

Trabajo Fin de Máster
Máster en Ingeniería Ambiental

Agua regenerada como producto para extinción de incendios forestales

Autor: Juan José Gallardo Galán

Tutora: Carmen Arnaiz Franco

Departamento de Ingeniería Química y Ambiental
Escuela Técnica Superior de Sevilla
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2019





Trabajo Fin de Máster
Máster en Ingeniería Ambiental

Agua Regenerada como Producto para Extinción de Incendios

Autor: Juan José Gallardo Galán

Tutora: Carmen Arnaiz Franco

Departamento de Ingeniería Química Ambiental

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2019



Trabajo Fin de Máster: Agua Regenerada como Producto para Extinción de Incendios

Autor: Juan José Gallardo Galán

Tutora: Carmen Arnaiz Franco

El tribunal nombrado para juzgar el Trabajo arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2019

El secretario del Tribunal



Tabla de contenido

1.	Introducción	1
1.1.	Objetivo del Trabajo Fin de Máster.....	1
1.2.	Contexto Histórico.....	1
1.3.	Conceptos generales del fuego forestal.....	7
1.3.1.	La reacción del fuego	7
1.3.2.	Triángulo del fuego	7
1.3.3.	Partes del incendio.....	7
1.3.4.	Clasificación de los incendios forestales	8
1.3.5.	Extinción del incendio	9
1.4.	¿Cuánto cuesta apagar un incendio forestal?.....	11
1.5.	¿Qué cantidad de agua es necesaria para extinguir un incendio forestal?	12
1.6.	Proyecto CILIFO	17
2.	Marco Legal	20
2.1.	Marco Legal Europeo	20
2.2.	Marco Legal Nacional.....	20
2.3.	Marco Legal Autonómico	22
3.	Necesidades de reutilización.....	23
3.1.	Desde un punto de vista ecológico	23
3.2.	Desde un punto de vista institucional.....	24
4.	Riesgos asociados al uso de agua residual regenerada.....	25
4.1.	Riesgo Ambiental.....	26
4.2.	Riesgo Sanitario	27
4.2.1.	Riesgo sanitario de origen biológico	28
4.2.2.	Riesgo sanitario de origen químico.....	29
5.	Tratamientos avanzados del agua.....	30
5.1.	Agua regenerada procedente de EDARs	30
5.1.1.	Biorreactores de Membrana (MBRs)	31
5.1.1.1.	MBR en La Barrosa	35
5.1.1.2.	MBR combinado con oxidación avanzada y con filtración por membranas.....	40
5.1.2.	Luz Ultra Violeta (UV).....	43
5.1.2.1.	EDAR de Mataró.....	46
5.1.2.2.	Caso en Colombia.....	47
5.1.3.	Ozonización	48
5.1.3.1.	Reutilización para riego agrícola en Cuba	50
5.1.4.	Procesos no convencionales	52



5.1.4.1.	Filtración por membrana más proceso de oxidación.....	52
5.1.4.2.	Estudio a planta piloto empleando esferas de titanio, filtración por membrana y oxidación avanzada.....	54
5.1.4.3.	Eliminación de microorganismos mediante aireación integrada en laguna	56
5.2.	Agua regenerada procedente de EDAMs.....	57
5.2.1.	Desinfección del agua salada mediante nanopartículas	61
5.2.2.	Desionización Capacitiva	67
6.	Propuesta de la calidad del agua.....	69
7.	Conclusiones.....	74
8.	Bibliografía	74
9.	Abreviaturas	78



1. Introducción

1.1. Objetivo del Trabajo Fin de Máster

El presente Trabajo Fin de Máster tiene como finalidad los siguientes objetivos:

- ✓ Describir la situación histórica de cómo los incendios forestales han afectado a la Península Ibérica.
- ✓ Analizar las tecnologías existentes para tratamientos avanzados de agua.
- ✓ Definir unos valores para los parámetros de agua reutilizable para extinción de incendios forestales, dado que no existe una legislación específica para ello.

Para la consecución de estos objetivos la metodología utilizada ha sido la siguiente:

- ✓ Búsqueda en bases de datos de importante relevancia internacional, tales como Scopus, Science Direct, o ResearchGate.
- ✓ Período de publicación. En la medida de lo posible, se ha recurrido a información publicada entre 2009 y 2019, es decir, en la última década, para así demostrar que los datos son recientes.
- ✓ Palabras clave. Se ha buscado en motores de búsqueda diversos conceptos tales como “desinfección”, “*firefighting water*”, “incendios forestales” o “tratamientos terciarios”. Tales conceptos han servido de ayuda para la realización de este trabajo.

1.2. Contexto Histórico

El año 2017 puede coronarse como año negro de incendios forestales a escala mundial, debido al tendente incremento en número de superincendios causados por el cambio climático. Los grandes incendios forestales se incrementaron casi un 200%, si se compara con la media registrada de los diez últimos años. Si se analiza al país vecino, Portugal, alrededor de 450.000 hectáreas quedaron calcinadas por los incendios, cuatro veces más en comparación con la década anterior.

En la Península Ibérica, la zona noroeste, comprendida por parte de Portugal y Galicia, fue la zona que más sufrió los estragos del fuego (Figura 1). A mediados de



junio de 2017, el fuego provocó la muerte de 64 personas en Portugal y 4 en Galicia, a los que se añadieron otros 43 portugueses en octubre de 2017.

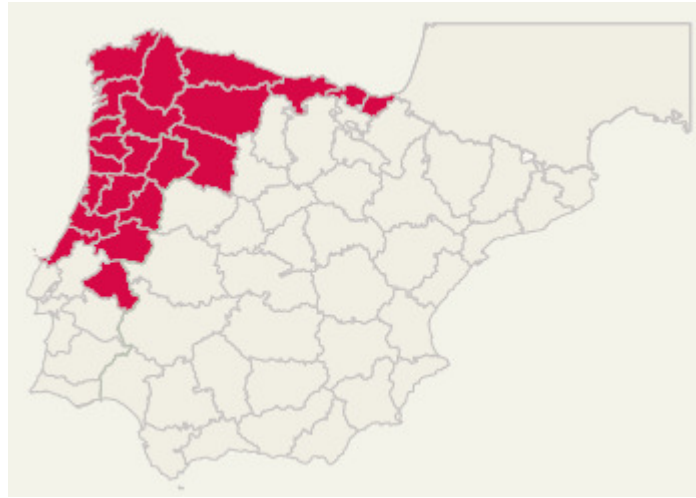


Figura 1. Provincias que comprenden el noroeste Ibérico en España y Portugal. Referencia: [WWF España].

La parte novedosa de este dato es que, a diferencia de los años 1995, 1998, 2000, 2003, 2005, 2006 o 2012, los incendios forestales se produjeron a finales de junio y mediados de octubre, fuera de la típica temporada de alto riesgo, comúnmente en julio y agosto (Figura 2). Es por esta misma razón que ya existe una nueva generación de incendios cuyo carácter resulta explosivo y extremo, propagándose las llamas velozmente, a causa del cambio climático.

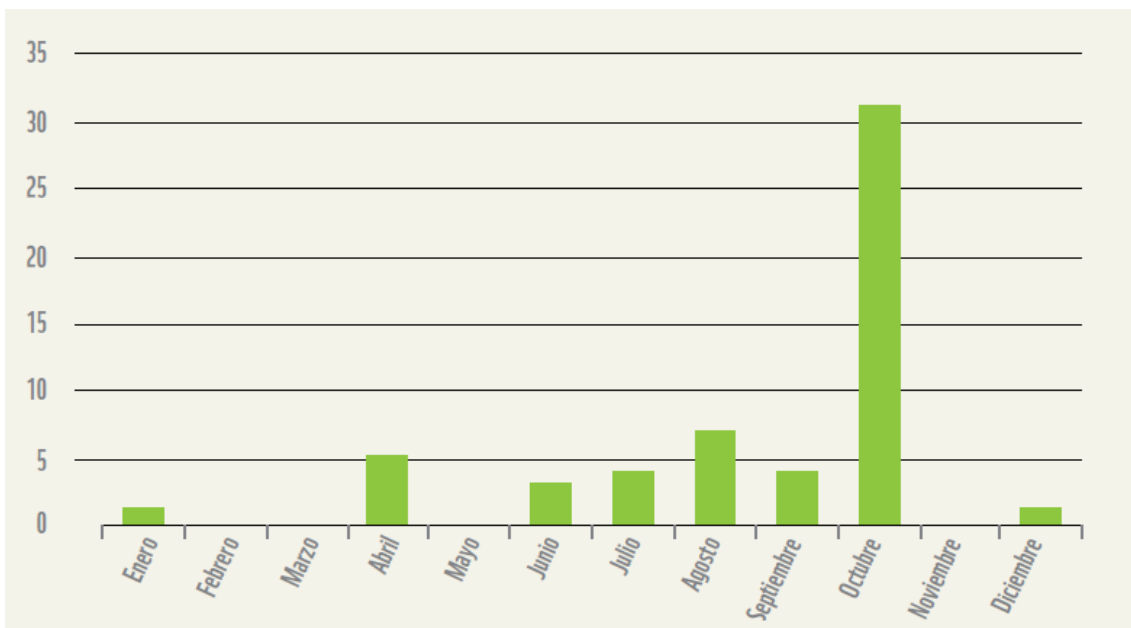


Figura 2. Distribución mensual de los grandes incendios en 2017. Referencia: [WWF España].



De los 100 municipios españoles donde se registraron más incendios en 2017, 94 se ubican en Galicia y Asturias. En Galicia, el 80% de los fuegos fueron intencionados (Figura 3).

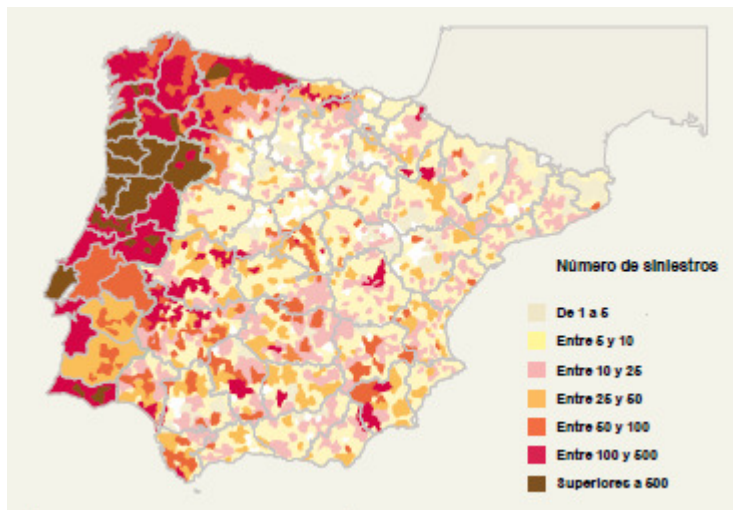


Figura 3. Número de incendios por término municipal en España y por regiones en Portugal (2001-2010). Referencia: [MAPAMA].

Para que se produzca un incendio, debe existir una combinación de 3 elementos: alguien que, involuntaria o intencionadamente prenda fuego (solo el 4% de los incendios se producen por causa natural en España, reduciéndose dicho porcentaje a la mitad en Portugal), un terreno inflamable, y que se den condiciones favorables para que las llamas se propaguen.

El noroeste se ha convertido en territorio inflamable debido a los siguientes motivos [1]:

Aldeas en vías de extinción. La despoblación y envejecimiento de la Galicia rural deriva en un abandono de las actividades agrícolas, suponiendo esto una mayor desatención del terreno.

Abandono forestal. A mediados del siglo pasado, se repoblaron muchísimas hectáreas con árboles de crecimiento rápido como el pino o el eucalipto, para la producción de papel. En su momento tuvo un impacto positivo en el entorno debido a que estas especies evitaron fenómenos erosivos, se redujeron las probabilidades de inundación, y generaron materias primas de buena calidad tales como madera o celulosa. A día de hoy esas actividades ya no resultan tan rentables como antaño por lo que miles de hectáreas han sido abandonadas a su suerte, reinando así una completa ausencia de planificación y gestión forestal. Consecuencia de ello es que abunda la biomasa muerta, suponiendo esto combustible para que el bosque arda.

Abandono agrario. El abandono de cultivos y pastoreo contribuye al aumento de superficie susceptible de sufrir un incendio.



Desorganización territorial. Hay muchas zonas de contacto entre terreno urbano y forestal. La mayoría de la población gallega se concentra en zonas mixtas urbano y forestal. A esto hay que añadir el hecho de que los incendios son casi dos veces más frecuentes en la interfaz urbano-forestal. La magnitud del riesgo es por ende más elevada.

Condiciones bioclimáticas. En el noroeste de la península, Galicia, norte de Portugal y Asturias, los inviernos templados y húmedos provocan que la vegetación crezca velozmente, produciendo mayor combustible para el fuego. Esto es así hasta el punto en el que una zona quemada dos o tres años atrás, pueda volver a arder. Al mismo tiempo, hay periodos anuales con ausencia de lluvias, mayoritariamente en verano y a finales de invierno, más un invierno extremadamente seco. En el momento que coincide verano cálido y seco con frente atlántico de componente nordeste, llega caliente, seco e intenso, situación propicia para una fácil propagación de las llamas, alcanzando diariamente un promedio de 130 fuegos, con picos detectados de hasta casi 450 fuegos en un único día. Toda esta casuística hace de este territorio un polvorín frente a los incendios forestales.

En el sur de España, 24 de junio de 2017, en el término municipal de Moguer (Huelva), se registró un incendio que afectó al Parque Natural de Doñana, obligando al desalojo de 2.000 personas del Parador de Mazagón. El incendio afectó a 8.486 hectáreas de matorral y arbolado, siendo 6.761 hectáreas las perjudicadas del Parque Natural de Doñana y el resto de superficie calcinada pertenecientes al Paraje Natural Laguna de Palos y Las Madres (Figura 4). Según cálculos del INFOCA, dispositivo para la Prevención y Extinción de Incendios Forestales de Andalucía, el combustible potencial del incendio era de 43.225 hectáreas [2].

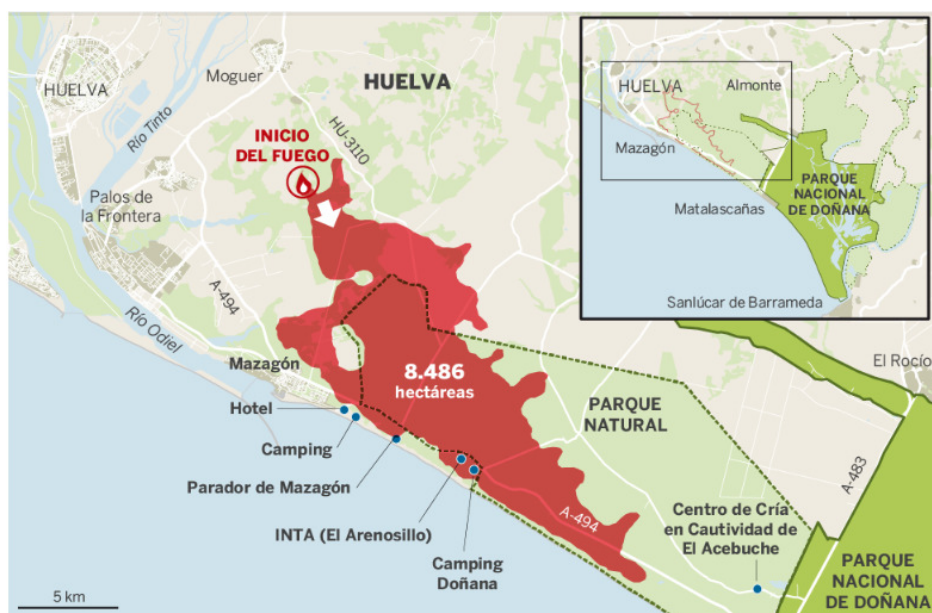


Figura 4. Representación gráfica del incendio que afectó al Parque Natural de Doñana. Fuente: [Comisión Europea. Junta de Andalucía]



En el verano del año en curso, 2019, ya se han declarado varios fuegos a gran escala, como por ejemplo el que se declaró el viernes 28 de junio en el municipio de Almorox (Toledo), donde se estima que unas 2.000 hectáreas han sido calcinadas. Se enviaron por parte de la Comunidad de Madrid, así como de la Delegación del Gobierno en Madrid, siete dotaciones con unas sesenta personas para colaborar en las labores de control del incendio. El viento y las altas temperaturas contribuyeron a que se originara el incendio. El tipo de vegetación, fundamentalmente pinar, ayudó a que el fuego llegara hasta el sur de la Comunidad de Madrid y el viento ayudó a que el fuego evolucionara en dirección a Rozas de Puerto Real, a poco más de 5 kilómetros de Cadalso [3].

Un día antes, el 27 de junio, en Tarragona, una mala gestión en un estercolero del municipio de la Torre de l'Espanyol, provocó que la gallinaza (excremento de gallina que hace posible la fermentación y el aumento de la temperatura) acumulada, entrara en autocombustión por el viento y calor, habiendo cerca también una amplia zona de vegetación, sinónimo de masa forestal disponible (Figura 5). Como dato de especial curiosidad, dicho fuego tuvo buena eficacia en cuanto a expansión se refiere debido a la regla del 30. Esto significa que hay más de 30 grados, humedad en el ambiente inferior al 30% y rachas de viento superiores a 30 kilómetros por hora. A día 28 de junio de 2019, los agentes rurales de Tarragona confirmaron que ya habían ardido 6.500 hectáreas de terreno [4].

Este verano de 2019, el incendio de mayor relevancia ha sido sin duda el surgido en la isla de Gran Canaria. Se declaró el día 17 de agosto, y a día 21 de agosto se tiene conocimiento de que ha arrasado ya 12.000 hectáreas y casi 10.000 personas han sido evacuadas desde el comienzo del incendio, se sabe también que tiene un perímetro de 78 kilómetros, en la Figura 6, se puede visualizar mejor cómo ha afectado dicho incendio a la isla. Se han llegado a observar llamas de hasta 50 metros de altura, afectando a municipios tales como Moya, Valleseco, Firgas o Agaete. El gobierno canario ya ha declarado catástrofe ambiental sin precedentes en la isla, que, en una primera valoración, afectando a sesenta especies vegetales terrestres endémicas de Gran Canaria, como la magarza plateada de Artenara o la col de risco de Tamadaba. Este incendio, está catalogado como incendio de sexta generación, cuyas características principales tiene que ver con rápida expansión y su especial virulencia. El agravante principal es la acumulación de maleza, troncos secos u otros materiales altamente inflamables a causa del descuido de los campos y bosques, materias que son gasolina que magnifica el fuego y lo hace incontrolable. Según explica Florencio López, jefe de Protección Civil de las Islas Canarias, el incendio se dio un barranco, donde las cargas de combustible eran grandes. No obstante, el propio López asegura que la zona se puede recuperar en un plazo máximo de cinco años, ya que, a diferencia del ecosistema peninsular, el canario está mucho más familiarizado con el fuego. Según fuentes del 112 de Canarias, han participado en las labores de extinción del incendio unos 1.000 operarios y 14 medios aéreos, encargados de la descarga de agua hacia las zonas afectadas y otros, cuya función es coordinarlos, también se desplazaron a la isla 278 militares de la Unidad Militar de Emergencias (UME) [5].



Figura 5. Incendio en Tarragona medido a las 7:30 del día 28 de junio de 2019. Fuente: [Maps4News y Copernicus].



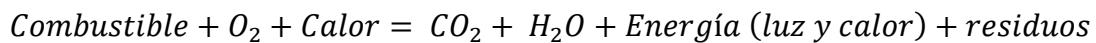
Figura 6. Superficie canaria afectada por el incendio. Referencia: [El Mundo]



1.3. Conceptos generales del fuego forestal

1.3.1. La reacción del fuego

El fuego forestal es una reacción química de oxidación rápida que involucra material vegetal. Consume oxígeno y genera dióxido de carbono y vapor de agua en forma de humo y emite luz y calor.



1.3.2. Triángulo del fuego

Cuando la temperatura del material está por encima de 300 °C, para el caso de la madera, la misma entra en combustión. Este proceso se conoce como reacción de combustión, químicamente llamado oxidación rápida, que incluye tres elementos: combustible, oxígeno como comburente, y calor. Dichos elementos constituyen el llamado triángulo de fuego (Figura 7).

Para llevar a cabo con éxito la extinción de un incendio, basta con anular un factor de los mencionados anteriormente.

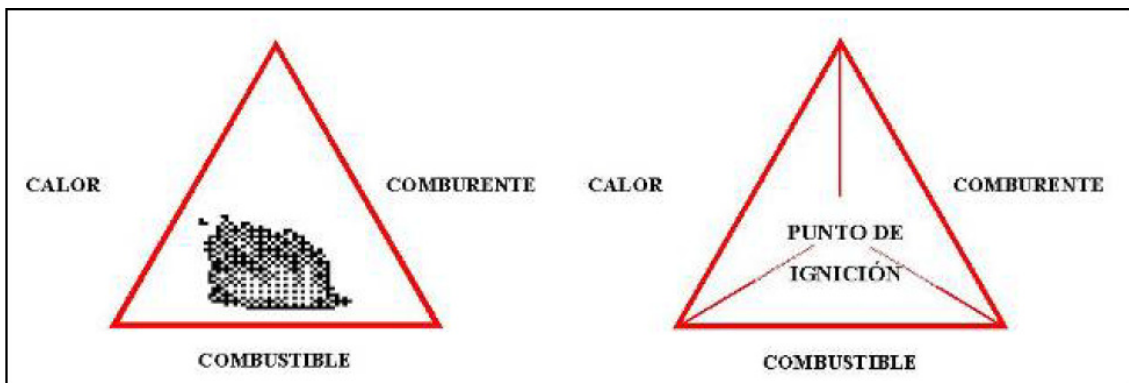


Figura 7. Presentación gráfica del triángulo del fuego. Fuente: [GEODEM].

1.3.3. Partes del incendio

En un incendio, se pueden diferenciar las siguientes partes (Figura 8):

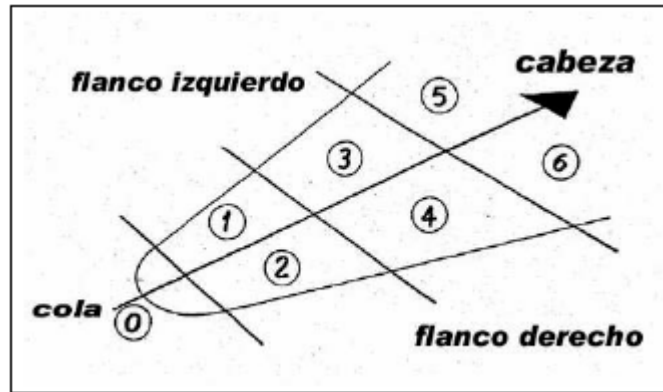


Figura 8. Partes de un incendio. Fuente: [GEODEM].

Si el fuego toma como eje de propagación la recta que une los puntos de inicio con la cola del incendio y si se toma como punto de vista la dirección del propio eje de propagación, se podrán diferenciar dos flancos, izquierdo y derecho.

Se suele hablar de línea de ignición de los combustibles, de escasa amplitud, separando el combustible en condiciones de arder del ya quemado, el cual ha liberado ya su energía en cuestión de segundos, y un frente de desecamiento, que avanza por delante del frente de avance, en este caso no visible. Este último generado por altas temperaturas transmitidas por radiación que desecan y matan rápidamente los vegetales predisponiéndolos para su combustión a la llegada del frente de avance.

1.3.4. Clasificación de los incendios forestales

Según la morfología del fuego en su inicio

La morfología del fuego sirve para predecir el futuro comportamiento del mismo. Esta característica será una de las primeras circunstancias a evaluar ante cualquier acción que se pueda realizar, para así garantizar una correcta extinción del mismo.

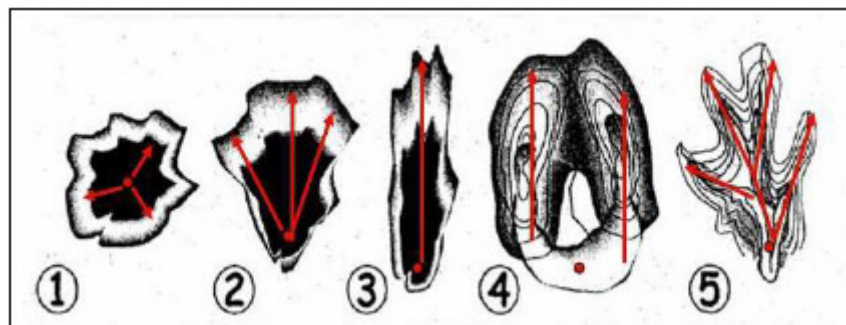


Figura 9. Clasificación de un incendio en función de su morfología. Fuente: GEODEM.



GEODEM clasifica los incendios en cinco categorías (Figura 9).

1. Incendios donde los efectos del viento y las pendientes no son relevantes.
2. Incendios donde los efectos del viento y/o la pendiente dominan.
3. Incendio dirigido por un viento fuerte.
4. Incendio sobre las crestas o lomas. Indica que los vientos generales son importantes.
5. Incendio que sigue los valles y los barrancos. Indica que los vientos de convección o topográficos controlan el incendio.

Según el combustible al que afecta

La clasificación se hace estudiando el combustible que propaga el incendio y que asegura su sostenibilidad:

- ✓ Fuegos de subsuelo: Consumen la materia orgánica y todo aquello que queda por debajo de la superficie del suelo (raíces, hojarasca, materia orgánica, etc.). Suelen ser de poca intensidad, pero duraderos, desde días hasta meses, se dan en zonas montañosas y no suelen ser muy frecuentes.
- ✓ Fuegos de superficie: La mayoría de incendios son de este tipo. Queman todo aquel combustible que se halle justo por encima de la superficie del suelo (hojas, ramas muertas, matorrales...). En estos casos, se precisa de una limpieza del suelo forestal para prevenir este suceso.
- ✓ Fuegos de copas: Queman las copas de los árboles (hojas, ramas y troncos) y pueden avanzar independientemente del fuego de superficie.

1.3.5. Extinción del incendio

La extinción de un incendio se lleva a cabo eliminando algún elemento del triángulo de fuego anteriormente descrito [6].



a) Eliminación de los combustibles.

Esta técnica consiste en crear una faja limpia hasta conseguir el suelo mineral, que es aquel que se interpone entre el fuego y la superficie forestal a proteger (Figura 10).

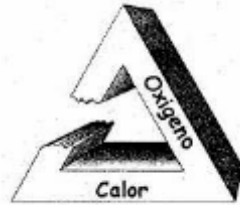


Figura 10. Componentes Oxígeno-Calor en el triángulo de fuego. Fuente: [GEODEM].

b) Eliminación del aire.

Se trata de evitar el aporte de oxígeno, aire en este caso, al combustible en ignición (Figura 11). Es por tanto un ataque directo. Hay básicamente dos métodos: recubrir el combustible, con tierra o con agua y golpear el combustible con la intención de ahogarlo.

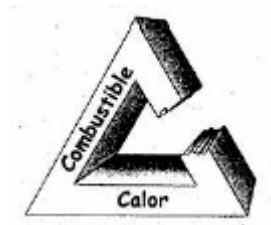


Figura 11. Componentes Combustible-Calor en el triángulo de fuego. Fuente: [GEODEM].

c) Eliminación del calor.

Consiste en inhibir la reacción exotérmica, retardando la emisión de gases inflamables, mediante la aplicación de productos sobre el combustible, principalmente agua (Figura 12).

Se puede utilizar agua de manera directa sobre el fuego. El agua al evaporarse consume calor (540 cal/L que se retiran de la atmósfera), reduciéndose la temperatura y limitando la propagación del incendio, y llegando a extinguirlo si se usan elevadas cantidades de agua o el foco del incendio es pequeño.



También se puede usar agua indirectamente sobre el combustible antes de que queme, aumentando su contenido en agua, dada la higroscopicidad de la materia vegetal.

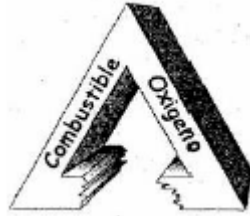


Figura 12. Componentes Combustible-Oxígeno en el triángulo de fuego. Fuente: [GEODEM].

1.4. ¿Cuánto cuesta apagar un incendio forestal?

Esta cuestión resulta de lo más interesante debido a que siempre se suelen presenciar multitud de incendios en España, pero rara vez se habla del coste que conlleva extinguir un incendio forestal.

Tomando como referencia datos ofrecidos por la Xunta de Galicia, en la provincia de Ourense, año 2013, apagar un incendio que afecte a una superficie de entre 20 y 30 hectáreas supone un gasto de 300.000 euros, según los datos que manejan brigadistas de distintos distritos forestales. Los medios aéreos se llevan la mayor parte de este dinero.

Los aviones e hidroaviones con capacidad para transportar entre 3.000 y 6.000 litros de agua cuestan desde 5.500 hasta los 6.000 euros por hora de trabajo, mientras que los helicópteros tienen una tarifa de entre 4.000 y 4.500 euros, dependiendo de su capacidad. En un fuego que afecte a 30 hectáreas, según los datos facilitados durante este verano por Medio Rural, suelen trabajar una media de cuatro aviones y otros tantos helicópteros durante cuatro y cinco horas en las tareas de extinción. El helicóptero o avión de reconocimiento y transmisiones cuesta 2.000 euros.

La factura en medios aéreos se sitúa en una media de 155.000 euros. Esta cifra se incrementa si las llamas se acercan a bienes no forestales, dado que suelen acudir más medios aéreos, como sucedió en Trives, Cualedro, Oímbra, o Entrimo, en los que llegaron a intervenir hasta 12 aeronaves a la vez.

Otros 145.000 euros, según los datos que manejan los brigadistas, se consumen en combustible para motobombas, bulldozer y palas, cuya hora de trabajo es de 60 y 100 euros, respectivamente, lo mismo que cuesta mover una brigada forestal siempre que tenga su base en la provincia. En la extinción de los incendios registrados en Cualedro, Entrimo, Muíños y Oímbra trabajaron brigadas desplazadas desde las



provincias de A Coruña y Pontevedra. En este caso, el coste (hay un desplazamiento) sube a los 150 euros a la hora.

La Xunta destinó 103 millones de euros a la lucha contra los incendios, un dinero que también se destina a convenios con los concellos, empresas e incluso el Ejército, dentro de la operación Centinela. Medio Rural firmó un convenio con Brilat para vigilar el monte, por importe de 500.000 euros. La mayor parte de los soldados patrullaron en la provincia de Ourense.

En Medio Rural aseguran no tener calculados los costes de cada incendio, pero sus trabajadores suman el gasto de cada motobomba municipal (100 euros por hora) y los brigadistas que están a las órdenes de los concellos. Medio Rural firmó convenios con la mayoría de los concellos de la provincia por importe de entre 6.000 y 10.000 euros para combatir las llamas [7].

Según M.Sueiro [8], se estima que el precio medio de extinción por hora de un gran incendio ronda los 50.000 euros. En el epígrafe gallego “Coste horario de gastos de extinción”, un agente forestal cuesta 24,72 euros la hora, una brigada de extinción helitransportada está valorada en 98,14 euros la hora, el uso de un avión Air Tractor 3.090 euros y un helicóptero Sokol 2.883,6 euros la hora.

En el incendio de 2013 en Boiro (A Coruña) participaron cuatro técnicos con un coste de 115,36 euros cada uno, 33 agentes forestales con un precio de 815,76 euros cada hora, 73 brigadas con un coste 5.697,24 euros, 54 motobombas por valor de 2.492,1 euros, 12 palas con un coste de 813,6 euros, 14 helicópteros con un precio de 23.733 euros y siete aviones por valor de 21.630 cada uno. Todos estos costes suponen un montante de 529.006 euros.

1.5. ¿Qué cantidad de agua es necesaria para extinguir un incendio forestal?

Esta cuestión nace como consecuencia de los catastróficos incendios forestales que se produjeron a escala mundial (California, Grecia, España o Australia) en el año 2017, como se ha comentado previamente. Para responder a esta pregunta, se recurre un artículo científico publicado en enero del año 2019 por la Universidad de Perth (Australia) [9].

Aunque muchos retardantes son usados durante un incendio, el agua sigue siendo el agente extintor por excelencia. Cuando se consideran los esfuerzos activos de supresión a alta intensidad en incendios forestales, solamente el enfriamiento de la superficie debería ser considerado ya que el agua evaporada se dispersa rápidamente y no afectará perceptiblemente a la temperatura de llama. Como resultado, aplicando la teoría del punto del fuego y considerando el calor radiante externo junto con el flujo de calor por convección, el ratio de flujo crítico, del inglés *Critical Flow Rate* (CF), medido en $\text{Lm}^{-2}\text{s}^{-1}$ se puede calcular para los supuestos incendios forestales



empleando la ecuación (1). CF es el ratio de flujo de agua que se precisa para extinguir una superficie que arde, con un período de tiempo disponible. Como el frente de llama varía en longitud y profundidad a lo largo del tiempo y queda influenciado por algunos factores que no se limitan al terreno, viento, estructura y geometría del combustible, el CF solo se puede calcular en un momento concreto.

$$CF = \dot{m}_{agua,cr,0} + \frac{\dot{q}_E}{\eta_{agua} \cdot L_{v,agua}} \quad (1)$$

Donde:

$\dot{m}_{agua,cr,0}$ es el ratio crítico de aplicación de agua sin asumir flujo de calor externo, tiene un valor de $0,0129 \text{ Lm}^{-2}\text{s}^{-1}$.

η_{agua} es el coeficiente de eficacia de aplicación del agua, representando la porción de agua que verdaderamente contribuye a la extinción de incendio, se toma un coeficiente de 0,7.

\dot{q}_E es el flujo de calor externo, se calcula empleando la ecuación (2).

$L_{v, agua}$ es el valor de la entalpía de cambio de fase del agua, cuyo valor es 2640 KJkg^{-1}

$$\dot{q}_E = \left(\frac{0,27 \cdot I}{2 \cdot L_f + D} \cdot \tau \phi \right) + \left(h \cdot (T_g - T_{fuel}) \right) \quad (2)$$

Donde:

I es la intensidad linear del fuego en kWm^{-1} , se calcula usando la ecuación Byram, ecuación (3), que se describirá posteriormente.

L_f es la longitud de la llama, en m, se calcula usando la ecuación (4).

D es la profundidad de la llama activa en m.

τ es la transmisividad atmosférica, de valor 1 dada la proximidad del combustible no quemado con respecto a las llamas.

ϕ es el factor paisaje, de valor 1 dada la proximidad del combustible no quemado con respecto a las llamas.

h es el coeficiente de transferencia de calor por convección establecido en $0,077 \text{ kW/m}^2\text{K}$ asumiendo una convección forzada y velocidad del aire a 10ms^{-1} .

T_g es la temperatura gas de la llama, valor estimado en 1090 K, como temperatura de un incendio.

T_{fuel} es la temperatura del combustible, valor estimado en 588 K, siendo la temperatura de ignición superficial para lechos de combustible.

La intensidad linear del fuego (I) es dada por



$$I = \frac{HWRoS}{36} \quad (3)$$

Donde:

H es el calor efectivo de combustión, siendo este valor 18.600 kJkg⁻¹ (Se toma este valor para los cálculos como referencia, pero varía en función del tipo de vegetación).

W es la carga total del combustible, en t/ha, considerando combustibles finos típicamente inferiores a 6 mm en diámetro.

RoS es la tasa de propagación (*Rate of Spread*) corregida para pendiente en kmh⁻¹, se calcula empleando la ecuación (5). Teniendo en cuenta que el terreno influye en RoS, se debe contemplar la pendiente como un terreno plano para que dichas ecuaciones sean de aplicación.

La longitud de la llama (L_f) viene calculada por:

$$L_f = \frac{13RoS + 0,24W}{2} \quad (4)$$

$$RoS = 0,0012(FDI)w \quad (5)$$

Donde:

FDI es el Índice de Peligro de Incendio Forestal (*Forest Fire Danger Index*), factor adimensional que incorpora la probabilidad de que un incendio se inicie, su tasa de propagación, su intensidad y la adversidad para extinguirlo, en función de una serie de combinaciones como la temperatura del aire, humedad relativa, velocidad del viento y los efectos de sequía a corto y largo plazo.

w es la carga de combustible en subsuelo medido en t/ha, considerando combustibles finos típicamente inferiores a 6 mm en diámetro.

Se analizaron 540 supuestos incendios, donde se evaluó el CF en función de su capacidad (seis variaciones, entre 5-30 t/ha) y en función de la altura de la llama (nueve variaciones comprendidas entre 2 y 10 m).

Los resultados fueron los siguientes (Figuras 13-15):

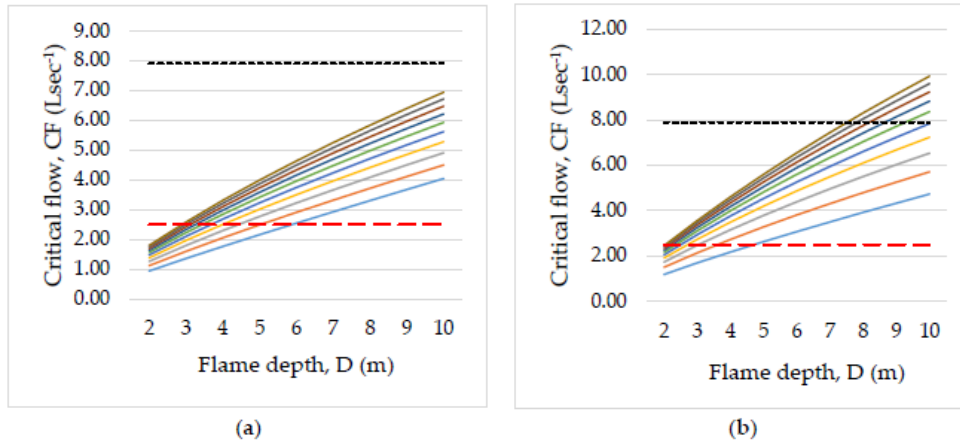


Figura 13. CF para una lengua de fuego de 10 m junto con el rango seleccionado de FDI para un valor w de: a) 5 t/ha b) 10 t/ha. Referencia: [Greg Penney].

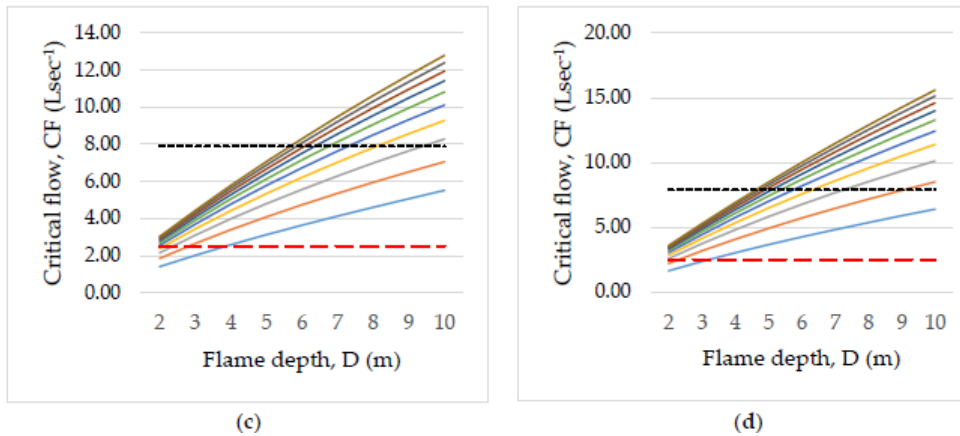


Figura 14. CF para una lengua de fuego de 10 m junto con el rango seleccionado de FDI para un valor w de: a) 15 t/ha b) 20 t/ha. Referencia: [Greg Penney].

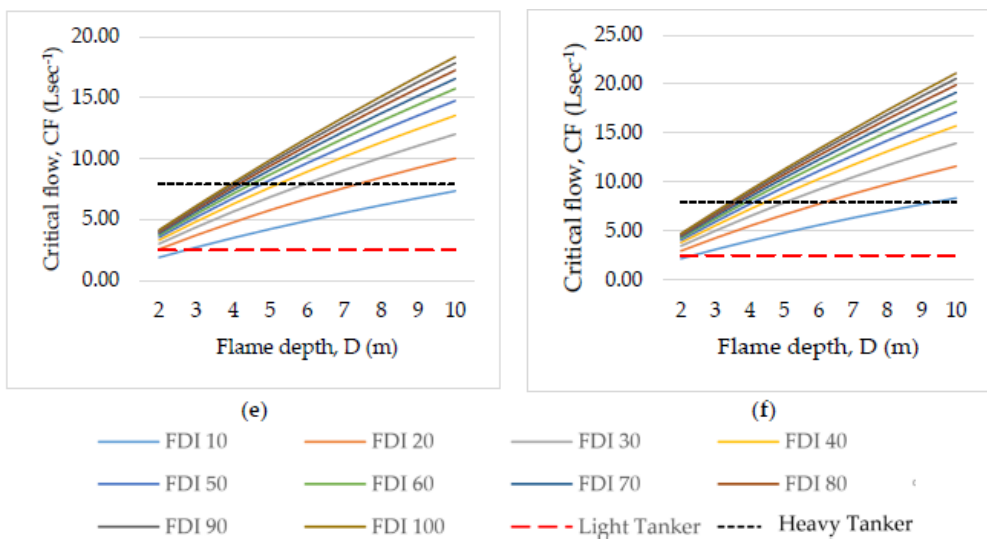


Figura 15. CF para una lengua de fuego de 10 m junto con el rango seleccionado de FDI para un valor w de: a) 25 t/ha b) 30 t/ha. Referencia: [Greg Penney].



El apartado a) muestra una tasa de CF para una sección de 10 metros de lengua de fuego desde 0.94 Ls^{-1} empezando primero por 2 m de altura de llama para una capacidad (w) de 5 t/ha hasta $21,10 \text{ Ls}^{-1}$ para 10 m de profundidad y una capacidad (w) de 30 t/ha en el apartado f).

Como se puede apreciar, una cisterna ligera (*Light Tanker*) no puede abastecer el caudal requerido para un ratio de 10 m una vez que supera la altura de 6 m independientemente de la carga de combustible y el FDI. Estas cisternas pueden hacer frente a una lengua de fuego durante 200 s bajo circunstancias limitadas.

Dispositivos más grandes como las cisternas pesadas (*Heavy Tanker*) tienen un caudal máximo de $7,9 \text{ Ls}^{-1}$, y pueden abastecer de suficiente agua como para sofocar un incendio de sección de 10 m de lengua para todos los FDI para una w de 5 t/ha. Ya que las condiciones empeoran, la capacidad de una cisterna pesada para extinguir un incendio de 10 m de sección disminuye rápidamente. Para casos donde se precisen mayores caudales de agua, las aeronaves pueden ser una buena herramienta para combatir los incendios, independientemente de la profundidad de llama, su FDI o su capacidad de combustible (w).

A continuación, se muestra una tabla para estimar el ratio de flujo crítico en función de la tasa de propagación (RoS), intensidad y longitud de la llama (Tabla 1). Esto incorpora como ventajas:

- ✓ Todo el espectro de las condiciones climáticas del fuego y las cargas de combustible en el subsuelo. Por lo tanto, los controladores de incidentes pueden calcular rápidamente la CF sin necesidad de utilizar condiciones meteorológicas predecibles de incendio, un componente esencial para el cálculo del FDI o la carga de combustible en el subsuelo a lo largo del paisaje.
- ✓ Proporciona a los controladores de incidentes herramientas visuales y matemáticas para evaluar el potencial de idoneidad de las estrategias de supresión.

La limitación de este enfoque es que, a medida que el comportamiento de los incendios forestales se intensifica, las funciones de potencia parecen subestimar la FC a profundidades de llama activas mayores de 6 m en comparación con el uso de la teoría y ecuación (1) directamente.



Tabla 1. CF como función de RoS, Intensidad y Longitud de Llama. Referencia: [9].

Tasa de propagación, RoS (kmh ⁻¹)	
Profundidad de llama activa (m)	Función
2	$CF_2 = 2,72 \cdot RoS^{0,42}$
3	$CF_3 = 3,97 \cdot RoS^{0,43}$
4	$CF_4 = 5,12 \cdot RoS^{0,44}$
5	$CF_5 = 6,24 \cdot RoS^{0,44}$
6	$CF_6 = 7,23 \cdot RoS^{0,45}$
7	$CF_7 = 8,30 \cdot RoS^{0,45}$
8	$CF_8 = 9,23 \cdot RoS^{0,45}$
9	$CF_9 = 10,20 \cdot RoS^{0,45}$
10	$CF_{10} = 11,11 \cdot RoS^{0,46}$
Intensidad, I (kWm ⁻¹)	
Profundidad de llama activa (m)	Función
2	$CF_2 = 0,11 \cdot (I)^{0,33}$
3	$CF_3 = 0,15 \cdot (I)^{0,34}$
4	$CF_4 = 0,12 \cdot (I)^{0,35}$
5	$CF_5 = 0,22 \cdot (I)^{0,35}$
6	$CF_6 = 0,24 \cdot (I)^{0,36}$
7	$CF_7 = 0,27 \cdot (I)^{0,36}$
8	$CF_8 = 0,30 \cdot (I)^{0,36}$
9	$CF_9 = 0,32 \cdot (I)^{0,36}$
10	$CF_{10} = 0,35 \cdot (I)^{0,36}$
Longitud de llama, L _f (m)	
Profundidad de llama activa (m)	Función
2	$CF_2 = 0,64L_f^{0,62}$
3	$CF_3 = 0,90L_f^{0,63}$
4	$CF_4 = 1,14L_f^{0,65}$
5	$CF_5 = 1,35L_f^{0,65}$
6	$CF_6 = 1,56L_f^{0,66}$
7	$CF_7 = 1,74L_f^{0,67}$
8	$CF_8 = 1,93L_f^{0,67}$
9	$CF_9 = 2,11L_f^{0,68}$
10	$CF_{10} = 2,28L_f^{0,68}$

1.6. Proyecto CILIFO

La difícil campaña de incendios de 2017, con terribles consecuencias especialmente en Portugal, llevó a la presidenta de la Junta de Andalucía, Susana Díaz Pacheco, a promover la creación del Centro Ibérico para la Investigación y Lucha contra los Incendios Forestales (CILIFO). Dicha propuesta está en marcha dentro de un



proyecto POCTEP (Programa Operativo Cooperación Transfronteriza España-Portugal) de cooperación transfronteriza que dispone de 24,6 millones de euros de presupuesto, de los que la UE financia el 75%, y un período de ejecución de tres años, desde abril de 2018 a diciembre de 2021 [10].

Con la creación del CILIFO se pretende unificar protocolos y procedimientos, cubrir la formación y acreditación del personal del operativo de extinción de ambos dispositivos, y poner en marcha a medio plazo un Centro Tecnológico referente en la innovación, divulgación, formación y acreditación.

El proyecto CILIFO cuenta con un amplio paquete de acciones, agrupadas en las áreas de infraestructuras, sensibilización, formación, desarrollo e innovación, que permitirán implementar y mejorar la estrategia de lucha contra los incendios forestales en España y Portugal. Como medidas específicas, el proyecto impulsará en concreto las siguientes acciones:

- ✓ Creación el Centro Ibérico para la Investigación y Lucha contra los Incendios Forestales (CILIFO).
- ✓ Refuerzo de infraestructuras de apoyo a los medios y dispositivos aéreos y terrestres de lucha contra IF.
- ✓ Diseño e implementación un Plan de Formación transfronterizo en prevención y extinción de incendios forestales; basado en la adquisición de capacidades y el aprendizaje permanente por parte de los operativos de extinción de España y Portugal.
- ✓ Diseño y puesta en marcha de un Plan de Sensibilización conjunto sobre incendios forestales.
- ✓ Diseño y puesta en marcha de un programa transfronterizo para la investigación e innovación en materia de lucha contra IF donde participen investigadores de todas las regiones.

El CILIFO proporcionará un revulsivo económico en la zona a través de la inversión pública en su puesta en marcha, funcionamiento y mantenimiento en el tiempo. Además de ser un referente por sus labores en cuanto a formación, divulgación e innovación.

El partenariado que se presenta en este proyecto, está constituido por organismos públicos, entidades y asociaciones, tanto a nivel local como regional, que desarrollan competencias muy específicas sobre el territorio del Área de Cooperación Alentejo-Algarve-Andalucía y concretamente en materia de conservación y protección del patrimonio ambiental, cultural y natural, especialmente en la lucha contra



incendios forestales y emergencias ambientales, contando con una amplia experiencia en este sector.

La Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio lidera este programa de cooperación transfronteriza como jefe de fila. Los socios que participan como beneficiarios tienen una larga trayectoria en la gestión, desarrollo y ejecución de proyectos conjuntos como partenariado, especialmente a través de los Programas de Cooperación Transfronteriza. Estos son los socios:

- ✓ Agencia de Medio Ambiente y Agua de Andalucía (AMAYA). Junta de Andalucía
- ✓ Estación Biológica de Doñana. Agencia Estatal Consejo Superior de Investigaciones Científicas.
- ✓ Fundación ONCE para la cooperación e inclusión social de personas con discapacidad.
- ✓ Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria (INIA)
- ✓ Universidad de Cádiz
- ✓ Universidad de Córdoba
- ✓ Universidad de Huelva
- ✓ Comunidade Intermunicipal do Algarve (AMAL)
- ✓ Câmara Municipal de Castro Marim
- ✓ Câmara Municipal de Loulé
- ✓ Câmara Municipal de Monchique
- ✓ Câmara Municipal de Tavira
- ✓ Fundación Delegación Fundación Finnova
- ✓ Universidade de Évora



2. Marco Legal

A continuación, se mencionan las normativas que afectan a este Trabajo Fin de Máster, centradas en la reutilización de aguas residuales, a nivel europeo, nacional, y ya, por último, autonómico (Andalucía).

2.1. Marco Legal Europeo

Directiva 91/271/CEE

Directiva 91/271/CEE del Consejo, de 21 de mayo de 1991, sobre el tratamiento de las aguas residuales urbanas. El Anexo I fija las condiciones de calidad de las aguas residuales urbanas y el artículo 4 regula las condiciones en las que se tiene que cumplir dicho Anexo y fija los plazos de cumplimiento para cada tipo de instalación. Su transposición al ordenamiento jurídico español se realiza en el Real Decreto Ley 11/1995, de 28 de diciembre, por el que se establecen las normas aplicables al tratamiento de las aguas residuales urbanas, posteriormente desarrollado en el Real Decreto 509/1996, de 15 de marzo. Dichas normas se recogen en el Plan Nacional de Saneamiento y Depuración, aprobado en 1995, y en el Plan Nacional de Calidad de las Aguas: 2007-2015, lo que ha supuesto un fuerte impulso en la construcción y mejora de estaciones depuradoras y ha relanzado el interés por la reutilización de las aguas regeneradas.

Directiva 2000/60/CEE

Directiva 2000/60/CEE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 23 de octubre de 2000, por la que se establece un marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de aguas. Mediante esta Directiva, la Unión Europea organiza la gestión de las aguas superficiales, continentales, de transición, aguas costeras y subterráneas, con el fin de prevenir y reducir su contaminación, fomentar su uso sostenible, proteger el medio acuático, mejorar la situación de los ecosistemas acuáticos y paliar los efectos de las inundaciones y de las sequías. Esta Directiva contempla, en el Anexo VI, la reutilización como medida complementaria a incluir en el programa de medidas a elaborar por cada organismo de cuenca.

2.2. Marco Legal Nacional

La legislación española, en materia referente a aguas, es muy diversa y variada, y se persiguen una serie de objetivos:



- ✓ Eficiencia y sostenibilidad en la gestión del agua.
- ✓ Disponer de un elemento más en la gestión integrada de los recursos hídricos.
- ✓ La creación de un marco flexible adaptado a la continua actualización de los diferentes aspectos a considerar en la reutilización de aguas.
- ✓ Habituar la reutilización de aguas regeneradas en todo el territorio español.
- ✓ Sinergia real entre las administraciones con competencias sobre el agua y entre administraciones cuyas competencias implican demanda y usos del agua.
- ✓ Crear conciencia a la ciudadanía sobre la reutilización de agua regenerada.
- ✓ Garantizar la participación pública.

Real Decreto de Reutilización 1620/2007, de 7 de diciembre, modifica parcialmente el Reglamento del Dominio Público Hidráulico (RDPH) aprobado por Real Decreto 849/1986, de 11 de abril mediante la derogación de los artículos 272 y 273 del RDPH que regulaban la reutilización de las aguas.

El Anexo I del RD fija los valores máximos admisibles de los parámetros en función de los usos a los que está destinada el agua regenerada distinguiendo cinco grandes tipos de usos: urbano, agrícola, industrial, recreativo y ambiental. Sobre este último es el dónde se enfocará el presente trabajo, y realizará una propuesta para reutilizar el agua para extinción de incendios forestales.

El mismo Anexo establece además la frecuencia y método de análisis de los parámetros. Para valorar el cumplimiento de los requerimientos de calidad establece los criterios de conformidad y las medidas de gestión frente a incumplimientos.

Ley de Aguas. Real Decreto Legislativo 1/2001 de 20 de julio, por el que se aprueba el texto refundido de la Ley de Aguas. En el artículo 109 establece que el Gobierno debe desarrollar las condiciones básicas de la reutilización y precisar la calidad exigible a las aguas regeneradas según los usos previstos.

Real Decreto 907/2007, de 6 de julio, por el que se aprueba el Reglamento de la Planificación Hidrológica. En esta norma, la reutilización de aguas está incluida en los criterios para la estimación de las demandas de agua, el estudio de los sistemas de explotación, las medidas para fomentar el uso eficiente y sostenible del agua y las medidas complementarias que deban aplicarse para la consecución de objetivos medio-ambientales o para alcanzar una protección adicional de las aguas.



Real Decreto Ley 11/1995, de 28 de diciembre, por el que se establecen las Normas Aplicables al Tratamiento de las Aguas Residuales Urbanas. Esta norma es el resultado de la transposición de la Directiva 91/271/CEE.

Real Decreto 509/1996, de 15 de marzo, de desarrollo del Real Decreto Ley 11/1995, de 28 de diciembre, por el que se establecen las normas aplicables al tratamiento de las aguas residuales urbanas, modificado por el Real Decreto 2216/1998 de 2 octubre.

2.3. Marco Legal Autonómico

Antes de la aprobación del Real Decreto de reutilización, la Comunidad Autónoma de Andalucía publicó normativa diferente a la que se contempla los parámetros de calidad mínimos para el uso de agua regenerada según los usos.

La Consejería de Salud de Andalucía publicó en 1995 los criterios para la evaluación de proyectos de reutilización basado en las directrices dadas por la OMS.

En cuanto a la normativa referente a reutilización de agua en campos de golf, en Andalucía se rige por el Decreto 43/2008 de 12 de febrero, regulador de las condiciones de implantación y funcionamiento de campos de golf en Andalucía (modificado por el Decreto 309/2010), que contempla la exigencia de que todas esas instalaciones, salvo en casos excepcionales, reutilicen aguas residuales regeneradas para cubrir sus necesidades de riego.

En el artículo 8, suficiencia de recursos hídricos del Decreto 43/2008, se establece que los campos de golf deberán ser regados con aguas regeneradas de conformidad con los condicionantes y requisitos establecidos en la normativa vigente sobre la reutilización de aguas depuradas.

La normativa vigente es, como se ha mencionado anteriormente, el Real Decreto 1620/2007, que en cuanto a regeneración de agua para campos de golf se refiere, los valores máximos admisibles, para la calidad 4.1. Usos recreativos, campos de golf, deberán ser los siguientes:

- ✓ Nematodos intestinales: 1 huevo/10 L
- ✓ Escherichia coli: 200 UFC/100 mL
- ✓ Sólidos en suspensión: 20 mg/L
- ✓ Turbidez: 10 UNT



3. Necesidades de reutilización

3.1. Desde un punto de vista ecológico

Se debe extrapolar el funcionamiento de los sistemas naturales “sostenibles” hacia los sistemas de producción antropogénicos, dado que, en los sistemas naturales, el flujo de materia es cerrado. Esto quiere decir que la materia se recicla y vuelve a formar parte del sistema.

El agua, como bien escaso, se debe conservar y gestionar de manera sostenible (Figura 16), para ello, influirá notablemente el uso de la tecnología en función de la ubicación geográfica y disponibilidad tecnológica de cada región.

CICLO DEL AGUA



Figura 16. Ciclo natural del agua. Fuente: [\[www.arkiplus.com\]](http://www.arkiplus.com).

En la vida humana, a diferencia de la naturaleza, este ciclo no es cerrado. Es por esta razón por la que se debe aprovechar el agua al máximo, mediante tecnologías de depuración basadas en las EDARs, ERAs y EDAMs.

El uso de dichas tecnologías persigue dos objetivos concretos:



- ✓ Reducir la carga contaminante del agua residual no depurada, de tal forma que se consiga que las masas de agua no depurada y son vertidas no perjudiquen la capacidad de autodepuración del medio receptor.
- ✓ Por otra parte, reducir el abusivo uso de las fuentes de agua convencionales.

3.2. Desde un punto de vista institucional

La reutilización del agua es siempre un objetivo ambicioso a perseguir por parte de las instituciones y debe ser incluida a modo de recurso adicional e incluirse en los planes de la gestión del agua.

La OMS en su documento *“WHO - Guidelines for the safe use of wastewater excreta and greywater”* relaciona los Objetivos de Desarrollo del Milenio con la reutilización del agua. Contempla la reutilización del agua como un recurso estratégico y de especial valor en zonas donde exista estrés hídrico, siempre y cuando se asegure la salud pública y la protección del medio ambiente.

En la Cumbre Mundial sobre Desarrollo Sostenible de Johannesburgo, celebrada en 2002, el agua y el saneamiento fueron dos de los grandes temas a tratar. La gestión integral del agua fue incluida en el marco de la política internacional, donde la reutilización tiene gran relevancia, sobre todo en regiones susceptibles de sufrir periodos de sequía.

A nivel comunitario, en la Directiva Marco de Aguas (DMA) se incluye la reutilización del agua entre las medidas complementarias que se pueden incluir en el programa de medidas a aplicar en cada demarcación hidrográfica con el fin de cumplir los objetivos establecidos en el artículo 4 de la DMA [11].

A menor escala, en Sevilla, el interés de EMASESA, por dar el mejor uso posible al agua se basa en tres pilares [12]:

- 1) **Fomento del consumo responsable.** Este aspecto ha originado un ambicioso plan de gestión de la demanda, que ha reducido el consumo doméstico de 138 L/habitante/día en el año 2001 a 119 L/habitante/día en 2011. Estos valores son claramente inferiores a los de la media de consumo diario por habitante en España que se cifra en 126 litros de agua según la encuesta de “Suministros de Agua Potable y Saneamiento en España” realizada en 2012 por la Asociación Española de Abastecimientos de Agua y Saneamientos.
- 2) **Reducción de pérdidas.** También hay que reseñar la importante reducción de pérdidas en todos los tramos de la red, tanto en la aducción de los embalses como en la propia distribución a las viviendas ya que, para que la Unión Europea financiara la construcción del embalse de Los Melonares, la empresa



adquirió, entre otros, el compromiso de reducir las pérdidas y para lograrlo ha venido realizando un esfuerzo inversor muy importante. Así se ha alcanzado en 2010, dos años antes de lo requerido, un porcentaje de reducción total de pérdidas en el sistema de abastecimiento (aducción, tratamiento y distribución) del 15,5%.

- 3) **Reutilización de Aguas.** EMASESA igualmente apuesta por la reutilización del agua una vez depurada en todas aquellas actividades en las que sea posible, como el riego de las instalaciones propias y de campos de golf o en la refrigeración de determinados equipos e instalaciones industriales.

4. Riesgos asociados al uso de agua residual regenerada.

El ciclo integral del agua es un ciclo complejo, la posibilidad de regenerar agua para distintos usos hace que dicho ciclo sea más sostenible. Pero, como todo proceso de regeneración, lleva intrínsecamente un riesgo asociado que, deberá ser identificado y gestionado eficientemente. En la metodología de trabajo para los técnicos y supervisores de plantas de tratamiento para minimizar o anular los riesgos, se establecen puntos de control crítico, puntos de muestreos críticos o definición de paso o barreras [13].

El riesgo se define como la probabilidad de un resultado sanitario adverso, o un factor que aumenta esa probabilidad. La prevalencia del riesgo es la proporción de la población que está expuesta a un determinado riesgo. En lo relativo al riesgo, es necesario analizar:

- ✓ Fuente del riesgo.
- ✓ Riesgo o probabilidad de ocurrencia.
- ✓ Tiempo de exposición al riesgo.
- ✓ Impacto o daño sobre el medio o la salud.

Un riesgo también podría ser relativo, es decir, la probabilidad de un resultado sanitario adverso en las personas expuestas a un riesgo determinado, en comparación con las personas no expuestas.

El peligro es una propiedad inherente, que conlleva un potencial de nocividad. La intensidad de esa nocividad es por ende otro factor a ponderar. Tómese de ejemplo,



la radiografía para uso sanitario, la intensidad y tiempo de exposición son tan ínfimos que no representan daño para la salud humana [14].

Los riesgos pueden ser clasificados en dos ámbitos: ambientales y sanitarios.

4.1. Riesgo Ambiental

Orientado hacia los ecosistemas, así como a la probabilidad de que se produzcan efectos negativos debido a la acción de aguas regeneradas. En la Tabla 2, puede observarse la caracterización del riesgo.

Tabla 2. Evaluación inicial, la posibilidad que ocurra, si se da el daño. Referencia: [AGWR].

Pasos	Evaluación del riesgo ambiental
Paso 1: Identificación de los riesgos	Identificar los riesgos presentes en el agua regenerada y sus efectos sobre el medio ambiente.
Paso 2: Análisis de la probabilidad de ocurrencia	Probabilidad de que se produzca, como por ejemplo una subida importante en la concentración salina
Paso 3: Evaluación del daño	Considerar los posibles efectos del peligro o evento peligroso, en un primer momento y su progresión en el tiempo. Por ejemplo, riego de agua regenerada sobre cultivos y posterior percolación al subsuelo.
Paso 4: Caracterización del riesgo	Una estimación del riesgo general planteado por la amenaza desde el punto de vista ambiental

Según la *Australian Guidelines for Water Recycling* (AGWR) los riesgos ambientales se centran en la determinación de éstos causados por agentes químicos y microbiológicos (Figura 17). Como puede apreciarse, dada la importancia que tienen los riesgos sanitarios, y afección de manera indirecta por los riesgos ambientales, las medidas de control tomadas en los primeros suelen ser suficientes para la determinación y control de los segundos. Es decir, el marco de actuación y la importancia de los que implican la probabilidad de un daño a la salud, englobarían a los que afectan al medio ambiente.

En cuanto a daños medioambientales, el primer paso es identificar los agentes que pueden causar dicho daño. En este caso, se centra en las sales que puedan venir disueltas en el agua, que tienen efectos perjudiciales para suelo, flora y fauna.

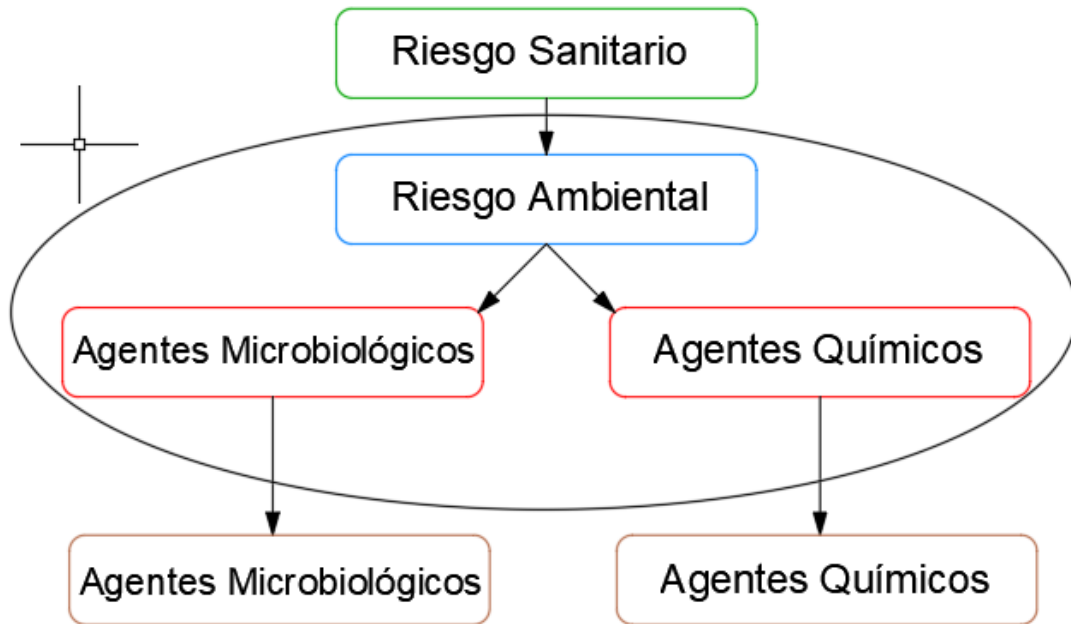


Figura 17. Riesgos y Agentes. Fuente: [AGWR].

Ciertos iones, como B, Cl, Na y Cd, pueden llegar a provocar toxicidad en plantas.

- ✓ La salinidad, generalmente provoca afecciones al suelo, alterando así la capacidad de intercambio suelo-planta.
- ✓ Como catión, el monovalente sodio es de los más perjudiciales. Es el que tiene más capacidad de alterar las propiedades de intercambio del suelo, en cuantiosas cantidades, puede llegar a inhibir la capacidad drenante del suelo.
- ✓ Fósforo y nitrógeno pueden afectar al balance de nutrientes en seres vivos, y en los cauces receptores provocar un *bloom* de algas y proceso de eutrofización.

4.2. Riesgo Sanitario

Este aspecto resulta crucial debido a que indirectamente acaba afectando a la salud humana. Los riesgos sanitarios, se enfocan sobre la salud humana. De acuerdo a la OMS, que tiene en cuenta que el riesgo cero es inexistente, establece los siguientes pasos a seguir (Tabla 3).



Tabla 3. Evaluación del riesgo ambiental. Referencia [AGWR].

Pasos	Evaluación del riesgo sanitario
Paso1: Determinación del peligro	Determinación de los tipos de efectos en la salud que pueden producirse, basándose en datos toxicológicos obtenidos en estudios epidemiológicos o de laboratorio.
Paso 2: Evaluación de la exposición	Combina datos sobre la distribución y las concentraciones de la contaminación en el medioambiente con información sobre el comportamiento y la fisiología a fin de estimar la cantidad de contaminantes que están expuesto los seres humanos.
Paso 3: Evaluación de la relación dosis-respuesta	Relaciona la probabilidad de cierto efecto en la salud con la dosis de contaminante o la magnitud de la exposición.
Paso 4: Caracterización del riesgo	Combina las evaluaciones de la exposición y de la relación dosis-respuesta para calcular el riesgo sanitario estimado, como el número previsible de personas que contraerán cierta enfermedad en una población determinada. Generalmente incluye la estimación y la comunicación de la incertidumbre.

Desde el punto de vista de la salud, en función de su procedencia, existe una clasificación para su identificación. La procedencia puede ser biológica, o química [15].

4.2.1. Riesgo sanitario de origen biológico

Aquí se analizan los posibles agentes que pueden ir en el agua residual. Mediante un óptimo control durante la regeneración, se puede reducir notablemente el riesgo de poder provocar un daño. El agua, como elemento vivo, contiene una elevada cantidad de organismos, algunos de los cuales son patógenos, lo que significa que provocan enfermedades.

Los microorganismos que suelen estar más presentes en el agua, se describen a continuación y suelen producir enfermedades respiratorias o digestivas.



- ✓ Bacterias, por ejemplo, *Salmonella* y *Campylobacter*, causan gastroenteritis o enfermedades respiratorias.
- ✓ Virus como rotavirus y HAV.
- ✓ Protozoos como *Cryptosporidium* spp., *Giardia* spp., etc.
- ✓ Y para concluir, Helmintos como *Ascaris* spp., provocadores de anemias, teniasis, tricuriasis, etc.

Su presencia dependerá de la procedencia del agua. No se puede considerar el mismo control de estos patógenos en zonas pobres, que en países desarrollados. Esto será un factor importante a tener en cuenta a la hora de evaluar los riesgos asociados.

Detectar este tipo de patógenos es un asunto complejo y caro, puesto que se encuentran en cantidades pequeñas, de ahí que sean complicados de detectar. Sin embargo, existen ciertas metodologías que hacen más sencilla la tarea de detectar y contabilizar los organismos patógenos. Como bioindicadores, existen las coliformes totales (CT), coliformes fecales (FC), *E. coli* y enterococos, estos dos últimos ya en menor proporción. Es una metodología muy establecida a escala global y ya existen normativas y legislaciones respecto al control de los mismos [16].

4.2.2. Riesgo sanitario de origen químico.

En las aguas regeneradas, existe también la presencia de agentes químicos potencialmente tóxicos, se deberá tener entonces en cuenta en el análisis de riesgos sanitarios, debido a que pueden provocar problemas a largo plazo. Existen dos grupos mayoritarios, compuestos inorgánicos y compuestos orgánicos.

- ✓ **Metales:** Cd, Cr, Cu, Fe, Hg, Pb, entre otros. Pueden provocar efectos de bioacumulación y llegar a los seres humanos por la cadena trófica.
- ✓ **Compuestos inorgánicos disueltos:** Sales inorgánicas (cloruros, sulfuros, nitratos, etc.) que pueden provocar efectos perjudiciales en la salud humana (metahemoglobina asociada a nitratos).
- ✓ **Otros compuestos químicos (orgánicos e inorgánicos):** Pesticidas, compuestos orgánicos halogenados, etc. Gran parte de estos compuestos son carcinogénicos, teratogénicos y/o mutagénicos, lo que conlleva un riesgo para la salud humana (cianotoxinas), o por bioacumulación, toxicidad en plantas y biota (cloro libre residual).



5. Tratamientos avanzados del agua

Este apartado tiene como objetivo una búsqueda bibliográfica de las múltiples tecnologías para llevar a cabo una correcta avanzada depuración del agua.

Por depuración avanzada del agua se entiende la desinfección de la misma, así como reducir su turbidez y contenido de sólidos en suspensión de la manera más óptima posible.

Se ha contemplado que el agua regenerada puede proceder de los siguientes lugares, junto con su debida argumentación:

- ✓ **EDARs:** Es crucial aprovechar un residuo como puede ser el agua residual para convertirla en un recurso valioso (agua depurada), para así poder llegar a cerrar el ciclo integral del agua, a nivel antropogénico. El agua depurada procedente de EDARs bien podría interesar para incendios que ocurran en zonas del interior de la península ibérica.
- ✓ **EDAMs:** No es ninguna novedad desalar agua para uso humano, bien sea para consumo humano, regadío, usos industriales, etc. El agua depurada procedente de EDAMs cobra especial interés para incendios con relativa proximidad a zonas costeras, como pueda ser el caso de Galicia, o la zona de Doñana.

A continuación, en la Tabla 4, se muestra una comparativa con las ventajas e inconvenientes de la procedencia del agua regenerada.

5.1. Agua regenerada procedente de EDARs

En este apartado, se analizarán las tecnologías existentes, MBRs, ozonización, luz UV, y otros modelos experimentales cuyos resultados llegan a ser muy prometedores, también se analizará, en la medida de lo posible, el coste de dichos tratamientos avanzados.



Tabla 4. Comparativa entre EDARs y EDAMs. Referencia: [17].

	Ventajas	Inconvenientes
EDARs	Un agua regenerada de calidad suficiente para que pueda reutilizarse en entornos cercanos a la EDAR, no precisaría de costosas infraestructuras de almacenamiento y transporte.	Por lo general, no suele cumplir los límites en vertidos a zonas sensibles (N y P), de acuerdo a la directiva 91/271
	Eliminan eficientemente la materia orgánica (DBO ₅ y DQO)	Para la gran mayoría de usos en reutilización de aguas que dicta el RD 1620/2007, es necesario implantar un tratamiento terciario, con el consiguiente costo económico.
		En muchos efluentes, existe una elevada concentración de sales disueltas. En casos de regadío, un uso excesivo de este tipo de agua puede llegar a provocar la muerte de la planta, así como la salinización del suelo, afectando así la permeabilidad
EDAMs	Se obtiene agua de buena calidad y a precio asequible para los agricultores (0,37€/m ³)	Aunque hay estudios que avalan la gran calidad del agua desalada, supone un enorme costo el construir infraestructuras para transportar dicha agua.
	Las plantas de agua de mar incluyen un sistema de recuperación de energía de la salmuera resultante consiguiéndose así una notable reducción del coste energético del proceso.	El boro puede resultar un ion tóxico como resultado de una incorrecta desalinización del agua.

5.1.1. Biorreactores de Membrana (MBRs)

Por sus siglas, procedentes del inglés (*Membrane Bio-Reactors*), están compuestos por dos partes principales que son:

- ✓ Unidad biológica responsable de la degradación de los compuestos presentes en el agua residual.



- ✓ Un módulo de membranas encargado de llevar a cabo la separación física del licor de mezcla presente en el reactor biológico.

Esta tecnología, antaño tenía un uso limitado a tratamiento de afino o terciario dentro del proceso convencional. Los mayores factores que condicionaron el desarrollo de la tecnología de membrana como elemento de depuración de aguas residuales eran su elevado coste de inversión, así como de operación. En la actualidad, la aparición de módulos de membrana menos costosos y más efectivos junto con la necesidad de obtener una buena calidad de efluentes hace que la tecnología de membrana cobre especial interés [17].

Se pueden distinguir dos tipos principales de biorreactores de membrana en base a su configuración:

- ✓ **Biorreactores con membrana integrada o sumergida:** La fuerza impulsora a través de la membrana se consigue presurizando el biorreactor o creando vacío en el lado permeado de la membrana (Figura 18). Generalmente se coloca el difusor de aire justo debajo del módulo de la membrana para suministrar el aire necesario para el proceso biológico, para homogeneizar el contenido del tanque y para la propia limpieza de la membrana (además la limpieza de la membrana se completa a través de frecuentes retrolavados con agua permeada + aire y cuando es necesario mediante retrolavados con soluciones químicas).

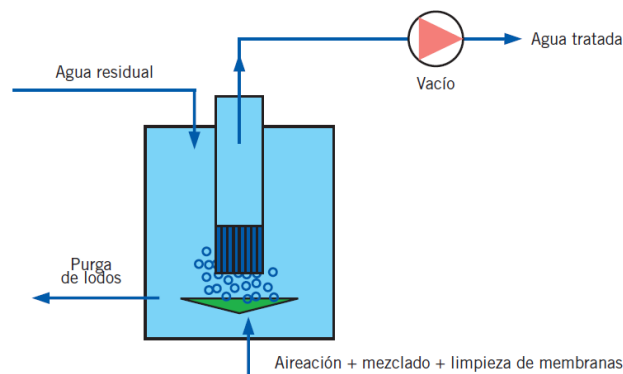


Figura 18. MBR con membrana sumergida. Referencia: [Desalación y reutilización de aguas. Situación en la provincia de Alicante].

- ✓ **Biorreactores con membrana externa (o con recirculación):** El licor de mezcla es recirculado desde el biorreactor hasta la unidad de membrana que se dispone externamente a la unidad biológica. En este caso, la fuerza impulsora es la presión creada a través de la superficie de la membrana (Figura 19).

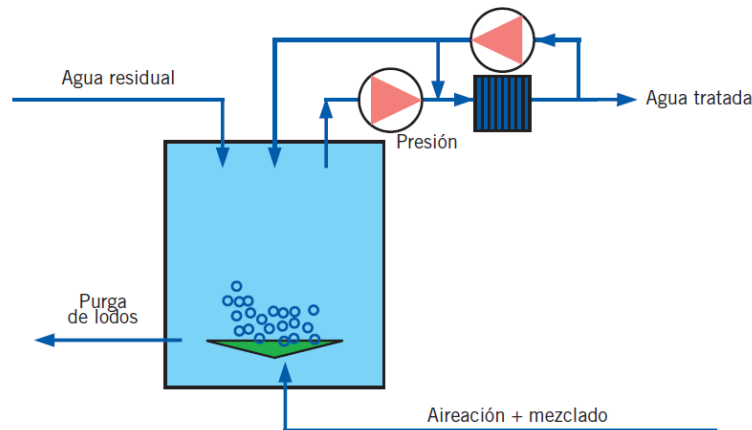


Figura 19. MBR con membrana externa. Referencia: [Desalación y reutilización de aguas. Situación en la provincia de Alicante].

De los tipos de membranas que existen, el biorreactor con membrana sumergida es el más utilizado debido a su menor consumo energético.

Para obtener un buen rendimiento, las membranas usadas en la unidad MBR deben satisfacer una serie de criterios:

- ✓ Deben ser inertes y no biodegradables.
- ✓ Deben ser fáciles de limpiar y de regenerar y deben de ser resistentes a los agentes químicos y a las presiones y temperaturas elevadas.
- ✓ Deben de ser neutras o presentar carga negativa para evitar la adsorción de los microorganismos.
- ✓ Deben ser duraderas y fáciles de sustituir.

La tecnología MBR presenta una serie de ventajas:

- ✓ Eficaz retención de los sólidos suspendidos y de muchos de los compuestos solubles dentro del biorreactor, lo que proporciona un efluente de excelente calidad capaz de cumplir los requisitos de vertido más rigurosos y potencialmente reutilizable en multitud de aplicaciones.



- ✓ Retención de bacterias y virus obteniéndose un efluente desinfectado, lo que reduce hasta cierto punto la necesidad de posterior desinfección y se elimina, la peligrosidad asociada a los subproductos de la desinfección cuando se realiza con cloro u ozono.
- ✓ La ausencia del decantador secundario, que también actúa como un selector natural de la población bacteriana, permite que se desarrollen bacterias de crecimiento lento (como las bacterias nitrificantes) que persistan en el biorreactor incluso a tiempos de retención de sólidos cortos.
- ✓ La membrana retiene no sólo toda la biomasa, sino que también previene el escape de enzimas exocelulares y de oxidantes solubles que crean un licor de mezcla más activo capaces de degradar una gama más amplia de compuestos.
- ✓ La mayor parte de las plantas MBR pueden operar a edades de fango de 40 días o superior. Estas edades de fango elevadas pueden reducir en hasta un 40% la producción de lodo con la consiguiente reducción de costes de operación en planta y de gestión de este subproducto.

Por el contrario, como inconvenientes la tecnología MBR presenta:

- ✓ Inversión inicial importante ya que las unidades de membrana son actualmente caras.
- ✓ Hay un gasto energético asociado a la presión o vacío necesario para que el agua permee a través de las membranas.
- ✓ Hay problemas de polarización y ensuciamiento.
- ✓ Los lodos generados pueden presentar problemas adicionales de deshidratación.
- ✓ Como factor limitante, la posible acumulación en el biorreactor de compuestos inorgánicos no filtrables que a determinadas concentraciones podrían ser dañinos para la población bacteriana o afectar a la integridad de las membranas.

Como costes de operación significativos, el coste de reactivos es de 0,015 a 0,030 €/m³ y el de la energía 0,06 a 0,11 €/m³ [17].

Los costes totales de implantación oscilan entre 4.000 y 6.000 €/m³/día, incluyendo pretratamiento, MBR y tratamiento de fangos. Los costes operacionales



son del orden de 1 a 1,2 €/m³ [17]. La distribución aproximada de estos costes se muestra en la Figura 20.

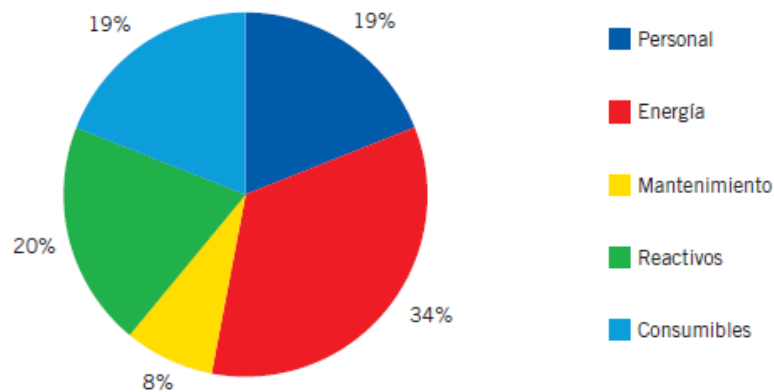


Figura 20. Distribución de costes de operación para tratamiento de un vertido industrial mediante proceso MBR. Referencia: [Desalación y reutilización de aguas. Situación en la provincia de Alicante].

5.1.1.1. MBR en La Barrosa

En el año 2014, en el término municipal de Chiclana de la Frontera (Cádiz), en la EDAR “La Barrosa”, se llevó a cabo un estudio a escala piloto para comprobar el funcionamiento de dicha tecnología. Esta idea surgió como Trabajo Fin de Máster realizado por Raúl Caro Estrada, por la Universidad de Cádiz [18].

El tanque, a escala piloto, tiene 500 litros de volumen para alimentación.

Las condiciones operacionales impuestas fueron las siguientes: ciclos de filtrado de 9 minutos combinado con un ciclo de lavado de 1 minuto, con caudal neto de 250 L/día, aproximadamente. La aireación se fijó en 1,7 m³/h para mantener oxígeno disuelto a concentración aproximada de 1 mg O₂/L.

Actualmente la planta se encuentra operativa y se está incrementando la concentración de lodos en el reactor aerobio de la unidad MBR. Para ello se miden y analizan los parámetros básicos de control como son DQO, DBO₅, SST, SSV, turbidez, PTM, caudal y caracterización microscópica de la microbiota.

Evolución de la DQO:

Tres veces por semana, durante quince días, se mide la demanda química de oxígeno (Figura 21). Durante el periodo que dura el ensayo, la corriente de salida se estabiliza a partir del décimo día, con valores intermedios entre 15 y 40 mg O₂/L. El porcentaje medio de reducción alcanza el 94%. Contemplando la normativa vigente para vertido, debe ser inferior a una concentración de 125 mg O₂/L o un 90% de reducción en el caso más restrictivo para dicho parámetro. Luego se puede afirmar que cumple en este aspecto.

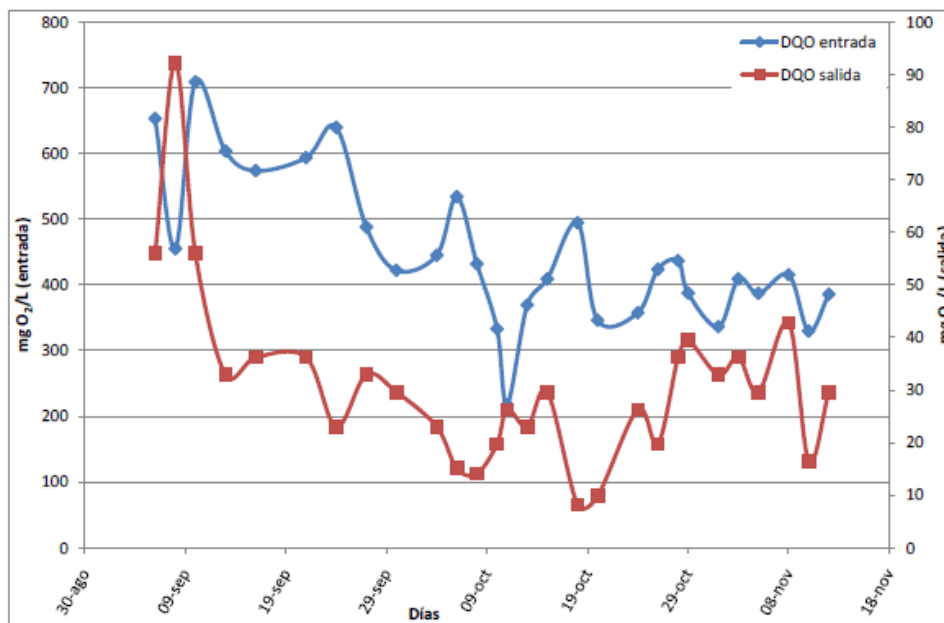


Figura 21. DQO a la entrada y salida durante 15 días (La Barrosa). Referencia: [Raúl Caro Estrada].

Evolución de la DBO₅:

Este parámetro indica la biodegradabilidad que posee la materia orgánica entrante al reactor. Con la misma pauta de medición que en la DQO, se puede establecerse una relación estrecha con la DQO.

El porcentaje de reducción conseguido se sitúa en 94,5%, a partir del 16 de septiembre, es cuando la concentración queda por debajo de lo establecido legalmente, es decir, 25 mg O₂/L. La DBO₅ no oscila tanto como en el caso de la DQO de salida, debido a que los microorganismos condicionan en gran medida la cantidad de materia biodegradable que existe en el biorreactor (Figura 22).

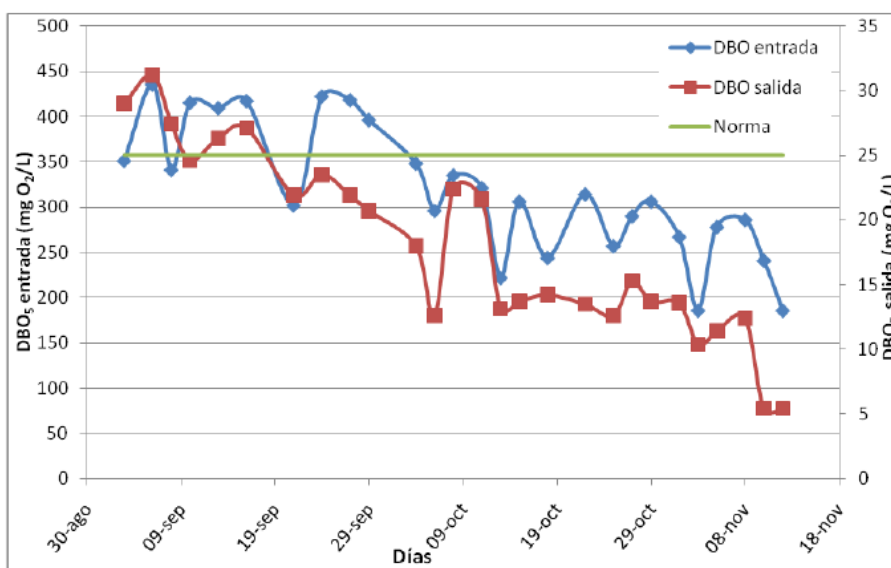


Figura 22. DBO₅ a la entrada y salida (La Barrosa). Referencia: [Raúl Caro Estrada].



Evolución de los Sólidos en Suspensión Totales y Volátiles:

En un principio se midieron sólidos únicamente dentro del reactor, ya que los datos que ha arrojado la turbidez durante todo el ensayo en el permeado llevaron a pensar que serían muy bajos.

Observando la Figura 23, se pueden diferenciar tres etapas claramente marcadas. La primera, desde el inicio del ensayo hasta el 24 de septiembre, momento en el que se realizó la primera limpieza, únicamente con NaClO.

La siguiente fase, a partir del 2 de noviembre, se tomó la decisión de inocular la planta con 25 L de lodo fresco procedente de la recirculación, al mismo tiempo que se realizaba una limpieza química completa a base de NaClO (1 g/L) y Ácido Cítrico (2 g/L). Es a partir de este día cuando se consiguen los mejores rendimientos depurativos, tanto en DBO₅ como en color del efluente.

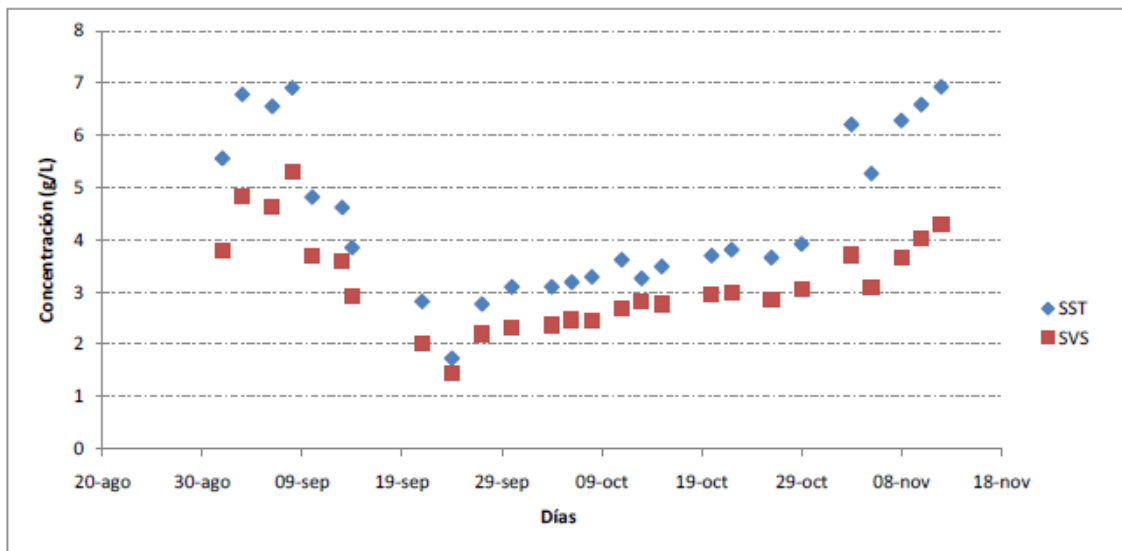


Figura 23. Evolución de SST y SVS en el reactor (La Barrosa). Referencia: [Raúl Caro Estrada].

Evolución de la turbidez

La turbidez fue medida a través del espectrofotómetro mediante el método nefelométrico. Se pudo confirmar que la eliminación de partículas suspendidas de pequeño tamaño es tal que la turbidez se situó siempre por debajo del límite más restrictivo de 2 UNT, según RD 1620/2007 de reutilización de aguas (Figura 24).

Evolución de la Presión Transmembrana:

La presión transmembrana es una variable medida *in situ*, a través de un manómetro situado en la conducción que va desde la membrana hasta el tanque de permeado.

Existen dos etapas totalmente distinguidas. La primera de ellas se caracteriza por un ensuciamiento rápido de la membrana, debido a un insuficiente pretratamiento del agua de entrada al biorreactor.



A la vista de la Figura 25, se obtienen conclusiones muy útiles sobre el mantenimiento de las membranas. La membrana quedó saturada por los sólidos en suspensión, pero una vez realizada la limpieza con hipoclorito se consiguió una notable disminución de la presión para los ciclos de filtrado, pero no ocurría lo mismo para los ciclos de lavado.

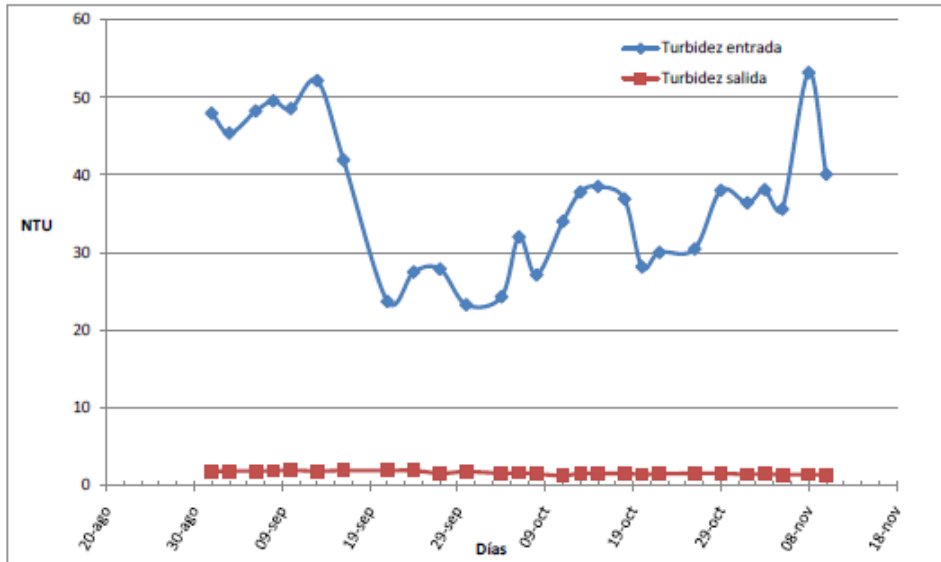


Figura 24. Turbidez en la alimentación y el permeado (La Barrosa). Referencia: [Raúl Caro Estrada].

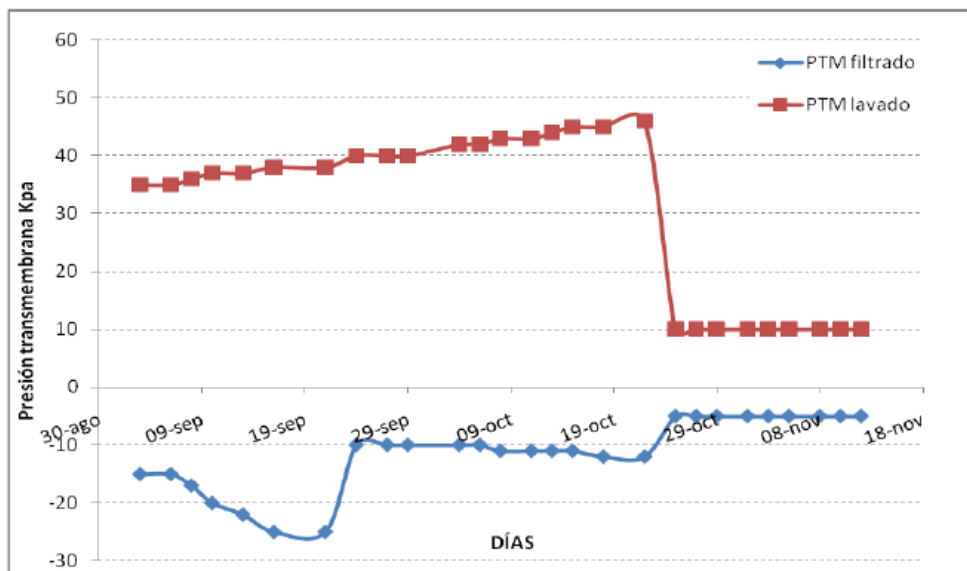


Figura 25. Evolución de la PTM (La Barrosa) Referencia: [Raúl Caro Estrada].

La presión de lavado siguió incrementándose hasta que llegó a los 45 kPa, momento donde se optó por realizar la limpieza en dos ciclos, uno con hipoclorito (1 g/L) y otro con ácido cítrico (2 g/L).



La presión a partir de ese día se situó en los rangos esperados del test realizado con la membrana nueva. Otra evidencia notable salta a la vista de comparar la membrana tras la limpieza química sólo con NaClO y tras la limpieza completa con NaClO + Ácido Cítrico.

Evolución de la tasa de respiración y tasa específica de respiración:

El principio de la OUR, velocidad de consumo de oxígeno (*Oxygen Uptake Rate*), no es otro que el medir la velocidad de consumo de oxígeno del propio licor-mezcla del reactor biológico de la estación depuradora. Por ello, el propio licor del reactor se convierte en la muestra a analizar.

El SOUR (*Specific OUR*) es el OUR específico o Actividad Biológica del licor-mezcla referida a los MLVSS (SSV), las unidades son mg O₂/g SSV·h. Los valores del SOUR dependen del F/M (Carga Másica) en que el reactor se encuentre operando. Los resultados se muestran en la Figura 26.

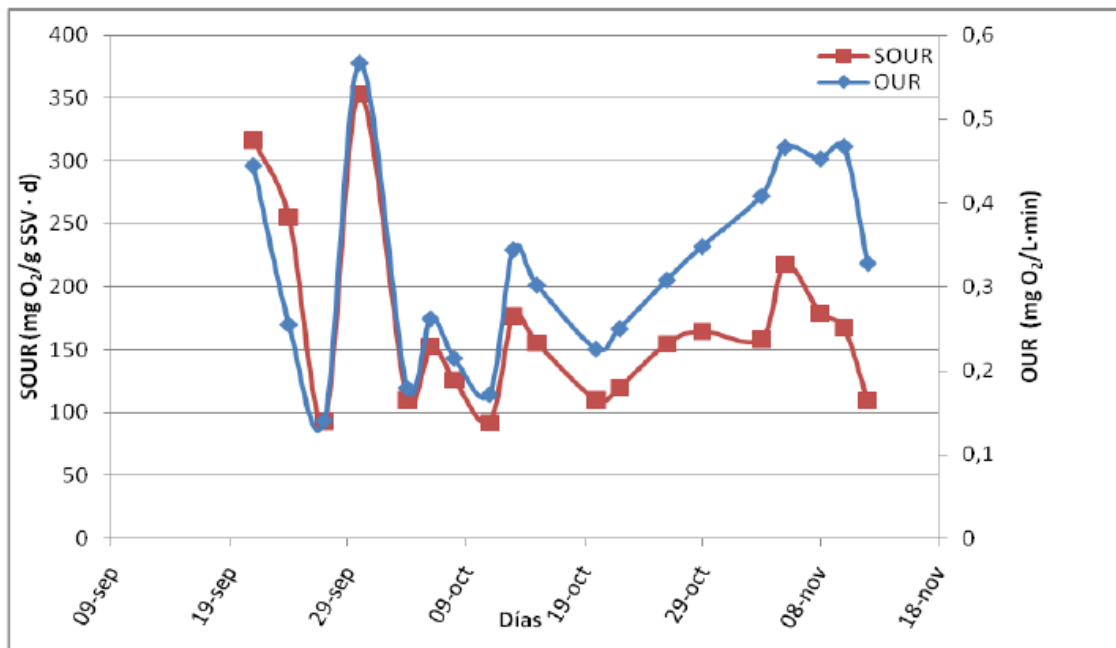


Figura 26. Evolución del OUR y el SOUR (La Barrosa). Referencia: [Raúl Caro Estrada].

Puede decirse que ambas medidas de actividad microbiana presentan relación directa con otros dos parámetros como son, por un lado, la carga orgánica que entra en el biorreactor, y por otro la concentración de microorganismos presentes en el licor mezcla.

En el primer mes de ensayo, las grandes variaciones de los citados parámetros se correlacionaban perfectamente con las tasas de respiración observadas en la Figura



26. Tras la evolución de las características del agua residual de entrada, con una tendencia evidente a la disminución de contaminación en la entrada, podemos ver cómo parece que se estabiliza la actividad microbiana, hasta que, en la última fase, cuando se hace la adición de lodo fresco, a la vez que se reduce la carga contaminante se aprecia una tendencia a la baja, posiblemente en camino de estabilizarse.

Algunas conclusiones respecto al estudio son las siguientes:

- ✓ Durante la experiencia llevada a cabo con alimentación basada en agua residual sintética y sin lodo activo en el reactor se concluye que la membrana por sí sola no es capaz de retirar la materia orgánica disuelta, pasando ésta al permeado.
- ✓ Las características analizadas en el efluente obtenido permiten que pueda ser reutilizado en numerosas aplicaciones recogidas en la legislación. No obstante, conviene recordar que la parte microbiológica no ha sido evaluada en esta parte de la experimentación ya que se ha dedicado principalmente a conocer el equipo y ponerlo a punto para posteriores experiencias. Sin embargo, el tamaño de poro tan pequeño, (0,04 μm) permite albergar grandes esperanzas en la desinfección del efluente permeado.
- ✓ El pretratamiento del agua de alimentación al biorreactor se considera esencial, ya que evita que se produzcan daños físicos en la membrana y reduce en gran medida el ensuciamiento de la misma. La opción que ha sido elegida y que da buenos resultados, es la que comprende dos tamices a la entrada del tanque de alimentación (de 2 mm y 1 mm respectivamente), y uno a la entrada del reactor biológico (de 0,2 mm).

5.1.1.2. *MBR combinado con oxidación avanzada y con filtración por membranas*

Esta experiencia se realizó en el año 2018 por Edgardo David Vásquez Rodríguez como Tesis Doctoral para aspirar al grado de Doctor por la Universidad de Alicante [19].

Para este estudio se utilizó un MBR a escala laboratorio de 90 L, con un módulo de membranas sumergido interno, fibra hueca de microfiltración, con un tamaño de poro de 0,4 μm y una superficie filtrante de 1 m^2 . El afluente utilizado era agua residual sintética dopada con microcontaminantes pertenecientes a las familias de triazinas, organoclorados, fármacos, hormonas, productos de cuidado personal, surfactantes, parabenos y plastificantes, operándose a tiempos de retención celular de 30 y 60 días.



Para los post-tratamientos se utilizó un generador de ozono Modelo Anseros, COM-AD-01 con una generación efectiva de 4 g O₃/h, acoplado a una columna de 0,75/L para el contacto ozono-agua. Para la realización del tratamiento UV se utilizó un fotoreactor con una lámpara de baja presión (LP) con una potencia regulable de 5-20 W de potencia con emisiones UV 185-254 nm de la marca UV-Consulting Peschl España. El sistema de filtración consistía en un módulo de células con agitación Amicon, los cuales son un soporte de filtros que posee juntas tóricas. A este módulo se le acoplaron membranas de NF (FILMTEC NF270) y OI (FILMTEC XLE-2521) con el objetivo de filtrar los efluentes del MBR.

Eliminación de la materia orgánica:

La carga másica promedio fue de 0,23 kg DQO·kgSSV⁻¹·d⁻¹, con una DQO de 363 ± 54 mg O₂/L. Para cada uno de los TRC analizados se obtuvieron las reducciones de materia orgánica que se pueden ver en la Figura 27, donde quedan recogidos los datos de la evolución de la DQO en los TRC analizados, tanto en el afluente como en el efluente.

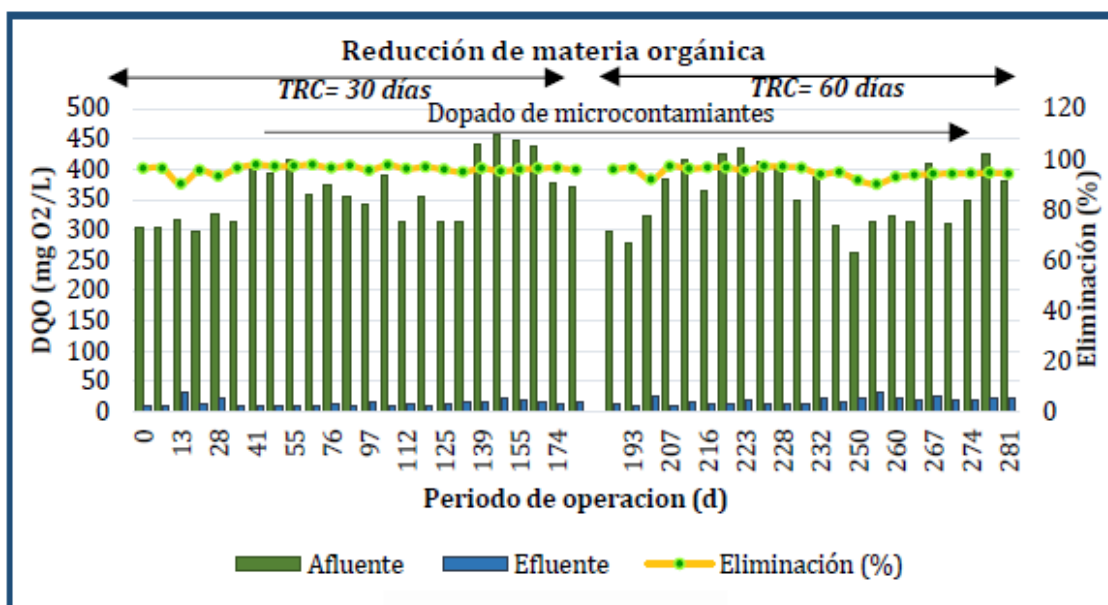


Figura 27. Reducción de la materia orgánica. Referencia: [Edgardo David Vásquez Rodríguez].

Durante el periodo de operación con TRC de 30 días, la concentración de DQO en el efluente presentó un promedio de 16 mg/L, mientras que durante el período de operación a 60 días de TRC, la concentración media de DQO en el efluente fue de 18 mg/L.



Los resultados obtenidos demuestran que la eficacia depurativa a lo largo de los dos TRC estudiados fue excelente, obteniéndose un rendimiento medio de eliminación de materia orgánica del 96%.

Reducción de nutrientes:

Respecto a los nutrientes, los porcentajes de reducción son mucho menores, hay que tener en cuenta que el MBR no está diseñado específicamente para eliminar nutrientes, careciendo por ello de zona anóxica.

Las concentraciones de nitrógeno total que se aportaban a la entrada (afluente) se encuentran en un rango de 37 ± 8 mg/L y las obtenidas en el efluente varían en un rango de 25 ± 7 mg/L (Figura 28).

Estos valores en el permeado se deben a que los compuestos orgánicos nitrogenados del alimento se transforman en nitratos por la acción de las bacterias nitrificantes y las condiciones de exceso de oxígeno en el reactor. Se obtiene un promedio de 26% de reducción del nitrógeno total.

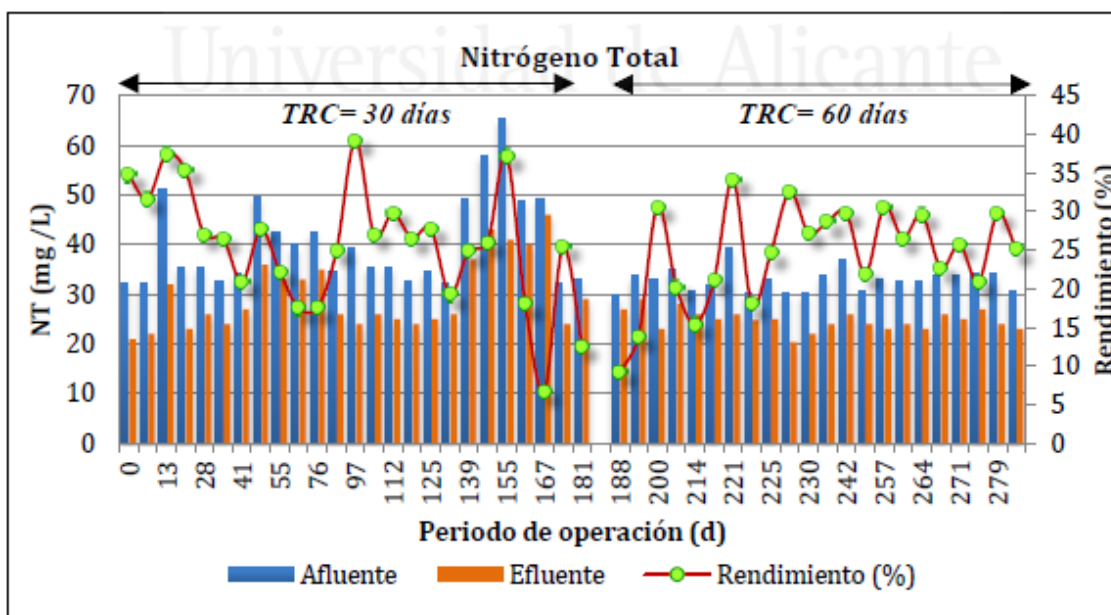


Figura 28. Rendimientos MBR en la reducción de nitrógeno total. Referencia: [Edgardo David Vásquez Rodríguez].

Respecto al fósforo, las concentraciones de fósforo total promedio en el efluente fueron de $2,76 \pm 0,41$ mg/L para el primer TRC, y de $1,74 \pm 0,37$ mg/L en efluente del segundo TRC (Figura 29).

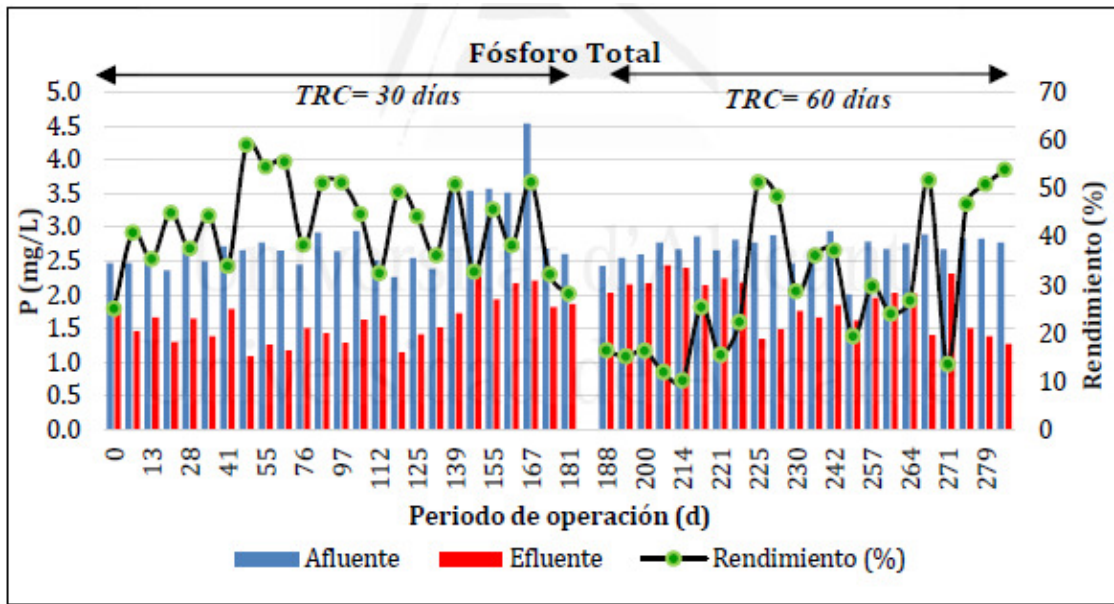


Figura 29 Rendimientos MBR en la reducción de fósforo total. Referencia: [Edgardo David Vásquez-Rodríguez].

Se alcanzó un porcentaje de eliminación media de fósforo total del 36% a lo largo de todo el período de investigación.

5.1.2. Luz Ultra Violeta (UV)

La luz ultravioleta (UV) es una alternativa de desinfección en muchas aplicaciones de tratamiento de aguas potables y residuales. Como ventaja, parte de que no genera subproductos nocivos problemáticos, dado que es un proceso totalmente físico.

La región espectral más efectiva para la inactivación de los microorganismos ocurre a una longitud de onda de 240 a 280 nm, siendo la radiación UV más germicida la que presenta una longitud de onda de 254 nm, ya que el ADN expuesto a esta energía presenta un máximo de absorción, y, por consiguiente, de inactivación.

La eficacia del sistema de desinfección con luz ultravioleta depende de las características del agua residual, la intensidad de la radiación, el tiempo de exposición de los microorganismos a la radiación y la configuración del reactor. Para cualquier planta de tratamiento, el éxito del tratamiento de desinfección está directamente relacionado con la concentración de componentes coloidales y de partículas en el agua residual, que absorben y reflejan la radiación impidiendo que alcance a los microorganismos.

Los componentes principales del sistema de desinfección con luz UV son las lámparas de vapor de mercurio, el reactor y los balastos electrónicos (Figura 30).

La fuente de luz UV son las lámparas de arco de mercurio de baja o mediana presión, bien sea de intensidad baja o alta. La longitud de onda óptima para desactivar



eficazmente los microorganismos se encuentra en el rango de 250 a 270 nm. La intensidad de la radiación emitida por la lámpara se disipa a medida que la distancia de la lámpara aumenta. Las lámparas de baja presión emiten básicamente luz monocromática a una longitud de onda de 253,7 nm. Las longitudes estándar de las lámparas de baja presión son de 0,75 y 1,5 metros, y sus diámetros van de 1,5 a 2,0 cm. La temperatura ideal de la pared de la lámpara se encuentra entre 35 y 50 °C.

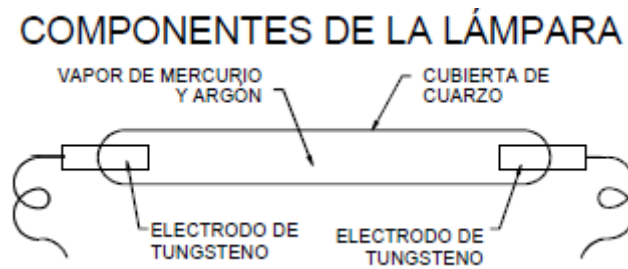


Figura 30. Diferentes partes que componen una lámpara de luz UV. Referencia: [Trojan Technologies].

Existen dos tipos de configuraciones de reactor para el sistema de desinfección con luz UV: de contacto, y sin contacto. En ambos casos, el agua residual puede fluir en forma perpendicular o paralela a las lámparas. En el caso del reactor de contacto, la serie de lámparas de mercurio está recubierta con mangas de cuarzo para minimizar los efectos de enfriamiento del agua residual.

En el caso del reactor sin contacto, las lámparas de luz UV se encuentran suspendidas sobre un conducto transparente que transporta el agua residual que va a ser desinfectada. Esta configuración no es tan común como la configuración del reactor de contacto. En ambos tipos de reactores, el balasto (Figura 31) –o caja de control– proporciona el voltaje de inicio para las lámparas y mantiene una corriente continua [20].

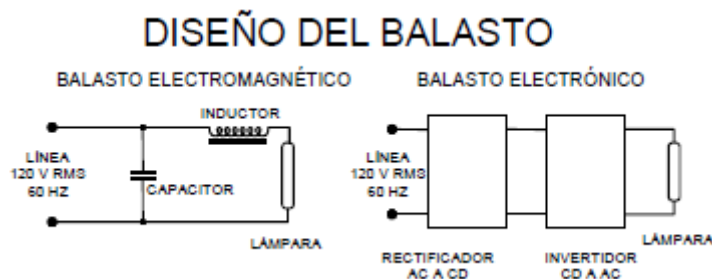


Figura 31. Representación de un balasto. Fuente: [Trojan Technologies].



A continuación, se muestran las ventajas e inconvenientes que dicha tecnología presenta:

Ventajas de la desinfección UV:

- ✓ La desinfección con luz UV es eficaz para la inactivación de la mayoría de los virus, esporas y quistes.
- ✓ La desinfección con luz UV es más un proceso físico que una desinfección química, lo cual elimina la necesidad de generar, manejar, transportar, o almacenar productos químicos tóxicos, peligrosos o corrosivos.
- ✓ No existe ningún efecto residual que pueda afectar a los seres humanos o cualquier organismo acuático.
- ✓ La desinfección con luz UV es de uso fácil para los operadores.
- ✓ La desinfección con luz UV tiene un período de contacto más corto en comparación con otros desinfectantes (menos de 20 segundos incluso con la utilización de las lámparas de baja presión).
- ✓ El equipo de desinfección con luz UV requiere menos espacio que otros métodos.

Desventajas de la desinfección UV:

- ✓ La baja dosificación puede no inactivar efectivamente algunos virus, esporas y quistes.
- ✓ Algunas veces los organismos pueden reparar o invertir los efectos destructivos de la radiación UV mediante un “mecanismo de reparación”, también conocido como fotoreactivación o, en ausencia de radiación, como “reparación en oscuridad”.
- ✓ Es necesario un programa de mantenimiento preventivo para controlar la acumulación de sólidos en la parte externa de los tubos de luz.
- ✓ La turbidez y los sólidos suspendidos totales (SST) en el agua residual hacen que la desinfección con luz UV sea ineficaz. El uso de la desinfección con lámparas UV de baja presión no es tan efectivo en el caso de efluentes secundarios con niveles de SST mayores a 30 mg/L.



- ✓ La desinfección con luz UV no es tan económica como la desinfección con cloro, pero los costos son competitivos cuando la cloración requiere de cloración y se cumple con los códigos de seguridad relacionados con el manejo del cloro.

Costos de Desinfección UV:

El rango de precios de los equipos de desinfección UV varía ampliamente, de menos de US\$ 1.000 a más de US\$ 400.000 dependiendo del caudal. Aproximadamente, dos tercios de los equipos UV son adquiridos a través de contratista; 19% directo del fabricante y 14% a través de distribuidor o terceros. Dado que el costo del equipo es una parte importante del costo de capital, se estima que el costo de capital sea el costo del equipo más 20%. Los costos promedio de capital son de US\$ 1,08 centavos/m³ a US\$ 2,07 centavos/m³ para una dosis de 40 mWs/cm² tratando un caudal entre 91 y 6,814 m³/día.

Los mayores costos de operación y mantenimiento incluyen costo de repuestos, costo de energía y mano de obra. Para un caudal entre 91 y 6.814 m³/día y una dosis de 40 mWs/cm², los costos se estiman entre US\$ 0,19 centavos/m³ y US\$ 0,53 centavos/m³ para piezas de repuesto, entre US\$ 0,17 centavos/m³ y US\$ 0,45 centavos/m³ por energía, y entre US\$ 0,0026 centavos/kgal y US\$ 0,11 centavos/kgal por mano de obra. En general, los costos promedio de tres fabricantes de equipos UV varían entre US\$ 0,39 centavos/m³ a US\$ 1,09 centavos/m³ para una dosis de 40 mWs/cm². Los costos de mano de obra y energía varían de lugar a lugar [21].

5.1.2.1. EDAR de Mataró

Este trabajo presenta los resultados experimentales obtenidos en una planta piloto de regeneración de agua residual, con capacidad para producir 20 m³/día de agua regenerada. El agua regenerada se destina al riego experimental de cultivos de consumo crudo. La planta está instalada en la EDAR de Mataró, donde se depuran aguas residuales con un contenido notable de aguas industriales. La planta piloto está dotada de diversos procesos de tratamiento (coagulación, floculación, decantación, filtración y desinfección) que se han optimizado para alcanzar la inactivación total de los indicadores bacterianos [22].

El efluente secundario de la EDAR de Mataró cumple las condiciones requeridas para su utilización en riego agrícola, pero para adecuar a los niveles exigidos en cuanto a calidad sanitaria se refiere, se propone una optimización del proceso de regeneración convencional utilizado (coagulación-floculación-decantación-filtración), el cual ha permitido mejorar notablemente la turbiedad del agua, al igual que la transmitancia a la luz de 254 nm.

La etapa de coagulación-floculación-decantación es la que produce las mejoras más significativas de los parámetros de calidad físicoquímica del agua evaluados. El



coagulante PAXXL-63 es el que mejor se adecua a la calidad del efluente secundario de la EDAR de Mataró. Una dosis de 12 mg/L Al^{+3} , en lugar de la obtenida en el laboratorio (24 mg/L Al^{+3}), junto con una dosis de polielectrolito (A-321 E) de 0,5 mg/L asegura una coagulación-floculación-decantación óptima y reduce sensiblemente la producción de fangos. El proceso de coagulación-floculación-decantación permite obtener un agua con una turbiedad media de 7,2 UNT y aumentar la transmitancia del agua del 18% al 36%. Aunque el uso de polielectrolito permitió mejorar la turbiedad residual del agua y disminuir la producción de fangos en el decantador, no consiguió mejorar la transmitancia del agua ni el grado de inactivación vírica. La dosis de PAX XL-63 aplicada logró una reducción del 51% (0,3 ulog/100 mL) de los SO presentes en el efluente secundario.

La desinfección con luz ultravioleta (UV) del agua regenerada en la EDAR de Mataró no satisface el criterio de calidad bacteriológica establecido en el Título 22 del Código del Agua de California. Tampoco permite satisfacer las recomendaciones sanitarias de la OMS (1989) o los criterios propuestos por el CEDEX (1999). La materia orgánica disuelta en el efluente tratado hace que la transmitancia del agua regenerada sea baja, lo que interfiere de forma significativa con el proceso de desinfección con luz UV, disminuyendo su eficacia. Aunque el tratamiento terciario de regeneración consigue aumentar la transmitancia del agua desde un valor medio del 18,5% hasta un 36%, no es suficiente para conseguir los rendimientos esperados. La desinfección con una dosis de luz UV de 125 mJ/cm² permite alcanzar una inactivación media de 2,9 unidades logarítmicas (ulog/100 ml) de CT y de 3,8 ulog/100 ml de SO, a partir de unas concentraciones iniciales de 5,8 ulog/100 mL de CT y de 5,3 ulog/100 mL de SO.

La aplicación de una correcta dosis de hipoclorito sódico, tras el paso de la desinfección por luz UV, mejora la eficacia de desinfección de la misma, ya que inactiva a los microorganismos que la luz UV no ha sido capaz de inactivar. La dosis apropiada para que haya podido surtir efecto ha sido de 2 mg Cl_2 /L.

Los SO han resultado ser menos resistentes a la luz UV que los indicadores bacterianos convencionales. Mientras que los CT registraron una inactivación entre 2,4 y 2,8 ulog/100 mL, con dosis comprendidas entre 75 y 125 mJ/cm², los SO experimentaron una inactivación entre 3,0 y 4,0 ulog/100 mL con esas mismas dosis. Estos resultados pueden interpretarse en este caso afirmando que la adopción de los CT ofrece más garantías como indicador de contaminación que los colifagos somáticos.

5.1.2.2. *Caso en Colombia*

Colombia es un país donde existe una gran problemática entorno a la falta de acceso y a la deficiente calidad del agua. Alrededor del 35% de la población del país, es decir, 16 millones y medio de personas padecen de dicho inconveniente. Por tal razón, en el año 2015, se realizó un estudio sobre métodos de desinfección que reduzcan la carga bacteriana del agua y que a su vez no cause efectos secundarios en la población.



Estos motivos llevaros a seleccionar la desinfección del agua mediante luz UV como método idóneo.

Primeramente, se tomó agua sin contaminantes microbiológicos y libre de cloro residual. Las muestras fueron preparadas para inocularlas con bacterias coliformes, agregando al agua estiércol de ganado bovino, para así tener un cultivo representativo de unidades formadoras de colonias (UFC) (Tabla 5).

Tabla 5. Análisis microbiológico inóculo inicial. Referencia: [23]

Análisis Microbiológico	Resultado
E. coli (UFC/100 mL)	>8,0
Coliformes totales (UFC/100mL)	>8,0
Mesófilos (UFC/mL)	20·10 ⁴

La fase experimental de este estudio comprendió la ejecución de varios experimentos de inactivación de las células de *E. coli*, Coliformes Totales y Mesófilos.

Para este caso específico, la longitud onda óptima fue de 253,7 nm. La turbidez es un parámetro influyente en la desinfección de agua por medio de UV. Se logró comprobar que a medida que se incrementa la turbidez del agua, es menor la inactivación.

El tiempo mínimo de exposición para poder alcanzar la inactivación de los microorganismos es de 300 segundos, con una intensidad de 34,64 mWs/cm². Se lograron obtener valores menores a 1,1 UFC/100 mL de *E. coli* y Coliformes Totales y menor a 100 UFC/mL de microorganismos mesófilos.

La dosificación determinada efectiva en la desinfección depende del microorganismo objeto de estudio, dado que no todos los agentes patógenos reaccionan igual manera ante los efectos de la luz UV. Se logró establecer que *E. coli* reacciona ante un menor tiempo comparado con coliformes totales.

Se logró comprobar que en cargas altas como la del inóculo inicial con *E. coli* > 8,0 (UFC/100 mL), Coliformes Totales > 8,0 (UFC/100 mL) y Mesófilos 20·10⁴ (UFC/mL), el proceso de desinfección mediante UV no es eficiente aun en exposiciones mayores a los 300 segundos [23].

5.1.3. Ozonización

El ozono es oxígeno enriquecido, constando de tres átomos de oxígeno, es inestable y se descompone con cierta facilidad en oxígeno normal y oxígeno nascente, que es un fuerte oxidante. Es un gas de color azul característico, muy inestable,



detectable y fácilmente reconocible por su olor picante con concentraciones entre 0,08 y 0,1 ppm.

A continuación, se muestran una serie de puntos a favor y en contra de dicha tecnología [24].

Ventajas:

- ✓ El ozono es un reactivo muy oxidante. La muerte de bacterias ocurre directamente por la desintegración de las paredes celulares, debido a un proceso de oxidación catalítica.
- ✓ Es un virucida efectivo, actúa oxidando globalmente la materia de estos. Se ha demostrado la existencia de un umbral de la dosis residual de ozono ($0,3 \text{ g/m}^3$) por encima de la cual la inactivación es total. Si esta dosis se mantiene al menos 4 minutos, el grado de inactivación es superior al 99,99% de los virus presentes al principio.
- ✓ Reduce la turbiedad, el contenido en sólidos en suspensión y las demandas químicas (DQO) y biológicas (DBO) de oxígeno.
- ✓ Ausencia de subproductos tóxicos. El ozono se transforma en oxígeno.
- ✓ Simplicidad en el montaje y automatización del sistema.
- ✓ Bajos costos de explotación.
- ✓ Reoxigenación del medio acuoso.

Desventajas:

- ✓ Es un producto caro que hay que producir *in situ*. El coste inicial de un sistema completo de tratamiento con ozono es bastante elevado, comparado con otros oxidantes, no sólo es necesario el ozonizador, sino también la unidad de tratamiento y secado de aire, la cámara de contacto, la desgasificación y posterior eliminación del ozono residual, además de los elementos de control, sofisticados autómatas electrónicos.
- ✓ El ozono es poco soluble en el agua, lo cual limita extremadamente su aplicación, a 20 °C sólido se disuelven 570 mg/L.



- ✓ En apariencia resulta ideal por su potencia y poca persistencia, pero hay que estudiar más en profundidad su efecto sobre los compuestos orgánicos, y ver los compuestos que se producen. Necesidad de una desinfección residual.

5.1.3.1. Reutilización para riego agrícola en Cuba

El objetivo del trabajo fue la evaluación a escala piloto de los procesos de coagulación-floculación, filtración y ozonización (cada uno por separado y con la combinación de todos) en el tratamiento de agua residual municipal para su reutilización en riego agrícola [25].

Los coagulantes más eficientes fueron policloruro de aluminio y sulfato de aluminio. Se seleccionó arena sílice por su mejor eficiencia como medio filtrante. En la etapa de ozonización se obtuvieron modelos estadísticos para predecir los niveles de reducción de los contaminantes evaluados, ese propone una dosis mínima de ozono de 40 mg/L. Con el esquema de tratamiento propuesto en la Figura 32 se logran eficiencias de reducción de los parámetros físico-químicos (84-98%) y microbiológicos (99,998-100%), que permiten cumplir con las normas para reutilización en riego agrícola.

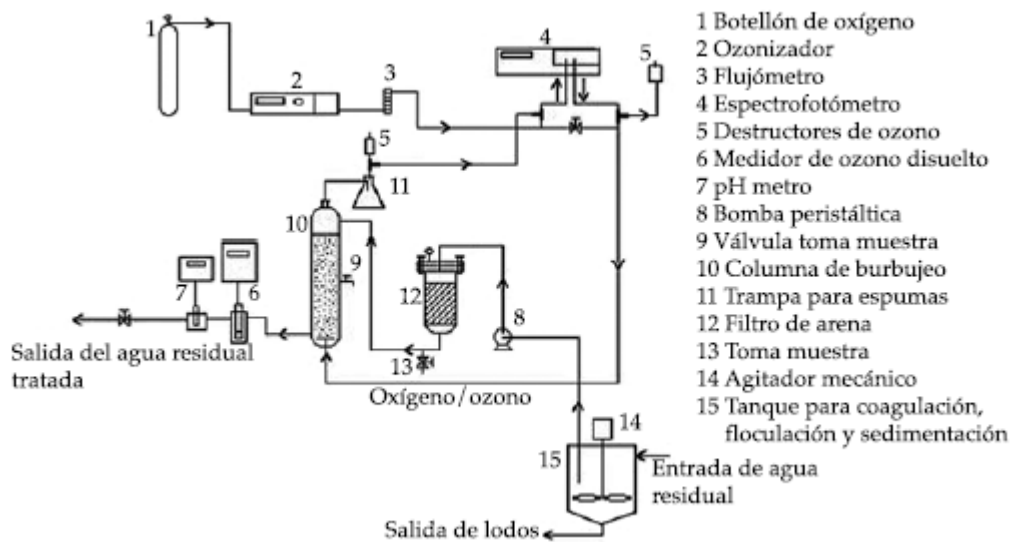


Figura 32. Diagrama de flujo utilizado a escala piloto. Referencia: [Eliet Veliz, José Guadalupe Llanes].

En la Tabla 6 se pueden observar los rendimientos de reducción para cada parámetro a analizar en el agua residual.



Tabla 6 Valores promedio y porcentajes de reducción de cada proceso y totales para todo el esquema a escala de banco. Comparación entre dosis de ozono. Referencia: [25].

Etapas/Parámetros		AC	C-F + F	Ozonización O ₃ (mg/L)			ET (%)
				40	80	160	
Turbidez	UNT ± DE	317 ± 21,2	28,2±10,4	5,7±1,1	5,2±0,8	5±1	98
	R(%)	-	91	80	82	82	
SST	mg/L ± DE	283 ± 19,3	33,6±8,2	10,2±2,8	9,2±1,1	8,8±0,7	96
	R(%)	-	88	70	73	74	
Color	U Pt-Co ± DE	1270 ± 90,6	215,2±18,3	56,5±5,6	51,5±3,6	28,6±4,2	96
	R(%)	-	83	74	76	87	
Abs 254 nm	Abs- ± DE	0,988±0,103	0,543±0,09	0,15±0,01	0,14±0,01	0,11±0,01	84
	R(%)	-	45	71	75	80	
DQO	mg O ₂ /L ±DE	281,3 ±10,7	74,9±14,6	41,2±9,1	27,3±6,9	15,6±1,5	85
	R(%)	-	73	45	64	79	
Coliformes Fecales	NMP/100mL ±DE	8,10±0,15·10 ⁶	1,22±0,50·10 ⁵	830±35	110±25	0	99,8
	R(%)	-	98,49	99,32	99,91	100	
Huevos de helminto	HH/L	4,3±1,2	2,2±0,9	0	0	0	100

Donde:

DE: Desviación Estándar.

AC: Agua cruda sin tratamiento. Muestra inicial.

C – F + F: Agua residual tratada por coagulación-floculación con sulfato de aluminio en dosis de 100 mg/L, y una posterior filtración por arena sílice.

Dosis O₃: Dosis de ozono aplicada en la etapa de ozonización (mg/L)

R (%): Porcentaje de reducción parcial, al compararse los valores obtenidos en cada etapa con respecto a la muestra en la etapa anterior.

ET (%): Porcentaje de eficiencia total entre AC y la dosis de ozono aplicada de 80 mg/L.

Conclusiones:

La eficiencia de los coagulantes resultó ser policloruro de aluminio > sulfato de aluminio > sulfato férrico. Al aumentar las velocidades de agitación en la mezcla rápida (de 72 a 278 G-S-1) se obtienen mejores resultados en la reducción de turbidez y permite disminuir las dosis de coagulante entre 33 y 50%. Se seleccionó el sulfato de aluminio, en dosis de 100 mg/L, como coagulante a recomendar para mayores escalas de tratamiento, por ser más económico y más fácil de emplear que el policloruro de aluminio. Se seleccionó arena sílice por su eficiencia como medio filtrante, por ser más económico y duradero que las otras opciones, y con mejor operación de filtrado y retrolavado. Se propone aplicar dosis de ozono de entre 40 y 80 mg/L para una correcta desinfección. Con el esquema de tratamiento propuesto, se logran obtener efluentes tratados con una calidad físico-química y microbiológica que cumple con los



requisitos para su reutilización en riego agrícola, establecida por la norma de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos de América [US EPA, 1992] y la norma de la Organización Mundial de la Salud [WHO, 2006].

5.1.4. Procesos no convencionales

A continuación, se hablará de una serie de casos experimentales que también servirán para analizar la calidad del efluente con el fin de seleccionar unos parámetros óptimos para que el agua sea apta para extinción de incendios forestales.

5.1.4.1. Filtración por membrana más proceso de oxidación

En el año 2008, el Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental de la Universidad de Yonsei (Seúl, Corea del Sur), realizó un estudio a escala piloto basado en depurar agua mediante un proceso de microfiltración y oxidación avanzada. La finalidad del estudio no era otra que reutilizar agua para consumo humano y extinción de incendios. El tratamiento de depuración del agua fue denominado como A₂O-MF-OP (Anaeróbico, Anóxico, Óxico, Microfiltración y Proceso de oxidación). En las Figuras 33 y 34 puede apreciarse los diagramas de equipo; resaltar que se eligió ozonización como proceso de oxidación [26].

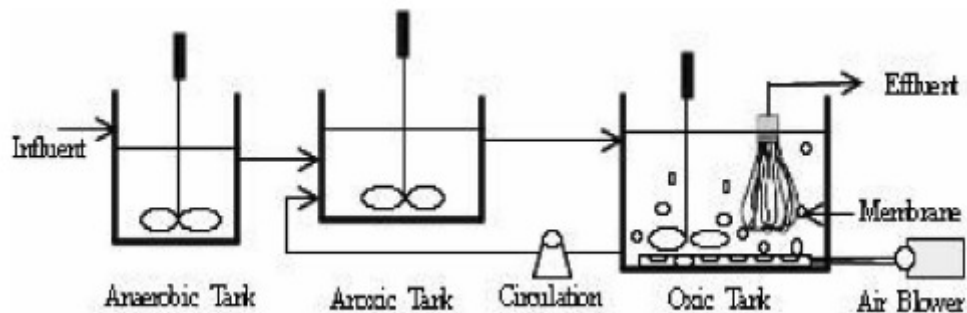


Figura 33. Diagrama de equipos del sistema A₂O-MF. Referencia: [Joonkyu Kim, Insang Song].

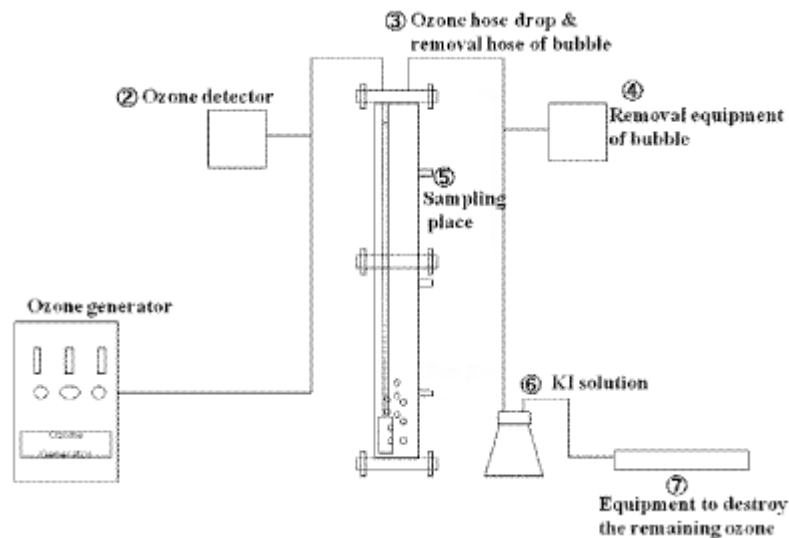


Figura 34. Diagrama esquemático del sistema de ozonización experimental. Referencia: [Joonkyu Kim, Insang Song].

Los datos tomados en el efluente fueron los siguientes:

- ✓ DQO: 12 mg O₂/L
- ✓ SS: 5 mg/L
- ✓ E. coli: 0 UFC/100 mL
- ✓ Turbidez: 0,62 NTU
- ✓ Color: 15,8 Pt-Co

El sistema A₂O-MF-OP satisface plenamente los valores legales para reutilización de aguas en Corea, los cuales son DQO menor a 20 mg/L, turbidez menor a 2 NTU, colorimetría inferior a 20 Pt-Co y sólidos en suspensión por debajo de 5 mg/L.

También destacar que para dicho estudio se contempló la microfiltración por ser las membranas de este tipo más baratas que sus homólogos para ultrafiltración o nanofiltración.



5.1.4.2. *Estudio a planta piloto empleando esferas de titanio, filtración por membrana y oxidación avanzada*

En este estudio, realizado el mismo año por los mismos autores que el estudio anterior, resulta innovador en tanto que es un proceso que combina esferas de titanio, microfiltración y oxidación avanzada [27].

Los objetivos de este estudio fueron evaluar la columna de esferas de titanio, la membrana de microfiltración- y la oxidación avanzada en conjunto para la eliminación de DQO, turbidez, colorimetría, sólidos en suspensión, y *E. coli* en el tratamiento de aguas residuales.

A continuación, en las Figuras 35 y 36, se muestran los esquemas del proceso junto con el sistema de ozonización del agua.

Para este proceso, los resultados fueron los siguientes:

- ✓ DQO: 14 mg O₂/L
- ✓ SS: 0 mg/L
- ✓ *E. coli*: 0 UFC/100 mL
- ✓ Turbidez: 0,68 NTU
- ✓ Color: 16,5 Pt-Co

Los resultados informados en este estudio indican que este proceso muestra buena capacidad de tratamiento. Y al igual que el estudio predecesor, se adapta a los límites legales de Corea del Sur.

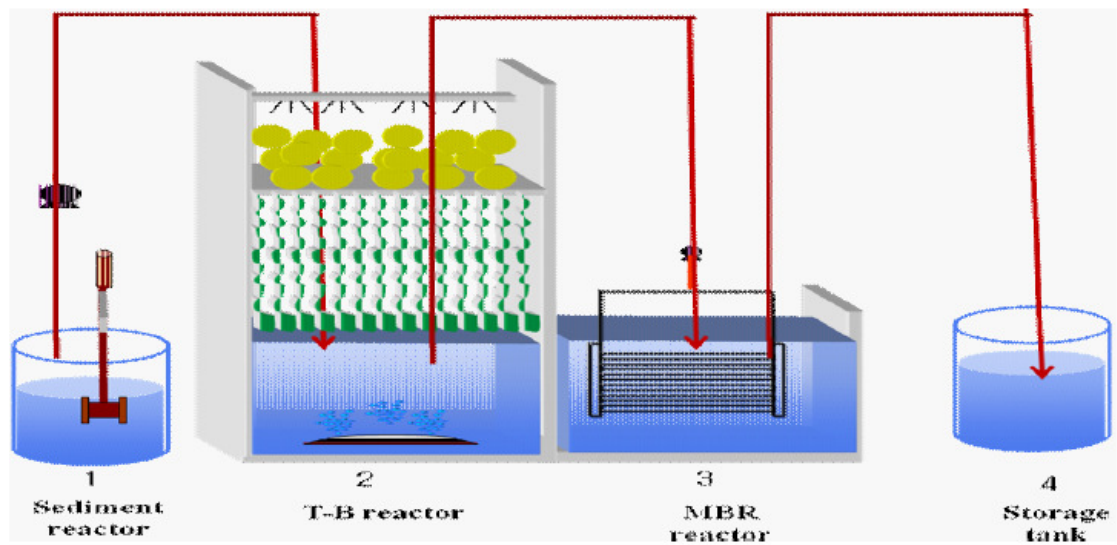


Figura 35. Diagrama esquemático de las esferas de titanio junto con la membrana de microfiltración. Referencia: [Joonkyu Kim, Insang Song].

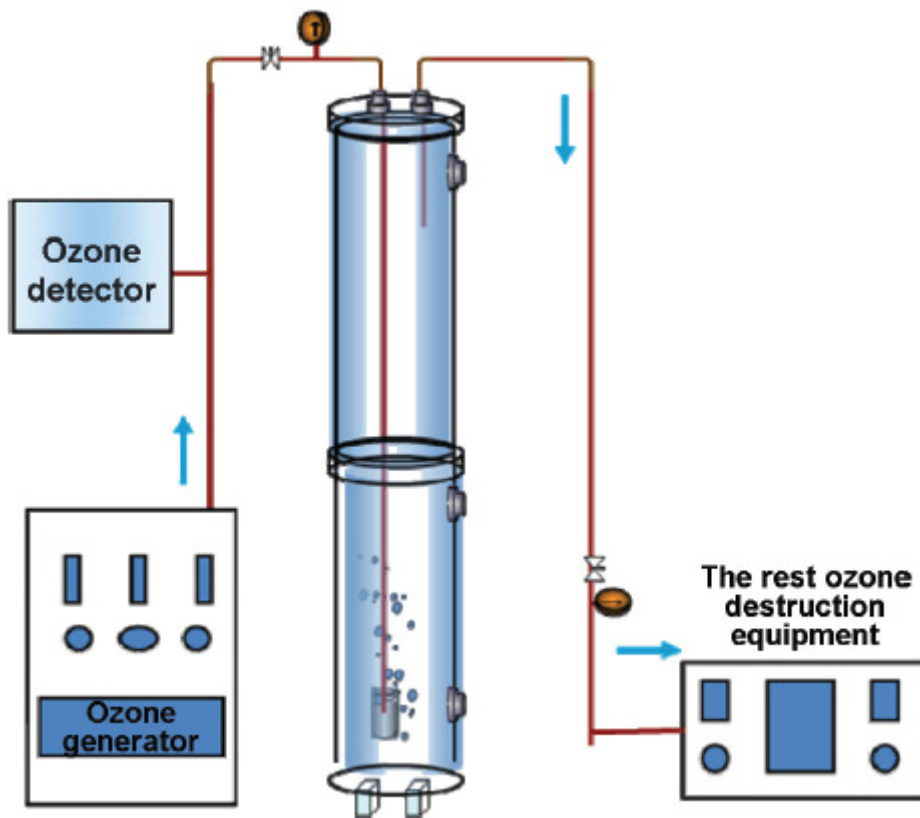


Figura 36. Diagrama esquemático del sistema de ozonización. Referencia: [Joonkyu Kim, Insang Song].



5.1.4.3. Eliminación de microorganismos mediante aireación integrada en laguna

El objetivo de este estudio fue determinar la eficiencia de la laguna (con recirculación de fango) en la eliminación de huevos parasitarios, quistes protozoarios, y coliformes termotolerantes de la EDAR de Marivan (Irán) [28]. El estudio experimental se realizó de julio a diciembre de 2015 sobre el afluente y efluente de la EDAR de Marivan. Las muestras fueron evaluadas semanalmente en muestras de 100 mL y 10 L para el afluente y efluente, respectivamente. En las Tablas 7 y 8 se muestra la evolución de los diferentes microorganismos en el afluente y efluente en los meses de verano, así como en los meses de invierno.

Tabla 7. Parámetros medidos en el afluente y efluente durante los meses de verano. Referencia: [28].

Muestra	Afluente	Efluente
Quistes protozoarios	45,04±8,16	0,49 ± 0,06
Huevos de nematodo	24,1 ± 3,86	0
Huevos parasitarios totales	23,9 ± 4,74	0,11 ± 0,06
<i>Antamoba coli</i>	17,32 ± 0,87	0
<i>Giardia</i> (quistes)	27,71 ± 4,47	0,51 ± 0,02
Huevo de <i>Hymenolepis nana</i>	0	0
Huevo de <i>Trichorhynchus trichorhynchus</i>	0	0
Huevo de <i>Ascaris lumbricoides</i>	28,34 ± 3.77	0
Coliformes termo tolerantes	26,12·10 ⁵	31,08·10 ⁴

Tabla 8. Parámetros medidos en el afluente y efluente durante los meses de invierno. Referencia: [28].

Muestra	Afluente	Efluente
Quistes protozoarios	17,02 ± 2,76	0
Huevos de nematodo	22,54 ± 3,86	0
Huevos parasitarios totales	31,25 ± 9,74	0,27 ± 0,04
<i>Antamoba coli</i>	4,52 ± 0,57	0
<i>Giardia</i> (quistes)	12,5 ± 1,47	0
Huevo de <i>Hymenolepis nana</i>	6,52 ± 1,57	0,35 ± 0,06
Huevo de <i>Trichorhynchus trichorhynchus</i>	0,11 ± 0,07	0
Huevo de <i>Ascaris lumbricoides</i>	24,71 ± 7,65	0
Coliformes termo tolerantes	54,21·10 ⁵	10,63·10 ⁵



Los resultados de este experimento indican que la mayor concentración de huevos en el agua bruta residual en verano e invierno son los pertenecientes a los protozoarios y *Ascaris lumbricoides*, respectivamente. Esto es debido a la elevada resistencia contra las adversidades climatológicas. La máxima eficiencia en el proceso para verano e invierno es del 88,1% y 80,77%, respectivamente.

En este estudio, a pesar de los altos tiempos de residencia en la laguna, los coliformes fecales no alcanzaron los valores propuestos por la Organización Mundial de la Salud para regadío. Por lo tanto, es necesario poner especial atención a las condiciones climáticas de la zona. Se recomienda una eliminación de 5 unidades logarítmicas en dicha EDAR. En el caso de este país, para que este método sea eficaz para aguas de riego, se debería implantar un tratamiento de desinfección auxiliar, como cualquiera de los vistos anteriormente.

5.2. Agua regenerada procedente de EDAMs

Este apartado cobra especial énfasis, debido a que, aunque el mar supone una fuente ilimitada de agua, no es aconsejable usarla directamente para extinción de incendios. Aquí cobra especial relevancia una de las diversas propiedades del suelo, la salinidad. Dicha propiedad se refiere a la cantidad de sales en el suelo y puede ser estimada por la medición de la conductividad eléctrica (CE) de una solución extraída del suelo.

La salinidad puede afectar al crecimiento de las plantas en varias maneras:

- ✓ Los daños directos que causan la salinidad.
- ✓ Disminución de la absorción del agua por las raíces.

Una concentración alta de sales tiene como resultado un potencial osmótico alto de la solución del suelo, por lo que la planta tiene que utilizar más energía para absorber el agua. Bajo condiciones extremas de salinidad, las plantas no pueden absorber el agua y se marchitan, incluso cuando el suelo alrededor de las raíces se siente mojado al tacto. Las plantas se ven afectadas cuando el contenido en sales solubles excede el 1% [29].

Otra razón por la que no se recomienda el uso de agua salada, según Germán Brito, Químico Industrial de la Universidad Católica de Valparaíso (Chile) explica lo siguiente: “La sal de mar, debido a la alta cantidad de salinidad que tiene, genera corrosión en los metales, de manera que el daño en la maquinaria podría ser irreversible. La reacción química produciría una oxidación que daña a los metales, en este caso el avión que transporte el agua.” [30].



En este apartado, cabe destacar la mención por parte de Alberto Vázquez Figueroa y su contribución a la lucha contra los incendios forestales, desde el punto de vista de la desalación de agua [31-34].

El sistema se denomina Sistema Integral VF y fue ideado por el escritor e inventor Alberto Vázquez-Figueroa. Debido a ello el llamado Sistema Integral VF se basa en las patentes 950075 /07-04-95 y 9502446/12-12-95 y su principal objetivo se centra en equilibrar la curva de consumo energético disminuyendo sus costes, al tiempo que se desala agua de mar.

En mayo de 2005, Vázquez Figueroa señaló al Ministerio de Industria la conveniencia de aprovechar el mar que nos rodea con el fin de reciclar energía y como resultado se ordenó el estudio “Aprovechamiento hidroeléctrico con agua de mar por acumulación por bombeo”. A la vista de ello la empresa del Ministerio de Medio Ambiente, ACUAMED, realizó el estudio Aprovechamiento hidroeléctrico con agua de mar por el sistema de acumulación por bombeo, cuyos resultados se mostraron el día 22/02/06, determinando que una Central de Bombeo Reversible de Agua de Mar con una potencia de generación de 50 MW/h, tiene un coste de 232.628.879 euros, y produce unos beneficios energéticos anuales (a precio de mercado) de 21.273.582 euros. Pese a estar diseñada para utilizar agua de mar, su funcionamiento es idéntico al de las Centrales Reversibles de ríos y pantanos ya que bombea agua a lo alto de una montaña en “horas valle” con el fin de dejarla caer, turbinarla y devolverla en “horas punta”. Lo que en esencia hace es reciclar energía con la ventaja de que el mar es inagotable, el depósito inferior es gratuito y no se mantiene cautiva un agua potable cada vez más escasa. Con una subvención del 20%, y una vez pagados impuestos rinde unos beneficios del 12%, al tiempo que se amortiza en catorce años.

Comprobado que desde el punto de vista económico el sistema resultaba altamente rentable, llegó el momento de avanzar en el tema de los incendios forestales partiendo de la base de que una serie de grandes depósitos de agua situados escalonadamente a diferentes alturas se encuentran en disposición de apagar cualquier fuego que se inicie en un área de unos treinta kilómetros a la redonda por medio de un sistema de tuberías dispuestas en forma de tela de araña que permiten que el agua fluya por la ley de los vasos comunicantes (Figura 37).

El coste de dichas tuberías ha sido calculado en un 8% de la inversión total y, en buena lógica, debería ser financiado por la Oficina de Protección Civil, según el propio Vázquez Figueroa, encargada de preservar vidas humanas, así como por el Ministerio de Medio Ambiente como aportación a su lucha contra el cambio climático y la desertificación.

En puntos clave de dicha tela de araña, unas torres telescópicas pueden elevarse por la presión del agua hasta unos cinco metros por encima de los árboles.

Una vez comprobado que reciclar energía resulta rentable, nos encontramos con que una serie de grandes depósitos situados en alturas permitirían apagar de cualquier incendio forestal que se produjera en un área de unos treinta kilómetros a la



redonda por medio de una red de tuberías que permitirían que el agua fluyera por su propia presión.

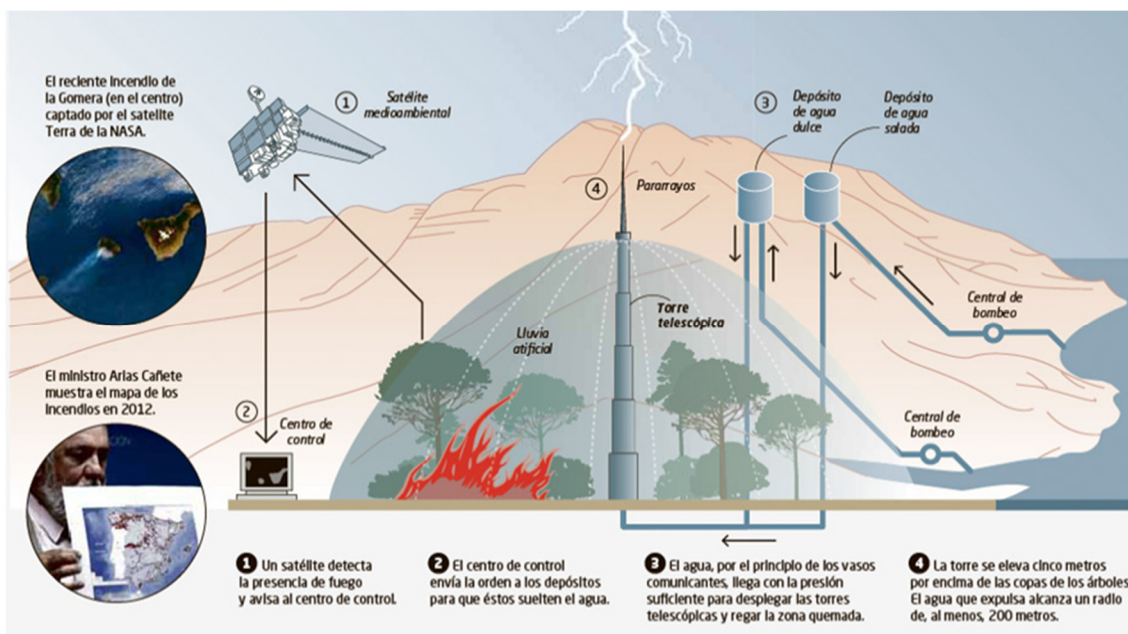


Figura 37. "El apaga fuegos" de Vázquez Figueroa. Fuente: [Alberto Vázquez Figueroa].

En el momento en que unos satélites artificiales que ya existen y que detectan de inmediato cualquier señal de fuego avisa del peligro, el centro de control envía una orden a la torre más próxima que deja caer sobre las llamas una lluvia instantánea que apaga el fuego a semejanza de los sistemas contraincendios que se exigen en la actualidad a todos los grandes edificios.

No solo le está enviando el contenido del depósito de cabecera, sino toda el agua que simultáneamente se está bombeando desde el mar, ya que en caso de necesidad no importa utilizar energía de hora punta.

Para conseguirlo la única condición imprescindible se limita a disponer de una montaña cercana al mar, algo muy común en nuestra geografía. El primer paso consiste en elevar agua de mar a una serie de balsas intercomunicadas entre sí, que ejercen las funciones de regulación, reserva o pre-tratamiento. Simultáneamente el agua se deja caer con objeto de que accione las turbinas (preferentemente Pelton) que generen la energía eléctrica que se envía a la red (Figura 38).

En apariencia significa un trabajo inútil, pero no es así; de ese modo la curva de consumo diario no se equilibra como hasta ahora por el costoso sistema de aumentar o disminuir grupos de producción, sino a base de regular el caudal hidráulico abriendo o cerrando una "llave de paso" según las necesidades de cada instante.

Ello evita a "La Red" la obligación de programar a diario las expectativas de demanda, así como la necesidad de mantener una de "Reserva contra Imprevistos". La energía hidráulica es la única que siempre está disponible de forma inmediata.

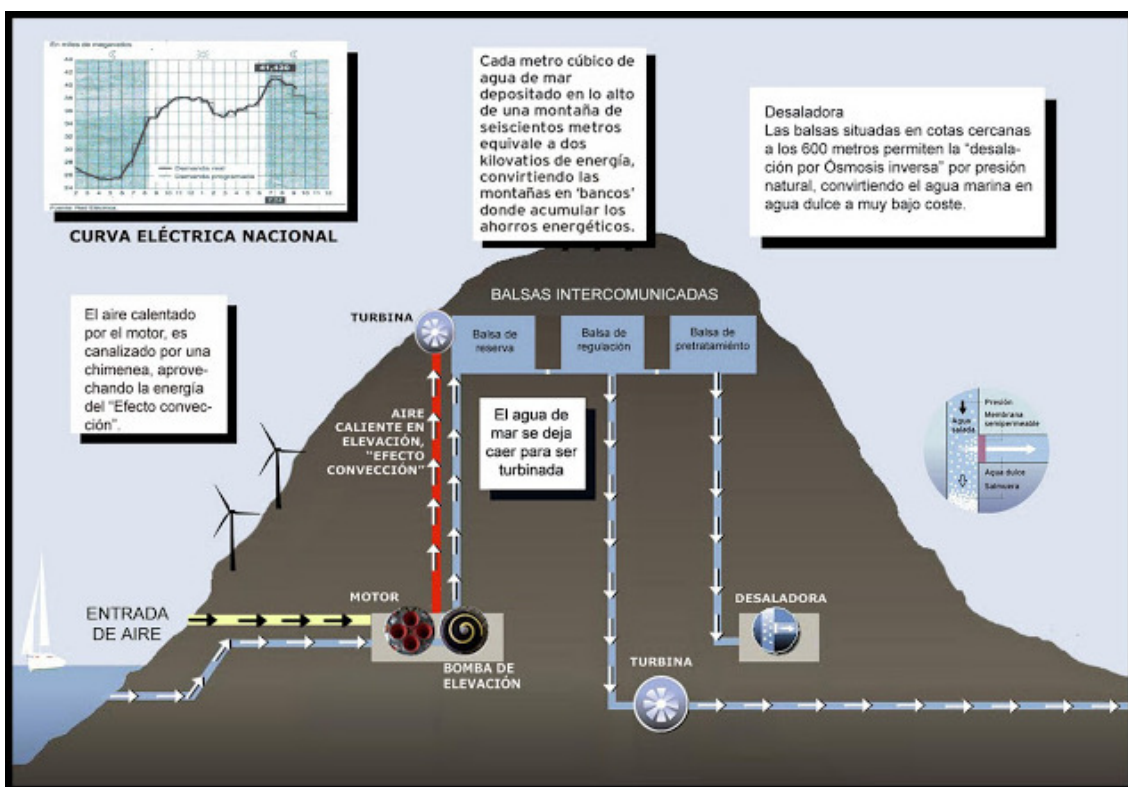


Figura 38. Esquema de la propuesta de Vázquez Figueroa. Referencia: [Alberto Vázquez Figueroa].

Los fines de semana, cuando el consumo energético disminuye de forma notable, se reabastecen las balsas de reserva disponiéndolas para cinco días de consumo normal y como su capacidad está calculada para que sobrepase cualquier posible demanda diaria, los motores funcionan siempre en un régimen continuo, lo que aumenta su eficacia.

Los gases de escape que producen por pérdida de rendimiento (que en los casos de motores alimentados con gasoil puede alcanzar temperaturas increíblemente altas) calientan una corriente de aire que asciende por una chimenea interior generando una gran cantidad de energía a causa del llamado “Efecto Convección”.

Si la chimenea es lo suficientemente alta se consigue que las pérdidas de un motor se conviertan en ganancias, obteniendo un rendimiento que en ocasiones supera el ciento veinte por ciento, algo impensable en cualquier otra circunstancia.

Cuando la balsa “de pre tratamiento” se encuentran a más de quinientos metros de altura se puede desalar agua por el sistema de “Ósmosis Inversa por Presión Natural”, ya que cada diez metros de columna de agua equivale a una atmósfera de presión.

La mitad se convierte en potable mientras la otra mitad se trasforma en salmuera que al mezclarse con la gran masa de agua proveniente de las turbinas pierde su salinidad por lo que regresa al mar sin afectar ni a la flora ni a la fauna.



En determinados casos se pueden utilizar molinos de viento que contribuyan de forma directa a subir agua a las balsas transformando la inestable energía eólica en energía hidráulica controlada.

Diversificar los puntos de producción constituye un notable ahorro ya que disminuye de forma drástica las pérdidas de energía (en ocasiones hasta del cuarenta por ciento) motivadas por la necesidad de enviarla a grandes distancias desde los centros de producción. Esa descentralización impide que pueda producirse un colapso general de la red tal como se ha producido en algunas ocasiones.

Pero como todo sistema, no alcanza la perfección. En este sentido, toma cierta relevancia la crítica a dicho sistema realizada por Ricardo Marqués Sillero, corresponsal de El País [35]:

“La cuestión, sin embargo, radica en que la energía, necesaria para elevar el agua dulce producida según el método de Vázquez Figueroa un total de 700 metros (630 de profundidad más 70 de altura) hasta el nivel del mar es exactamente, la misma que la necesaria para accionar las motobombas que, a, nivel del mar, sería necesario operar para producir la ósmosis inversa por el procedimiento tradicional. Si esto es así, ¿cuál es la ventaja de la propuesta que estamos analizando? En recientes informaciones se ha resaltado que, al ser la electricidad más barata por la noche se podría construir un depósito subterráneo de almacenamiento de agua dulce (¡a 630 metros de profundidad!) con el fin de accionar las motobombas sólo por la noche. Esto es cierto, pero las mismas motobombas, actuando también por la noche, podrían producir, al nivel del mar, la misma cantidad de agua salada con el mismo consumo energético. Bien es verdad que para ello se necesitaría mayor cantidad de membranas para la ósmosis inversa. ¡Pero nos ahorramos cavar un pozo de 630 metros y construir además un depósito de almacenaje a dicha profundidad! Puestos a explotar la idea, le propongo a Vázquez Figueroa una mejora de su invento, consistente en simular la presión hidrostática del pozo mediante un pistón de acero de peso similar al de la columna de agua (la energía necesaria para impulsar agua de mar dentro del "émbolo" sería entonces, igual a la necesaria para bombear el agua, en el procedimiento de Vázquez Figueroa, a condición de utilizar en apoyo de la: bomba la presión de la salmuera saliente).”

5.2.1. Desinfección del agua salada mediante nanopartículas

Se evalúa la capacidad de siete tipos de nanopartículas (Ag, Cu, Ag-Cu, ZnO, MgO, SiO₂, y nanotubos de carbono) para desinfectar agua desalada procedente de plantas donde se utilizan tanto ósmosis inversa como plantas de destilación *flash* multietapa.

Científicos y profesionales en el campo del tratamiento del agua concibieron que el desinfectante ideal debería poseer las siguientes cualidades [36]:



- 1) Una desarrollada, rápida y consistente inactivación de los microorganismos (precisando de un tiempo de residencia y dosis razonables).
- 2) Barato en comparación con el actual estado del arte.
- 3) Que no sea tóxico e incapaz de producir subproductos que amenacen a la salud humana.
- 4) Elevada tasa de inactivación frente a un rango de microorganismos (protozoos, bacterias y virus) bajo condiciones factibles de pH y temperatura.
- 5) Preferiblemente, que se pueda incorporar al proceso ya existente sin que esto altere significativamente a la cadena del proceso.

Este estudio, que fue llevado a cabo en dos plantas desalinizadoras (Destilación *flash* multietapa y Ósmosis inversa) en los Emiratos Árabes Unidos en el año 2019, para evaluar la utilización de las nanopartículas para desinfectar agua procedente de ósmosis inversa y destilación *flash* multietapa, tenía como objetivo evaluar la capacidad de desinfección de las siete nanopartículas en *E. coli*, *Enterobacter*, *Salmonella* y *Enterococci*.

La Tabla 9 muestra las características de las muestras antes de cloración de la Destilación *Flash* y Ósmosis Inversa.

Tabla 9 Características del agua de Destilación *Flash* Multietapa y del permeado de Ósmosis Inversa. Referencia: [36].

Parámetro	Destilación <i>Flash</i>	Ósmosis Inversa
F ⁻ (mg/L)	0.009	0,025
Cl ⁻ (mg/L)	10,6	103
NO ₃ ⁻ (mg/L)	0,24	0,2
SO ₄ ⁻ (mg/L)	1.3	4,2
Na ⁺ (mg/L)	12	80
K ⁺ (mg/L)	2	7
Ca ²⁺ (mg/L)	4	12
Mg ²⁺ (mg/L)	<1	<1
HCO ₃ ⁻ (mg/L)	15	<1
Conductividad Eléctrica (μS/cm)	80	448
Fuerza Iónica (mM)	1.28	7.17

Se analizaron muestras de ambas plantas tras finalizar la desalinización, pero justo antes del tratamiento por cloración, el agua procedente de la Destilación *Flash*



mostraba elevados niveles de *Coliform bacilli* mientras que, en el proceso de Ósmosis Inversa, el agua contenía *Pseudomonas aeruginosa* y *Coliform bacilli* (Tabla 10).

Tabla 10 Resultados de las muestras para el análisis bacteriológico de Destilación Flash y Ósmosis Inversa (UFC/100 mL). Referencia: [36].

Cepa Bacteriana	Destilación Flash	Permeado de OI
<i>E. coli</i>	No detectado	No detectado
<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	30	$5,6 \cdot 10^5$
<i>Coliform bacilli</i>	$2,4 \cdot 10^{10}$	$8,3 \cdot 10^5$
<i>Enterococci</i>	No detectado	No detectado
<i>Clostridia</i>	No detectado	No detectado

Para comprobar la eficacia de inactivación de las nanopartículas, se llevaron a cabo en muestras de agua procedentes de Destilación Flash y Ósmosis Inversa bajo la presencia de cuatro tipos de bacterias: *E. coli*, *Enterobacter aerogenes*, *Salmonella typhimurium* y *Enterococci faecal*.

Las muestras de agua fueron agitadas para homogenizar la disolución y el contenido se distribuyó entre nueve matraces esterilizados. De los cuales seis se rellenaron con 200 mL, mientras que los otros tres se rellenaron con 300 mL (Figura 39).

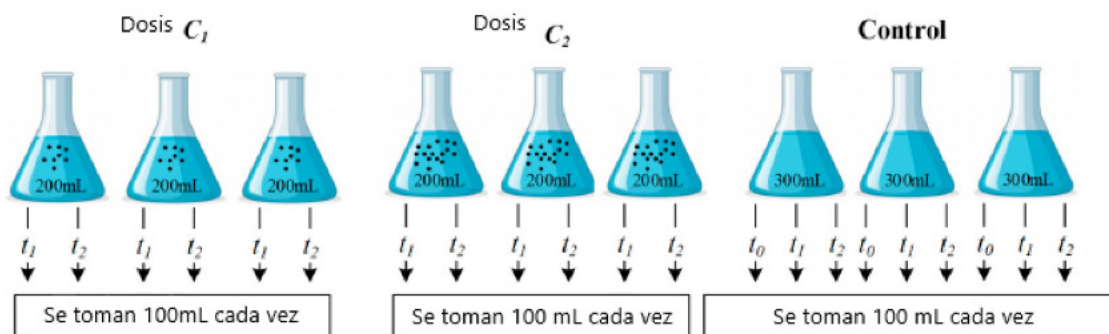


Figura 39 Diagrama de procedimiento de evaluación antibacteriana para un tipo de microorganismo y nano partícula. Referencia: [36].

Las concentraciones de Cu como nanopartículas no superan el límite de 2 mg/L impuesto por la OMS para consumo humano, siendo la concentración empleada de 50 µg/L para ambos casos. La OMS también recomienda no superar la concentración de Ag y Zn en el agua, cuyos valores establece en 0,1 y 3 mg/L, respectivamente. Los



valores empleados para este estudio fueron de 2,6 y 50 $\mu\text{g/L}$ respectivamente. Los tiempos de medición son de 60 y 120 minutos.

Hay varios factores que pueden influir en la actividad antimicrobiana de las nanopartículas, como son el tipo, la concentración, tamaño y forma. En cuanto a los microorganismos, la eficiencia de inactivación podría quedar influenciada por su concentración inicial tanto en las disoluciones como en las cepas.

Las Figuras 40-43 muestran las eficiencias de inactivación frente al cociente concentración por tiempo de las diferentes nanopartículas tanto para Destilación *Flash* como para Ósmosis Inversa. Aunque los rangos de $C \cdot t$ para Ag y Ag-Cu fueron los más bajos, estos demostraron ser los mejores desinfectantes. N_t y N_{ct} son las concentraciones bacterianas con y sin control de nanopartículas en un momento t (minutos), respectivamente.

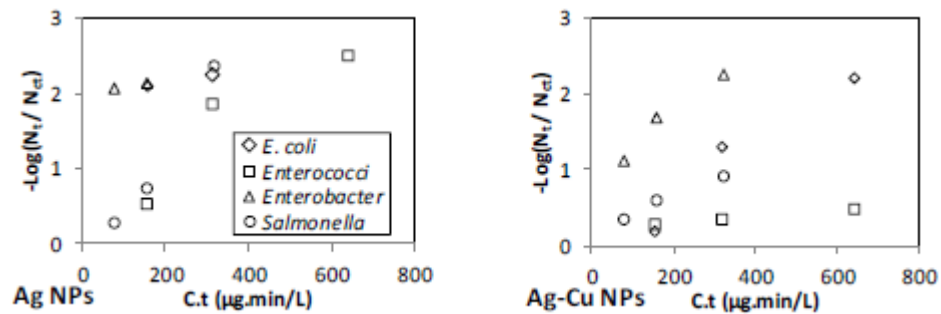


Figura 40. Consecuencia de $C \cdot t$ en la inactivación de *E. coli*, *Enterococci*, *Enterobacter* y *Salmonella* en el permeado de Ósmosis Inversa. Referencia: [36].

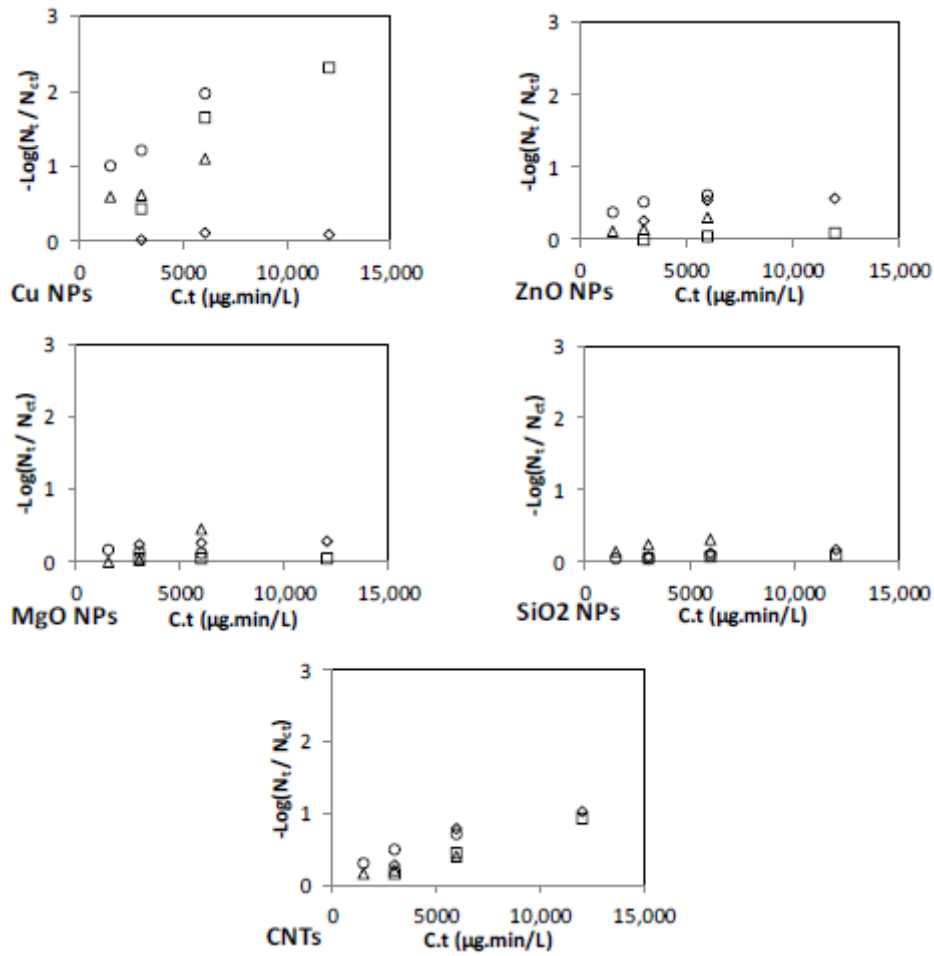


Figura 41. Consecuencia de C-t en la inactivación de *E. coli*, *Enterococci*, *Enterobacter* y *Salmonella* en el permeado de Ósmosis Inversa. Referencia: [36].

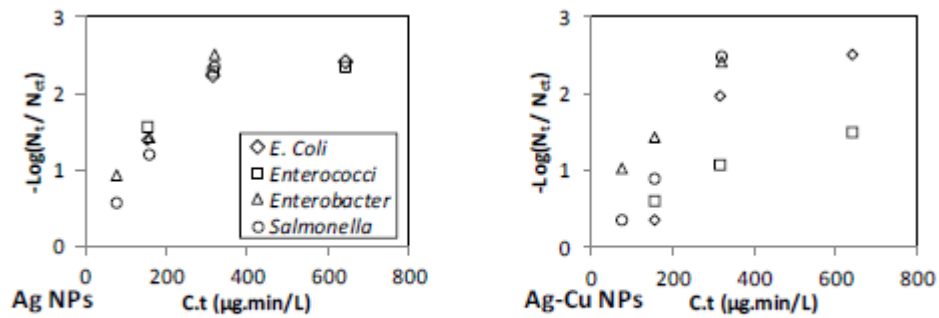


Figure 4. Cont.

Figura 42. Consecuencia de C-t en la inactivación de *E. coli*, *Enterococci*, *Enterobacter* y *Salmonella* en el destilado flash. Referencia: [36].

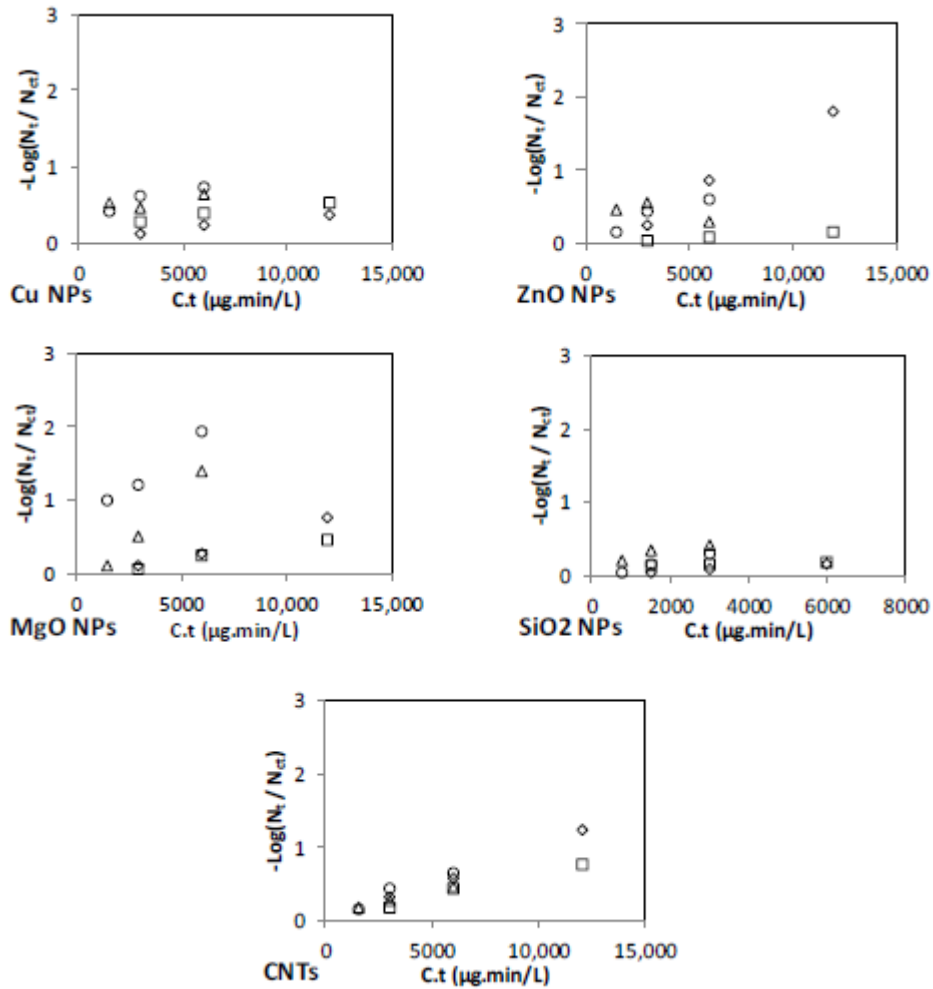


Figura 43. Consecuencia de C.t en la inactivación de *E. coli*, *Enterococci*, *Enterobacter* y *Salmonella* en el destilado flash. Referencia: [36].

La constante cinética (k) indicó que el rendimiento antimicrobiano de Ag fue el mejor entre todas las nanopartículas probadas y para las muestras de agua de MSF y RO probadas, seguido de las NP de Ag-Cu. Los resultados también revelaron que *Enterobacter* (cepa TPC129) parecía estar más inactivado que los otros tres tipos de bacterias para cada una de las nanopartículas, mientras que los *Enterococos* grampositivos (cepa NCTC775) parecían ser los menos influenciados por las nanopartículas. También se encontró que los efectos biocidas de las nanopartículas de Ag, Ag-Cu, ZnO y CNT fueron casi iguales en las muestras de agua enriquecida con Destilación *Flash* y Ósmosis Inversa, a pesar de algunas variaciones en la composición química de las dos muestras de agua. Sin embargo, las variaciones en las características químicas de las dos muestras de agua parecieron causar diferencias notables en las eficacias antibacterianas de Cu y MgO.



5.2.2. Desionización Capacitiva

La desionización capacitiva, (CDI) como técnica de electrosorción para obtener agua, es una de las más prometedoras tecnologías existentes en el campo de la desalinización. CDI ha emergido como técnica de electrosorción para desalinizar agua debido a una serie de características como bajo requerimiento energético, no genera subproductos nocivos, costes de mantenimiento y operación relativamente baratos, ecológico, carente de membrana, y apropiado para operaciones a pequeña escala.

Aun así, para alcanzar un buen cumplimiento de CDI, se requiere un buen diseño de la estructura material del electrodo. Hay un estudio realizado con nanofibras de nitrógeno-TiO₂/ZrO₂ que llevan incorporado carbón activo (NACTZ) para conseguir agua desalada (Figura 44). Las nanofibras se usan para compensar la baja capacitancia e hidrofobia del carbón activo, el cual limita la CDI durante el proceso [37].

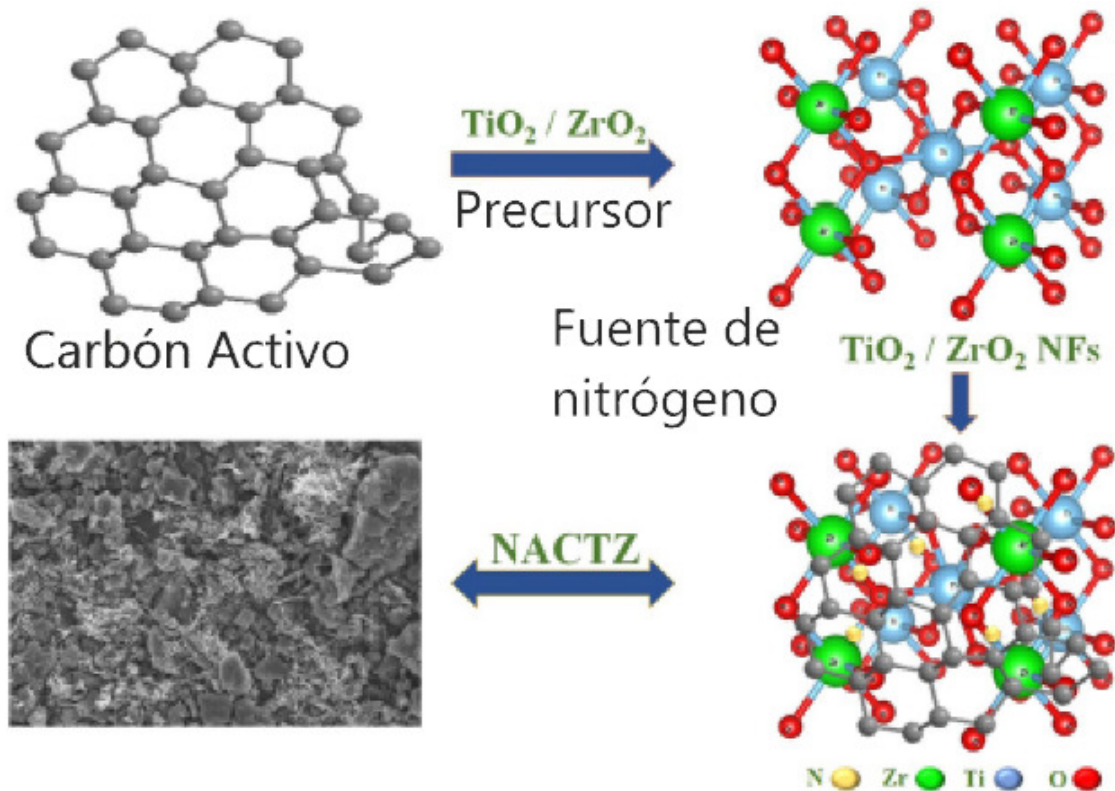


Figura 44. Síntesis del nanocompuesto NACTZ. Referencia: [Ahmed S. Yasin].

En CDI, se controla un par de electrodos mediante un voltaje de 0,8-1,2 V y los iones salinos se capturan y almacenan en la doble capa de los electrodos de carbón poroso del condensador, el cual es el proceso de carga. Por lo tanto, la eficiencia deseada en un CDI depende mayormente del grado de acción del electrodo. Para que un electrodo trabaje de manera óptima, este debe poseer buenas propiedades tales como elevada área superficial, gran conductividad, inercia química, elevada capacitancia y resistencia mecánica.



Entre los distintos tipos de materiales carbonosos que cumplen las anteriores propiedades, el carbón activo (CA, o AC en inglés), destaca entre otros homólogos tales como los nanotubos de carbono o aerogeles de carbón debido a su notable elevada área superficial, mayor conductividad eléctrica y rentabilidad a mayor escala. A pesar de las muchas ventajas que ofrece el carbón activo, también posee otros inconvenientes como la humectabilidad superficial y baja capacitancia específica limitan el uso del carbón activo, debido a la dificultad que los iones presentan en los caminos a recorrer resultando así en una tardía transportación de los electrolitos en el proceso de carga/descarga. Consecuencia de ello, se realizó el estudio con materiales inorgánicos como TiO_2 y ZrO_2 , que han logrado complementarse muy bien con electrodos para CDI, por su gran conductividad eléctrica, por sus buenas propiedades hidrófilas, eficacia en eliminar algunos microorganismos y por ser económicos. También se ha demostrado en los últimos años que la adición de nitrógeno al carbón activo mejora su capacidad de desalinización.

La estrategia de este estudio fue, además de obtener los requisitos necesarios para los materiales del electrodo y mejorar la eficacia desalinizadora, demostrar que se ofrece una buena competencia en la desinfección de microorganismos con dichos electrodos. Se realizó un análisis espectrofotométrico para analizar el grado de inactivación del carbón activo impoluto y el NACTZ frente a *E. coli* y *S. aureus*. Como se pueden ver en la Figura 45, el carbón activo no muestra ninguna eficacia en su actividad antibacteriana hacia las bacterias Gram-Positivas o Gram-Negativas. Por el contrario, el nanocompuesto NACTZ demuestra una actividad antibacteriana muy robusta y alta eliminación de *E. coli* y *S. aureus* a pesar de la elevada inyección bacteriana en el agua (10^7 CFU/mL). Esto es debido a la combinación realizada con TiO_2 y ZrO_2 , que tienen la capacidad de eliminar bacterias del tipo Gram-Positivo y Gram-Negativo, a pesar de la baja sensibilidad de las bacterias Gram-Positiva según su capacidad de formación de esporas. Además, se tiene gran conocimiento de la actividad antibacteriana del TiO_2 , debido a su habilidad de generar especies reactivas oxigenadas, concretamente la formación de radicales libres de hidroxilo, así como peróxidos dentro de un rango de longitud de onda de radiación UV. Además de participar en la eliminación de *E. coli*, TiO_2 también elimina virus tales como Hepatitis B o Herpes.

Otro dato a destacar, es que los electrodos compuestos por NACTZ eliminan en un 71,19% las sales presentes en el agua.

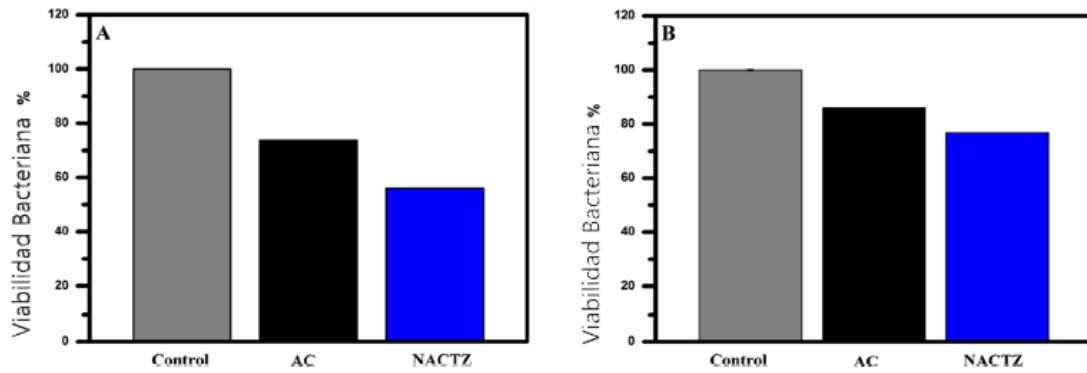


Figura 45. Viabilidad de *E. coli* (izquierda) y *S. aureus* (derecha) tras 24h después del tratamiento. Referencia: [Ahmed S. Yasin].

6. Propuesta de la calidad del agua

A continuación, se mostrará de manera tabular la información recogida a lo largo de este trabajo, para con los conocimientos adquiridos, diseñar unos valores que hagan el agua apta para extinción de incendios forestales (Tabla 11).

Tabla 11. Recopilación de información para definir parámetros para hacer apta el agua para extinción de incendio. Referencia: Elaboración Propia.

Parámetro Autor	DQO (mg O ₂ /L)	SS. (mg/L)	DBO ₅ (mg O ₂ /L)	E. coli (UFC/100mL)	Nitrógeno Total (mg/L)	Turbidez (UNT)	Coliformes Totales (UFC/100 L)	Huevos de nematodos (huevo/10L)	Color (Pt-Co)
Joonkyu Kim (A ₂ O) [26]	12	5	-	0	-	0,62	-	-	15,8
Raúl Caro Estrada [18]	30	7·10 ³	5	-	-	1	-	-	
Joonkyu Kim (Esferas de titanio) [27]	14	0	-	0	-	0,68	-	-	16,5
Edgardo David Vásquez Rodríguez [19]	18	-	-		1,74 ± 0,37	7,2	-	-	-
Paula Aguirre [22]	137	1,6	-	-	-	3,3	0	-	-
Pedro Mauricio Acosta Castellanos [23]	-	-	-	-	-	-	<100	-	-
Eliet Veliz, José Guadalupe Llanes [25]	15,6±1,5	8,8±0,7	-	-	-	5,1	0	-	28,62±4,2
Ali Almasi [28]								23,32	



Resaltar que, en la Tabla 11, en el trabajo realizado por Eliet Veliz, se decidió poner los valores del efluente para una dosis de 160 mg O₃/L por ser el caso más restrictivo. En cuanto al trabajo de Ali Almasit, los huevos de nematodos son un promedio de la medida entre verano e invierno. Finalmente, los resultados de Paula Aguirre, se toman a la salida del canal de desinfección por cloración.

Teniendo en cuenta los datos anteriores se puede decir:

- 1) Basándose en la experiencia, en un país desarrollado como España, la reutilización de aguas mayoritariamente va destinada a regadío de cultivos, y en otros lugares del mundo, también se destina a consumo humano. Es por ello mismo que, sea necesario reducir al máximo posible el contenido de microorganismos presente en el agua.
- 2) El agua reutilizada se enfoca principalmente a las dos causas anteriores, debido a que siempre existe una constante necesidad de agua, en cambio, los incendios no es algo que ocurra recurrentemente, es por ello mismo que no se haya enfocado hasta ahora a gran escala la reutilización de agua con tal fin. Es por esto mismo que este trabajo se haya enfocado en este aspecto, para así poder contribuir a un problema que está causando graves daños medioambientales a escala global.
- 3) Para el caso de este trabajo, el agua para extinción de incendios forestales, en este sentido no tiene por qué ser tan exigente el factor microorganismo, dado que, al entrar en contacto con el fuego a tan alta temperatura, se produce una eliminación natural de los mismos. Aquí sí que entra más en juego el factor turbidez y sólidos en suspensión, los motivos se explicarán a continuación.

El aumento de turbidez puede deberse a causas naturales como tormentas, lluvias torrenciales e inundaciones, que crean corrientes de agua rápidas que pueden transportar mayor número de partículas y sedimentos de mayor tamaño. Este incremento de corriente puede dar lugar al arrastre de arena, lodos, arcillas y partículas orgánicas del terreno al agua superficial, afectando de este modo a la turbidez. La materia en suspensión, como arcilla, lodo y materia orgánica, así como plancton y demás microorganismos, que interfiere con el paso de la luz a través del agua, puede provocar turbidez. Estas partículas también se conocen como Sólidos en Suspensión Totales (SST). Cuanto mayor sea el valor de SST en el agua, mayor será su opacidad y la turbidez medida [38].



El aumento de las partículas en suspensión en el agua puede conducir a:

- a) Comprometer la eficacia de la desinfección. La materia en suspensión da soporte a los microorganismos y limita la acción de los desinfectantes añadidos al agua.
- b) La deposición de los sedimentos en determinados puntos del sistema de abastecimientos (depósitos, cabos extremos o terminales de red).

Ante el aumento de la turbidez, los gestores del abastecimiento deberán suspender o disminuir, en la medida de lo posible, la captación del agua hasta que remita el episodio.

El enturbiamiento del agua, entre otras causas, puede ser síntoma de sifonamiento, fenómeno conocido como expulsión del agua fuera del sello hidráulico por efecto de las variaciones de presión en los sistemas de evacuación y ventilación.

En lo relativo a tuberías, la causa del deterioro es la entrada de agentes extraños como arena, tierra, agua residual u otros compuestos presentes en la zona de ruptura.

Para limpieza de depósitos, en concordancia con el Artículo del RD 140/2003, se efectuarán inspecciones periódicas y la limpieza de los depósitos tendrá una función de desinfección y desincrustación. La periodicidad de la limpieza se adecuará a la calidad del agua, las dimensiones y a los condicionantes operativos del depósito, siendo recomendable no superar un período máximo comprendido entre 3-5 años. Cuando lleguen al depósito aguas con hierro o manganeso, cuando se concentren aguas turbias en el mismo, así como, tras paradas prolongadas y actuaciones de reparación o modificaciones estructurales significativas, la frecuencia de limpieza debe acortarse de forma que se garantice la calidad del agua en todo el volumen del depósito [39].

Con todo esto, el alumno propone una mención en el Real Decreto 1620/2007, por el que se establece el régimen jurídico de la reutilización de aguas depuradas, Anexo I.A: Criterios de calidad para la reutilización de las aguas, según la calidad 5.4 a) Otros usos ambientales, que se incluya el agua regenerada para extinción de incendios forestales con los siguientes requisitos:

- ✓ **Nematodos intestinales:** 1 huevo/10 L
- ✓ **Escherichia coli:** 5.000 UFC/100 mL
- ✓ **Sólidos en Suspensión:** 15 mg/L
- ✓ **Turbidez:** 1 UNT



Para llegar a conseguir estos valores en la calidad del agua, el alumno propone el siguiente diagrama, como bien puede verse en la figura 46, con su correspondiente justificación:

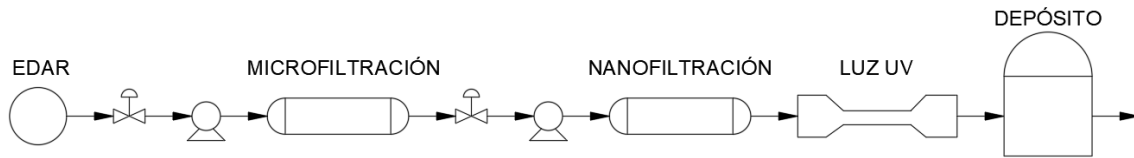


Figura 46 Diagrama de bloques enfocado al agua contra extinción de incendios. Referencia: [Elaboración Propia]

Se ha elegido Luz UV por los siguientes motivos:

- ✓ A nivel laboral, prácticamente no se requiere preparación profesional por parte del operario o encargado de mantenimiento, puesto que es algo tan sencillo como pulsar un interruptor para encender o apagar las lámparas. Del mismo modo, su mantenimiento es simple, cuando una lámpara se averíe, solamente se recambia por otra.
- ✓ No existen riesgos hacia los trabajadores, a diferencia de la ozonización que genera gas ozono, dado que es un proceso físico, por esta misma razón, tampoco genera subproducto, como pueda ocurrir en la cloración, eliminándose así la necesidad de retirarlo.
- ✓ Como se ha visto anteriormente, el agua necesita estar lo menos turbia posible para que la luz incida sobre los microorganismos, siendo esto un requisito que obliga a la mayor claridad posible del agua para el correcto funcionamiento de las lámparas. De esta manera, también se elimina el problema que ocasione a tuberías y depósitos ya mencionados.

Como dato de interés, destacar que hay numerosos estudios para la reducción de turbidez como el realizado en Algeria [40], que mejora de la eliminación de la turbidez empleando *Opuntia ficus indica*. Esta planta mejora el proceso de electrocoagulación – electrofloculación usando una solución de 300 mg/L de gel de sílice y consiguió una eliminación de turbidez del $93,14\% \pm 1,31$ con una concentración de 2,5 mg/L de mucílago de la planta, un voltaje de 21,2 V, a pH 9,65 y a una conductividad igual a 2,61 mS/cm. El mucílago de *Opuntia ficus indica* incrementa la



eliminación de turbidez y reduce el consumo de energía específica a una determinada densidad.

A menor escala de rendimiento de eliminación, también resulta útil mencionar otro estudio de eliminación de turbidez mediante coagulación convencional y con el uso de coagulantes naturales (semillas de *Moringa oleifera*). La dosis correcta de esta semilla para turbidez media y alta fueron 50 mg/L y 100 mg/L, respectivamente, atribuyéndosele unos porcentajes de eliminación de 90,46% y 88,57% a cada dosis [41].

7. Conclusiones

Este Trabajo Fin de Máster se contempla como una aportación más al ámbito de la economía circular. Es decir, se parte de un desecho, como es el agua residual, y mediante una serie de transformaciones físico-químicas que ya han sido descritas anteriormente, se convierte en un producto de utilidad, en este caso, para extinción de incendios forestales, evitándose así el tener que tomar agua de embalses, destinados principalmente a consumo humano.

Todo lo que se ha expuesto hasta aquí sirve con el propósito de ser una herramienta más para la extinción de incendios forestales, pero siempre es mejor utilizar el famoso dicho “más vale prevenir que curar”. Por esta misma razón, los grandes incendios no se apagan con agua, sino con planificación territorial y desarrollo rural. Es preciso darles un futuro económico, ambiental y demográfico a las áreas que desde hace años se queman.

La estrategia de lucha contra los incendios tiene que abordar las causas y apostar por una prevención real: reducir la alta siniestralidad, hacer el territorio menos inflamable y más resiliente al cambio climático, realizar una planificación territorial, asignar usos, intervenir sobre la propiedad abandonada y poner en marcha políticas fiscales para incentivar usos compatibles con la conservación de la naturaleza.

8. Bibliografía

[1] WWF, El polvorín del noroeste, 2018, Páginas 1-6, Fecha de Consulta: 22/06/2019, 10:23.

[2] R. Silva, «El país,» 2017. [En línea]. Available: https://elpais.com/elpais/2017/06/25/media/1498413163_152123.html. Fecha de Consulta: 27/06/2019, 16:25

[3] «El Mundo,» 2019. [En línea]. Available: <https://www.elmundo.es/espana/2019/06/28/5d16859d21efa064238b45ff.html>. Fecha de



Consulta: 30/06/2019, 09:12

[4] A. Congostrina, «El país,» 2019. [En línea]. Available: https://elpais.com/ccaa/2019/06/27/catalunya/1561616601_903218.html. Fecha de Consulta: 30/06/2019, 09:47

[5] N. Alba, «El Mundo,» [En línea]. Available: <https://www.elmundo.es/espana/2019/08/20/5d5aa5a5fdddfffa138b465c.html>. Fecha de Consulta: 29/08/2019, 18:00

[6] Geodem, CURSO BÁSICO SOBRE PREVENCIÓN Y DEFENSA CONTRA INCENDIOS FORESTALES. Fecha de Consulta: 29/08/2019, 18:00

[7] A. Rodríguez, «La región,» 2016. [En línea]. Available: <https://www.laregion.es/articulo/ourense/apagar-incendio-30-hectareas-cuesta-media-300-000-euros/20161011074558655417.html>. Fecha de Consulta: 30/06/2019, 10:22

[8] M. Sueiro, «El Mundo,» 2013. [En línea]. Available: <https://www.elmundo.es/elmundo/2013/09/02/espana/1378124276.html>. Fecha de Consulta: 30/06/2019, 12:41

[9] G. Penney, D. Habibi, M. Cattani y M. Carter, Calculation of Critical Water Flow Rates for Wildfire Suppression, Perth: MDPI, 2019. Páginas 2-8. Fecha de Consulta: 30/06/2019, 12:41

[10] «Junta de Andalucía,» [En línea]. Available: <http://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/site/portalweb/menuitem.30d4b35a97db5c61716f2b105510e1ca/?vgnextoid=df14be3aa5957610VgnVCM100000341de50aRCRD&vgnextchannel=4545b76b91557610VgnVCM100000341de50aRCRD&vgnnextfmt=portalwebSinMenu>. Fecha de Consulta: 25/08/2019, 12:35

[11] M. d. M. A. y. M. R. y. Marino, «Evaluación Ambiental Estratégica del Plan Nacional de Reutilización de Aguas Regeneradas,» 2009. Páginas 13-19. Fecha de Consulta: 30/06/2019, 16:45

[12] EMASESA, «EMASESA,» 2011. [En línea]. Available: http://www.emasesa.com/compromiso-social/gestion-sostenible-del-ciclo-integral-del-agua/ahorro-de-recursos-hidricos/#tabitem_0_2. Fecha de Consulta: 30/06/2019, 18:32

[13] AEAS, Manual de Buenas Prácticas de Uso de Aguas Regeneradas, 2011. Páginas 2-14. Fecha de Consulta: 01/07/2019, 10:25

[14] OMS, Informe sobre la Salud en el Mundo, 2002. Páginas 19-22. Fecha de Consulta: 01/07/2019, 12:02

[15] L. Alcalde, Evaluación y Gestión del Riesgo Asociado a la Reutilización de Aguas Residuales, Barcelona: Universitat de Barcelona, 2012. Páginas 3-9. Fecha de Consulta: 01/07/2019, 13:09

[16] F. Brissaud y M. Salgot, Orientaciones comunitarias (UE) sobre la calidad de las aguas regeneradas. Jornadas Técnicas: La integración del Agua Regenerada en la Gestión de los



Recursos, 2011. Páginas 5-12. Fecha de Consulta 01/07/2019, 17:21

[17] D. Prats Rico y J. Melgarejo Moreno, Desalación y reutilización de aguas. Situación en la provincia de Alicante, Alicante, 2006. Páginas 56,57,144,147. Fecha de Consulta: 01/07/2019, 18:38

[18] R. Caro Estrada, Estudio de aplicación de Biorreactores de Membrana (MBR) en la depuración de las aguas residuales, Cádiz: Universidad de Cádiz, 2014. Páginas 37-52. Fecha de Consulta: 01/07/2019, 20:05

[19] E. D. Vásquez Rodríguez, Eliminación de microcontaminantes orgánicos presentes en aguas residuales urbanas mediante MBR combinado con oxidación avanzada y con filtración por membranas, Alicante: Universidad de Alicante, 2018. Páginas 156-159. Fecha de Consulta: 03/07/2019, 11:22

[20] UCA, Dimensionamiento de Sistemas de Desinfección mediante Radiación Ultravioleta, Cádiz: Universidad de Cádiz. Páginas 3-4. Fecha de Consulta: 03/07/2019, 13:59

[21] H. Wright y W. Cairns, Desinfección de Agua por medio de Luz Ultravioleta, 2007. Páginas 4-5, 22-23. Fecha de Consulta: 03/07/2019, 16:02

[22] P. Aguirre, J. García y R. Mujeriego, Desinfección con cloro y luz UV en un proceso convencional de regeneración de agua, Mataró, 2004. Páginas 79,80,83-87. Fecha de Consulta: 03/07/2019, 18:00

[23] P. M. Acosta Castellanos, C. A. Caro Camargo y N. R. Perico Granados, Análisis de interferencia de parámetros físicos del agua, en desinfección por radiación UV, Bogotá, 2015.

[24] J. J. Brenes Varo, Diseño del proceso de tratamiento terciario de ozonización del agua de salida de una E.D.A.R. convencional para su reutilización en el riego de campos de golf, Cádiz: Universidad de Cádiz, 2006. Páginas 107-111. Fecha de Consulta: 04/07/2019, 11:05

[25] E. Veliz, J. Guadalupe Llanes, L. Asela Fernández y M. Bataller, Coagulación-floculación, filtración y ozonización de agua residual para reutilización en riego agrícola, La Habana, 2016. Páginas 17,30,31. Fecha de Consulta: 04/07/2019, 12:26

[26] J. Kim, I. Song, H. Oh, J. Jong, J. Park y Y. Choung, A laboratory-scale graywater treatment system based on a membrane filtration and oxidation process-characteristics of graywater from a residential complex, Seoul, 2008. Páginas 347-356. Fecha de Consulta: 05/07/2019, 09:46

[27] J. Kim, I. Song, S. Lee, P. Kim, M. Lee y Y. Choung, Novel pilot-scale graywater treatment system using titanium ball, membrane and advanced oxidation process, Seoul, 2008. Páginas 153-157. Fecha de Consulta: 05/07/2019, 10:28

[28] A. Almasi, M. Mohammadi, S. Salehnia, M. Hiva Azizi, M. Pirsahab y M. Reza Zolfaghari, Removal of parasitic particles, protozoa cysts, and thermotolerant coliforms in the integrated aeration lagoon, case study: Iran, Marivan, 2018. Páginas 222-224. Fecha de Consulta: 05/07/2019, 12:38



- [29] O. Lutenberg, «La Salinidad y su Influencia en Suelos y Plantas,» [En línea]. Available: <http://www.ana.gob.pe/media/496359/salinidad.pdf>. Fecha de Consulta: 08/07/2019, 9:32
- [30] «Ahora Noticias,» 2017. [En línea]. Available: <https://www.ahoranoticias.cl/noticias/nacional/189490-revelan-por-que-hace-30-anos-conaf-dejo-de-usar-agua-del-mar-para-combatir-incendios-forestales.html>. Fecha de Consulta: 08/07/2019, 9:53
- [31] A. Vázquez Figueroa, «El Mundo,» 25 08 2012. [En línea]. Available: <https://www.elmundo.es/elmundo/2012/08/23/ciencia/1345724845.html>. Fecha de Consulta: 08/07/2019, 10:16
- [32] A. Vázquez Figueroa, «Teide Actualidad,» 08 01 2009. [En línea]. Available: <https://www.teldeactualidad.com/hemeroteca/articulo/opinion/2009/08/01/3522.html>. Fecha de Consulta: 08/07/2019, 10:43
- [33] «Energética Futura,» 17 01 2010. [En línea]. Available: <https://energeticafutura.com/blog/la-desaladora-perfecta-electricidad-agua-a-bajo-coste/>. Fecha de Consulta: 08/07/2019, 11:12
- [34] «El Diario,» 03 08 2007. [En línea]. Available: https://www.eldiario.es/canariasahora/canariasopina/incendios-forestales-Alberto-Vazquez-Figueroa_6_131296913.html. Fecha de Consulta: 08/07/2019, 11:33
- [35] R. Marqués Sillero, «El País,» 4 10 1995. [En línea]. Available: https://elpais.com/diario/1995/10/04/opinion/812761210_850215.html. Fecha de Consulta: 08/07/2019, 12:04
- [36] L. Al-Issai, W. Elshorbagy, M. A. Maraqa, M. Hamouda y A. M. Soliman, Use of Nanoparticles for Disinfection of Desalinated Water, 2019. Páginas 1,2,4-13,15-17. Fecha de Consulta: 08/07/2019, 12:04
- [37] A. S. Yasin, I. M. Mohammed, H. M. Mousa, C. Hee Park y C. Sang Kim, Facile synthesis of TiO₂/ZrO₂ nanofibers/nitrogen co-doped activated carbon to enhance the desalination and bacterial inactivation via capacitive deionization, 2018. Páginas 1-10. Fecha de Consulta: 11/07/2019, 9:38
- [38] IADC, Facts about: Turbidez, 2007. Páginas 1-3. Fecha de Consulta: 12/07/2019, 12:04
- [39] AEAS, Recomendaciones de actuación ante incidencias en los abastecimientos de agua, 2007. Fecha de Consulta: 11/07/2019, 13:15
- [40] N. Djerroud, N. Adjeroud, L. Felkai-Haddache, Y. Hammoui, H. Remini, F. Dahmoune, B. Merzouk y K. Madani, Enhanced electrocoagulation–electroflotation for turbidity removal by *Opuntia ficus indica* cladode mucilage, 2017. Página 1. Fecha de Consulta: 14/07/2019, 10:55
- [41] V. Gaikward y G. Munavalli, Turbidity removal by conventional and ballasted coagulation with natural coagulants, 2019. Página 1. Fecha de Consulta: 14/07/2019, 11:15



9. Abreviaturas

INFOCA:	Dispositivo para la Prevención y Extinción de Incendios Forestales de Andalucía
GEODEM:	Centro de Ingeniería e Innovación para el Desarrollo Medioambiental
CF:	<i>Critical Flow Rate</i> , ratio de flujo crítico de agua necesario para extinguir un incendio
RoS:	<i>Rate of Spread</i> , tasa de propagación de un incendio
I:	Intensidad de un incendio, expresada en kWm^{-1}
L _f :	Intensidad linear de la llama, medida en m
POCTEP:	Programa Operativo Cooperación Transfronteriza España-Portugal
AMAYA:	Agencia de Medio Ambiente y Agua de Andalucía
ONCE:	Organización Nacional de Ciegos Españoles
AMAL:	Comunidade Intermunicipal do Algarve
CEE:	Comunidad Económica Europea
UE:	Unión Europea
RDPH:	Reglamento del Dominio Público Hidráulico
RD:	Real Decreto
OMS:	Organización Mundial de la Salud
WHO:	<i>World Health Organization</i> , siglas en inglés de OMS
EDAR:	Estación Depuradora de Aguas Residuales
ERA:	Estación Regeneradora de Agua
EDAM:	Estación Desaladora de Agua Marina
EMASESA:	Empresa Metropolitana de Abastecimiento y Saneamiento de Aguas de Sevilla, S.A.
DQO:	Demanda Química de Oxígeno, expresada como $\text{mg O}_2/\text{L}$



DMA:	Directiva Marco de Aguas
AGWR:	<i>Australian Guidelines for Water Recycling</i>
HAV:	Virus de la hepatitis A
MBR:	<i>Membrane Bioreactors</i> , biorreactores de membrana
DBO ₅ :	Demanda Biológica de Oxígeno, expresada como mg O ₂ /L
SST:	Sólidos en Suspensión Totales
SSV:	Sólidos en Suspensión Volátiles
OUR:	<i>(Oxygen Uptake Rate)</i> , velocidad de consumo de oxígeno
SOUR:	<i>Specific OUR</i>) es el OUR específico o Actividad Biológica del licor-mezcla referida a (SSV)
NF:	Nanofiltración
MF:	Microfiltración
UV:	Luz ultravioleta
US\$:	Moneda estadounidense, dólar
PTM:	Presión Transmembrana
TRC:	Tiempo de Retención Celular
CT:	Coliformes Totales
CF:	Coliformes Fecales
SO:	Colifagos Somáticos
E.coli:	<i>Escherichia coli</i>
UFC:	Unidades Formadoras de Colonias
EPA:	<i>Environmental Protection Agency</i> , agencia de protección del medio ambiente (EEUU)
A ₂ O-MF-OP:	Proceso de tratamiento de aguas residuales mediante proceso Anaeróbico, Anóxico, Óxico, Microfiltración y Proceso de oxidación
AEAS:	Asociación Española de Abastecimiento de Agua y Saneamiento
CE:	Comunidad Europea
ACUAMED:	Aguas de las Cuencas Mediterráneas
NASA:	National Aeronautics and Space Administration, Administración Nacional de la Aeronáutica y el Espacio
MSF:	<i>Multi Stage Flash</i> , destilado flash multietapa



RO:	<i>Reverse Osmosis</i> , Ósmosis Inversa
CDI:	<i>Capacitive Deionization</i> , Desionización Capacitiva
NACTZ:	Nanofibras con carbón activo incorporado
CA:	Carbón Activo
UME:	Unidad Militar de Emergencias
CILIFO:	Centro Ibérico para la Investigación y Lucha contra los Incendios Forestales