y ausencia de centros activos.**
- II. Agua biodegradable conteniendo pequeñas concentraciones de sustancias biorecalcitrantes.**
- III. Agua tóxica que contiene compuestos que impiden los tratamientos microbiológicos.**
- IV. Agua residual que contiene sustancias específicas y sus metabolitos que pudieran acumularse e inhibir el crecimiento de microorganismos.**

# Ósmosis Inversa (RO) o Nanofiltración (NF)

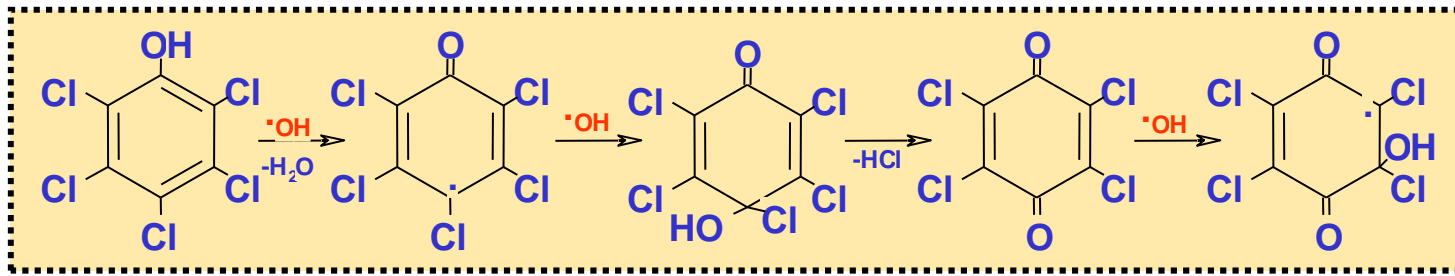


Tratamiento AOPs?



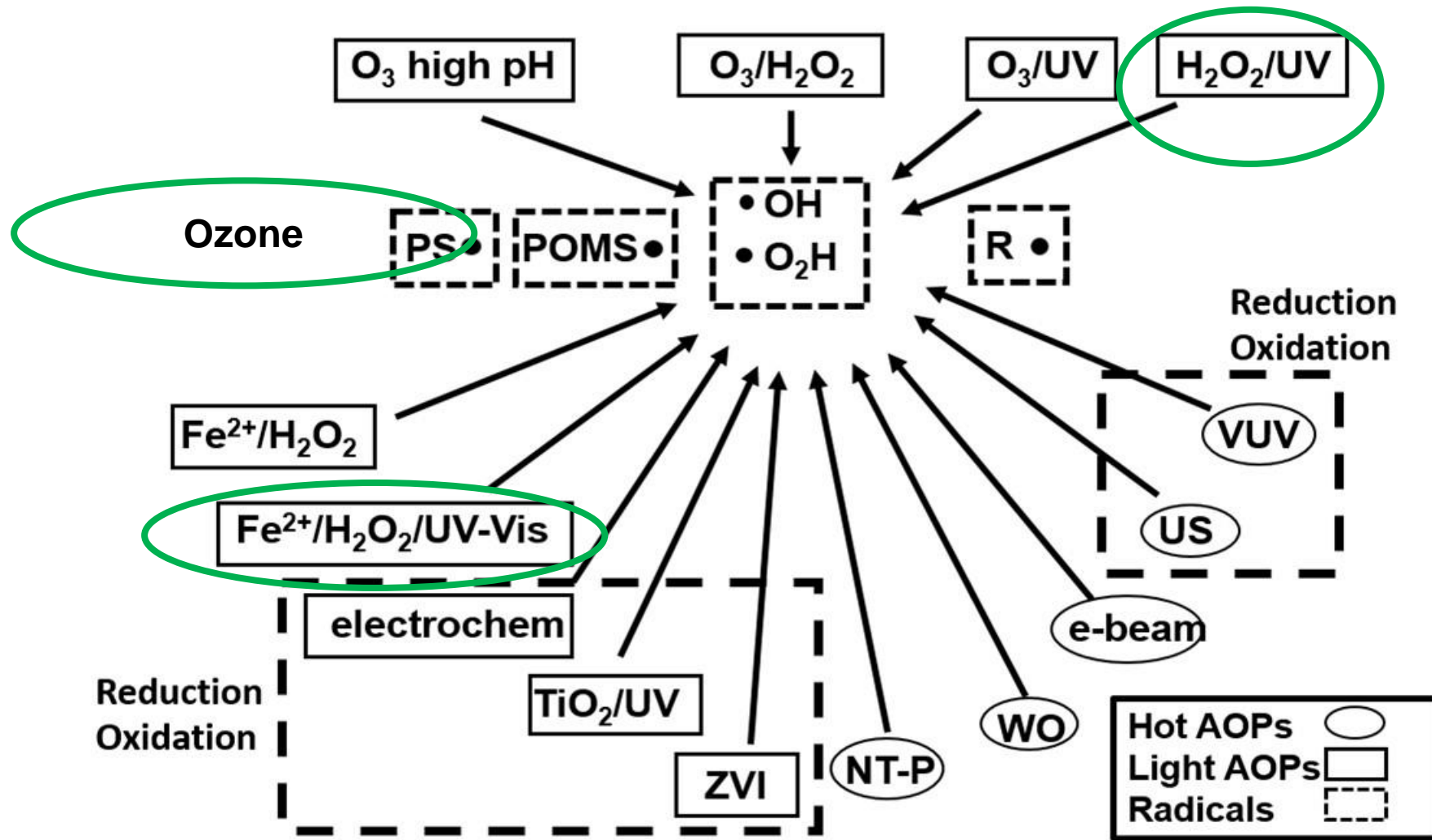


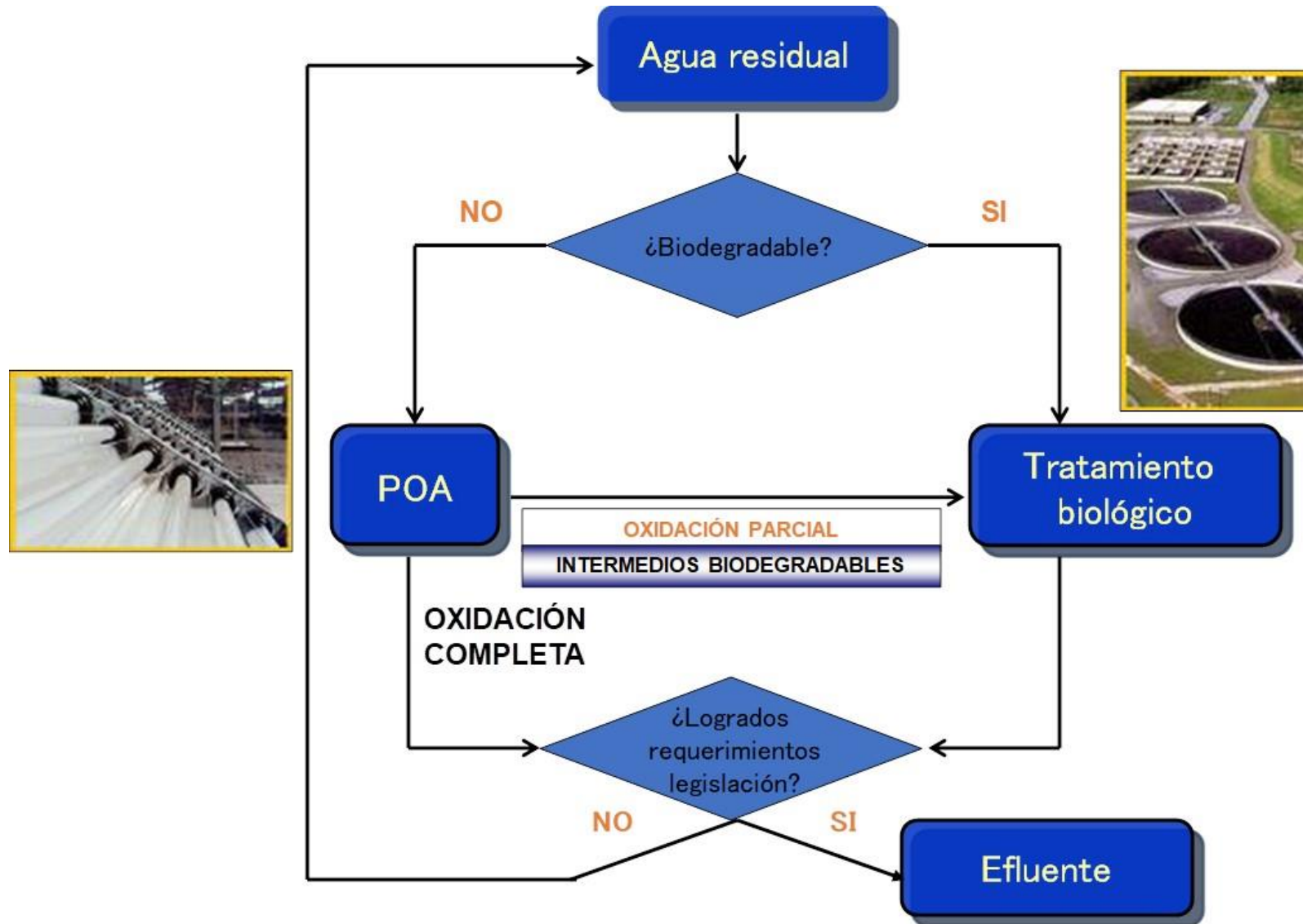
“Procesos de tratamiento de agua a temperatura ambiente y presión atmosférica que generan radicales hidroxilo ( $\cdot\text{OH}$ ), en suficiente cantidad para purificar el agua”

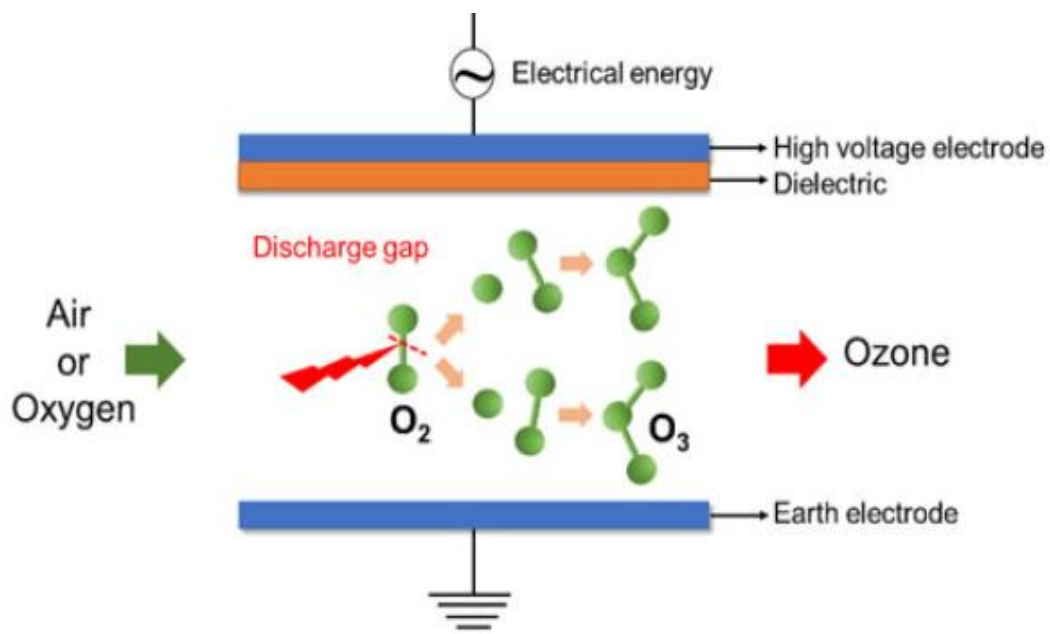


CO<sub>2</sub>  
Acidos inorgánicos  
Agua

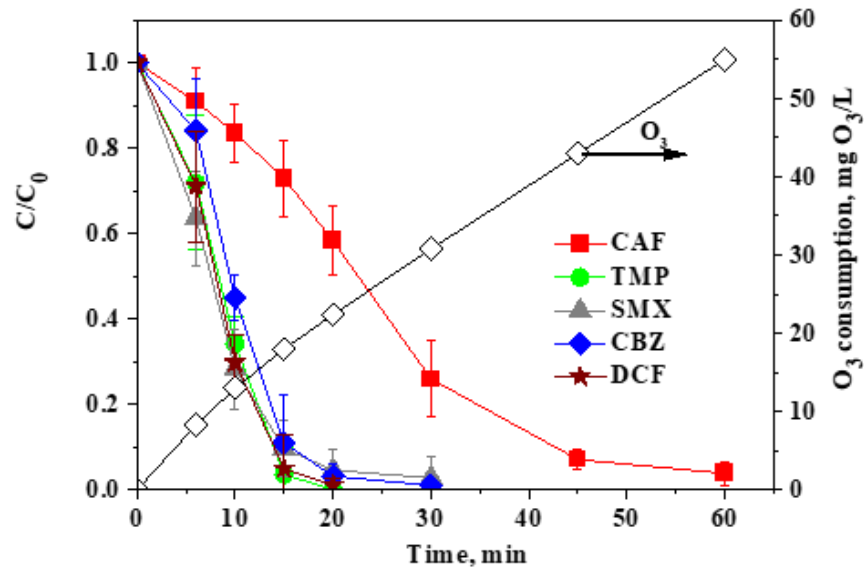
Especie	Potencial de Oxidación
Flúor	2.23
<b>Radical hidroxilo</b>	<b>2.06</b>
Oxígeno atómico	1.78
Peróxido de Hidrógeno	1.31
Radical peróxido	1.25
Permanganato	1.24
Ácido hipobromoso	1.17
Cloro dióxido	1.15
Ácido hipocloroso	1.10
Cloro	1.00
Bromo	0.80
Iodo	0.54







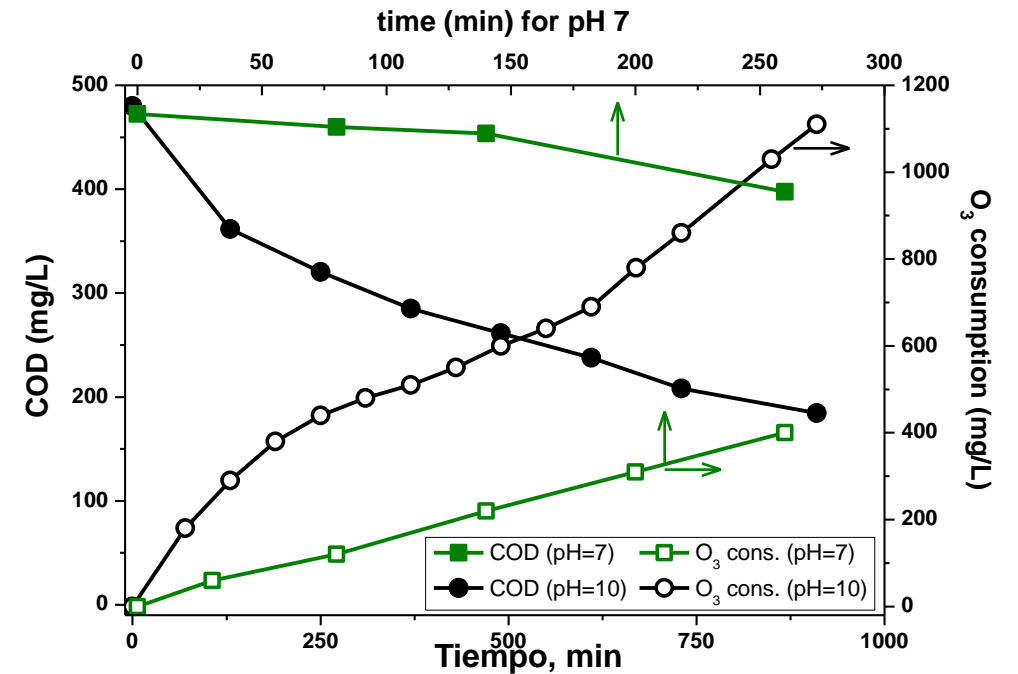
### Concentración baja

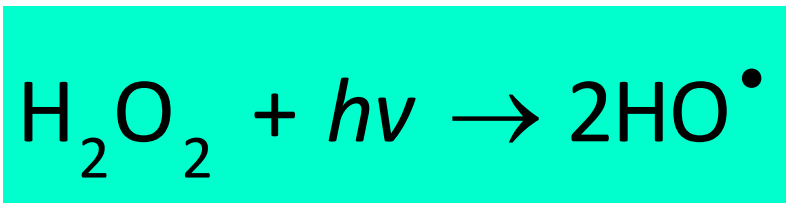
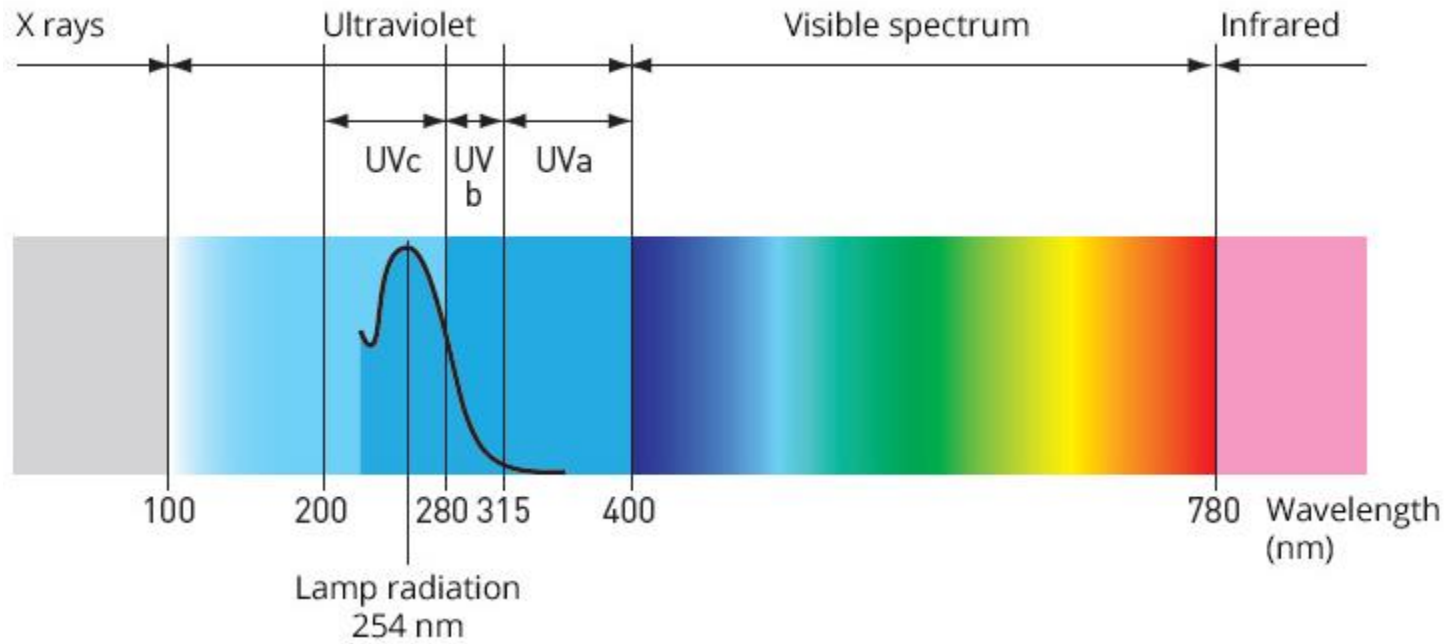


Cafeina (CAF), Trimetoprim (TMP), Sulfametoxazol (SMX), Carbamacepina (CBZ), Diclofenaco (DCF)

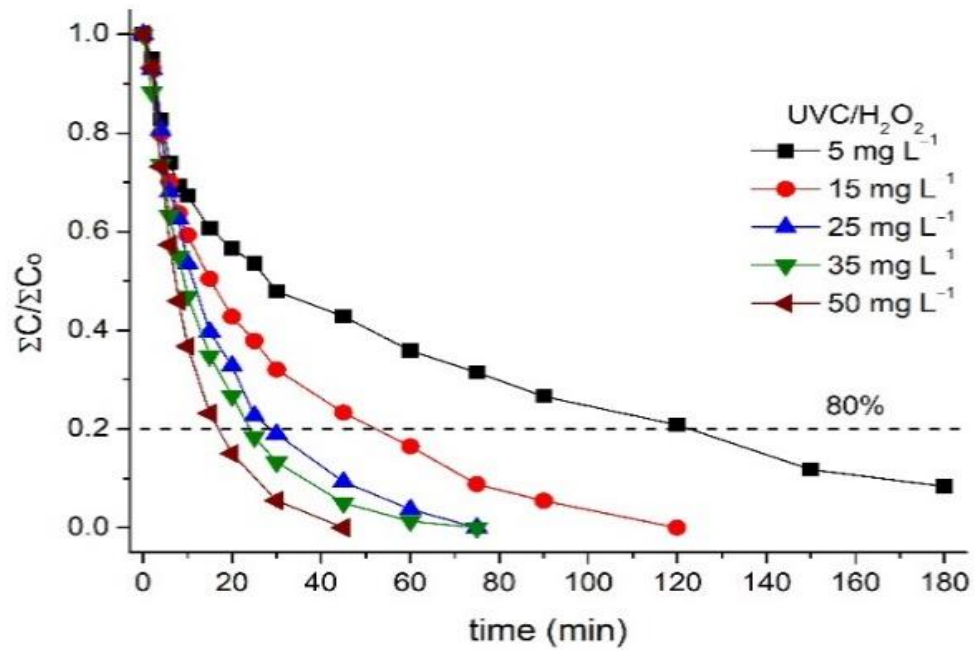
100 µg/L cada uno

### Concentración alta

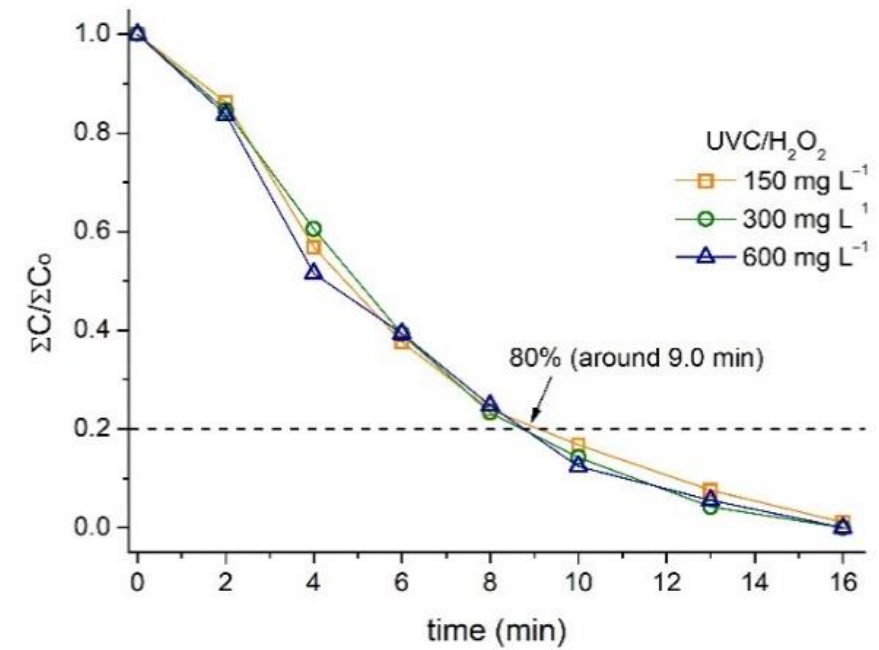




### Dosis H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> baja



### Dosis H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> alta



acetaminofen + cafeina + carbamacepina + trimetoprim + sulfametoxazol + diclofenaco

100 µg/L cada uno

UV-C

- Baja eficiencia en la eliminación de CEC.

Cl<sub>2</sub> libre  
(Cloración)

- Baja eficiencia en la eliminación de CEC.
- Generación de subproductos tóxicos: trihalometanos (THM).

UV-C/  
Cl<sub>2</sub> libre

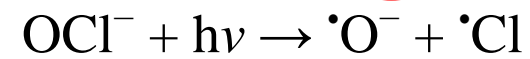
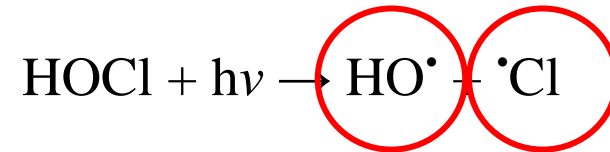
- **Combinación poco estudiada en la eliminación de CEC.**
- **Efecto de la radiación UVC en la formación de THM.**

En riego agrícola, las aguas regeneradas pueden ser almacenadas durante horas/días antes de su utilización.

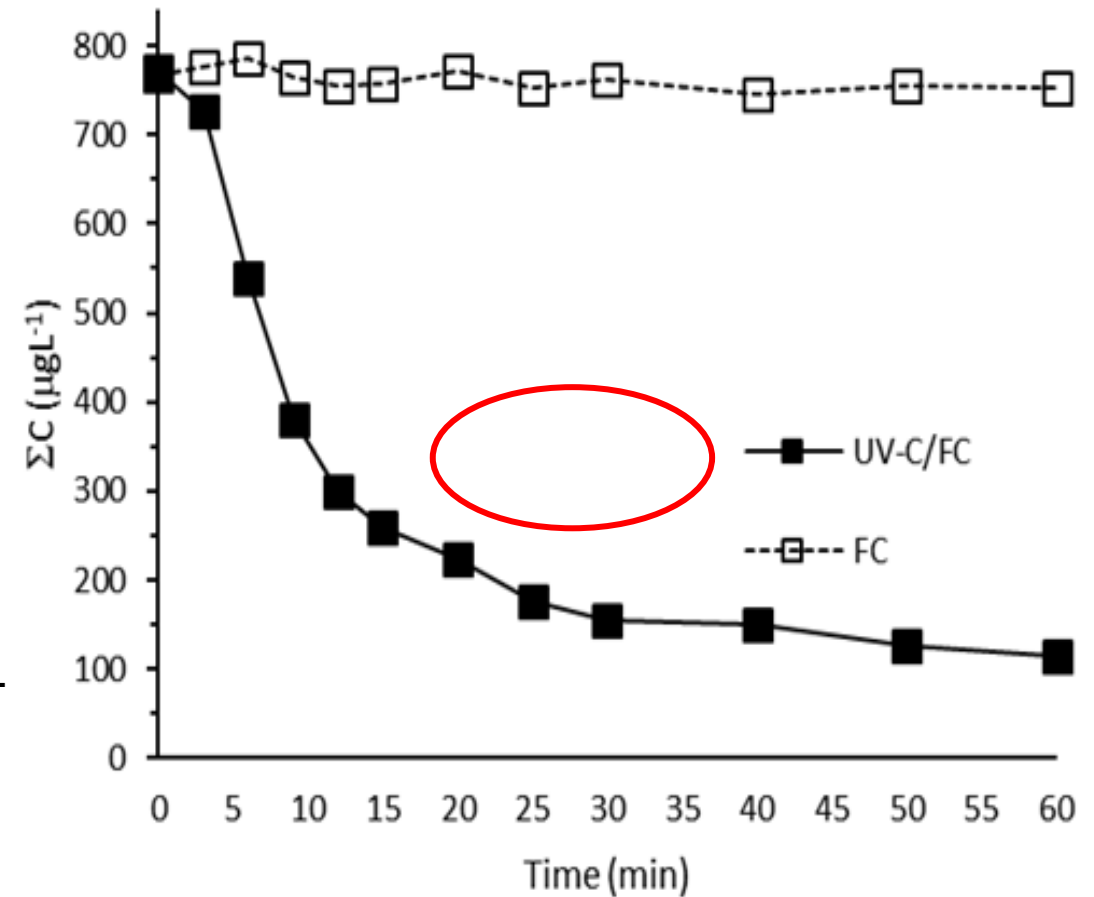


**OBJETIVO:** Evaluación de la combinación **UV-C/Cl<sub>2</sub> libre** en la descontaminación de ARU





Carbamacepina,  
diclofenaco,  
sulfametoxazol e  
imidacloprid. 200 µg/L  
cada uno



## Formación de THM durante el almacenamiento del agua regenerada

Cl<sub>2</sub> residual: formación de THM post-tratamiento

Cl<sub>2</sub> libre

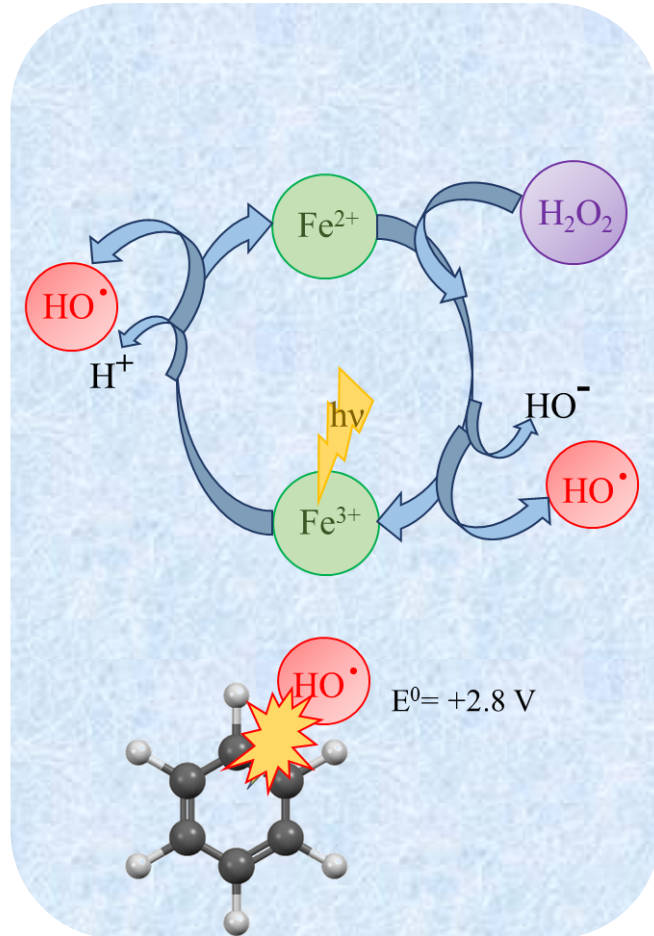
Aumento tras 24 y 48 h de cloroformo y diclorobromometano

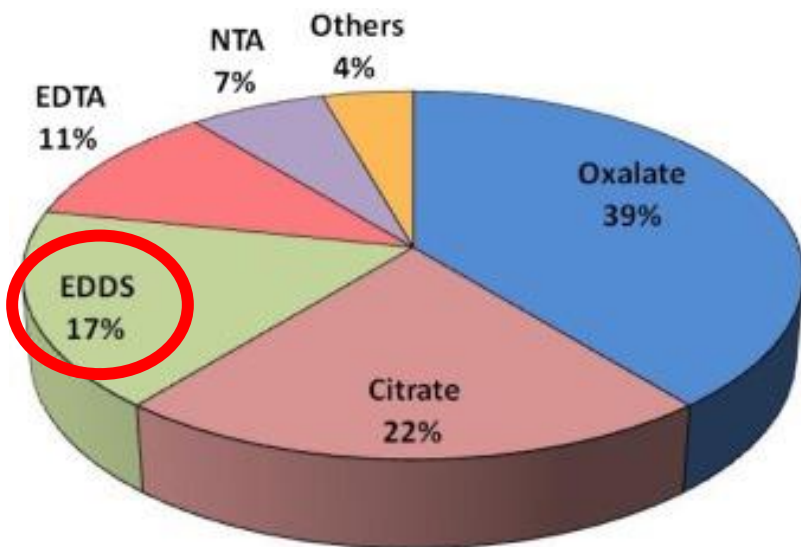
Formación post-tratamiento tras 48 h de dibromoclorometano y bromoformo

UV-C/Cl<sub>2</sub> libre

**No se detectan THM** tras los mismos tiempos de almacenamiento

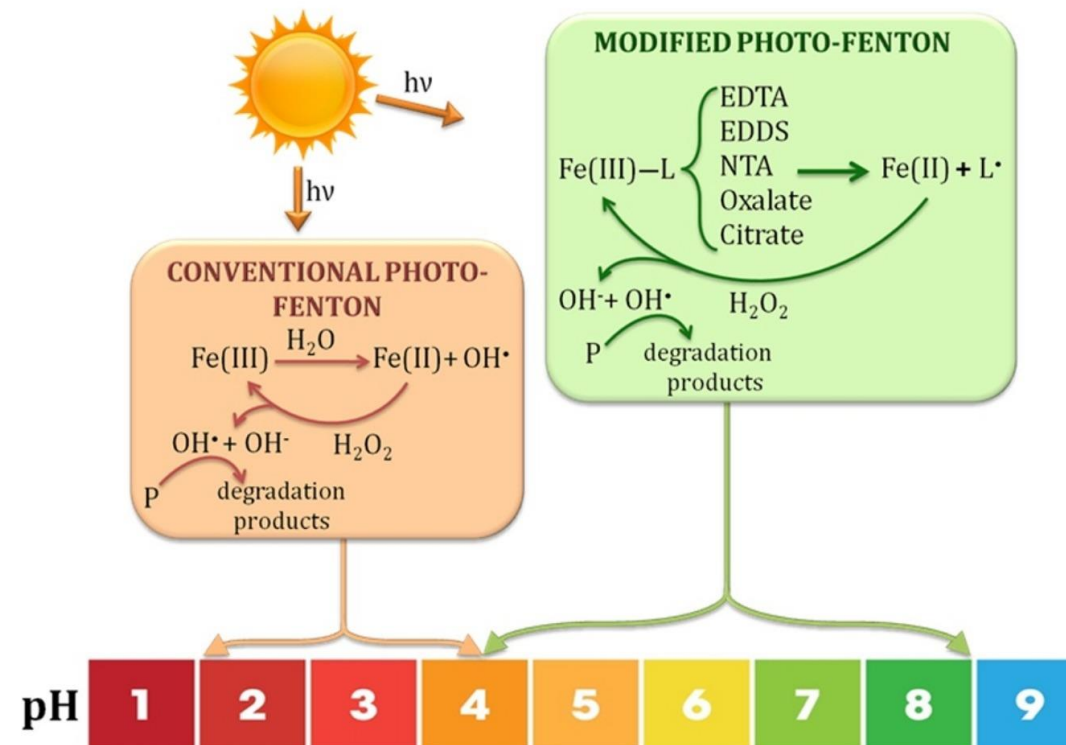
Tratamiento terciario para regeneración de agua con posterior almacenamiento





Fe<sup>3+</sup> forma complejos con diferentes ligandos, algunos de ellos fotoactivos.

- Se mantiene Fe<sup>3+</sup> en disolución en un intervalo amplio de pH.
- Pueden tener rendimientos cuánticos mayores que los complejos de Fe<sup>3+</sup> con agua.
- Formación de especies oxidantes adicionales.





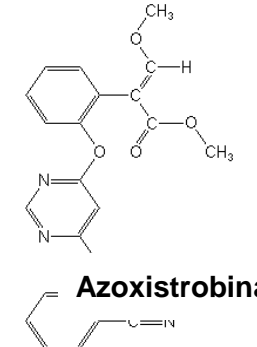
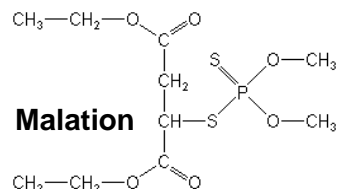
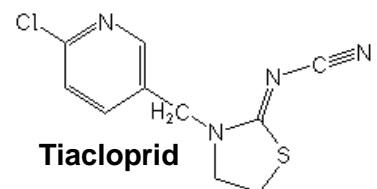
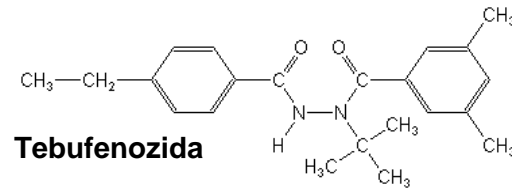
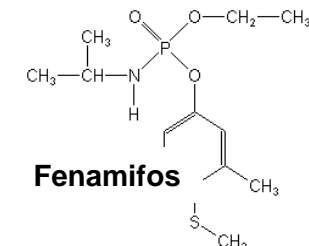
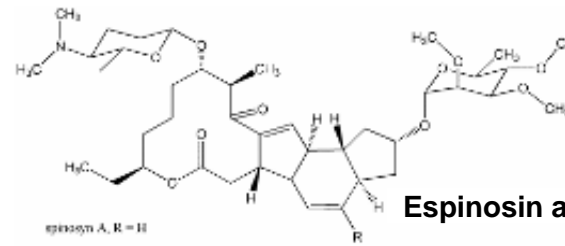
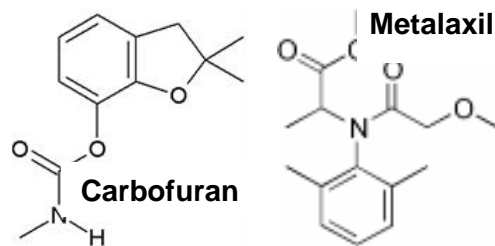
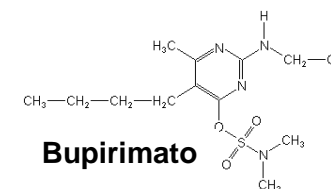
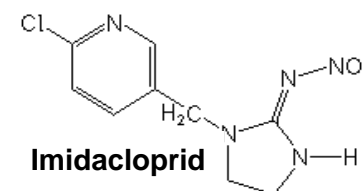
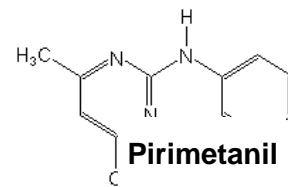
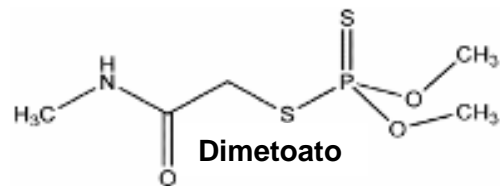


**Concentración alta (mg/L).  
Agua de toxicidad relevante.**

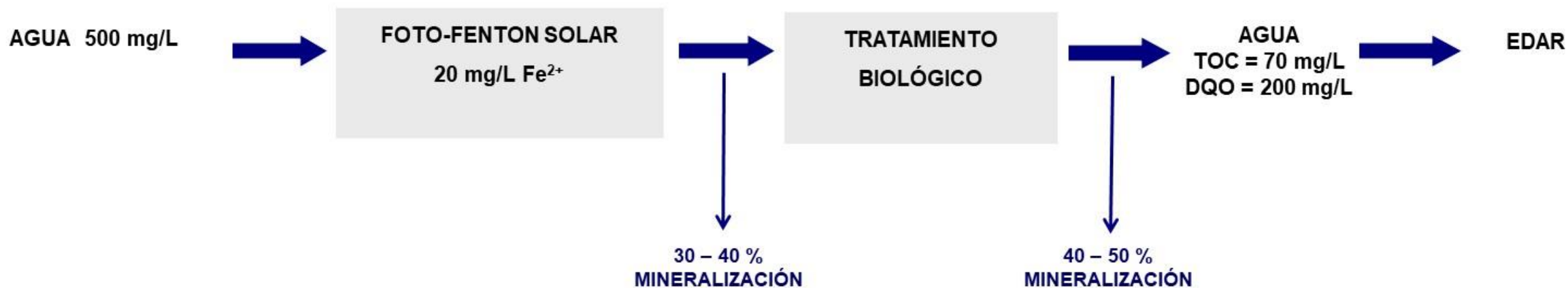
**Concentración baja ( $\mu\text{g/L}$ ). Agua no tóxica.**



Plaguicidas en agua, concentración alta



TOC<sub>0</sub>: 500 mg/L

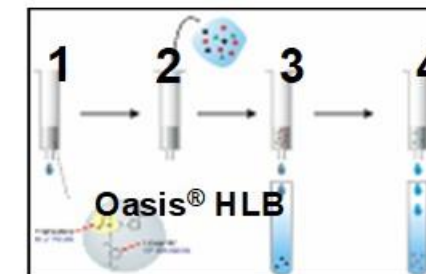




## Efluente final

Compuesto	% Reducción FF	% Reducción FF/BIO
Imidacloprid	89.2	>99
Dimetoato	85.2	>99
Pirimetanil	75.2	81
Tiacloprid	69.8	84.2
Carbofuran	71.4	>99
Metalaxil	71.4	>99
Espinosin a	62.9	>99
Bupirimato	71.1	>99
Fenamifos	66.7	>99
Azoxistrobina	73.3	>99
Malation	83.3	>99
Tebufenocida	63.5	>99

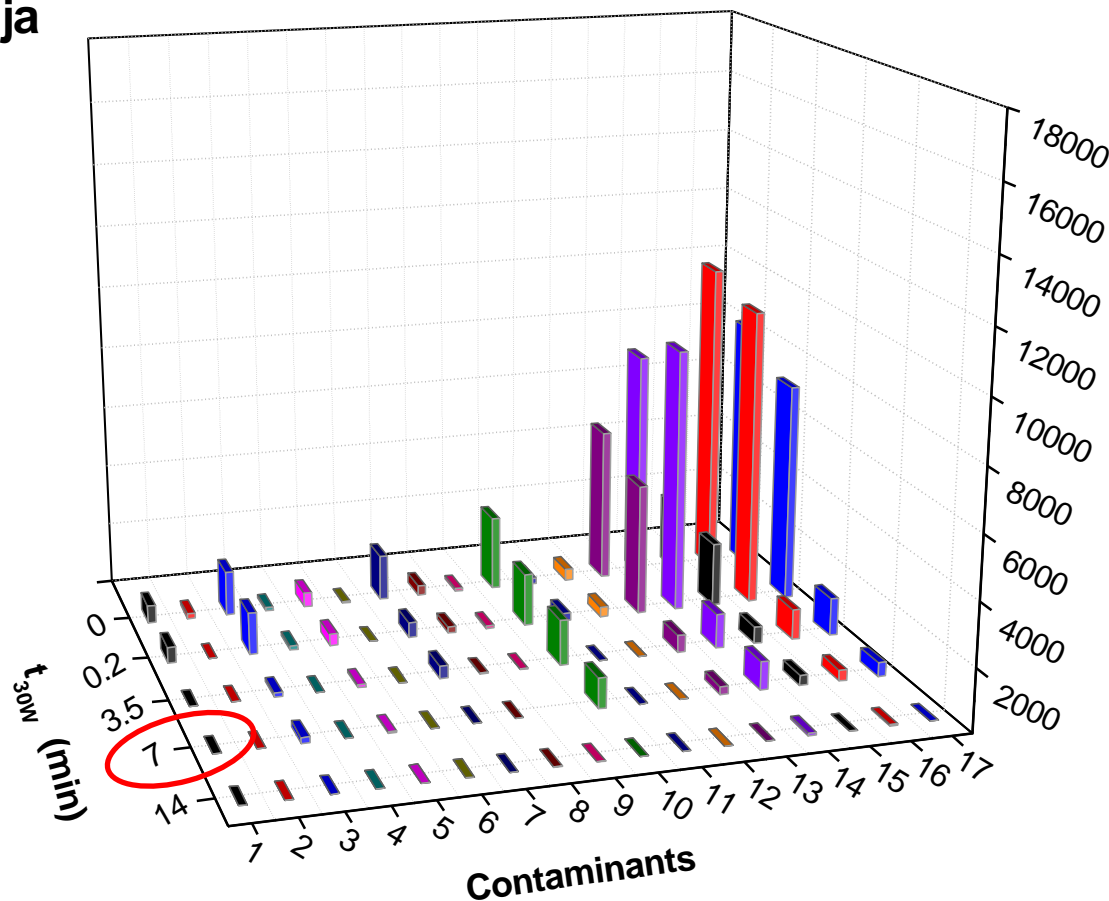
## Extracción S-L



## LC – TOF – MS (ESI+)



## Plaguicidas y otros contaminantes en agua, concentración baja



- 1-Bisphenol A;
- 2-Ibuprofen;
- 3-Hydrochlorothiazide;
- 4-Diuron;
- 5-Atenolol;
- 6-4-AA;
- 7-Diclofenac;
- 8-Ofloxacin;
- 9-Trimethoprim;
- 10-Gemfibrozil;
- 11-4-MAA
- 12-Naproxen;
- 13-4-FAA;
- 14- $\Sigma C$ ;
- 15-4-AAA;
- 16-Caffeine;
- 17-Paraxanthine

$C_1$  a  $C_{17} > 1000$  ng L<sup>-1</sup>.

14=  $\Sigma C$  = resto de contaminantes  $< 1000$  ng L<sup>-1</sup>

# Mensaje para llevar a casa



Se debe realizar una **evaluación profunda del problema específico** a resolver para enfocarse en la opción de tratamiento óptima

**Se dispone de tecnología** para depurar las aguas correctamente y permitir reutilización segura.

Las diferentes tecnologías basadas en AOP muestran una alta eficiencia como tratamiento terciario para la eliminación de contaminantes de todo tipo, pero una **evaluación económica y del ciclo de vida debe respaldar la selección final.**



Las herramientas microbiológicas y analíticas avanzadas aplicadas a la evaluación del tratamiento de aguas residuales industriales permiten el diseño y la estimación del rendimiento de **tecnologías modernas e integradas.**

Almería cuenta con el know-how, contrastado internacionalmente: **PSA + CIESOL (UAL)**