



Trabajo Fin de Grado

ESTUDIO PARA LA REUTILIZACIÓN DEL EFLUENTE DE UNA ESTACIÓN DEPURADORA DE AGUAS RESIDUALES EN EL RIEGO DE MAÍZ

Realizado por:
ELENA LABORDA LARRODÉ

Directora:
NATIVIDAD MIGUEL SALCEDO

Ciencias Ambientales

Mayo 2013

Escuela Politécnica Superior de Huesca

AGRADECIMIENTOS

Me gustaría dar las gracias a Nati, por la oportunidad de hacer este proyecto, solucionar todas mis dudas con claridad y precisión, y por estar siempre atenta a todos los detalles.

Gracias a mi familia y amig@s, por su ánimo y apoyo.

Gracias a todas las personas del laboratorio del Departamento de Investigación, Calidad y Tratamiento de Aguas, por acogerme y ayudarme en todo lo que necesitaba.

A Sara, por concederme todos los favores que le he pedido, y por su disponibilidad y amabilidad durante todo este tiempo.

MEMORIA

INDICE

1. INTRODUCCIÓN	9
2. ANTECEDENTES.....	11
2.1 Regeneración de aguas depuradas.....	11
2.1.1 Historia del aprovechamiento de aguas residuales en la agricultura.....	13
2.1.2 Marcolegislativo	14
2.1.3 Recomendaciones sobre la calidad requerida en el agua de riego para el cultivo de maíz.....	17
2.1.4 Procesos convencionales usados como tratamientos para la regeneración de aguas	20
2.2 Características de las Estaciones Depuradoras de Aguas Residuales	25
2.2.1 Características de las aguas de salida de depuradoras	25
2.2.2 Descripción de los procesos llevados a cabo en la EDAR de Tauste	28
2.3 Cultivo objeto de estudio	34
2.3.1 Parcelario de la zona de estudio y sistema actual de riego	25
2.3.2 Necesidades hídricas y nutricionales del maíz	39
3. MATERIALES Y MÉTODOS	41
3.1 Toma de muestras	41
3.1.1 Datos estadísticos del efluente de la EDAR de Tauste en 2011	41
3.2 Metodología analítica.....	42
3.2.1 Caracterización de las muestras.....	42
3.2.1.1 Parámetros físico-químicos	42
3.2.1.2 Parámetros biológicos	46
3.2.1.3 Metales pesados	47
3.3 Procedimiento experimental.....	48
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	53
4.1 Cálculo de caudales disponibles y necesidades hídricas del parcelario	53
4.2 Caracterización del efluente de la EDAR de Tauste	55
4.2.1 Caracterización del efluente durante el ejercicio de 2011	55
4.2.2 Caracterización propia del efluente de la EDAR de Tauste en laboratorio.....	57
4.3 Aplicación de tratamientos de regeneración al efluente a escala de laboratorio.....	59
4.3.1 Selección de los métodos más adecuados y justificación	59
4.3.2 Calidad del efluente tras la aplicación de los procesos de regeneración	61
4.3.2.1 Resultados tras la ozonización	61
4.3.2.2 Resultados tras la cloración.....	62
4.3.2.3 Eficiencia obtenida con los procesos de regeneración y estudio del impacto en los cultivos	63
4.3.3 Análisis general de los procesos de regeneración aplicados.....	74
5. CONCLUSIONES	76
6. BIBLIOGRAFÍA.....	78
7. ANEXOS.....	82
ANEXO I: CARACTERIZACIONES DE LOS PARÁMETROS ANALIZADOS EN EL EFLUENTE DE SALIDA DE LA EDAR DE TAUSTE.....	82
ANEXO II: DATOS DE LOS PARÁMETROS ANALIZADOS TRAS LA APLICACIÓN DE LOS PROCESOS DE REGENERACIÓN	83

ANEXO III: CÁLCULOS DETALLADOS DE LAS DEMANDAS DE REACTIVOS PARA LA APLICACIÓN DE LOS TRATAMIENTOS DE REGENERACIÓN	85
ANEXO IV: IMAGEN 2.22 CON MAYOR DETALLE	87

INDICE DE TABLAS Y FIGURAS

Figuras e Imágenes

Imagen 1.1	Distintos usos del agua regenerada antes de su retorno al dominio público Hidráulico	9
Imagen 2.1	Ubicación de las actuaciones de reutilización planificada en España en 2008	12
Figura 2.12	Diagrama de bloques EDAR de Tauste. Elaboración propia.....	29
Imagen 2.13	Desbaste EDAR Tauste	30
Imagen 2.14	Desarenado-Desengrasado EDAR Tauste.....	30
Imagen 2.15	Canal Parshall EDAR Tauste	30
Imagen 2.16	Reactor Biológico EDAR Tauste	31
Imagen 2.17	Decantador secundario EDAR Tauste.....	32
Figura 2.18	Procesos y operaciones unitarias en depuración de aguas residuales.....	33
Imagen 2.19	Espesador de fangos EDAR Tauste.....	33
Figura 2.20	Esquema de una centrífuga.....	34
Imagen 2.21	<i>Zea mays</i>	34
Imagen 2.22	Municipio de Tauste y zonas agrícolas más cercanas al casco urbano, Escala 1:66.666.....	35
Imagen 2.23	Radio de 1000m alrededor de la EDAR de Tauste, Escala 1:16666	36
Imagen 2.24	Mapa de la superficie de estudio, Escala 1:8333	37
Imagen 2.25	Mapa de las parcelas de la zona de estudio	37
Figura 2.29	Consumo de agua del maíz, en milímetros por día.....	39
Imagen 3.1	Cultivo de <i>Escherichia coli</i> y Coliformes	46
Imagen 3.2	Foto de huevo de nematodo, microscopio 20x	47
Figura 3.3	Esquema de la instalación para el tratamiento de muestras de ozono	49
Figura 3.4	Recta de calibrado del ozonizador del laboratorio de Investigación, Calidad y Tratamiento de Aguas de la universidad de Zaragoza.....	49
Figura 4.2	Esquema de la situación actual en la zona de estudio	54
Figura 4.3	Esquema de la situación tras la reutilización de las aguas regeneradas para el riego de la zona de estudio	55

Figura 4.10	Variación de la concentración de huevos de nemátodos	65
Figura 4.11	Variación de la concentración de <i>Escherichia coli</i>	65
Figura 4.12	Variación del valor de Sólidos en Suspensión y Turbidez	66
Figura 4.13	Variación de la concentración de Nitrógeno total y Nitratos	67
Figura 4.14	Variación de la concentración de Fósforo	68
Figura 4.15	Variación de la concentración de Demanda Biológica e Oxígeno y Demanda Química de Oxígeno.....	69
Figura 4.16	Variación de la concentración de Coliformes totales	70
Figura 4.17	Variación de la concentración de Manganese	70
Figura 4.18	Variación de la concentración de Hierro	71
Figura 4.19	Variación del pH.....	71
Figura 4.20	Variación de la concentración de la Conductividad Eléctrica	72
Figura 4.21	Variación del índice SAR	73
Figura 4.22	Variación de la concentración de los iones Magnesio, Calcio y Sodio	73

Tablas

Tabla 2.2	Parámetros legislados en el RD 1620/2007	14
Tabla 2.3	Límites exigidos de parámetros según su futuro uso, de acuerdo con el RD 1620/2007	15
Tabla 2.4	Directrices recomendadas sobre la calidad microbiológica de las aguas residuales empleadas en agricultura	17
Tabla 2.5	Parámetros con límites legislados y recomendaciones de autores.....	18
Tabla 2.6	Tratamientos utilizados actualmente para la regeneración de aguas, metodología de cada uno de ellos y parámetros que modifican	20
Tabla 2.7	Parámetros físico-químicos de aguas urbanas tratadas con fangos activados y rangos habituales	26
Tabla 2.8	Características del agua tratada con fangos activos y después del tratamiento terciario de ósmosis inversa o ultrafiltración.....	27
Tabla 2.9	Parámetros biológicos más comunes en aguas residuales y urbanas y sus rangos habituales.....	27

Tabla 2.10	Metales detectados a la salida de depuradora y rangos habituales	28
Tabla 2.11	Nitrógeno, fósforo e iones encontrados en efluentes de EDARs.....	28
Tabla 2.26	Requisitos para los vertidos procedentes de Estaciones de Depuración de Aguas Residuales urbanas	38
Tabla 2.27	Extracción y exportación real de nutrientes principales por la parte aérea del maíz	39
Tabla 2.28	Extracción de microelementos para una cosecha de 18,7 toneladas de grano de maíz	39
Tabla 4.1	Cálculos de las necesidades hídricas del parcelario de estudio y de los caudales de salida de la de la EDAR de Tauste (en m ³ /día).....	53
Tabla 4.4	Caracterización mensual de los parámetros analizados in situ en la EDAR de Tauste.....	56
Tabla 4.5	Media de las tres caracterizaciones y límites legislados/recomendados.....	58
Tabla 4.6	Ventajas y desventajas de los dos métodos de desinfección más utilizados	60
Tabla 4.7	Resultados tras la aplicación de ozono al efluente de la EDAR de Tauste	62
Tabla 4.8	Resultados tras la aplicación de cloro al efluente de la EDAR de Tauste	63
Tabla 4.9	Tabla resumen sobre los valores de los parámetros tras la caracterización y la aplicación de tratamientos de regeneración	64

1. INTRODUCCIÓN

El agua es un recurso natural imprescindible a la vez que limitado. Es por ello que el aumento de su demanda induce a plantearse diferentes alternativas con el fin de maximizar los recursos hídricos disponibles. La regeneración y posterior reutilización de las aguas antes de que alcancen el dominio público hidráulico amplía el ciclo que el agua realiza desde su captación, y ofrece nuevas alternativas para su aprovechamiento.

Como consecuencia de la necesidad de establecer una regulación completa y detallada que posibilite las soluciones necesarias respecto a la reutilización de aguas, se publica en el BOE de 8 de diciembre de 2007, el Real Decreto 1620/2007, por el que se establece el régimen jurídico de la reutilización y se introduce la denominación de aguas regeneradas, más acorde con las posibilidades de reutilización que la norma establece (RD 1620/2007).

Se entiende por agua regenerada el agua residual depurada que ha pasado por un proceso adicional o complementario con el fin de alcanzar la calidad requerida para un uso concreto. Así mismo, se habla de reutilización de las aguas al aplicar éstas para un nuevo uso privativo, después de haber sido sometidas a los procesos de depuración establecidos para alcanzar la calidad requerida en función de los usos.

Para todos los usos posibles que establece el RD 1620/2007, en el anexo I del mismo se establecen los criterios mínimos de calidad exigida, en relación a diversos parámetros microbiológicos y físico-químicos. Por otro lado, dependiendo del uso al que vaya a ser destinada el agua regenerada, además de tener en cuenta los criterios de calidad existentes en el RD 1620/2007, podrán considerarse otros incluidos en materias específicas.

El agua puede reutilizarse en el ámbito urbano, agrícola, industrial o con fines recreativos o ambientales.



Imagen 1.1: Distintos usos del agua regenerada antes de su retorno al dominio público hidráulico. Fuente: elaboración propia.

Debe considerarse por otra parte que hay que garantizar unos caudales mínimos ambientales y concesiones previamente autorizadas aguas abajo del vertido, por lo que no todos los efluentes son susceptibles de reutilización. Los tratamientos destinados a regenerar las aguas se realizan en las Estaciones de Regeneración de Aguas Residuales o ERAR.

Al diseñar un tratamiento de regeneración hay que tener en cuenta criterios sanitarios y además económicos. Se debe garantizar la salubridad del agua tratada pero a costes asequibles para el usuario, garantizando así su posible utilización a escala real. La reutilización de aguas residuales además requiere una infraestructura de almacenamiento y distribución a los puntos de uso que implica una planificación de la gestión y del uso del mismo.

En este marco se plantea el presente trabajo de investigación, cuyo principal objetivo es el estudio de varios tratamientos de regeneración de aguas destinadas al riego de maíz en el municipio de Tauste. Para ello, será necesaria la disminución de ciertos parámetros cuya concentración en el efluente es demasiado elevada para el uso en riego. Los posibles tratamientos se aplicarían como complemento del proceso convencional de depuración.

Este objetivo principal se apoya en los siguientes objetivos secundarios:

- I. Estudio sobre la regeneración de aguas y las técnicas aplicadas en la actualidad, la normativa vigente que afecta, y búsqueda bibliográfica de recomendaciones relativas a la calidad de aguas para riego de maíz.
- II. Estudio de necesidades hídricas y de riego del maíz en el municipio de Tauste, y análisis de la extensión parcelaria del futuro regadío.
- III. Estudio de posibilidades de regeneración del efluente de salida de la instalación depuradora, que estará compuesto de:
 - Estudio temporal de las características del efluente de salida de la depuradora.
 - Caracterización físico-química y microbiológica completa del efluente.
 - Determinación de parámetros a reducir, según legislación y recomendaciones estudiadas.
 - Selección de uno o varios métodos de regeneración teniendo en cuenta los parámetros a reducir, aplicación a escala de laboratorio y estudio de ventajas y desventajas de las técnicas seleccionadas.

Todo el proceso experimental se ha llevado a cabo dentro del Grupo de Investigación de Calidad y Tratamiento de Aguas, situado en el edificio Torres de Quevedo, en la Escuela de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad de Zaragoza.

Esta memoria se estructura en ocho capítulos y cuatro anexos.

Tras el presente capítulo “Introducción”, en el segundo capítulo “Antecedentes” se definen todas las pautas necesarias para una correcta regeneración de aguas, la historia de la regeneración en el mundo y en la agricultura, los tratamientos más utilizados, etc. Así mismo, se detalla toda la normativa relacionada con la regeneración de aguas para riego, y una recopilación bibliográfica sobre recomendaciones de diferentes autores respecto a las características que debe tener un efluente de riego para maíz. En este capítulo se incluyen un apartado con un estudio de las características principales de los efluentes de EDAR comunes. En esta misma línea, aparece además una explicación sobre el proceso completo de tratamiento de aguas en la Estación Depuradora de Aguas Residuales (EDAR) de Tauste, y un análisis del parcelario y el cultivo de estudio, en el que se presenta información sobre el estado actual de la zona de estudio (catalogación), y una relación de los caudales necesarios para llevar a cabo el proyecto.

En el capítulo número tres, “Materiales y Métodos”, se especifica la metodología completa de toma de muestras, tanto de las muestras de agua residuales como de la toma de datos estadísticos y de evolución histórica obtenidos de la Depuradora de Tauste. A continuación se desarrolla toda la metodología de análisis que se ha realizado y se especifica todo el equipamiento necesario para llevar a cabo la parte experimental de este trabajo.

En el capítulo número cuatro, “Resultados y Discusión”, se presenta la investigación realizada en relación al estudio de regeneración del efluente de la EDAR de Tauste, a través de dos tratamientos de regeneración de aguas: ozonización y cloración. Se presentan los resultados de las diferentes caracterizaciones del efluente, así como los datos obtenidos tras la aplicación de las técnicas de regeneración junto a su discusión.

En el capítulo cinco, se muestran las principales conclusiones obtenidas tras la realización del presente trabajo y, por último, en el capítulo seis, se incluye la bibliografía utilizada y referenciada en todo el texto.

Además, la memoria se complementa con cuatro anexos en los que aparecen los análisis detallados de cada una de las réplicas realizadas en laboratorio, además de la resolución completa de algunos métodos aplicados y una foto.

2. ANTECEDENTES

2.1 Regeneración de aguas depuradas

A lo largo de la historia, el aumento de la actividad industrial y el consiguiente desarrollo económico y social han ido produciendo un crecimiento de las grandes ciudades que a su vez, ha ido haciendo más complejo el suministro de uno de los elementos indispensables para la vida, el agua. Habitualmente, los componentes aportados por el medio natural y el uso por parte del hombre, generan una contaminación de estas aguas que impide una aplicación directa para un uso determinado sin la corrección previa de algunos de sus parámetros.

Atendiendo a los criterios de calidad se puede evaluar las posibilidades de aplicación de las aguas residuales depuradas. De forma general se puede indicar que la inmensa mayoría de las estaciones depuradoras de aguas residuales urbanas se diseñan y operan de modo que cumplan las directrices europeas (Directiva 91/271/CEE). Esta normativa establece para el agua tratada unos objetivos de calidad para minimizar el impacto ambiental en las zonas de vertidos (sensibles, normales o menos sensibles), pero no está explícitamente orientada a la reutilización.

En consecuencia, la mayoría de las estaciones de tratamiento actualmente programadas o en funcionamiento pueden cumplir estas directrices pero obtener un efluente con muy pocas posibilidades de reutilización. En definitiva, los sistemas actuales de tratamiento de aguas residuales no están generalmente diseñados para que el efluente alcance la calidad necesaria para una reutilización en la mayoría de los usos posibles.

En este momento, la regeneración y reutilización de las aguas residuales cobran un papel de gran importancia, pues además de solucionar el problema de contaminación, permiten aumentar la disponibilidad del recurso sin necesidad de seguir explotando las fuentes convencionales para el suministro de agua. En concreto, la reutilización de agua regenerada dentro de una cuenca hidrográfica es una de las prácticas que mejor concuerda con los preceptos de un desarrollo sostenible (SEGUI, 2004).

Para que la reutilización sea segura desde el punto de vista sanitario y ambiental, es imprescindible que el agua residual se depure hasta que reúna las características de calidad apropiadas a su nuevo uso. Se comprende que, por ejemplo, para cualquier aplicación relacionada con el contacto o la alimentación humana o animal, el agua debe estar exenta de microorganismos patógenos y de sustancias tóxicas; para la recarga directa de acuíferos debe adquirir las características de un agua mineral; para su uso industrial en calderas debe tener muy pocas sales disueltas; para el regadío puede contener nutrientes y cierta materia orgánica aunque no debe contener metales ni oligoelementos en concentraciones tóxicas, etc. (Prats, 2011).

Igualmente, para que la reutilización de aguas residuales pueda ser realizada en las condiciones apropiadas es preciso también disponer de las infraestructuras de regulación y distribución, y utilizar el agua de forma correcta para evitar riesgos sanitarios. En cada caso hay que realizar un estudio específico en el que, a partir de las necesidades de reutilización de la zona, se tenga en cuenta la calidad del efluente de la depuradora y la calidad que se desea alcanzar para cada uno de los usos posibles, con el fin de definir los tratamientos complementarios y las modificaciones necesarias en el proceso de depuración. En estos estudios se deben incluir los beneficios y costes asociados a cada uno de los nuevos usos para verificar la viabilidad económica y medioambiental de la reutilización frente a otras posibles alternativas de abastecimiento.

La evacuación de aguas residuales sin tratar o parcialmente tratadas al medio ambiente puede causar problemas de contaminación del agua subterránea y superficial así como de la tierra. El uso planificado de aguas residuales para riego o acuicultura evita esos problemas y reduce el daño resultante, según la Organización Mundial de la Salud (OMS, 1989).

El uso de aguas residuales para riego en sustitución del agua subterránea en zonas donde la utilización excesiva de ésta última causa problemas (como intrusión de agua salada en las zonas costeras), podría resultar en otros beneficios para el medio ambiente. Por ejemplo, hay ciertos contaminantes (como el nitrógeno, la materia orgánica o compuestos del fósforo) que si se evacuan directamente al entorno natural, podrían acarrear graves problemas de contaminación, pero sin embargo sirven como nutrientes cuando se encuentran en el agua de riego o en estanques de peces (OMS, 1989).

El riesgo de contaminación del agua subterránea por medio del riego con aguas residuales regeneradas dependerá de las condiciones locales y de la intensidad de aplicación. Donde existe una capa profunda homogénea no saturada encima de una capa saturada de la fuente acuífera, la mayoría de los contaminantes son absorbidos por la capa no saturada y es muy poco el riesgo de contaminación del agua subterránea. Solo habrá riesgo de acumulación de nitratos si hay una capa no saturada de poca profundidad o muy permeable encima de la fuente acuífera y sobre todo si esta zona tiene grietas. Por otra parte, los cultivos absorberán nitrógeno de las aguas residuales para riego y, con ello, reducirán la contaminación del agua subterránea (OMS, 1989).

En lo que a datos sobre reutilización se refiere, en España el volumen de aguas depuradas reutilizadas en 2008 se situaba en torno a los $368 \text{ hm}^3/\text{año}$ y suponía un 10,8 % del caudal de aguas residuales depurado.



Imagen 2.1: Ubicación de las actuaciones de reutilización planificada en España en 2008. Fuente: CEDEX, 2008.

El mayor caudal reutilizado se da en el arco Mediterráneo, Andalucía y los archipiélagos de Baleares y Canarias, destacando la Comunidad Valenciana, que reutilizaba $149 \text{ hm}^3/\text{año}$ (40,4% del total del caudal reutilizado) y la Comunidad de Murcia, que reutilizaba $85 \text{ hm}^3/\text{año}$ (23,0% del total del caudal reutilizado). Ambas comunidades han seguido incrementando sus programas de reutilización hasta alcanzar en el caso de la Comunidad Valenciana en 2010 los 350 hm^3 , lo que significa un incremento de más del doble de lo que se reutilizaba en 2008.

En los últimos 20 años, ha crecido mucho el interés en el uso aguas residuales regeneradas para riego de cultivos en las regiones áridas y semiáridas por la escasez de otras fuentes de agua y la necesidad de incrementar la producción local de alimentos. Los planificadores del aprovechamiento de recursos hídricos se han dado cuenta del valor de esta práctica, tanto para la conservación de agua como la reutilización de nutrientes, y el público no ha hecho ninguna objeción cuando se han incluido los mecanismos necesarios de protección de la salud.

2.1.1 Historia del aprovechamiento de aguas residuales en la agricultura

El uso de aguas residuales en agricultura en lo que se llamó «cultivo con aguas negras» comenzó en Australia, Francia, Alemania, India, el Reino Unido y los Estados Unidos de América a finales siglo XIX, y en México en 1904. Sin embargo, en ciertas regiones templadas, donde era cada vez mayor el volumen de aguas residuales colectadas y más acentuada la falta de terrenos cercanos a las ciudades, la superficie necesaria para el cultivo con aguas negras llegó a ser tan extensa que se convirtió en algo prohibitivo. De los países citados, sólo Australia (Melbourne), la India, el actual territorio de República Federal de Alemania y México siguieron empleando aguas residuales de esa forma (OMS, 1989). El aprovechamiento indirecto, es decir, la extracción de agua de los ríos que reciben aguas residuales depuradas o no, es práctica común en todo el mundo.

El aprovechamiento de los efluentes tratados para el riego de cultivos y de las «zonas verdes» del sector urbano (parques y campos de golf) se ha ampliado mucho en Australia, América Latina, el Norte de África, España y otros países del Mediterráneo, así como en los Estados Unidos de América. En algunos países como Arabia Saudí, Israel, Jordania y Perú, la política gubernamental se ha centrado en el aprovechamiento de todos los afluentes de las plantas de tratamiento de aguas negras, sobre todo para riego de cultivos.

La restricción de ciertos cultivos puede desempeñar una valiosa función para proteger la salud pública cuando se emplean aguas residuales en estado bruto o sólo parcialmente tratadas. La mayor parte de las aguas negras de la Ciudad de México se han empleado en el Estado de Hidalgo y se han usado para regar 80000 ha, sobre todo para la producción de alfalfa, maíz, cebada y avena, lo que ha convertido este plan de aprovechamiento de aguas residuales en el mayor del mundo (OMS, 1989).

El tratamiento de aguas residuales en estanques de estabilización es un método eficaz y de bajo costo para la eliminación de agentes patógenos y, por tanto, es apropiado para sistemas de aprovechamiento de aguas residuales. Se empleó con éxito en la depuración de las aguas residuales de la ciudad de Ammán, Jordania, de varias partes de Túnez y en una zona de Lima (Perú), donde se regaban el maíz, otras verduras y varios cultivos forrajeros. En Lima, el tratamiento de aguas residuales en estanques de estabilización es la única forma de proteger la salud y no hay ninguna restricción de cultivos.

En el poblado de Ica, Perú, cuyas aguas negras se tratan sólo parcialmente en estanques de estabilización, se ha optado por tratamiento parcial y restricción de cultivos. Los afluentes contienen cerca de 10^5 de coliformes fecales por cada 100 ml. y se emplean para regar unas 400 ha. de algodón, maíz y uvas. No se permite el cultivo de tuberosas ni de verduras que crezcan cerca del suelo o que se consuman crudas, y se emplea agua subterránea para regar algunas zonas vecinas para el cultivo de los productos prohibidos (OMS, 1989).

En los distritos de riego administrados por el Gobierno de Túnez (OMS, 1989) se trabaja mediante selección de cultivos y tratamiento de aguas residuales con lo que se logra retirar sólo parte de los agentes patógenos. Las aguas residuales de ciertos sectores de la ciudad de Túnez se someten a tratamiento biológico secundario convencional y se emplean sin cloración para regar varios millares de hectáreas de árboles de frutas cítricas que constituyen cultivos comerciales. Las aguas residuales depuradas se distribuyen por medio de tuberías enterradas y los efluentes llegan a los árboles a lo largo de surcos de poca extensión en los que se han instalado rociadores con válvulas.

El aprovechamiento total de las aguas residuales en agricultura es una política nacional declarada sobre el uso de recursos hídricos en Israel (OMS, 1989), donde se han ejecutado unos 250 proyectos de riego para los que se ha utilizado más del 70 % del volumen total de aguas

residuales del sector urbano. La principal estrategia de protección de la salud es el tratamiento mínimo en estanques de estabilización junto con restricción de cultivos, medida que permite producir sólo algodón y forrajes.

Por otro lado, muchos países han adoptado por normas microbiológicas muy estrictas para las aguas residuales tratadas, basándose exclusivamente en criterios indicadores de la calidad bacteriológica. Algunos han adoptado por el método de tratamiento terciario (Prats, 2011) cuando ha estado a su alcance, y han instalado los servicios necesarios para filtración rápida con arena y flotación después del tratamiento biológico secundario de las aguas residuales. En algunas regiones se pretende ozonizar los efluentes en el futuro, aun después de ese tratamiento terciario, con el fin de eliminar todo riesgo sanitario.

Especialmente en las regiones áridas y semiáridas, pero también en otras zonas, es indispensable considerar el aprovechamiento como una opción factible para la evacuación de aguas residuales regeneradas más bien que como algo posible sólo en condiciones excepcionales.

2.1.2 Marco legislativo

Las primeras actuaciones legales en cuanto a la regeneración y posterior reutilización del agua en España se realizaron adoptando las normas de reutilización de California (California Code Regulations, 2001), las directrices de la US EPA (U.S. Environmental Protection Agency) y las recomendaciones de la OMS (OMS, 1989). En 1999, el Ministerio de Obras Públicas, Transporte y Medio Ambiente propuso un conjunto de propiedades fisicoquímicas y microbiológicas para 14 posibles aplicaciones de agua regenerada (Jordán, 2008).

Pero no fue hasta la aparición del Real Decreto 1620/2007 (RD 1620/2007) por el que se establece el régimen jurídico de la reutilización de las aguas depuradas, cuando se instauraron una serie de pautas y límites máximos de concentraciones de algunos parámetros obligatorios para la reutilización de las aguas regeneradas.

En este Real Decreto se establecen límites de parámetros específicos que deben cumplirse en función del uso al que vaya a ser destinada el agua regenerada; dichos criterios serán considerados mínimos obligatorios exigibles (Anexo IA del RD 1620/2007). En las siguientes tablas se detallan todas las variables específicas que deben medirse.

Tabla 2.2: Parámetros legislados en el RD 1620/2007.
Fuente: elaboración propia.

PARÁMETROS
Nematodos intestinales
<i>Escherichia coli</i>
Sólidos en suspensión
Turbidez
Otros parámetros (en función del uso):
Sustancias peligrosas
<i>Legionella</i>
<i>Salmonella</i>

Tabla 2.3: Límites exigidos de parámetros según su futuro uso, según el RD 1620/2007. Fuente: RD 1620/2007.

USO DEL AGUA PREVISTO	Nematodos intestinales (huevos/10L)	SS (mg/L)	TURBIDEZ (NTU)	<i>E.coli</i> (UFC/100mL)
1 URBANOS				
1.1 Residencial	1	10	2	0
1.2 Servicios	1	20	10	200
2 AGRICOLAS				
2.1 Riego cultivos (contacto directo con partes comestibles)	1	20	10	100
2.2 Riego productos de consumo humano. Pastos. Acuicultura	1	35	Sin límite	1000
2.3 Cultivos leñosos. Cultivo flores. Riego cultivo industrial no alimentario.	1	35	Sin límite	10000
3 INDUSTRIALES				
3.1 Aguas de proceso y limpieza (no alimentario)	Sin límite	35	15	10000
3.1.1 Aguas de proceso y limpieza industria alimentaria	1	35	Sin límite	1000
3.2 Torres de refrigeración y condensadores.	1	5	1	0
4 RECREATIVOS				
4.1 Riego campos de golf	1	20	10	200
4.2 Estanques. Masas de agua	Sin límite	35	Sin límite	10000
5 AMBIENTALES				
5.1 Recarga de acuíferos por percolación localizada	Sin límite	35	Sin límite	1000
5.2 Recarga de acuíferos por inyección directa	1	10	2	0
5.3 Riego bosques, zonas verdes. Silvicultura.	Sin límite	35	Sin límite	Sin límite
5.4 Otros usos: mantenimiento de humedales, caudales mínimos, etc.	Depende del caso			

Tal y como se ha establecido en el objetivo principal de este trabajo, se trata de la regeneración de un agua depurada para su uso como riego de maíz. En este caso se trata de un uso agrícola del tipo 2.2, el cual abarca la acuicultura, el riego de pastos para consumo de animales productores de leche o carne, y el riego de productos para consumo humano con sistema de aplicación de agua que no evita el contacto directo del agua regenerada con las partes comestibles, pero el consumo no es en fresco sino con un tratamiento industrial posterior (RD 1620/2007).

Según este tipo de uso, se debe tener en cuenta la concentración de tres parámetros: nematodos intestinales (límite de 1 huevo/10 litros), *Escherichia coli* (límite de 1000 UFC/100 mililitros) y Sólidos en Suspensión (límite de 35 mg/litro). Este caso no impone un valor máximo de turbidez.

Estos parámetros no han sido los únicos a tener en cuenta en el análisis del efluente, sino que se ha estudiado también toda la normativa vigente relacionada, así como una búsqueda bibliográfica de recomendaciones de autores sobre los parámetros necesarios en el agua de riego para maíz.

Además de los criterios establecidos en el RD 1620/2007, han de tenerse en cuenta otros límites en función del uso posterior del agua. A continuación se detalla una lista con la legislación pertinente en materia de sustancias peligrosas, zonas vulnerables, normas de vertido, establecimiento de límites de ciertos parámetros presentes en el efluente, etc.

- DIRECTIVA 2006/11/CE, relativa a la contaminación causada por determinadas sustancias peligrosas vertidas en el medio acuático, que establece la necesidad de reducir la contaminación de las aguas causadas por sustancias persistentes, tóxicas y bioacumulables concretas, con el objetivo de proteger el medio acuático.
- DIRECTIVA 91/271/CE, sobre el tratamiento de aguas residuales urbanas. En esta Directiva se establecen las eficiencias mínimas exigibles de los tratamientos que se llevan a cabo en las EDARs, así como los límites máximos de algunos parámetros permitidos en el efluente. Estos parámetros son aquellos regulados por el Instituto Aragonés del Agua (IAA), y su análisis es común en todas las instalaciones de depuración (Demanda Química de Oxígeno, Demanda Biológica de Oxígeno, Nitrógeno total, Fósforo total y Sólidos en Suspensión). En esta normativa se detalla además las condiciones de calidad que debe alcanzar el efluente de una EDAR en zonas catalogadas como sensibles y vulnerables, reduciendo las concentraciones máximas permitidas de algunos nutrientes.
- REAL DECRETO 261/1996 de 16 de febrero sobre la protección de las aguas contra la contaminación producida por los nitratos procedentes de fuentes agrarias, transposición de la directiva 91/676/CEE. Este Real Decreto prevé que las zonas vulnerables designadas deberán ser examinadas, y en su caso, modificadas o ampliadas por los órganos competentes de las Comunidades Autónomas.
- ORDEN de 19 de julio de 2004, del Departamento de Agricultura y Alimentación, por la que designan las siguientes nuevas Zonas Vulnerables a la contaminación de las aguas por los nitratos procedentes de fuentes agrarias en la Comunidad Autónoma de Aragón y se aprueba el Programa de Actuación sobre las mismas: Zona Vulnerable del acuífero Ebro III y aluviales del Bajo Arba, Bajo Gállego y Bajo Jalón; Zona Vulnerable de Singra-Alto Jiloca; Zona Vulnerable de los sectores oeste y centro del acuífero de Apiés; y Zona Vulnerable del acuífero de Muel-Belchite. (Boletín Oficial de Aragón del de agosto de 2004).
En ella se amplían la relación de superficies designadas como nuevas Zonas Vulnerables a la contaminación por nitratos, entre las cuáles se encuentra la zona elegida como área de estudio para este trabajo (Aluviales del Bajo Arba).
- RESOLUCIÓN de 30 de junio de 2011, de la Secretaría de Estado de Medio Rural y Agua, por la que se declaran las zonas sensibles en las cuencas intercomunitarias. En esta Resolución se declara a la zona del Río Arba de Luesia como zona sensible (Desde el río Arba de Riguel hasta desembocadura en el Río Ebro), incluyendo toda la extensión del término municipal de Tauste.

Tras el análisis completo de la legislación, se ha determinado que hay una serie de parámetros que deben ser analizados por ley en el efluente: nematodos intestinales, *Escherichia coli*, Sólidos en Suspensión, Demanda Biológica de Oxígeno, Demanda Química de Oxígeno, Nitrógeno total y fósforo total. Junto a estos se analizarán además otros parámetros escogidos mediante el análisis de recomendaciones de diferentes autores, relacionadas con la calidad del agua de riego adecuada para el cultivo del maíz, y que se muestran a continuación.

2.1.3 Recomendaciones sobre la calidad requerida en el agua de riego para el cultivo de maíz

Directrices sobre la calidad de los efluentes empleados en la agricultura

Según las Directrices Sanitarias sobre el uso de aguas residuales en agricultura y acuicultura de la Organización Mundial de la Salud, y respaldado por las recomendaciones de las reuniones de expertos de Engelberg (1985) y Adelboden (1987), el uso inocuo de aguas residuales en agricultura o acuicultura exige la eliminación casi completa de los helmintos, ya que constituyen el mayor riesgo real para la salud pública proveniente del riego con aguas residuales. Eso significaría que se debe eliminar un 99,9 % de los huevos de helmintos mediante procesos de tratamiento apropiado en las zonas donde las helmintiasis son endémicas y presentan riesgos tangibles para la salud.

A continuación se muestra una tabla indicativa de las directrices recomendadas por la OMS sobre la calidad microbiológica que deben tener las aguas residuales empleadas en agricultura.

Tabla 2.4: Directrices recomendadas sobre la calidad microbiológica de las aguas residuales empleadas en agricultura. Fuente: OMS, 1989.

Categoría	Condiciones de aprovechamiento	Grupo expuesto	Nematodos intestinales ^b (media arit. nº huevos/L ^c)	Coliformes fecales (media geométrica nº por 100ml ^a)	Tratamiento de aguas residuales necesario para lograr la calidad microbiológica exigida
A	Riego de cultivos que comúnmente se consumen crudos, campos de deporte, parques públicos ^d	Trabajadores consumidores público	≤1	≤1000 ^d	Serie de estanques de estabilización que consiguen calidad microbiológica indicada o tratamiento equivalente
B	Riego de cultivos de cereales industriales y forrajeros, praderas y árboles ^e	Trabajadores	≤1	No se recomienda ninguna norma	Retención en estanques de estabilización (8 a 10 días) o eliminación equiv. de helmintos y coliformes fecales
C	Riego localizado de cultivos en la categoría B cuando ni los trabajadores ni el público están expuestos	Ninguno	No es aplicable	No es aplicable	Tratamiento previo según lo exija la tecnología de riego por no menos que sedimentación primaria

a: En casos específicos, se deberían tener en cuenta los factores epidemiológicos, socioculturales y ambientales de cada lugar y modificar las directrices de acuerdo con ello.
b: Especies *Ascaris* y *Trichuris* y anquilostomas.
c: Durante el periodo de riego.
d: Conviene establecer una directriz más estricta (≤ 200 coliformes fecales/100ml) para prados públicos, (como hoteles) con los que el público puede tener contacto directo.
e: En el caso de los árboles frutales, el riego debe cesar dos semanas antes de cosechar la fruta y ésta no se debe recoger del suelo. No es conveniente regar por aspersión.

Actualmente, la legislación española no ha especificado los valores límite de muchos parámetros a la hora de establecer unos rangos admisibles en el agua de riego de determinados cultivos. Únicamente el Real Decreto 1620/2007 establece unos requisitos en el agua regenerada para riego, especificando solamente tres parámetros cuyos límites máximos está prohibido sobrepasar (sólidos en suspensión, huevos de nematodos intestinales y *Escherichia coli*).

En el presente proyecto se ha elaborado una recopilación bibliográfica sobre recomendaciones de autores en lo relativo al regadío de maíz. Para ello, se ha realizado una búsqueda de información sobre los rangos que tolera el maíz en varios parámetros del agua de riego.

Gracias al análisis de esta bibliografía de recomendaciones, se ha podido comparar en distintas fuentes cuáles son los parámetros más nombrados y aquellos a los que más importancia dan la mayoría de autores consultados respecto al maíz. Han sido estos parámetros los que se han tenido en cuenta a la hora de caracterizar el efluente de salida de la EDAR (además de aquellos parámetros legislados), pudiendo obtener así datos comparativos entre los valores que se recomiendan y los que realmente se encuentran en la muestra.

En los casos en los que hay varias recomendaciones para un mismo parámetro, se ha escogido el límite menor (el más restrictivo) siempre y cuando no haya ningún límite legislado para ese parámetro, ocasión en la que se antepone siempre la legislación a la recomendación.

A continuación se presenta una tabla en la que se muestran los parámetros que personalmente se han considerado más importantes en lo que respecta a la bibliografía consultada, y las recomendaciones de los rangos en los que se deben encontrar dichos parámetros en el agua de riego del maíz. Igualmente, se detallan aquellos rangos de parámetros que se encuentran actualmente legislados en el efluente de salida, bien sea por normativa relativa a requisitos de efluentes de las EDAR, o bien por legislación referida a límites específicos para las zonas vulnerables o sensibles. Al lado de cada límite recomendado o legislado se muestran las unidades en las que se medirán esos parámetros.

Tabla 2.5: Parámetros con límites legislados y recomendaciones de autores. Fuente: elaboración propia.

	PARAMETRO	Límite permitido para efluente regenerado	Límite Efluente depurado	Normativa de referencia	Límites recomendados	Bibliografía de las recomendaciones
PARÁMETROS LEGISLADOS	Nematodos Intestinales	1huevo/10L		RD 1620/2007	≤0,1huevo/L	-OMS, 1989.
	Escherichia coli	1000 UFC/100ml		RD 1620/2007		
	Sólidos en Suspensión	35mg/L	35 mg/L	RD 1620/2007 Directiva 91/271/CEE	5-35 TSS/L <50 mg/L 20 mg/L	- Lazarova et al, 2004. -FAO, 1985. -US EPA, 1992
	Turbidez	No se fija límite		RD 1620/2007	0,2-35 NTU <2 NTU	- Lazarova et al, 2004. -US EPA, 1992
	Nitrógeno Total		15 mg/L	Directiva 91/271/CEE	<10-15 mg/L 5-30mg/L <5 mg/L (sin restricciones)	- Lazarova et al, 2004. -Metcalf et al, 1995. -Mujeriego, 1990.
	Fósforo total		2 mg/L	Directiva 91/271/CEE	0,1-2mg/L	- Lazarova et al, 2004.
	DBO ₅		25 mg/L	Directiva 91/271/CEE	5-45 mg/L 20 mg/L <10 mg/L	-Lazarova et al, 2004. -US EPA, 1992 -Mujeriego, 1990.
	DQO		125 mg/L	Directiva 91/271/CEE	20-200mg/L	-Lazarova et al, 2004.

Tabla 2.5: Parámetros con límites legislados y recomendaciones de autores (Continuación)

	PARAMETRO	Límite permitido para efluente regenerado	Límite Efluente depurado	Normativa de referencia	Límites recomendados	Bibliografía de las recomendaciones
PARÁMETROS RECOMENDADOS	Coliformes Totales				1-200CFU/ 100mL	- Lazarova et al, 2004.
	Manganeso				0,2 mg/L <0,1 mg/L 0,2 mg/L	- Metcalf et al, 1995. - FAO, 1985. - Crook, 1991
	Hierro				5 mg/L 5 mg/L	- Metcalf et al, 1995. - Crook, 1991.
	Nitratos				<5 mg/L ninguna restricción >7,5 daño severo al cultivo	- Vomocil et al, 1992
	pH				< 7 6-9	- FAO, 1985. - Mujeriego, 1990.
	Conductividad Eléctrica				1,7 dS/m < 0,7 dS/m (sin riesgo) > 3dS/m (riesgo alto) 0,7 dS/m	- ARMCANZ & ANZECC, 1992. - FAO, 1985; Ayers & Westcot - FAO, 1985; Ayers & Westcot - Mujeriego, 1990.
	Salinidad				450-400mg TDS/L 0,45 g/L (no hay riesgo) >2 g/L (riesgo alto o severo)	- Lazarova et al, 2004. - FAO, 1985. - FAO, 1985.
	SAR				<3,0 (Sin restrict. para agua reciclada)	- Vomocil et al, 1992.
	Magnesio				<60 mg/L	FAO, 1985.
	Sodio				<900 mg/L	FAO, 1985.
	Calcio				0-400 mg/L	Mujeriego, 1990.
	Cobre				0,2 mg/L 0,2 mg/L	- Metcalf et al, 1995. - Crook, 1991
	Níquel				0,02-0,1 mg/L 0,2 mg/L 0,2 mg/L	- Lazarova et al, 2004. - Metcalf et al, 1995. - Crook, 1991.
	Zinc				2 mg/L 2 mg/L	- Metcalf et al, 1995. - Crook, 1991.
	Aluminio				5 mg/L 5 mg/L	- Metcalf et al, 1995. - Crook, 1991
	Boro				<1mg/L 2-4 mg/L	- Lazarova et al, 2004. - ARMCANZ & ANZECC, 1992.

	PARAMETRO	Límite permitido para efluente regenerado	Límite Efluente depurado	Normativa de referencia	Límites recomendados	Bibliografía de las recomendaciones
PARÁMETROS RECOM	Mercurio				<0,001 mg/L	-Lazarova et al, 2004.
	Cadmio				<0,01 mg/L	- Lazarova et al, 2004.
	Cromo VI				0,01 mg/L	-Crook, 1991.
	Plomo				0,1 mg/L	Crook, 1991.
	Cloro residual o libre				5,0 mg/L	Crook, 1991.
					<1 mg/L	- Metcalf et al, 1995.
					<1 mg/L	-US EPA, 1992
					<1 mg/L	-Mujeriego, 1990.

Tabla 2.5: Parámetros con límites legislados y recomendaciones de autores (Continuación).

2.1.4 Procesos convencionales usados como tratamientos para la regeneración de aguas

El agua de salida de las EDARs suele someterse a un determinado tratamiento con el objetivo de alcanzar los niveles o criterios exigidos en función de su reutilización tal y como establece el RD 1620/2007.

Las tecnologías aplicables en la regeneración de aguas depuradas se centran en diferentes procesos, pero son los citados a continuación los más comunes: procesos de membrana, de oxidación, adsorción con carbón activo, intercambio iónico, lagunas, humedales y otros sistemas biológicos e irradiación con ultravioleta (Mujeriego, 1993).

Cada uno de los procesos aplicados para regeneración tienen diferentes eficiencias, y varían dependiendo del tipo de agua, el tiempo de contacto (en el caso del uso de desinfectantes), el tipo de organismos patógenos presentes (bacterias patógenas, helmintos...), el pH o la materia orgánica en suspensión, la cual tiene una gran importancia a la hora de aplicar un tratamiento desinfectante (White, 2010).

A continuación se exponen los distintos tratamientos complementarios estudiados que se pueden aplicar como procesos de regeneración de aguas, dependiendo a los parámetros cuya concentración se desea modificar:

Tabla 2.6: Tratamientos utilizados actualmente para la regeneración de aguas, metodología de cada uno de ellos y parámetros que modifican. Fuente: elaboración propia.

Tratamiento	En qué consiste	Parámetros que elimina
Cloración	Adición de cloro como desinfectante al agua a tratar. Se adiciona en forma de gas cloro, hipocloritos o compuestos clorinados.	Eliminación prácticamente total de las sales disueltas y de los SS. Eliminación de patógenos (oxidación de material celular) y alta reducción de nitrógeno. Oxidación de manganeso.
Intercambio iónico	Pasar el agua repetidamente sobre un intercambiador catiónico sólido y otro aniónico, que reemplaza los cationes y aniones por los iones hidrógeno e hidroxilo.	Eliminación de compuestos inorgánicos (cada equivalente de sal es reemplazado por un mol de agua). Eliminación de N, metales pesados, sólidos disueltos orgánicos.

Tabla 2.6: Tratamientos utilizados actualmente para la regeneración de aguas, metodología de cada uno de ellos y parámetros que modifican (Continuación).

Tratamiento	En qué consiste	Parámetros que elimina
Ozonización	Las moléculas de oxígeno (O_2) son disociadas por medio de una fuente de energía produciendo átomos de O que chocarán con una molécula de oxígeno para formar O_3 (ozono), que se utiliza como desinfectante.	Eliminación de bacterias y virus, toxinas, pesticidas, reducción de sales pesadas, oxida hierro y manganeso, elimina olores y colores, disminuye la DQO, DBO, SS y turbidez, elimina algas, oxida componentes inorgánicos.
Radiación UV	La radiación UV, generada por una descarga eléctrica a través de vapor de mercurio, penetra al material genético de los microorganismos y retarda/fulmina su habilidad de reproducción.	Eliminación patógenos, virus
Precipitación química o coagulación	Eliminación de sustancias por adición de un reactivo que forma compuestos insolubles en el agua, facilitando su eliminación por métodos físicos. Para ello se debe añadir un floculante que dé lugar a flóculos más densos que el agua que puedan precipitar.	Principalmente para reducir el fósforo, compuestos orgánicos y turbidez. Elimina 80-90% SS, 70-80% DBO y 80-90% bacterias.
Lagunaje de estabilización	Son lagunas de poca profundidad donde las bacterias, algas y protozoos, en contacto con el aire eliminan de forma natural los SS y la materia orgánica, incluyendo patógenos.	Eliminación baja de DBO_5 , pero significativa de SS, N y P.
Nitrificación-Desnitrificación	Nitrificación: el N orgánico y amoniacal se oxida, transformándose en nitrito y después en nitrato. La desnitrificación es el paso de los nitratos a nitrógeno atmosférico, por bacterias desnitrificantes. El N_2 tenderá a salir a la atmósfera, disminuyendo el N del agua.	Hasta un 70% de eliminación de nitratos y fosfatos, si se realiza conjuntamente con un tratamiento aerobio-anaerobio de eliminación de fosfatos.
Filtro Intermitente de Arena (FIA)	La arena es el medio más comúnmente usado, pero también la antracita, residuos de minería, ceniza de incineradores, etc. La superficie del lecho se dosifica en forma intermitente con efluente, el cual percola a través de la arena, quedándose retenidas ciertas sustancias.	Más del 90% de coliformes fecales, el 90% de parásitos, el 50-90% de compuestos tóxicos orgánicos e inorgánicos, hasta el 67% de hierro y de manganeso y la mayoría de los sedimentos suspendidos.
Microfiltración	Filtración a través de membranas bajo presión (<5 atm)	SS, componentes emulsionados, bacterias, protozoos
Ultrafiltración	Filtración a través de membranas bajo presión (2-8 atm)	Macromoléculas con masas molares entre 5,000 y 100,000 (depende del tamaño del poro)
Nanofiltración	Filtración a través de membranas bajo presión (5-15 atm)	Moléculas con masas molares de entre 200 y 500 (depende del tamaño del poro)
Hiperfiltración	Filtración a través de membranas bajo presión (15-100 atm)	La mayoría de solutos e iones

Tabla 2.6: Tratamientos utilizados actualmente para la regeneración de aguas, metodología de cada uno de ellos y parámetros que modifican (Continuación).

Tratamiento	En qué consiste	Parámetros que elimina
Ósmosis inversa	Forzar el agua a través de una membrana semipermeable que retiene los materiales presentes. Depende de la sorción preferencial del agua.	Eliminación de sólidos disueltos orgánicos, metales pesados, 70-90% nitratos. Alto porcentaje de remoción de sales disueltas.
Electrodiálisis	Se aplica una corriente directa a un reservorio o corriente de agua, separado en capas verticales por membranas alternadamente permeables a cationes y aniones.	Remoción de hasta el 50% de los compuestos inorgánicos disueltos. Eliminación sólidos disueltos orgánicos.
Electrodesinfección	Utiliza ánodos con elevado poder de oxidación de forma indirecta (producción muy elevada de oxidantes tipo cloro, ozono, radicales o peróxidos).	Elimina virus, bacterias y parásitos.
Destilación	Colección de vapor de agua, después de hervir las aguas residuales, que deja como residuo las sustancias presentes en el agua.	Impurezas volátiles como el CO ₂ , sílice, amoníaco y diversos compuestos orgánicos.
Adsorción con carbón activo	Es un proceso donde el sólido (carbón activo) adsorbe sustancias solubles en el agua que quedan retenidas en este material.	Restos de metales pesados, fosfatos, nitratos o restos de toxinas, fenoles, hidrocarburos aromáticos, olor, color y sabor, plaguicidas y COVs
Stripping o arrastre con vapor de agua	Proceso de transferencia de masa mediante la inyección de vapor de agua a través del efluente tratado, trasladando las partículas del efluente al vapor.	Eliminación de COVs, como disolventes clorados o contaminantes gaseosos. Gran eliminación de amoniaco. Extracción de compuestos orgánicos volátiles. Especialmente adecuado para casos de bajas concentraciones.
Extracción por solvente	Disolución de la mezcla a separar en un disolvente que disuelva a todos los componentes. Se adiciona un segundo disolvente inmiscible. La separación de los disolventes y su evaporación, suministrará residuos enriquecidos en los componentes más solubles.	Contaminantes orgánicos, COVs.

SS: Sólidos en Suspensión
 Biológica de Oxígeno
 DQO: Demanda Química de Oxígeno
 P: fósforo total
 Volátiles

DBO₅: Demanda
 N: Nitrógeno total
 COVs: Compuestos Orgánicos

Actualmente, uno de los procesos más utilizados tanto para la regeneración de aguas como para tratamientos terciarios en Estaciones Depuradoras es la cloración. Este método permite una gran eficiencia a la hora de escoger un tratamiento desinfectante, a lo que se suma también su bajo coste.

Sin embargo el gran problema de la utilización de cloro para la desinfección de aguas residuales es la formación de compuestos organohalogenados cancerígenos como los trihalometanos (THMs). La ozonización es un método más efectivo que el cloro que también puede disminuir la concentración de muchos parámetros, sin generar subproductos cancerígenos del tipo organoclorados. El inconveniente es que precisa generación in situ, un reactor de contacto y una

operación apropiada para prevenir los riesgos de toxicidad hacia los operarios (Prats, 2011). Todo ello hace que resulte caro de instalar y tenga consumos energéticos importantes.

La radiación UV es efectiva como bactericida y viricida, pero poco eficaz frente a parásitos. Su principal inconveniente es que el agua a tratar debe estar exenta de sólidos en suspensión y turbidez, ya que se reduce drásticamente el rendimiento (es decir, solicita un tratamiento previo de filtrado o similar). Además se pueden dar fenómenos de reactivación de virus si los tiempos de exposición a la radiación son cortos o si la dosis de radiación no es suficiente (Prats, 2011).

Las nuevas tecnologías basadas en el uso de membranas (microfiltración, ultrafiltración, nanofiltración) comprenden una separación mediante exclusión física debido al tamaño, por lo que no es posible la generación de subproductos. El efluente queda totalmente exento de sólidos en suspensión y turbidez. El inconveniente es el coste de instalación y operación, debido al ensuciamiento de las membranas (Prats, 2011).

El resto de procesos son menos comunes, debido no solo a sus altos gastos de instalación o mantenimiento, sino por su mayor dificultad o incomodidad a la hora de aplicarlos al efluente para lograr su regeneración.

Gracias a los resultados obtenidos en el capítulo cuarto, se ha decidido que este proyecto se centrará principalmente en las técnicas de desinfección, particularmente consideradas como las más apropiadas para el posterior uso, y en concreto en dos de ellas: el cloro y el ozono. Las razones por las que se han elegido estos métodos aparecen en el apartado 4.3.1 (Selección de los métodos más adecuados y justificación).

Seguidamente se realiza un análisis de ambos tratamientos, explicando brevemente su historia de aplicación, su metodología, sus diferentes usos, ventajas e inconvenientes.

Cloración

El cloro, a lo largo de la historia y hasta la actualidad, ha sido el reactivo oxidante más utilizado en el tratamiento de aguas. La desinfección de aguas con cloro fue utilizada por primera vez en 1893, en Hamburgo (Alemania) y en 1904, se instaló el primer proceso de cloración continua en el abastecimiento de agua de Londres (Miguel, 2010).

En condiciones normales, el cloro es un gas tóxico, de olor penetrante y color amarillo/verdoso que se disuelve en agua. Su aplicación puede ser en forma pura o en forma de los derivados a los que da lugar en disolución: hipoclorito de sodio o calcio y ácido hipocloroso. El hipoclorito de sodio o lejía (NaClO) se produce cuando el cloro gas se disuelve en una disolución de hidróxido de sodio, y el hipoclorito de calcio ($\text{Ca}(\text{ClO})_2$) se forma a partir del precipitado que resulta de disolver el cloro gas en una disolución de óxido de calcio e hidróxido de sodio. El ácido hipocloroso (HClO) es la forma más oxidante del cloro (potencial de oxidación de 1,48 V) y la más abundante en disolución acuosa (Miguel, 2010).

El cloro posee una acción desinfectante en el agua que se consigue adicionando un exceso del mismo, de manera que se satisface la demanda de cloro del agua y además queda cierta cantidad de cloro residual para asegurar la calidad biológica a lo largo de su recorrido por la red de distribución (en el caso de cloración para potabilización de aguas).

La demanda de cloro de un agua se define como la cantidad de cloro que reacciona con las sustancias presentes en el agua y que son susceptibles de ser oxidadas. El cloro residual se refiere a la cantidad de cloro en forma activa que permanece en el agua tras la reacción con dichas sustancias (Miguel, 2010).

El cloro, como agente oxidante y desinfectante, se utiliza en la potabilización y regeneración de aguas para:

- Control de crecimiento de algas y otros organismos molestos que pueden dañar las instalaciones, como el mejillón cebra y la almeja asiática.
- Eliminación de gérmenes patógenos.
- Oxidación de compuestos orgánicos que da sabor, olor o color al agua.
- Oxidación de compuestos inorgánicos como el hierro y el manganeso, nitritos, sulfuros, sulfitos y bromuros.
- Descomposición de compuestos peligrosos fácilmente oxidables.
- Mejora de la eficiencia del proceso de coagulación y filtración de partículas en suspensión al oxidarlas previamente.

Por tanto, el cloro y derivados tienen un elevado poder desinfectante y acción desinfectante residual, además de la oxidación de muchos compuestos orgánicos e inorgánicos, siendo el método más sencillo y menos costoso de conseguir una desinfección.

Sin embargo, la cloración también presenta una serie de inconvenientes. La principal desventaja de esta técnica es la formación de subproductos peligrosos. Cuando el cloro reacciona con la materia orgánica del agua, se forman compuestos orgánicos halogenados que son potencialmente cancerígenos.

Entre estos subproductos los más importantes son los trihalometanos: cloroformo (CHCl_3), bromodicitrormetano (CHBrCl_2), dibromoclorometano (CHBr_2Cl) y bromoformo (CHBr_3) (Rodríguez et al, 2007). La concentración de estas sustancias en aguas potables se encuentra limitada por la legislación vigente (RD 140/2003) estableciendo un límite de 100 $\mu\text{g/L}$ como sumatorio total de trihalometanos. Todos ellos se forman por la reacción del cloro con la materia orgánica presente en el agua.

Aunque el cloro presenta la gran desventaja de formación de subproductos, se debe tener en cuenta igualmente que, en el caso de aguas regeneradas, no hay ninguna normativa que indique un límite máximo de trihalometanos.

Además de la formación de subproductos, el cloro presenta otros inconvenientes:

- El cloro gas puede presentar problemas de toxicidad y corrosión en el almacenamiento y empleo del mismo. Son necesarios contenedores a prueba de fugas en el caso de utilizar cloro gas.
- El hipoclorito de calcio tiene que ser almacenado en un lugar seco y a bajas temperaturas.
- El hipoclorito sódico, además de ser corrosivo, presenta problemas de almacenamiento porque se degrada con el tiempo y en presencia de luz.
- El cloro produce la liberación de metales componentes del material del sistema de distribución mediante oxidación, como por ejemplo el arsénico.

Ozonización

La primera aplicación del ozono en el mundo del agua, como agente desinfectante, se debe al francés De Meriteus en 1886. Posteriormente el empleo del ozono se ha extendido especialmente a finales del siglo XX, y en la actualidad es usado en numerosos países en plantas de tratamiento de agua potable (Doménech, 2004).

El ozono es un gas incoloro, altamente corrosivo y tóxico. Es un agente con gran poder oxidante (potencial de oxidación 2,07 V) que se produce generalmente a partir del oxígeno por una descarga eléctrica en presencia de aire u oxígeno: los átomos que componen el oxígeno molecular se disocian y cada átomo liberado se une a una nueva molécula de oxígeno dando lugar a la molécula de ozono (Miguel, 2010).

A pesar de su elevado poder oxidante, el ozono es un compuesto inestable en disolución acuosa, aumentando su descomposición por el efecto del pH, de la luz o la temperatura. Debido a la inestabilidad de este compuesto debe ser generado *in situ*.

El ozono, en disolución acuosa, puede reaccionar a través de dos vías (Andreozzi et al., 1999):

- Vía directa: se trata de una oxidación directa debida a la reacción entre el ozono molecular y los compuestos disueltos. Esta oxidación es de ataque selectivo y tiene lugar a bajo pH.
- Vía radicalaria: se trata de un mecanismo debido a la reacción entre los radicales generados en la descomposición del ozono y los compuestos disueltos. Este tipo, es un ataque no selectivo y tiene lugar a pH básico.

El ozono como agente oxidante y desinfectante se utiliza en la potabilización y regeneración de aguas para:

- Oxidación de contaminantes inorgánicos, incluyendo el hierro, el manganeso, el amoníaco, los nitritos, los yoduros y el sulfuro.
- Oxidación de microcontaminantes orgánicos, incluyendo compuestos que dan olor y sabor al agua, contaminantes fenólicos y algunos plaguicidas.
- Aumento de la biodegradabilidad de compuestos orgánicos.
- Eliminación de color.

Las dosis de ozono se encuentran limitadas por la transferencia de masa del gas al agua y por los costes asociados. El ozono es un poderoso agente oxidante/desinfectante, capaz de oxidar compuestos orgánicos e inorgánicos con tiempos de contacto muy bajos y sin producir subproductos halogenados de desinfección.

Sin embargo, el principal problema del ozono es que no tiene poder residual que pueda prevenir durante cierto tiempo después de la desinfección. Además de este principal problema, el ozono presenta otros inconvenientes (Miguel, 2010):

- En aguas con concentraciones de iones bromuro superiores a 0.10 mg/L produce subproductos de desinfección bromados (bromoformo, ácidos acéticos bromados, bromopicrina, acetonitrilos bromados) que pueden ser incluso más peligrosos para la salud humana que los no bromados.
- Los ácidos orgánicos y los aldehídos aumentan considerablemente el contenido en carbono orgánico biodegradable que si no es eliminado, puede acelerar el crecimiento de bacterias en el sistema de distribución.
- El coste inicial del equipamiento es muy elevado y la generación de ozono consume una gran cantidad de energía.
- Requiere un alto nivel de mantenimiento y generación *in situ*.

2.2 Características de las Estaciones Depuradoras de Aguas Residuales

2.2.1 Características de las aguas de salida de depuradoras

En general, la composición de las aguas de salida de las Estaciones Depuradoras de Aguas Residuales depende fundamentalmente de los hábitos de la población y los aportes industriales al vertido urbano, además de otros muchos impactos ambientales. Del mismo modo, los compuestos contaminantes que pueden detectarse en esas aguas son muy variados. A pesar de ello, se puede decir que en general, estas aguas se caracterizan por (Katsogiannis y Samara, 2006; Kuster et al., 2008):

- La presencia de altas concentraciones de sólidos en suspensión.
- Elevada turbidez.
- La presencia de gran variedad de gérmenes patógenos. Es el factor de riesgo más importante asociado a la reutilización del agua. Supone la exposición del hombre a agentes biológicos como son bacterias patógenas, helmintos, protozoos o virus entéricos.
- La presencia de contaminantes inorgánicos, como nitrógeno y fósforo (en concentración variable según proceda de instalaciones con o sin eliminación de nutrientes) y en algunos casos de metales pesados, no eliminados en el tratamiento de depuración y cuya concentración depende en gran medida de la componente industrial que tenga el vertido urbano.
- La presencia de materia orgánica. Dentro de este grupo genérico, se distingue:
 - Materia orgánica No Peligrosa: Formada mayoritariamente por compuestos que no han sido degradados en las instalaciones de depuración, bien porque son refractarios al tratamiento o bien porque no se han alcanzado rendimientos del 100%; se trata de sustancias orgánicas como los ácidos carboxílicos, ésteres, proteínas, hidratos de carbono, etc.
 - Materia orgánica Peligrosa: sustancias persistentes que no han sido eliminadas en el tratamiento de depuración, que aunque estén presentes en una muy baja concentración, pueden resultar un problema ambiental y sanitario. Se trata de productos farmacéuticos, productos de cuidado personal, detergentes, plaguicidas y plastificantes. Algunos tienen características tóxicas, cancerígenas, mutagénicas, etc. Todos ellos son compuestos Peligrosos tal y como establecen la Directiva 2006/11/CE y derivadas.

A continuación se describen y comentan los parámetros más importantes para una EDAR, divididos en parámetros físico-químicos, microbiológicos y compuestos inorgánicos, todos ellos detectados habitualmente en los flujos de salida de la mayoría de las Estaciones Depuradoras.

Parámetros físico-químicos

Los parámetros físico-químicos encontrados en la bibliografía son: pH, temperatura, conductividad, turbidez y sólidos en suspensión (SS) además de otros parámetros como Demanda Química de Oxígeno (DQO) o Demanda Biológica de Oxígeno (DBO_5).

Mientras el pH se mantiene entre 7-8 en la mayor parte de las aguas de salida de la depuradora (Hassanli et al., 2009; Santos et al, 2009; Kalavrouziotis et al, 2009), en el resto de las variables se pueden encontrar una gran variabilidad de rango dependiendo sobre todo del tipo de agua tratada y el tipo de tratamiento realizado.

En las tablas siguientes se puede observar para varios parámetros el rango de valores detectados en agua tratada mediante tratamiento con fangos activos (Folch et al, 2008). Aguas de procedencia similar pero sometidas a un tratamiento terciario como ósmosis inversa o ultrafiltración pueden ayudar a conseguir mínimos de SS, conductividad o turbidez (Llorente et al, 2005).

Tabla 2.7: Parámetros físico-químicos de aguas urbanas tratadas con fangos activados y rangos habituales. Fuente: Folch et al, 2008 (Folch et al, 2008).

PARÁMETROS	VALOR
Conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	1459-2207
DQO (mg/L)	19-98
DBO_5 (mg/L)	5-31
SS (mg/L)	5,6-92,2
Turbidez (NTU)	3-54,2

Tabla 2.8: Características del agua tratada con fangos activos y después del tratamiento terciario de ósmosis inversa o ultrafiltración. Fuente: Llorente et al, 2005 (Llorente et al, 2005).

PARÁMETROS	VALORES MÁXIMOS		PARÁMETRO	VALORES MÁXIMOS
DBO ₅ (mg/L)	186	Tratamiento terciario →	DBO ₅ (mg/L)	83
SS (mg/L)	300		SS (mg/L)	41

El RD 1620/2007 marca límites en función de los usos para los SS y la turbidez. En la tabla anterior se observa que, debido al amplio rango de valores de estos parámetros, no en todos los casos es imprescindible un tratamiento terciario para su reutilización, cuando se está en los límites inferiores y para determinados usos. Sin embargo, en otros casos es necesario para alcanzar incluso el límite más permisivo de la legislación.

Parámetros microbiológicos

En lo que respecta a los parámetros microbiológicos detectados en aguas de salida de EDARs, se encuentran sobre todo *Clostridium*, *Coliformes faecalis*, coliformes totales y *Escherichia coli* (*E.coli*). La concentración varía en función del grado de tratamiento. Por ejemplo en India (Avinash et al., 2009) donde el agua residual doméstica se trata con un tratamiento de depuración poco eficaz, las concentraciones son máximas. En países europeos donde hay tratamientos más avanzados, los parámetros más frecuentes son prácticamente los mismos pero su concentración es menor (Molleda et al., 2008; Llorente et al., 2005; Wéry et al., 2008).

En la tabla siguiente se pueden ver los valores de parámetros microbiológicos detectados en aguas de salida de EDARs en Europa, medidos en Unidades Formadoras de Colonias (UFC/100ml).

Tabla 2.9: Parámetros biológicos más comunes en aguas residuales y urbanas y sus rangos habituales. Fuente, Molleda et al, 2008; Llorente et al, 2005; Wéry et al, 2008. (Molleda et al, 2008; Llorente et al, 2005; Wéry et al, 2008)

PARÁMETRO	UFC/100ml
<i>Clostridium</i>	0 - 4·10 ⁴
<i>Coliformes Faecalis</i>	2·10 ² - 2·10 ⁵
<i>Coliformes Totales</i>	10 ⁴ - 2·10 ⁶
<i>E. Coli</i>	8,6·10 ¹ - 2·10 ⁵

El RD 1620/2007 marca límites de concentración de *Escherichia coli* en 10⁴ UFC/100ml para el caso menos restrictivo y llega a exigir su ausencia en algunos casos. En vista de los rangos de la tabla anterior, se determina que en ocasiones es imprescindible realizar un tratamiento de desinfección para alcanzar el límite más permisible y el agua de muestra siempre deberá tratarse cuando sea necesario alcanzar 0 UFC/100ml. El resto de agentes patógenos como *Clostridium*, presentes también, se deben tener en consideración en función del uso posterior que vaya a tener esa agua.

Contaminantes inorgánicos

La contaminación inorgánica se debe principalmente a metales pesados altamente tóxicos como el plomo, mercurio y cadmio (Muñoz et al., 2008), cobre, cromo y zinc (Kalavrouziotis et al., 2009), que están presentes en aguas residuales industriales y que se descargan en la red de saneamiento municipal. Otros metales hallados pueden ser metales de transición como el hierro, el manganeso (Kalavrouziotis et al., 2009) y níquel (Muñoz et al., 2008). En la tabla siguiente se muestran los valores de concentración frecuentes de diferentes metales en aguas de salida de EDARs.

Tabla 2.10: Metales detectados a la salida de depuradora y rangos habituales. Fuente: Kalavrouziotis et al., 2009; Muñoz et al., 2008. (Kalavrouziotis et al., 2009; Muñoz et al., 2008).

Metales	Concentraciones
Pb ($\mu\text{g/L}$)	0,006-1
Hg (mg/L)	0-60
Cu ($\mu\text{g/L}$)	2,73-36
Cd (mg/L)	0-0,001
Cr ($\mu\text{g/L}$)	1,25
Zn ($\mu\text{g/L}$)	69-109,76
Ni ($\mu\text{g/L}$)	0,007-0,42
Fe ($\mu\text{g/L}$)	102,89-130
Mn ($\mu\text{g/L}$)	84,54

Algunos de los autores mencionados anteriormente (Hassanli et al., 2008; Kalavrouziotis et al., 2009) muestran en sus estudios valores habituales hallados de sodio, nitratos, Nitrógeno total o fósforo que se muestra a continuación.

Tabla 2.11: Nitrógeno, fósforo e iones encontrados en efluentes de EDARs. Fuente: Hassanli et al., 2008; Kalavrouziotis et al., 2009. (Hassanli et al., 2008; Kalavrouziotis et al., 2009)

PARÁMETRO	VALORES	PARÁMETROS	VALORES
P_{tot} (mg/L)	0,02-10,76	N_{tot} (mg/L)	7,90-45
Na^+ (mg/L)	9,09-304,67	NO_3^- (mg/L)	5,50-10,98

Aunque la legislación vigente en cuanto a los límites de parámetros para la reutilización del agua no marque específicamente ninguna de estas variables, las Normas de Calidad Ambiental (NCAs) establecen metales como el plomo, el mercurio o el zinc como Sustancias Prioritarias Preferentes.

En el presente proyecto se han tenido en cuenta las NCAs para la selección de los metales a determinar, pero el principal factor que ha limitado dicha elección han sido las recomendaciones de autores sobre qué metales pesados son los más peligrosos o cuya presencia es más importante a la hora del riego del maíz.

2.2.2 Descripción de los procesos llevados a cabo en la EDAR de Tauste

La Estación Depuradora de Aguas Residuales con la que se ha trabajado en este proyecto está situada en el municipio de Tauste, provincia de Zaragoza. Dicha EDAR se encuentra en funcionamiento desde el 21 de Febrero del año 2005, y cuenta con un caudal de diseño de 3500 m³/día, que corresponde a 13125 habitantes equivalentes. El organismo contratante es el Instituto Aragonés del Agua y actualmente se ocupa de su gestión la empresa AQUALIA S.A, perteneciente al grupo Fomento de Construcciones y Contratas (FCC).

Según información recibida de la encargada de la planta depuradora de Tauste, Sara Larrodé, el vertido de entrada de la EDAR tiene unas características aproximadamente similares durante todo el año, por lo que se puede afirmar que no existen variaciones importantes anuales en la composición del afluente de la planta. Como punto a destacar, se debe contar con que el caudal de entrada es más concentrado en invierno, y por tanto posee más carga orgánica que el de verano, que llega más diluido.

Se podría exceptuar en cierto modo los meses de agosto, en los cuáles la empresa conservera situada en el polígono de este municipio comienza la campaña de embotado del tomate, lo que da lugar a un aumento en los niveles de carga orgánica en el vertido principal, sin que éste llegue a afectar de forma acusada en el efluente de salida.

En base a la información proporcionada por Sara, el vertido que llega a la EDAR está compuesto por un 85% de vertido urbano y un 15% de vertido industrial aproximadamente, por lo que se trata de un caudal principalmente de origen doméstico.

Esta Estación Depuradora consta de diversos tratamientos, los cuales se detallan en este diagrama de bloques:

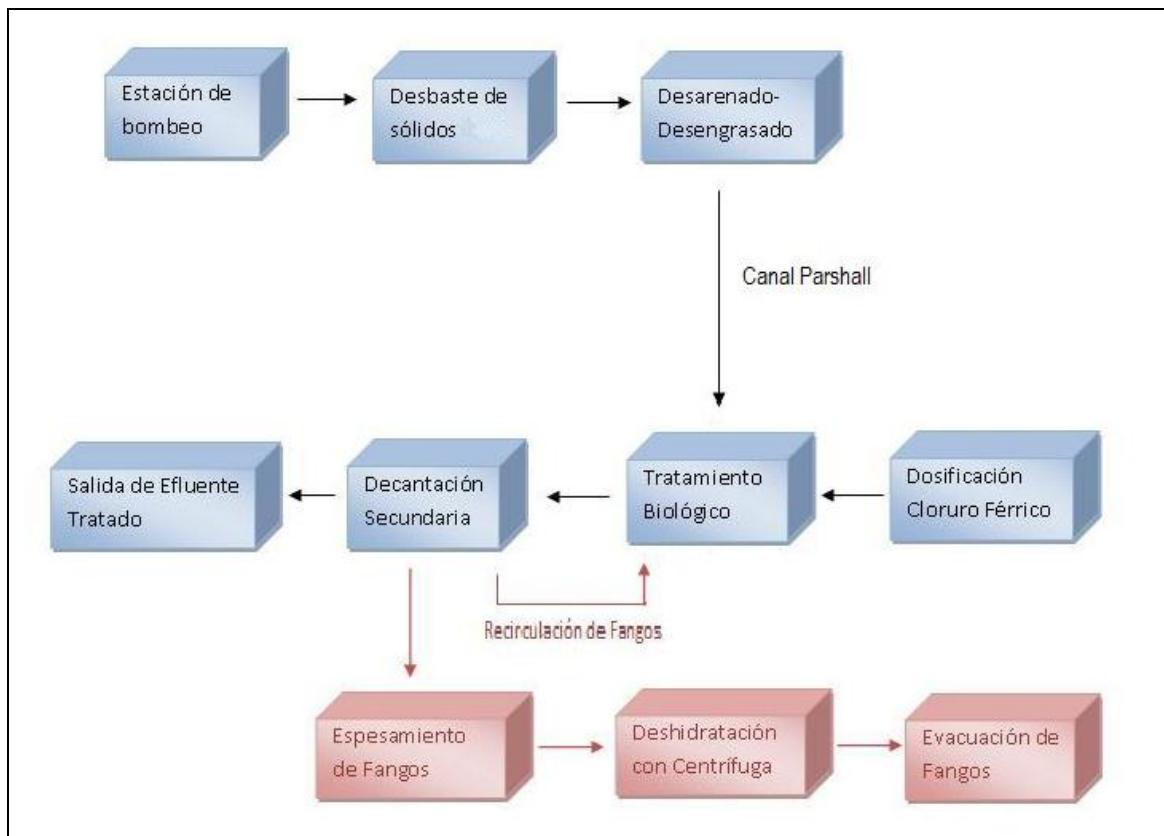


Figura 2.12: Diagrama de bloques EDAR de Tauste. Fuente: Elaboración propia.

1. Transporte del vertido hasta la EDAR. Las aguas que se sanearán en la depuradora provienen de la red de alcantarillado de Tauste, la cual recibe las aguas residuales de dicha población y de su polígono industrial. También llegan los vertidos de dos pequeños municipios llamados Sancho Abarca y Santa Engracia cuyo ayuntamiento pertenece al de Tauste. Todo el agua llega a la estación de bombeo, la cual se sitúa a mitad de camino entre el casco urbano de Tauste y la Estación Depuradora, ésta última ubicada a 1,14km del municipio (dato obtenido mediante medición de distancias en el visor SIGPAC).
2. Pretratamiento. Esta Estación Depuradora no posee ninguna balsa de recepción/homogenización de vertidos antes del pretratamiento, por lo que el vertido no se regula y su concentración en diversos parámetros y en caudal es distinta a cada hora del día. El proceso de pretratamiento comprende dos subprocesos: desbaste y desarenado-desengrasado.
 - Desbaste, consistente en la separación de los sólidos de volumen elevado para evitar posibles problemas en la línea de depuración de aguas que comienza posteriormente. El desbaste comienza con un pozo de gruesos (instalado en la caseta de bombeo) el cual incorpora unas rejas de muy gruesos de tipo estático, que retienen arenas y sólidos de alta densidad y tamaño. Posteriormente el agua es bombeada a la EDAR donde se encuentra primeramente con otra reja de retención de sólidos, y después con un sistema de tamices de

superficie fija con autolimpieza, que impiden el paso de todas aquellas sustancias de más de 3mm.



Imagen 2.13: Desbaste EDAR Tauste. Fuente: elaboración propia.

- Desarenado-Desengrasado, consistente en una separación de sólidos en suspensión de densidad elevada (compuestos inorgánicos) mediante decantación diferencial, impidiendo la sedimentación de la materia en suspensión de baja densidad (de naturaleza orgánica). Instalado a continuación del desbaste, está formado por un desarenador con aireadores que inyectan aire desencadenando un giro de la masa de agua que permite también un desengrasado en superficie, aunando dos procesos en la misma estructura. Tanto las arenas como las grasas son clasificadas y almacenadas hasta su recogida mediante un gestor autorizado. Las grasas son espesadas antes de almacenarse. Después de esta etapa, el agua pasa a un canal Parshall (estructura hidráulica que permite medir la cantidad de agua que pasa por la sección de un canal) el cual la dirige hacia el tratamiento secundario.



Imagen 2.14: Desarenado-Desengrasado EDAR Tauste.



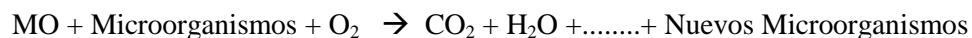
Imagen 2.15: Canal Parshall EDAR

Fuente: elaboración propia.

Fuente: elaboración propia

3. Tratamiento Secundario. Del tipo Fangos Activados en aireación prolongada (reactor biológico con proceso orbal). Este tratamiento consiste en la eliminación de la materia orgánica biodegradable presente en el agua residual mediante una biomasa o conjunto de microorganismos que la utilizan como sustrato o fuente de alimentación, descomponiéndola vía aerobia. El sistema está formado por dos reactores con proceso orbal (con canales en su interior), que trabajan en serie y manteniendo diferentes concentraciones de oxígeno disuelto.

La reacción bioquímica que tiene lugar es la siguiente:



El proceso de lodos activos se compone de tres unidades básicas:

- Reactor o Tanque biológico. El agua procedente del tratamiento primario es introducida de forma continua en los reactores biológicos donde se mantiene una concentración elevada de microorganismos en suspensión. Justo en la entrada de los reactores, se dosifica cloruro férrico a la corriente residual proveniente del desbaste, con el objetivo de lograr una coagulación-floculación del fósforo en el propio tanque.

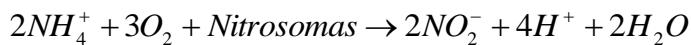
Los microorganismos capturan la materia orgánica biodegradable presente, alimentándose de ella y provocando su eliminación a través de reacciones bioquímicas de oxidación y síntesis. El agua que llega al reactor provoca una serie de movimientos de la corriente por toda la estructura, transcurriendo por los canales y desplazando parte del agua-biomasa ya oxidada al decantador instalado a continuación.

El oxígeno que precisan los organismos para llevar a cabo la tarea anterior es introducido mediante el empleo de difusores de aire situados en el fondo del reactor, al mismo tiempo que provocan la agitación suficiente para mantener la biomasa en suspensión y en mezcla íntima con el agua a tratar. En general, se opera con 0,1-2 ppm de oxígeno disuelto.



Imagen 2.16: Reactor Biológico EDAR Tauste. Fuente: elaboración propia.

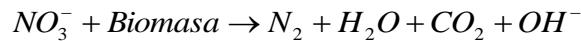
Este proceso de aireación en el tanque biológico permite que al mismo tiempo que se descompone y elimina la materia orgánica, se puedan llevar a cabo una serie de procesos de nitrificación-desnitrificación. Este proceso consiste en la oxidación del nitrógeno amoniacal y orgánico a nitratos a través de dos etapas. En la primera etapa tiene lugar la oxidación del nitrógeno orgánico y amoniacal a nitrito. Esta reacción es llevada a cabo por bacterias del género nitrosomas:



En la segunda fase y mediante bacterias del género nitrobacter, tiene lugar la oxidación del nitrito a nitrato.



El proceso de desnitrificación ocurre cuando la cantidad de oxígeno en el medio es mínima, y por tanto las necesidades de este elemento por la biomasa son solventadas por el oxígeno disponible en la molécula de nitrato, de forma que:



Para conseguir el juego de concentraciones máximas y mínimas de oxígeno disuelto en los reactores biológicos, la EDAR de Tauste posee un sistema informatizado que apaga o enciende las soplantes de oxígeno en función de la concentración de O_2 disuelto en el tanque, con intervalos de tiempo regulares.

- Decantadores secundarios. A los dos decantadores llega continuamente una mezcla de agua y biomasa desde los reactores. Los microorganismos que componen esta biomasa se aglomeran sobre pequeñas partículas en suspensión, generando unos flóculos de varios milímetros fácilmente decantables, que sedimentan en el fondo del equipo. Este fango es extraído y enviado de nuevo al reactor (con el fin de mantener la concentración adecuada de microorganismos en dicho reactor), o bien es purgado cuando se encuentra en exceso. Cuando sale de los decantadores, el agua va hacia la fuente de presentación, que es el punto de evacuación del efluente hacia el río. La EDAR de Tauste vierte su efluente en el río Arba (del cual se sitúa a unos 40 metros de distancia) utilizando un emisario subterráneo.



Imagen 2.17: Decantador secundario EDAR Tauste.

Fuente: elaboración propia.

- Recirculación del lodo activado. Para mantener la concentración en el reactor, gran parte de los lodos decantados en el decantador secundario son recirculados de nuevo al tanque biológico y así mantener la población necesaria. El resto de fangos se desechan en una purga, la cual es necesaria también para extraer cierto número de microorganismos del sistema y poder trabajar con una población fija de ellos, ya que en el reactor se forman continuamente microorganismos nuevos. Los lodos que son recirculados entran de nuevo al tanque biológico por donde el agua residual procedente del pretratamiento.

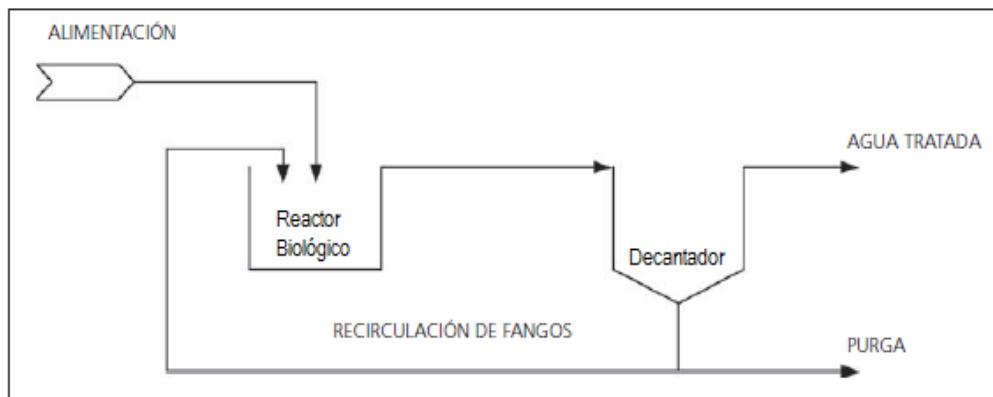


Figura 2.18: Procesos y operaciones unitarias en depuración de aguas residuales. Fuente: Fundación EOI, 2005.

La determinación del caudal de recirculación se realiza a partir del índice volumétrico de fangos (IVF), definido como el volumen en mililitros ocupado por un gramo de MLSS después de un tiempo de decantación de 30 minutos. Los MLSS son los Sólidos Suspensos en el Licor Mezcla, siendo este Licor el conjunto de agua residual y biomasa del reactor biológico.

4. Espesador. Se trata de un espesado de los fangos en un Espesador de gravedad (concentración y reducción del volumen de fangos procedentes de la purga mediante un cilindro metálico que rompe la velocidad de las aguas y las remueve mediante un canal periférico). La diferencia de densidad entre el agua y los fangos a espesar, hacen posible la separación de ambas fases. De forma cilíndrica y cubierto por la parte de arriba, el espesador tiene en su interior un fondo con pendiente de 45° que facilita la descarga del fango espesado. Posteriormente los fangos son estabilizados (mediante oxidación de la materia orgánica vía anaerobiosis) antes de llegar a la zona de deshidratación.



Imagen 2.19: Espesador de fangos EDAR Tauste.
Fuente: elaboración propia.

5. Deshidratación: realizada en centrífugas (rotura y secado de los fangos provenientes del espesador mediante la adición de calor, reduciendo por evaporación el contenido de agua). Las centrífugas son máquinas que separan las partículas de acuerdo con su densidad y tamaño, de tal forma que las partículas más pequeñas se perderían con el efluente, quedando retenidas las más pesadas. Sin embargo, gracias a la utilización de polielectrolito (polímero adicionado al lodo justo antes de su entrada al dispositivo de centrífuga), se

consigue la floculación del fango y en consecuencia una mayor retención de partículas, así como una mayor sequedad en el producto final o torta (entre el 20 y el 25% de sequedad).

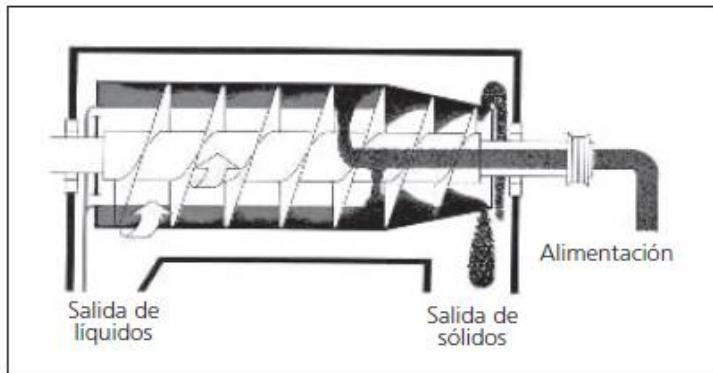


Figura 2.20: Esquema de una centrífuga. Fuente: Tecnologías para la sostenibilidad. Procesos y operaciones unitarias en depuración de aguas residuales, 2005.

Los lodos procedentes de la centrífuga son almacenados en un silo, y recogidos cada dos semanas para su aplicación como abono en terrenos agrícolas del propio municipio.

2.3 Cultivo objeto de estudio

Tal y como se ha nombrado en párrafos anteriores, el objetivo del presente proyecto es el modificar la calidad del efluente de la EDAR de Tauste, para que éste tenga las características adecuadas para el regadío de maíz. Seguidamente se presenta una breve historia sobre la biología de este cultivo y el estado actual de su producción.

El maíz (*Zea mays*) es uno de los cereales de mayor importancia a nivel mundial. Originario de América del sur y Centroamérica, sin que pueda precisarse el lugar en el que se inició su cultivo hace unos 5000 años, fue la base de alimentación en ese continente y hoy es, junto con el arroz y el trigo, uno de los principales alimentos cultivados por el hombre.

Procede de la mejora de una gramínea silvestre, realizada por las culturas precolombinas y aunque hoy existen muchas variedades, todas están emparentadas con la especie *Zea mexicana* (teosinte), que crece silvestre en Méjico. La mejora genética realizada por el hombre durante siglos hace que, en la actualidad, la morfología del maíz sea muy diferente de la de su antepasado.



Imagen 2.21: *Zea mays*. Fuente: www.panorama.com.ve

La producción mundial está en torno a los 760 millones de t/año. El mayor productor es Estados Unidos (aproximadamente el 43%), seguido por China (19%) y Brasil (cerca del 7%). La Unión Europea ocupa el cuarto lugar como productor, con poco menos de 50 millones de t/año (Guerrero García, 1999).

La producción de cereales en general, y en particular del maíz, se ha visto incrementada durante el siglo XX por dos hechos fundamentales: la mejora genética y la fertilización, especialmente la nitrogenada. Hoy se estima que la producción de maíz, en los países desarrollados, podría incrementarse al menos un 30% adoptando programas de abonado correctos.

2.3.1 Parcelario de la zona de estudio y sistema actual de riego

Para la realización de este estudio, se ha seleccionado una superficie sobre la cual se realizaría el regadío con el agua residual regenerada. Esta zona se encuentra en el término municipal de Tauste, y está constituida por terrenos anexos o próximos a la Estación Depuradora.

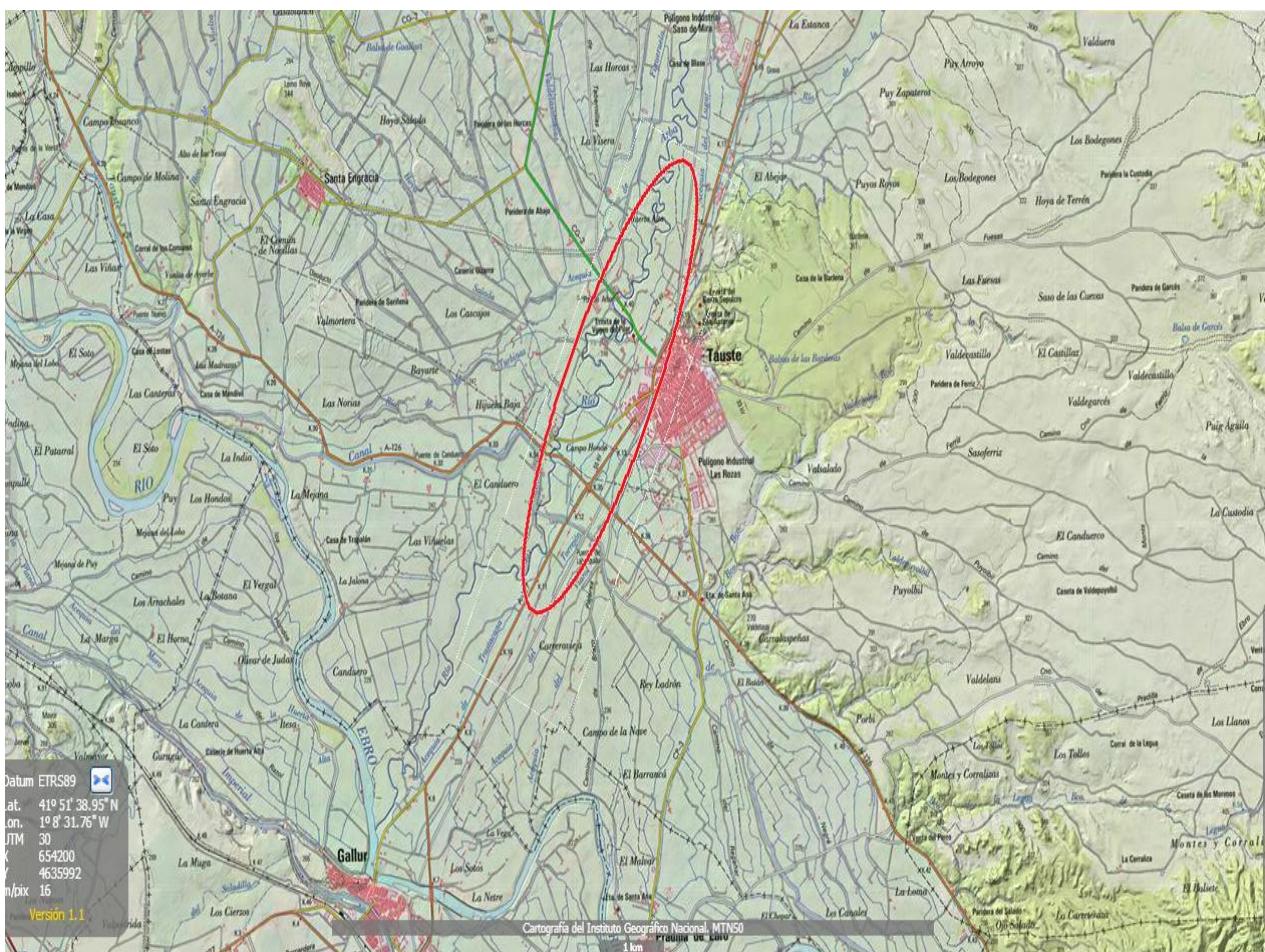


Imagen 2.22: Municipio de Tauste y zonas agrícolas más cercanas al casco urbano, Escala 1:71428 Fuente: Visor IBERPRIX

Como se puede ver en el mapa anterior, Tauste se divide en varias zonas agrícolas ubicadas alrededor del casco urbano, y todas ellas con su sistema independiente de riego. De entre todas las zonas presentes, se ha elegido “Campo Hondo-Miraflores”, por ser aquella donde está ubicada la Estación Depuradora de Tauste (facilidad a la hora de manejar el traslado del agua de la EDAR hasta las parcelas a regar). La imagen 2.22 se puede ver con mayor detalle en el Anexo IV.

Campo Hondo-Miraflores se sitúa en el Aluvial del Bajo Arba, las parcelas son de tipo regadío y se riegan actualmente con las aguas de la “Aequia del lugar”. El riego de toda la zona cercana al Arba se basa en dos acequias, una por la margen izquierda del río (Aequia del lugar) y la otra por la derecha (Aequia de tras l’Arba).

Ambas acequias nacen del río Arba, en un punto varios kilómetros aguas arriba llamado Escorón. Allí se sitúa un pequeño salto del río, mediante el cual se aprovecha para dar paso al nacimiento de ambas acequias, una por cada margen del río.

Actualmente la comunidad de regantes perteneciente a toda la zona regada por las dos acequias anteriores, se llama “Sindicato de regantes de la Huerta Alta de Tauste”.

El método seguido para la selección de la superficie de estudio se detalla a continuación. Se ha tenido en cuenta un radio de 1000 metros alrededor de la depuradora, con el objetivo de trabajar en esa superficie por su cercanía a la instalación.

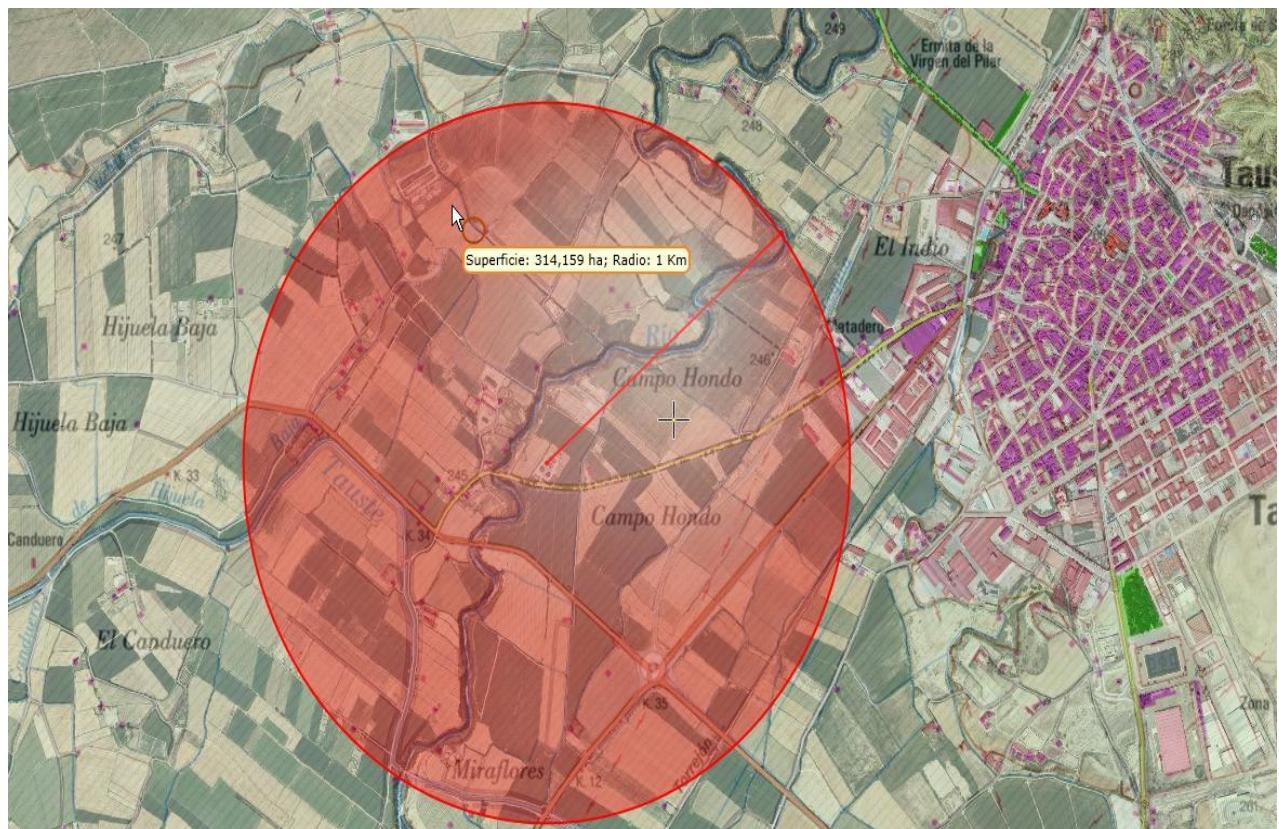


Imagen 2.23: Radio de 1000m alrededor de la EDAR de Tauste, Escala 1:16666

Fuente: Visor SIGPAC.

Una vez seleccionado ese radio, se ha optado por elegir para el futuro regadío parcelas situadas en la margen izquierda del río Arba (margen en la que se encuentra instalada la Estación Depuradora), aprovechando la barrera natural que supone dicho río. Igualmente se ha tomado como referencia, por el lado contrario, el casco urbano de Tauste como barrera artificial.

Gracias a ambas barreras, queda delimitada una zona entre el río Arba y el municipio, en la cual se va a desarrollar el área de estudio.

Dentro de esta zona, se ha seleccionado un polígono en el cual se toma como área de estudio. Las parcelas seleccionadas han sido todas aquellas que fueron sembradas con maíz el año anterior (2011), dentro de este polígono. En las siguientes imágenes se puede ver el polígono remarcado en color rojo (Imagen 2.24), y las parcelas con cultivo de maíz del área de estudio, marcadas con una X de color rojo (Imagen 2.25).

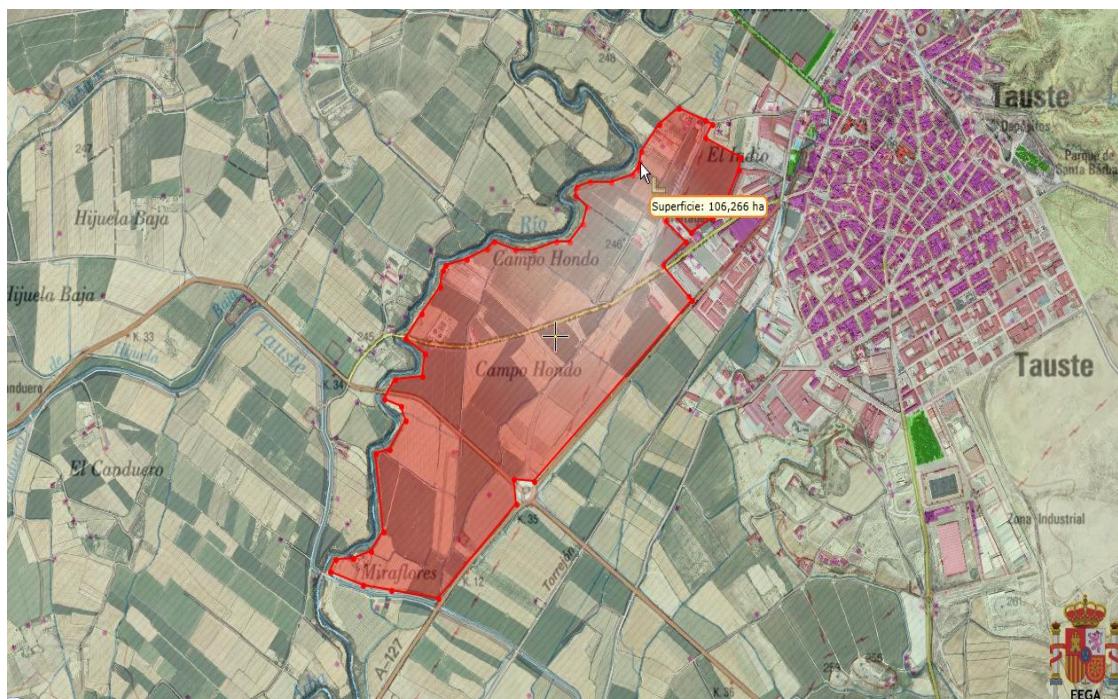


Imagen 2.24: Mapa de la superficie de estudio, Escala 1:22333. Fuente: Visor SIGPAC.



Imagen 2.25: Mapa de las parcelas de la zona de estudio, Escala 1:8333. Fuente: Visor SIGPAC.

Actualmente, y según datos ofrecidos por la Oficina Comarcal Agraria de Tauste, cada año se siembran con maíz una media aproximada del 30% del total de las parcelas de Campo Hondo-Miraflores.

Catalogación de la zona

Según la Orden de julio de 2004, del Departamento de Agricultura y Alimentación, se designan como nuevas Zonas Vulnerables a la contaminación de las aguas por nitratos procedentes de fuentes agrarias en la Comunidad Autónoma de Aragón, aprobándose el programa de actuación sobre las mismas: Zona Vulnerable del acuífero del Ebro III y Aluviales del Bajo Arba, Bajo Gállego y Bajo Jalón; Zona Vulnerable de Singra-Alto Jiloca; Zona Vulnerable de los sectores oeste y centro del acuífero de Apiés; y Zona Vulnerable del acuífero de Muel-Belchite. (BOA de 4 agosto, 2004).

- Las parcelas del término municipal de Tauste que según el catastro estén declaradas como tipo I (regadío) y se rieguen con aguas del canal de Tauste.

Igualmente, y gracias a la Resolución de 30 de junio de 2011, de la Secretaría de Estado de Medio Rural y Agua, por la que se declaran las zonas sensibles en las cuencas intercomunitarias, se declara a la zona del Río Arba de Luesia (Desde el río Arba de Riguel hasta desembocadura en el Río Ebro) como Zona sensible, englobando con esta decisión todo el término municipal de Tauste en esta catalogación.

Con respecto a las normativas aquí citadas, la superficie de estudio seleccionada para este proyecto, y englobada dentro de la zona de Campo Hondo-Miraflores, queda catalogada como Zona Vulnerable a la contaminación por nitratos, por encontrarse dentro de los límites de las zonas de regadío de Tauste y de los Aluviales del Bajo Arba. A esta catalogación se le suma la de Zona Sensible de todo el municipio.

Debido al peligro por la posible contaminación, es obligatorio dentro de las Zonas Vulnerables y Zonas Sensibles el respetar una serie de límites de ciertos parámetros en los vertidos de aguas de EDAR a los cauces principales. El primero de estos límites es en la concentración de nitrógeno total en el efluente de salida. Por estar situada en una zona catalogada como Zona Vulnerable, la planta de Tauste está obligada a cumplir un límite de 15 mg/L de Nitrógeno total en su vertido al río.

El segundo de estos límites está relacionado con la catalogación de Zona Sensible. Debido a que la EDAR de Tauste se encuentra también en una zona sensible, la concentración de fósforo debe estar por debajo del límite para este tipo de zonas, que es de 2 mg/L.

Los límites de estos parámetros aparecen en la Directiva 91/271/CEE, sobre el tratamiento de aguas residuales urbanas, y se reflejan en la siguiente tabla:

Tabla 2.26: Requisitos para los vertidos procedentes de Estaciones de Depuración de Aguas Residuales urbanas.
Fuente: Directiva 91/271/CEE.

Parámetros	Concentración		Porcentaje mínimo de reducción
	10.000 a 100.000 h-e	> 100.000 h-e	
Fósforo total	2 mg/L P	1 mg/L P	80%
Nitrógeno total (mg/L N)	15 mg/L N	10 mg/L N	70-80%

2.3.2 Necesidades hídricas y nutricionales del maíz

A continuación se presentan los intervalos (en kg) de los principales nutrientes que consume el maíz por tonelada de grano producido, así como de los principales oligoelementos presentes en el suelo y que condicionan su crecimiento.

Tabla 2.27: Extracción y exportación real de nutrientes principales por la parte aérea del maíz. Fuente: Canadian Fertilizer Institute (1998)

Nutrientes	kg/t de grano	
	Exportación (grano)	Extracción total
Nitrógeno (N)	15,5-19,1	24,7-30,0
Fósforo (P₂O₅)	7,0-12,3	10,2-12,3
Potasio (K₂O)	4,5-5,4	20,7-25,2

Tabla 2.28: Extracción de microelementos para una cosecha de 18,7 toneladas de grano de maíz. Fuente: Benne et al (1964).

Nutrientes	g/ha	
	Exportación (grano)	Extracción total (planta entera)
Hierro (Fe)	143	6240
Manganoso (Mn)	37	483
Zinc (Zn)	187	440
Cobre (Cu)	37	199
Boro (B)	36	126
Molibdeno (Mo)	5,5	11,1

Además de nitrógeno, fósforo y potasio, los cultivos necesitan también sales, que se encuentran disponibles en el agua de riego en cierta cantidad, y muchas de las cuales son nutrientes. En España, donde el maíz se cultiva mayoritariamente en regadío, el volumen de agua añadido es muy importante, de modo que cualquier sal que ésta contenga, será aportada también en cantidades considerables.

Seguidamente se presenta un diagrama donde se puede apreciar el volumen necesario (en milímetros por día) de agua necesaria por el maíz.

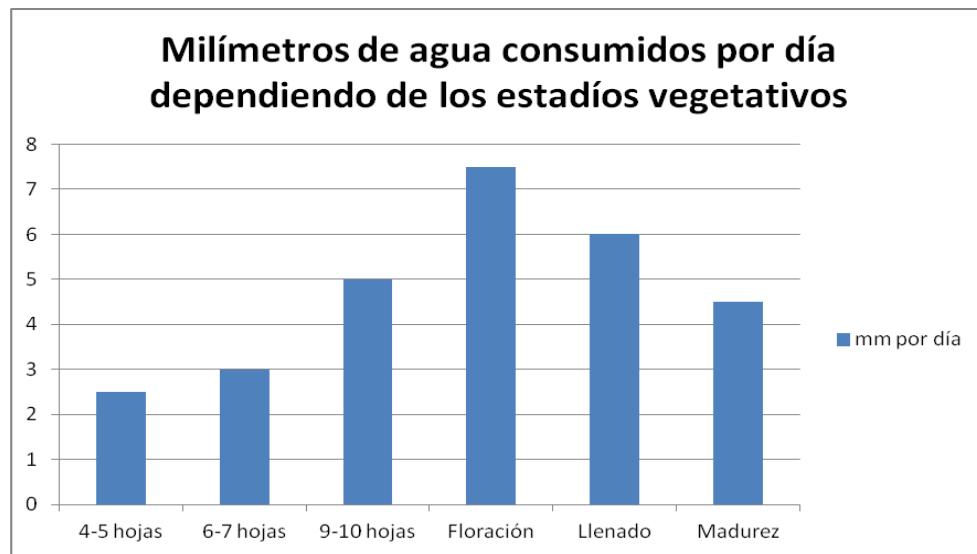


Figura 2.29: Consumo de agua del maíz, en milímetros por día. Fuente: elaboración propia.

El maíz tiene un requerimiento variable de agua en sus distintas etapas de crecimiento y desarrollo, como se ve en el gráfico anterior, que muestra el consumo promedio de agua a lo largo del ciclo de un maíz de ciclo completo.

Además de los datos de necesidades hídricas expuestos anteriormente, se han recabado datos más específicos de riego para el maíz en la zona de estudio, llevando a cabo una citación con un socio de la comunidad de regantes de Campo Hondo-Miraflores, con parcelas dentro del área de estudio.

Según datos de José Manuel Laborda, socio regante de la Comunidad de Regantes de La Huerta-Alta de Tauste, las necesidades hídricas de una hectárea sembrada con maíz en esta zona son de unos 8.000 a 10.000 m³ por temporada. En este municipio, el periodo de siembra comienza en la segunda quincena del mes de abril, siendo el periodo de cosecha en noviembre y diciembre. Este dato se da para un tipo de riego “de superficie” o “a manta”, que consiste en el anegamiento por completo de la parcela. Este tipo de riego es el utilizado por la inmensa mayoría de los usuarios regantes de las parcelas de maíz en la zona (información obtenida del socio José Manuel Laborda).

Con los métodos de riego por inundación de superficie, la profundidad a la que penetra el agua en el suelo varía en distintos lugares del campo y depende de la tasa y el tiempo de infiltración. Estas diferencias se deberán a la pendiente del terreno, grado de compactación, cambio de textura y química del suelo.

Caudal disponible

Los cálculos para obtener el dato de qué cantidad de metros cúbicos se poseen para el regadío de las parcelas de maíz, se llevará a cabo mediante el siguiente método.

Gracias a la información cedida por el Instituto Aragonés del Agua, se poseen datos medios diarios del caudal de salida (efluente tratado) de la EDAR de Tauste. Se tomará este dato diario multiplicándolo por el número de días de cada mes, y haciendo el sumatorio de todos los meses. Con esta serie de ecuaciones se obtendrá el número total de metros cúbicos de efluente tratado al año, de los cuales se seleccionarán únicamente los caudales de los meses correspondientes a las campañas de riego del maíz (de abril a diciembre).

Una vez obtenido el dato del total de caudal disponible para los meses en los que el cultivo del maíz está activo, se llevará a cabo el cálculo de los metros cúbicos necesarios para el regadío de las parcelas seleccionadas.

Para ello, se tendrá en cuenta el número total de parcelas de maíz seleccionadas y las necesidades hídricas correspondientes a dichas parcelas.

Una vez averiguadas estas dos cifras, se obtendrá el tanto por ciento del efluente que se necesitará para la irrigación del terreno escogido.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Toma de muestras

Para la toma de muestras del efluente de la EDAR de Tauste no se siguió un patrón específico de fechas. Se realizaron un total de siete tomas de muestras, todas ellas repartidas entre finales del mes de septiembre de 2012, y finales de febrero de 2013, y en cada una ellas se siguió el procedimiento estandarizado de toma de muestras para aguas residuales, el cual se especifica a continuación en este mismo capítulo.

Método Estandarizado para toma de muestras de aguas residuales

Todas las muestras tomadas para análisis se obtuvieron siguiendo el mismo procedimiento. La muestra para analizar fue en todos los casos una muestra simple, considerando como tal la obtenida en el punto de muestreo, y sin que se puedan obtener muestras compuestas ni integradas.

Para la toma de muestras se utilizaron envases de plástico, limpios y esterilizados (30 minutos en autoclave a 120°C). El volumen mínimo para la recogida de muestras fue de 2 litros (volumen mínimo recomendado en las captaciones de aguas residuales para análisis), siendo el máximo de 22 litros (acumulado en receptáculos de 2 y 5 litros). Los recipientes fueron llenados hasta el máximo sin dejar cámara de aire.

Los envases fueron marcados con rotulador permanente, y cada uno de ellos se acompañó con un informe con los siguientes datos: nombre, dirección, origen de la muestra (fuente de presentación), fecha y hora del muestreo.

Cada muestra tomada es una muestra representativa y homogeneizada del efluente del día anterior, es decir, en la EDAR de Tauste está instalado un sistema “toma-muestras” conectado a la fuente de salida del efluente hacia el río. Este aparato se programa 24 horas antes de tomar las muestras, y automáticamente va captando la misma cantidad de efluente a cada hora, dando lugar a una muestra final compuesta de 24 submuestas correspondientes a las 24 horas anteriores. Este dispositivo facilita el proceso y mejora los datos estadísticos ya que se obtienen muestras representativas de todas las horas del día.

Las muestras obtenidas se mantuvieron refrigeradas en nevera (entre 2 y 8°C) y en oscuridad, llegando en todos casos al laboratorio en menos de 24 horas desde su recogida.

Para llevar a cabo las mediciones mediante el método de Nitrógeno Kjeldhal, la muestra debe ser fresca (menos de 48h tras su recogida). Para todos los análisis con este procedimiento, se almacenaron las muestras en un recipiente cerrado a 4°C de temperatura hasta su medición. Igualmente, y para evitar la degradación del nitrógeno, se acidificaron las muestras en todos los casos. Para llevar a cabo esta acidificación, se añadió ácido sulfúrico concentrado (96%) hasta que el pH alcanzó un valor de 1,5-2. (4-130 Nitrogen Organic, Eaton et al, 2005).

3.1.1 Datos estadísticos del efluente de la EDAR de Tauste en 2011

Para una mejor documentación sobre los rangos en los que se mueven los parámetros que se analizan in situ en la EDAR de Tauste (por parte de la encargada de la planta), se llevó a cabo la recogida de datos de todos los parámetros relativos al ejercicio de 2011. Esta acción fue posible gracias a la implicación directa con la empresa, ya que las prácticas externas obligatorias en los estudios de Ciencias Ambientales fueron realizadas en la Estación Depuradora de Aguas Residuales de Tauste, en el verano de 2012.

Con el objetivo de conseguir mayor cantidad de información sobre la evolución histórica del efluente , se citó con el personal del Instituto Aragonés del Agua, sito en Zaragoza, gracias al cual se pudieron obtener una serie de datos medios mensuales de todos aquellos parámetros que la instalación está obligada a estudiar con el fin de cumplir con la normativa vigente.

3.2 Metodología analítica

3.2.1 Caracterización de las muestras

Se llevaron a cabo un total de tres caracterizaciones completas (análisis de todos los parámetros seleccionados) del efluente de la EDAR de Tauste.

1^a Caracterización: muestra tomada el 15 de Octubre de 2012

2^a Caracterización: muestra tomada el 2 de Diciembre de 2012

3^a Caracterización: muestra tomada el 19 de Febrero del 2013

Para obtener datos medios de las características del efluente, se realizaron medias aritméticas entre los resultados obtenidos de cada parámetro en las tres caracterizaciones. Se consiguió así un dato medio del valor de cada parámetro, valor con el cual se ha trabajado posteriormente.

Ya que las tres caracterizaciones se realizaron sobre muestras obtenidas en diferentes épocas del año, al realizar una media aritmética para cada parámetro, se obtiene también un valor medio del parámetro que representa los cambios estacionales del efluente, y que aparecerá acompañado de la desviación típica en las tablas de resultados.

Se debe tener en cuenta que las muestras de efluente de la segunda y tercera caracterización, se obtuvieron en meses que no entran dentro del periodo de siembra-recogida del maíz. De todas formas, los resultados obtenidos se pueden extraer fácilmente a las características del efluente en la campaña de riego del maíz.

Esto se puede demostrar ya que en la tabla 4.4 (“Caracterización mensual de los parámetros analizados in situ en la EDAR de Tauste en el año 2011”), dentro del apartado 4.2.1 de este proyecto, se puede ver cómo el valor medio mensual de cada parámetro no varían notablemente de mes a mes (exceptuando algunos parámetros en determinados meses, como por ejemplo el aumento de concentración de nitrógeno total y nitratos en el mes de agosto). Esta hipótesis también se apoya en los datos obtenidos gracias a la encargada de la planta depuradora, que asegura que el vertido tiene cierta homogeneidad durante todo el año.

En general, se puede afirmar que las características del efluente son similares dentro y fuera de la época de riego del maíz.

A continuación, se detallan todos los parámetros que se analizaron tanto en las caracterizaciones completas del efluente, como en las valoraciones de algunos parámetros tras aplicarse los procesos de regeneración.

El total de parámetros analizados han sido 30, y cada uno de ellos se expone a continuación, junto con su metodología analítica y los equipos necesarios utilizados para sus mediciones.

3.2.1.1 Parámetros físico-químicos

- pH

El pH de las muestras ha sido medido mediante un pH-metro CRISON GLP21, con un rango 1-14 y error $\leq 0,02$. Para llevar a cabo esta medida se ha utilizado el método normalizado 4500-HB (Eaton et al, 2005). Antes de cada lectura de pH, se ha procedido a la calibración del equipo utilizando disoluciones de pH conocido (7,00 y 4,01).

- *Conductividad Eléctrica (CE)*

La conductividad eléctrica de las muestras ha sido determinada con la ayuda de un conductímetro CRISON Basic 30 (con rango de detección de 0.01-19999 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y error $\leq 0.02 \mu\text{S}/\text{cm}$), según la Norma UNE-EN 7888: 1985 (NORMA UNE-EN 7888:1985). Antes de cada lectura de conductividad, se ha procedido a la calibración del equipo utilizando una disolución tampón de 1413 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

- *Demanda de cloro*

La demanda de cloro (DC) es la cantidad mínima de cloro que es necesario añadir a una muestra para lograr su oxidación y desinfección. Para su cálculo se ha utilizado el método estándar 2350-B (Eaton et al, 2005).

El método consiste en adicionar un exceso de cloro (D_0) a la muestra acuosa y determinar el cloro residual (R) que ésta contiene tras un tiempo mínimo. Este procedimiento se detalla más adelante en el apartado 3.3 de este mismo capítulo.

- *Turbidez*

La turbidez de las muestras se ha medido mediante un turbidímetro HANNAH LP 2000, con error de $\leq 0.2 \text{ NTU}$, y según la Norma ISO 7027-1999 (NORMA ISO 7027-1999).

- *Sólidos en Suspensión (SS)*

Los sólidos en suspensión han sido determinados mediante un espectrofotómetro multiparamétrico HACH LANGE DR 2800, según el método estándar 2540 D (Eaton et al, 2005).

- *Fósforo total*

La concentración de fósforo en todos los análisis se ha efectuado mediante un fotómetro multiparamétrico HANNAH 83099, y siguiendo el método estándar 4500-PC (Eaton et al, 2005), en un rango de 0-15 mg/L y error de $\pm 0,3 \text{ g/L}$.

- *Demanda Biológica de Oxígeno (DBO₅)*

El cálculo de la DBO₅ se ha llevado a cabo mediante la incubación de las muestras durante cinco días en un equipo VELP SCIENTIFICA FTC 90 Incubator, y siguiendo el método estandarizado 5210-B (Eaton et al, 2005) y la Norma UNE EN ISO 5815-1989 (NORMA ISO 5815-1989).

Todas las muestras fueron homogeneizadas (sin filtrar ni decantar) antes de su medida. Durante el periodo de cinco días las muestras se encuentran en el equipo antes mencionado a 20°C ± 1°C, en completa oscuridad.

- *Demanda Química de Oxígeno (DQO)*

El análisis de la DQO se realizara mediante la técnica de reducción del dicromato por reflujo cerrado, siguiendo el método 410.4 de la US EPA (US EPA, 1999).

La muestra debe ser homogeneizada, sin filtrar ni decantar, y posteriormente debe llevarse a ebullición (149°C), con reflujo cerrado en presencia de una cantidad conocida de dicromato de potasio y de un catalizador de plata en medio fuertemente ácido durante un período de 2 horas. Una parte de este dicromato es reducido por la materia orgánica oxidable presente.

La parte de dicromato no reducido se determina mediante espectrofotómetro UV/VIS a 600nm. El equipo utilizado ha sido un fotómetro multiparamétrico HANNAH 83099.

- *Nitrógeno Total*

El método utilizado ha sido Kjeldahl, siguiendo la Norma UNE-EN 5663/840 (NORMA UNE-EN 5663/840).

Este procedimiento permite conocer el contenido en nitrógeno orgánico y amoniacoal de una muestra de agua, no incluyéndose la concentración de nitritos y nitratos. El contenido en nitrógeno de la muestra se calcula utilizando una variante del método Kjeldhal, basado en la digestión de la muestra con ácido sulfúrico concentrado y un catalizador de sulfato de cobre y selenio. Durante la digestión, el nitrógeno orgánico se transforma en iones amonio. Posteriormente, en medio fuertemente básico se destila el amoniaco, el cual es recogido por el medio de una disolución de ácido bórico. La valoración posterior del ácido bórico con ácido clorhídrico permite conocer la cantidad de nitrógeno presente en la muestra inicial.

La cantidad de nitrógeno total (en mg/L) vendrá dada por la siguiente ecuación:

$$mg / L \text{ Nitrógeno total} = \frac{|V_{HCl} - V_{HCl(\text{blanco})}|}{mL} * 280$$

Donde V_{HCl} es el volumen de ácido clorhídrico gastado en la valoración y $V_{HCl \text{ Blanco}}$ es el volumen de ácido clorhídrico gastado en el blanco (o muestra de agua destilada).

- *Nitratos (NO_3^-)*

Los nitratos de la muestra se analizan mediante el método estandarizado 4110-B (Eaton et al, 2005) utilizando para ello un fotómetro multiparamétrico HANNAH 83099.

- *Salinidad*

Este parámetro se analiza a través de la Conductividad Eléctrica, ya que ambas están relacionadas con la cantidad de sales disueltas en el agua. Para hallar la cantidad de sales (en g/Litro) que se encuentran en la muestra, se tiene en cuenta la siguiente expresión (Dorronso, 2001):

Salinidad (mg/L de sales)= 0,64 x Conductividad eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$).

Donde: CE es la conductividad eléctrica en $\mu\text{S}/\text{cm}$

- *Relación de Absorción de Sodio (SAR)*

Representa la posible influencia del ión sodio, presente en el agua de riego, sobre el suelo: una elevada proporción relativa de sodio respecto a los iones calcio y magnesio en el agua de riego puede inducir cambios de estos iones por los de sodio en el suelo, provocando la degradación del mismo con la consiguiente pérdida de estructura y permeabilidad.

El SAR se mide, según lo establecido en el RD 1620/2007, mediante la siguiente fórmula:

$$SAR(meq/L) = \frac{[Na]}{\sqrt{\frac{[Ca] + [Mg^{2+}]}{2}}}$$

Para obtener el valor del SAR, es por tanto necesario el conocer la concentración de los tres iones que aparecen en la fórmula: Sodio, Calcio y Magnesio. Los análisis de estos tres elementos no se pudieron llevar a cabo en el laboratorio en el que se desarrolló el presente proyecto por falta del equipo necesario. Por ello, se enviaron muestras a un laboratorio externo llamado Servicio de Apoyo a la Investigación (SAI) de la Universidad de Zaragoza para su determinación.

Este servicio analizó dichos parámetros mediante el método de Espectroscopía de Emisión Atómica en Plasma ICP. Esta técnica se basa en la generación de un plasma acoplado por inducción que es capaz de analizar una gran cantidad de muestras en un período corto con muy buenos límites de detección para la mayoría de elementos. Método estandarizado 3120-B (Eaton et al, 2005).

Se puede generar un plasma acoplado por inducción al dirigir la energía de un generador de frecuencia de radio hacia un gas apropiado, comúnmente argón ICP. Es importante que el gas de plasma sea puro ya que los contaminantes en el gas pueden apagar la antorcha.

El acoplamiento se produce generando un campo magnético pasando una corriente eléctrica de alta frecuencia a través de una espiral de inducción enfriada. Este inductor genera rápidamente un campo magnético oscilante orientado al plano vertical de la espiral. La ionización del argón fluente se inicia con una chispa de la espiral Tesla.

Los iones resultantes y sus electrones asociados interactúan con el campo magnético fluctuante. Esto genera energía suficiente para ionizar átomos de argón por excitación de choque. Los electrones generados en el campo magnético son acelerados perpendicularmente hacia la antorcha. A altas velocidades, los cationes y electrones conocidos como corriente turbulenta (Eddy), colisionarán con los átomos de argón para producir mayor ionización lo que produce un gran aumento de temperatura. En 2 ms, se crea un estado estable con alta densidad de electrones. Se produce plasma en la parte superior de la antorcha. La temperatura en el plasma varía entre 6000-10000 K. Una larga y bien definida cola emerge desde la parte superior de la antorcha. Esta antorcha es la fuente espectroscópica. La misma contiene todos los átomos del analito y los iones que fueron excitados por el calor del plasma.

- Ozono residual

El ozono residual se ha medido únicamente en aquellas muestras previamente tratadas con ozono. Para ello se ha utilizado en todos los casos un test de ozono MERCK, consistente en un kit con un recipiente para contener la muestra, dos reactivos y una tabla colorimétrica de referencia. Este test tiene un rango de medición de 0,01-1 mg/L de ozono, y se basa en la comparación del color de la muestra (mezclada con los reactivos que contiene el kit) y la paleta de colores rosáceos que incorpora.

- Cloro residual

Los análisis de cloro residual se han llevado a cabo tanto en las caracterizaciones como después de la aplicación de los tratamientos de regeneración. Este análisis se ha llevado a cabo mediante el método estandarizado 4500-Cl Residual (Eaton et al, 2005), y el equipo utilizado ha sido un fotómetro multiparamétrico HANNAH 83099.

3.2.1.2 Parámetros biológicos

- *Escherichia Coli* y *Coliformes totales*

Para detectar y enumerar la presencia de Unidades Formadoras de Colonias de *Escherichia coli* y coliformes en el efluente, se ha seguido el procedimiento detallado en la Norma UNE EN 9308-1:2000 (NORMA UNE-EN 9308-1).

Este método se basa en el cultivo de estas colonias durante 24h a 42°C (*Escherichia coli*) o 37°C (coliformes totales) en una estufa. La siembra se realiza en Agar McConkey (marca SCHARLAB).

Para una mayor fiabilidad en la prueba, se sembraron varias placas petri con diferentes volúmenes de cada muestra del efluente (tratado y sin tratar), para tener concentraciones de microorganismos comparables y mayor número de datos con los que trabajar. Para ello se sembraron los siguientes volúmenes: 100 µL, 10 µL, 1 mL, 10 mL y 100 mL.

Los volúmenes de 1, 10 y 100 ml fueron filtrados previamente en un filtro de 0,45 micras, y se depositó directamente el filtro en una placa petri para el cultivo. En estos casos, se utilizaron placas petri de menor tamaño adaptadas a cultivos con filtro.

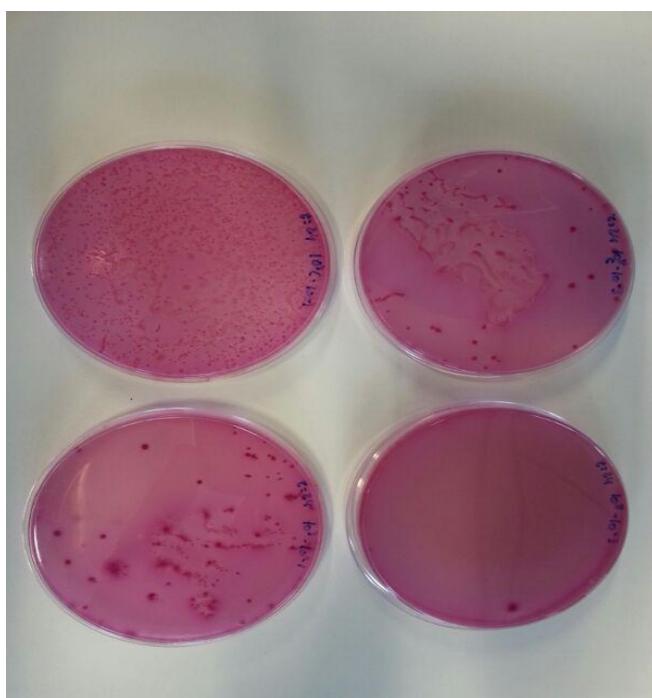


Imagen 3.1: Cultivos de *Escherichia coli* y coliformes totales.
Fuente: elaboración propia.

- *Huevos de Nematodos Intestinales*

El RD 1620/2007 propone, como método de referencia, el método de Bailenger modificado (Ayres, 1996) y permite emplear un método alternativo siempre que esté validado y permita obtener resultados comparables al de referencia. El método Bailenger modificado también es el método propuesto en las recomendaciones de la OMS.

En este caso en particular, se han llevado a cabo los análisis de huevos de nematodos mediante lo establecido en el RD 1620/2007, el método Bailenger modificado, el cual es muy eficiente para aguas tratadas no potables. El volumen mínimo de muestra ha sido de 10L para lograr una recuperación eficiente de huevos, aunque el número final de éstos sea muy bajo.

El método Bailenger (Ayres et al, 1996) consiste en la toma de 10 litros de muestra de agua residual (en este caso el efluente de salida de la EDAR) que se dejan sedimentar durante 24h extrayendo después el sobrenadante. Esta operación se realiza dos veces. Se obtiene así un volumen final de 100-200 ml, que se transfiere a tubos cónicos y se introduce en la centrífuga durante 15min a 1000g. Posteriormente se elimina el sobrenadante obtenido por el movimiento centrífugo, y se resuspende el pellet con un volumen igual de tampón acetoacético. Se considera como pellet el volumen total que queda en el tubo tras eliminar el sobrenadante, siendo conveniente dejar un poco de líquido sobre el pellet sólido del fondo del tubo.

Seguidamente se añade a los tubos dos volúmenes de éter dietílico y se mezcla en vórtex. La mezcla se centrifuga de nuevo durante 15 min a 1000g. Se anota el volumen de sedimento obtenido y se desecha el sobrenadante. Finalmente se centrifuga de nuevo durante 5 min, se extrae el sobrenadante y se resuspende el sedimento en cinco volúmenes de sulfato de zinc al 33%. Se mezcla en vórtex y por último se retiran alícuotas para ser miradas al microscopio. Las alícuotas se dejan reposar durante 5 min en una cámara McMaster para favorecer la flotación de los huevos antes de su examen.



Imagen 3.2: Foto de huevo de nematodo, microscopio 20x. Fuente: elaboración propia.

Según este método, el número de huevos se hallará mediante la siguiente ecuación:

$$N=AX/PV$$

Donde:

N=numero de huevos por 10L de muestra

A= numero de huevos contados en la cámara McMaster en dos o tres alícuotas

X= volumen final del producto (ml)

P= volumen examinado en la cámara McMaster (100μ por cada alícuota)

V= volumen original de la muestra (en litros)

3.2.1.3 Metales pesados

- Hierro

El análisis del hierro se ha llevado a cabo mediante un fotómetro multiparamétrico HANNAH 83099, y siguiendo el método estándar 3500-Fe B (Eaton et al, 2005).

- Manganese

El análisis del manganeso se ha llevado a cabo mediante un fotómetro multiparamétrico HANNAH 83099, y siguiendo el método estandarizado 3500-Mn B (Eaton et al, 2005).

- Cobre, Níquel, Zinc, Aluminio, Boro, Mercurio, Cadmio, Cromo, Plomo

Los análisis de estos metales pesados no se pudieron llevar a cabo en el laboratorio en el que se desarrolló el presente proyecto por falta del equipo necesario. Por ello, se enviaron muestras al laboratorio SAI de la Universidad de Zaragoza para la determinación de estos parámetros.

Este servicio analizó dichos parámetros mediante el método de Espectroscopía de Emisión Atómica en Plasma ICP, explicado anteriormente en el apartado 3.2.1.1 (SAR).

3.3 Procedimiento experimental

Este proyecto fin de carrera se ha basado en el estudio de los posibles tratamientos de regeneración del efluente de la estación depuradora del municipio de Tauste, teniendo en cuenta su uso final, que en este caso es el riego de parcelas agrícolas con cultivo de maíz.

Para lograr este propósito, se han efectuado varios análisis completos (o caracterizaciones) del efluente de la planta del municipio, y los valores obtenidos se han comparado con los valores de ciertos parámetros que precisa el maíz en el agua de riego (estos últimos encontrados tanto en legislación como en recomendaciones de autores). Una vez comparadas las características que posee el efluente y las que se requieren para el riego del maíz, se ha llevado a cabo un estudio en el que se ha buscado el tratamiento más adecuado para alcanzar esta calidad.

El resultado ha sido la elección de dos posibles técnicas de regeneración: la cloración y la ozonización, y ambas han sido aplicadas al efluente a escala de laboratorio.

Los tratamientos de regeneración seleccionados se aplicaron en las mismas muestras que se caracterizaron, pudiendo obtener así datos realmente comparables de la efectividad de los métodos empleados.

Igualmente, se realizaron dos repeticiones de cada uno de los tratamientos de regeneración seleccionados para obtener datos con un menor rango de error, realizando posteriormente medias entre ambos resultados (desviación típica).

Seguidamente se explica el procedimiento experimental llevado a cabo para aplicar las dos técnicas de regeneración al efluente de la EDAR.

Aplicación de Ozono

El equipo utilizado para la generación del ozono es un ozonizador FISCHER modelo 500. Este ozonizador contiene dos electrodos concéntricos, entre los que se establece un alto voltaje mientras fluye una corriente de oxígeno puro. En la descarga que se produce, se genera oxígeno atómico que se combina con el oxígeno molecular que circula entre los electrodos, formándose así la molécula de ozono.

El esquema de la instalación completa utilizada para el tratamiento de muestras con ozono se muestra a continuación:

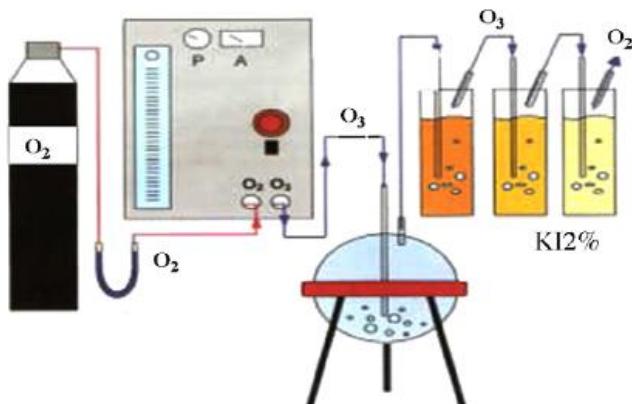


Figura 3.3: Esquema de la instalación para el tratamiento de muestras de ozono. Fuente: Departamento de Investigación, Calidad y Tratamiento de Aguas de la universidad de Zaragoza.

El oxígeno se aporta desde una botella de O₂ que se conecta directamente al ozonizador por lo que el aporte de gas se debe ajustar mediante la válvula reductora a 0,5 bar. La generación de ozono aumenta con el caudal de oxígeno introducido, por lo que el flujo de oxígeno que entra al ozonizador se regula con la válvula acoplada al rotámetro situado en el frontal del equipo. Entre la botella de gas y el ozonizador se coloca un lecho de sílica gel que debido a sus propiedades higroscópicas elimina la humedad de la corriente de O₂ antes de entrar en el ozonizador, ya que el gas de entrada siempre debe estar seco. Una vez accionado el interruptor principal transcurren unos breves segundos hasta que el amperímetro muestra la subida de corriente que indica que ha comenzado la ozonización.

El ozonizador se conecta a un reactor cerrado de vidrio que funciona en régimen semicontinuo, continuo respecto al gas y discontinuo respecto al líquido. El ozono gas se transfiere a la muestra por la parte superior del reactor a través de un divisor poroso (O₃ introducido). La transferencia del ozono al agua produce un burbujeo que proporciona agitación a la muestra, favoreciendo el contacto ozono-agua.

Para encontrar la cantidad exacta de ozono que se necesitará aplicar a la muestra de dos litros, se toma la recta de calibrado del ozonizador del laboratorio, a fecha de 08/01/2013:

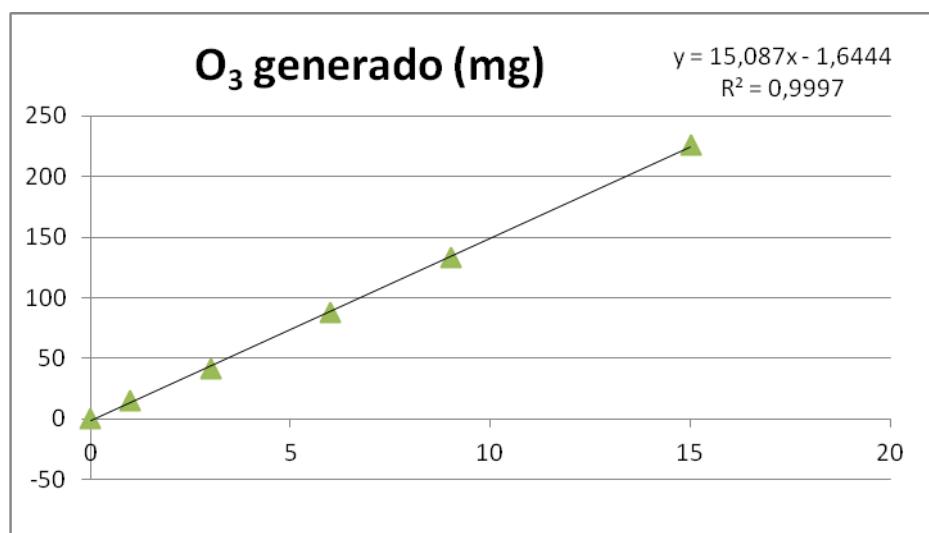


Figura 3.4: Recta de calibrado del ozonizador del laboratorio de Investigación, Calidad y Tratamiento de Aguas de la universidad de Zaragoza. Fuente: Departamento de Investigación, Calidad y Tratamiento de Aguas de la universidad de Zaragoza.

Con los datos anteriores, se obtienen los minutos de duración que debe de tener el tratamiento con ozono de la muestra del efluente de la EDAR de Tauste.

Pero no todo el ozono producido llega a consumirse en la reacción ya que parte queda en la fase gaseosa en la zona superior del reactor. Este ozono debe ser destruido (O_3 no consumido) por o que se colocan tres borboteadores (en este caso dos) en serie al reactor que contienen una disolución de yoduro potásico al 2%.

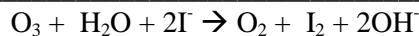
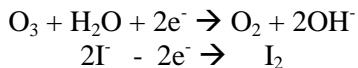
El ozono reacciona con el yoduro potásico reduciéndose a oxígeno y liberándose a la atmósfera. El experimento debe llevarse a cabo en una campana extractora ya que el ozono es un elemento tóxico. La cantidad de O_3 no consumida se calcula por un método volumétrico con tiosulfato sódico.

Por lo tanto, el O_3 consumido por la muestra se calcula según la ecuación:

$$O_3 \text{ consumido} = O_3 \text{ introducido} - (O_3 \text{ no consumido} + O_3 \text{ residual disuelto})$$

La cantidad de ozono producida se calcula por el método iodométrico (Kolthoff et al, 1957). Este método consiste en tomar muestras de la disolución de IK de los borboteadores para cada uno de los caudales de oxígeno y de los intervalos de tiempo fijados y valorar con tiosulfato sódico el yodo que se produce al reaccionar el KI con el ozono. El ozono residual disuelto se considera cero por su rápida degradación.

El yodo generado corresponde estequiométricamente con la cantidad de ozono generada ya que conforme el O_3 alcanza la disolución de KI, el O_3 se reduce a O_2 y a su vez el yoduro se oxida a yodo:



Se toman alícuotas de 50 ml de cada borboteador y se añaden 10ml de H_2SO_4 concentrado (96%) ya que se requiere medio ácido para la valoración. Se comienza a valorar con tiosulfato sódico hasta que el color pardo rojizo que aparece como consecuencia del I_2 formado se torne amarillo pálido. En este momento se añade el indicador de almidón, puesto que si se añadiera a la muestra inicial, en la que la cantidad de yodo es muy superior, se formaría un complejo que impediría valorar correctamente.

El ozono generado, en mg h⁻¹, se calcula según la siguiente expresión:

$$mg\ O_3/h = V \times N \times \left(\frac{250}{V'} \right) \times 24 \times \left(\frac{60}{t} \right)$$

Donde:

V = volumen total de tiosulfato sódico consumido (agente valorante)

N = normalidad de la disolución de tiosulfato sódico

V' = volumen de KI tomado para la valoración

t = tiempo, en minutos, de funcionamiento del generador

24 = peso equivalente del ozono

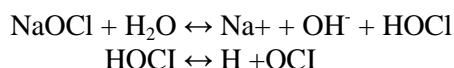
Por último, se suman los dos valores obtenidos de tiosulfato sódico consumidos en las valoraciones de las muestras de los dos borboteadores. Esta suma equivaldrá a todo el tiosulfato consumido para valorar el total de ozono presente en los dos litros de muestra.

Aplicación de cloro

Previa aplicación del cloro a la muestra se debe averiguar la demanda de cloro que requiere dicha muestra. Para su cálculo se utiliza el método estándar 5710 B (Eaton et al., 2005). Para este objetivo hay que preparar inicialmente un reactivo de cloración a base de hipoclorito de sodio diluido (1:10) con agua destilada.

A continuación, en un frasco con tapón de teflón de 350 ml, se añaden 5 ml de reactivo de cloración, 5 ml de tampón fosfato y se llena con la muestra. Las muestras cloradas se deben almacenar un mínimo de 4 horas en la oscuridad, a 25° C de temperatura.

Las reacciones que tienen lugar con el hipoclorito de sodio es:



Para calcular la dosis suministrada de cloro a la muestra, se toma un frasco de vidrio con tapón de teflón, se añaden 5 ml de reactivo de cloración y se llena hasta rebosar con agua destilada.

Del contenido de este último frasco, se valoran 100 ml con tiosulfato sódico, utilizando almidón como indicador. Para la valoración se utilizarán 100ml del contenido de este frasco, 5ml de ácido acético y 1g de yoduro potásico.

Se valora esta mezcla con el tiosulfato hasta que vira de naranja oscuro a color amarillo claro. Una vez ha virado se añade 1ml de almidón, y se sigue valorando con tiosulfato hasta que el color cambia de marrón-morado a transparente. Es entonces cuando se hace el recuento del volumen total utilizado de tiosulfato para la valoración.

Donde:

Vv: es el volumen de agente valorante consumido en la valoración.

N: es la normalidad del tiosulfato

Vm: volumen de muestra valorada.

Este resultado sirve también para conocer la concentración exacta del reactivo de cloración (Rc) que vendrá dada por la expresión:

$$Rc = D_0 * 350 / 5$$

Para calcular el cloro residual (R) se valoran 100ml del contenido del frasco de la muestra clorada con tiosulfato sódico, utilizando almidón como indicador. Para la valoración se utilizan 100ml del contenido del frasco de la muestra clorada, 5ml de ácido acético y 1g de yoduro potásico.

En esta valoración se tienen que dar los mismos virajes de colores que en la valoración del frasco de agua destilada con reactivo de cloración, añadiendo también 1 ml de almidón entre viraje y viraje. Una vez ocurrido esto, se mide la cantidad de tiosulfato sódico gastada en la valoración.

El cloro residual en la muestra en mg de Cl₂/L (R) vendrá dado por la expresión:

$$R = Vv * N * 35,5 * (1000 / Vm)$$

Donde:

Vv: es el volumen de agente valorante consumido en la valoración.

N: es la normalidad del tiosulfato.

Vm: volumen de muestra valorada.

Por último, para calcular la demanda de cloro de la muestra, se ha de resolver la siguiente ecuación:

$$CD=D_0 \cdot R \text{ (mg Cl}_2\text{/L)}$$

Conociendo ya la demanda de cloro de la muestra, a partir del reactivo de cloración se adiciona la cantidad exacta de cloro para satisfacer la demanda (CD).

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Cálculo de caudales disponibles y necesidades hídricas del parcelario

Como se viene comentando con anterioridad, este proyecto busca la regeneración de aguas con una calidad apta para el riego de parcelas con el cultivo de maíz, para lo cual es necesario, en primer lugar, calcular las cantidades de agua que se necesitan para este cometido.

Por ello, se procede a continuación al cálculo de las necesidades hídricas del parcelario de estudio. Primeramente, hay que tener en cuenta el número total de parcelas que se han seleccionado, que son 49,5696 hectáreas cultivadas con maíz. Se trabajará con la cifra de 50 hectáreas para poseer un pequeño margen de error o pérdidas.

- Necesidades hídricas del cultivo: entre 8000 y 10000 m³ por hectárea y temporada.
(Se tomará siempre el dato máximo de necesidad para el cálculo de las necesidades totales).
- Necesidades hídricas del total de parcelas ocupadas con maíz: aproximadamente 50 hectáreas
Necesidades hídricas de la zona de estudio = 10000m³/ha * 50 hectáreas = **500000 m³**.
- Caudales de efluente disponibles: Se han obtenido valores medios de caudales diarios dependiendo de cada mes. La información ha sido proporcionada por el Instituto Aragonés del Agua.

Tabla 4.1: Cálculos de las necesidades hídricas del parcelario de estudio y de los caudales de salida de la de la EDAR de Tauste (en m³/día). Fuente: elaboración propia.

Mes	Caudal tratado medio diario (m ³ /día)	Nº días/mes	Volumen efluente (m ³) al mes
Enero	1983	31	61473
Febrero	1998	28	55944
Marzo	2213	31	68603
Abril	1965	30	58950
Mayo	2014	31	62434
Junio	2000	30	60000
Julio	2048	31	63488
Agosto	2174	31	67394
Septiembre	2404	30	66120
Octubre	2203	31	68293
Noviembre	2028	30	60840
Diciembre	1823	31	56513
Total			750052
Total temporada riego (abril-diciembre)			564032

La temporada de riego dura desde abril hasta diciembre, así que el total de metros cúbicos de efluente en ese rango de meses es de 564032 m³/temporada de riego.

Como se puede observar, la cantidad de caudal tratado es mayor que la cantidad de caudal necesario para el regadío de la zona de estudio, por lo que se deduce que no habrá problemas de abastecimiento a lo largo de la temporada. Concretamente, el caudal necesario supone un 88,65% del caudal total de efluente en los meses de riego.

El hecho de que este caudal se desvíe hacia los campos de cultivo y no hacia el río, podría suponer una ausencia de recursos para aquellos agricultores que pudiesen tener tomas de agua del río más adelante en el cauce, pero éste no es uno de esos casos, ya que aguas abajo y hasta la desembocadura del río Arba en Gallur (municipio anexo a Tauste), no hay ninguna otra toma de agua para riegos.

Comparativa de la situación actual y futura en la zona de riego

Actualmente las aguas utilizadas para el riego de estas parcelas proceden del río Arba (Aequia del lugar). Si se realiza un balance aproximado de entradas y salidas del río, se obtiene que el agua que se sustraería de la EDAR para riego, y que por tanto dejaría de ser vertida al cauce, es la misma que actualmente proviene de la acequia y que no haría falta utilizar. Por tanto, la cantidad de agua desviada del río destinada anteriormente a regar estas parcelas, se verterá de nuevo en el río sin previo uso.

Es decir, la cantidad de agua utilizada para el riego va a ser la misma pero obtenida de distinta fuente, y los vertidos al cauce principal del río Arba van a ser los mismos pero en distintos puntos.

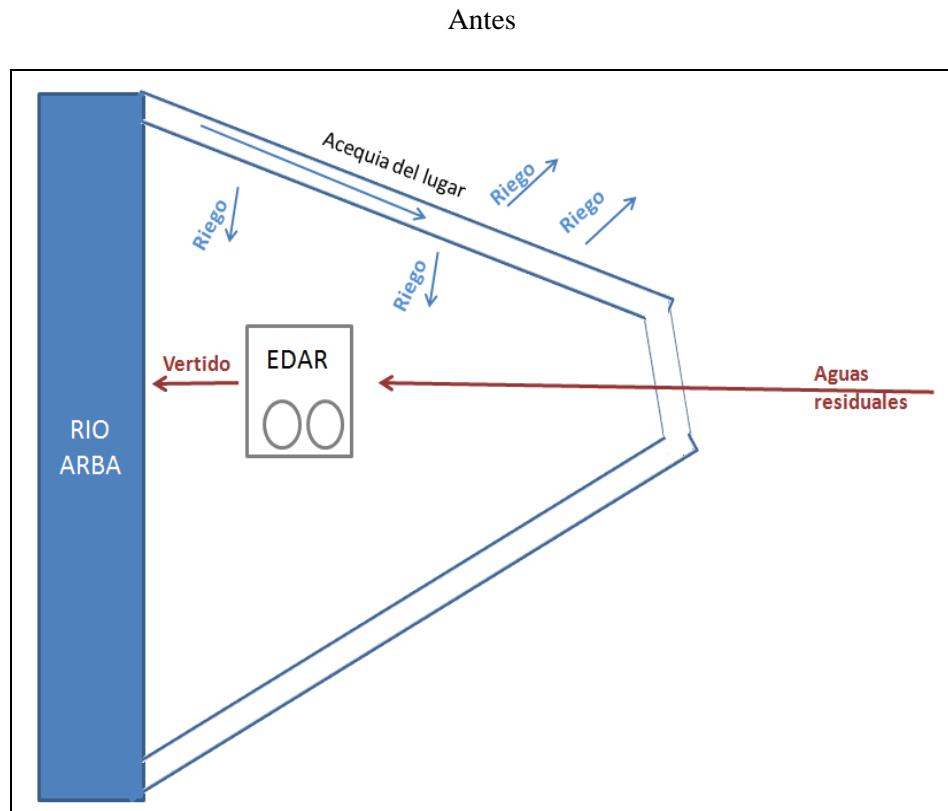


Figura 4.2: Esquema de la situación actual en la zona de estudio. Fuente: elaboración propia.

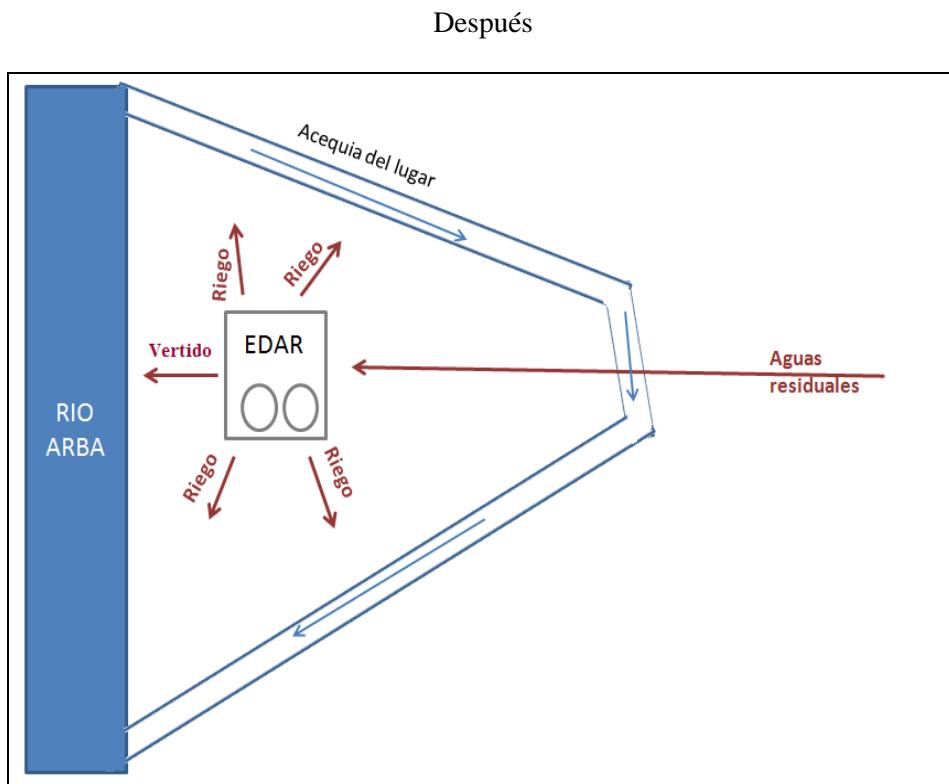


Figura 4.3: Situación tras la reutilización de las aguas regeneradas para el riego de la zona de estudio. Fuente: elaboración propia.

El resultado final es que se utiliza el mismo volumen de recurso hídrico para regar antes y después de la regeneración, teniendo en cuenta que lo único que varía es la fuente de ese recurso.

La cantidad de agua que se deriva del Arba a la Acequia del Lugar seguirá siendo la misma, pero el retorno al Arba será mayor ya que el volumen que antes de la regeneración se usaría para regar las parcelas de estudio, ahora volverá al cauce aguas abajo. El beneficio se presenta entonces en que no sólo se reducirá el vertido de aguas residuales tratadas al río, sino que además se consigue un agua de riego de mejor calidad que la actual.

4.2 Caracterización del efluente de la EDAR de Tauste

4.2.1 Caracterización del efluente durante el ejercicio de 2011

Estos datos corresponden a los valores medios mensuales de 2011, de aquellos parámetros cuyo análisis en la propia instalación depuradora son obligatorios. La tabla con todos los datos proporcionados por el Instituto Aragonés del Agua se presenta a continuación:

Tabla 4.4: Caracterización mensual de los parámetros analizados in situ en la EDAR de Tauste en el año 2011. Fuente: Instituto Aragonés del Agua.

Mes	Conduc. (dS/cm)	SS (mg/L)	DBO ₅ (mg/L)	Nt (mg/L)	N-NH ₄ ⁺ (mg/L)	N-NO ₃ ⁻ (mg/L)	Pt (mg/L)	DQO (mg/L)	Caudal tratado medio diario (m ³)	m ³ /mes
Enero	1,41	10,00	11,00	6,70	3,40	0,30	0,70	34,00	1983,00	67422
Febrero	1,33	11,00	6,00	3,30	1,20	0,60	0,50	32,00	1998,00	63936
Marzo	1,51	20,00	8,00	5,90	1,90	0,20	2,90	48,00	2213,00	106224
Abril	1,42	9,00	4,00	6,10	1,00	2,50	1,20	31,00	1965,00	60915
Mayo	1,39	4,00	4,00	2,10	0,80	0,30	0,60	18,00	2014,00	36252
Junio	1,44	5,00	10,00	2,10	0,20	0,80	0,80	23,00	2000,00	46000
Julio	1,56	5,00	5,00	4,80	1,00	0,80	1,00	25,00	2048,00	51200
Agosto	1,59	9,00	9,00	22,90	0,90	19,20	3,70	41,00	2174	89134
Septiembre	1,53	8,00	7,00	7,80	1,60	2,80	1,80	33,00	2204,00	72732
Octubre	1,58	7,00	4,00	7,90	0,70	4,30	0,70	24,00	2203,00	52872
Noviembre	1,31	10,00	7,00	11,90	9,50	0,30	0,40	25,00	2028,00	50700
Diciembre	1,61	7,00	3,00	23,30	19,10	2,60	0,30	20,00	1823,00	36460
Rangos Habituales EDAR Tauste	1,31-1,62	4,00-20,00	3,00-11,00	2,10-23,30	0,20-19,10	0,20-19,20	0,30-3,70	18,00-48,00	1823,00-2213,00	

Con la tabla anterior se corrobora la información concedida por Sara Larrodé (Encargada de la EDAR de Tauste), de que la composición del efluente de salida es similar todo el año, ya que el caudal de entrada no sufre variaciones importantes durante los doce meses.

Como se puede observar, la mayoría de los parámetros oscilan en unos valores medios similares todos los meses, exceptuando los valores de ciertos parámetros en algunos meses. Estos valores son los SS en marzo (los cuáles pueden deberse a un comienzo en las labores de jardinería de primavera, que puede aumentar los niveles de finos en el vertido), el Nitrógeno total y nitratos en agosto (el cual puede ser ocasionado por el aumento de la carga orgánica y nutrientes procedentes de la empresa conservera del polígono, ya que comienza la campaña del tomate), y el fósforo en agosto (cuyo aumento puede ser debido, al igual que el nitrógeno y los nitratos, al aumento de nutrientes en el caudal de entrada ocasionados por los vertidos de la industria conservera).

Mediante la información de la tabla anterior se obtienen valores medios de los parámetros que deben ser analizados diaria o semanalmente en el laboratorio de la planta depuradora. Actualmente se encarga de esa tarea la encargada de la EDAR de Tauste.

Los datos de conductividad, sólidos en suspensión, DQO y caudal son medidos diariamente, mientras que el resto (DBO_5 , fósforo, nitrógeno, nitratos y amonios) son medidos una o varias veces a la semana.

Estos datos suponen únicamente una referencia ya que sólo se han empleado aquellos relativos al caudal tratado medio diario (utilizados en el apartado 4.1, “Cálculo de caudales disponibles y necesidades hídricas del parcelario”). Su importancia radica en que su presencia facilita la comparación de datos con aquellos obtenidos en laboratorio, y permiten ver una evolución histórica de todo el efluente a lo largo de un año.

4.2.2 Caracterización propia del efluente de la EDAR de Tauste en laboratorio

En este apartado se detallan todos los resultados obtenidos tras realizar las caracterizaciones del efluente de salida de la EDAR de Tauste.

Como se detalló en el capítulo 3, apartado 3.2.1 (Caracterización de las muestras), las muestras fueron cogidas en tres fechas distintas, con el objetivo de analizar aguas en distintas épocas del año y obtener datos medios de distintas situaciones en la EDAR. Por ello, las caracterizaciones se llevaron a cabo con aguas recogidas en octubre y diciembre de 2012, y febrero de 2013.

La información de los valores de todos los parámetros en cada una de las caracterizaciones, aparecen en el Anexo I del presente proyecto con mayor detalle (ANEXO I: Caracterizaciones de los parámetros analizados en el efluente de salida de la EDAR de Tauste).

La siguiente tabla se presenta a modo de resumen y engloba la información de las tres caracterizaciones completas realizadas. En ella aparece el valor medio de cada parámetro, obtenido mediante la media aritmética de los tres datos de cada parámetro conseguidos en las tres caracterizaciones. En esta tabla también se muestra la normativa que registra cada parámetro (en el caso de que esté legislado), y el límite recomendado más restrictivo para cada uno de ellos, acompañado de la bibliografía donde se encuentra esa recomendación.

Los valores de los parámetros del efluente aparecen en dos colores. En rojo, aquellos cuyos límites sobrepasan los legislados o recomendados, y en verde los que se encuentran en un valor menor al límite.

Tabla 4.5: Media aritmética y desviación típica de cada parámetro que se ha caracterizado en el efluente, y límites legislados/recomendados para cada uno de ellos. Fuente: elaboración propia.

	PARAMETRO	Valor medio	Límite Legislado	Referencia de la normativa	Límite recomendado	Bibliografía de la recomendación
PARÁMETROS LEGISLADOS	Huevos de nematodos	9,33 ± 6,33 huevos/10L	1 huevo/ 10L	RD 1620/2007	≤0,1huevo/L	OMS, 1989.
	Escherichia coli	1510 ± 1280 UFC/ 100mL	1000UFC/ 100ml	RD 1620/2007		
	SS	20,73 ± 2,77 mg/L	35 mg/L	RD 1620/2007	20 mg/L	US EPA, 1992.
	Turbidez	6,17 ± 4,03 NTU	No se fija	RD 1620/2007	0,2-35 NTU	Lazarova et al, 2004.
	Nitrógeno Total	10,49 ± 3,79 mg/L	15 mg/L	Directiva 91/271/CEE	<5 mg/L (sin restricciones)	Mujeriego, 1990.
	NO ₃ ⁻	1,34 ± 1,16 mg/L			<5 mg/L ninguna restricción >7,5 daño severo al cultivo	Vomocil et al, 1992.
	Fósforo total	1,00 ± 0,2 mg/L	2 mg/L	Directiva 91/271/CEE	0,1-2mg/L	Lazarova et al, 2004.
	DBO ₅	10,76 ± 1,84 mg O ₂ /L	25 mg O ₂ /L	Directiva 91/271/CEE	<10 mg O ₂ /L	Mujeriego, 1990.
	DQO	24,30 ± 5,6 mg O ₂ /L	125 mg O ₂ /L	Directiva 91/271/CEE	20-200 mg O ₂ /L	Lazarova et al, 2004.
PARÁMETROS RECOMENDADOS	Coliformes totales	644 ± 696 UFC/100 mL			1-200CFU/ 100mL	Lazarova et al, 2004.
	Mn	0,21 ± 0,02 mg/L			<0,1 mg/L	FAO, 1985; Ayers & Westcot.
	Fe	0,53 ± 0,71mg/L			5 mg/L	Metcalf et al, 1995.
	pH	7,00 ± 0,12			6-9	Mujeriego, 1990.
	Conductividad Eléctrica (CE)	1,352 ± 53 dS/m			0,7 dS/m (sin riesgo) >3dS/m (riesgo alto)	FAO, 1985; Ayers & Westcot.
	Salinidad	0,86 ± 0,03 g/L			0,45 g/L (no hay riesgo) >2 g/L (riesgo alto para el cultivo)	FAO, 1985; Ayers & Westcot.
	SAR	0,049 ± 0,02 meq/L			<3,0 meq/L (Sin restricciones)	ARMCANZ & ANZECC, 1992.
	Mg	33,34 ± 1,84 mg/L			<60 mg/L	FAO, 1985; Ayers & Westcot.
	Na	84,32 ± 3,33 mg/L			<900 mg/L	FAO, 1985; Ayers & Westcot.
	Ca	161,56 ± 2,66 mg/L			0-400 mg/L	Mujeriego, 1990.
	Cu	0,033 mg/L			0,2 mg/L	Metcalf et al, 1995.
	Ni	0,00 mg/L			0,02-0,1 mg/L	Lazarova et al, 2004.
	Zn	0,027 mg/L			2 mg/L	Metcalf et al, 1995.
	Al	0,00 mg/L			5 mg/L	Metcalf et al, 1995.
	Boro	0,133 mg/L			<0,7 mg/L	-Mujeriego, 1990.
	Hg	0,00 mg/L			<0,001 mg/L	Lazarova et al, 2004.
	Cd	0,004 mg/L			<0,01 mg/L	- Lazarova et al, 2004.
	Cr ⁺⁶	0,00 mg/L			0,1 mg/L	Crook, 1991.
	Pb	0,076 mg/L			5,0 mg/L	Crook, 1991.
	Cl residual o libre	0,00 ± 0,00 mg/L			<1 mg/L	Metcalf et al, 1995.

Los valores de la mayoría de los metales pesados analizados (Cobre, Níquel, Zinc, Aluminio, Boro, Mercurio, Cadmio, Cromo VI y Plomo) no poseen desviación típica ya que sólo se han analizado una única vez, durante la primera de las caracterizaciones completas del agua muestra.

Teniendo en cuenta que el vertido de entrada de la EDAR de Tauste tiene unas características muy similares durante todo el año, se toma la decisión de analizar las concentraciones de metales pesados solo en el primer análisis, tomando como premisa que, si en la primera caracterización las concentraciones de estos metales son bajas, en el resto de análisis serán iguales o menores.

Como se ha podido observar en este capítulo, los valores de los parámetros analizados en la EDAR no varían apenas a lo largo del año. Esta situación corrobora también la premisa adoptada, porque si los parámetros físico-químicos y microbiológicos no varían (el vertido es homogéneo todo el año), tampoco lo harán las concentraciones de metales pesados. De todas formas, se ha considerado necesario al menos un análisis de estos componentes para asegurarse de que su concentración es baja, debido a los muchos problemas que pueden causar a los cultivos si se aplican en aguas de riego.

En cuanto a los parámetros fisco-químicos analizados, si se comparan las tablas 4.4 y 4.5 de este mismo capítulo, se puede comprobar que los datos medios de los parámetros que se han analizado en laboratorio, entran dentro del rango habitual de valores de los parámetros de obligado cumplimiento analizados en la EDAR en 2011.

Con ello se deduce que, aunque el periodo en el que se ha realizado este estudio (y por lo tanto los análisis en el efluente de salida) no ha sido en su totalidad durante la época de riego del maíz, los valores obtenidos en laboratorio están dentro de unos valores de normalidad. Por ello se afirma que la época de estudio no influye en la composición del efluente, es decir, el tipo de efluente de salida de esta instalación tiene una composición similar todo el año, independientemente de los vertidos de entrada.

4.3 Aplicación de tratamientos de regeneración al efluente a escala de laboratorio

Los tratamientos seleccionados para ser aplicados al efluente y así lograr la calidad del agua recomendada para el agua de riego de maíz han sido ozonización y cloración. Ambos se han realizado a escala de laboratorio y sobre muestras previamente caracterizadas. Cada uno de estos tratamientos ha sido aplicado dos veces sobre el efluente caracterizado, siguiendo el procedimiento experimental desarrollado en el capítulo 3 (apartado 3.3, Procedimiento experimental).

4.3.1 Selección de los métodos más adecuados y justificación

El principal factor que se ha valorado a la hora de la elección de los procedimientos de regeneración han sido todos aquellos parámetros que superan actualmente el rango legislado o recomendado. El objetivo es reducir la concentración de todos ellos logrando así un efluente con todos sus componentes en dosis aptas para el riego del maíz.

Como se ha podido ver en la tabla del apartado anterior “Media aritmética y desviación típica de cada parámetro que se ha caracterizado en el efluente, y límites legislados/recomendados para cada uno de ellos”, los valores que sobrepasan las concentraciones adecuadas son: huevos de nematodos, *Escherichia coli*, coliformes totales y manganeso.

Para que el efluente adquiera la calidad que se busca, se deben reducir todos los parámetros anteriores hasta lograr un valor dentro del rango permitido o recomendado. Además de tener en

cuenta este criterio a la hora de la elección del método de regeneración, se ha optado también por un tratamiento que no solo reduzca a los parámetros antes nombrados, sino que sea eficaz igualmente en la remoción de nitrógeno, ya que, aunque se encuentra dentro de los límites, se trata de una zona sensible a la contaminación por nitratos y por tanto se intentará disminuir la concentración de los compuestos del nitrógeno.

Basándose en la información contenida en la tabla 2.6 del apartado 2.1.4, relativa a los actuales procesos de regeneración utilizados y los parámetros que reducen/eliminan, se ha buscado entre estos procedimientos aquellos que destacasen por su acción desinfectante (por el exceso de agentes microbiológicos en el efluente), por la disminución del manganeso (que supera el límite recomendado) y por su eficiencia en la reducción del nitrógeno.

Teniendo en cuenta este razonamiento, se ha optado por la elección de las dos técnicas de regeneración de aguas que se han considerado más adecuadas: ozonización y cloración.

Ambas han sido escogidas mediante un análisis de ventajas y desventajas, no solo de eficiencia sino también respecto a su aplicación, es decir, se ha tenido en cuenta los materiales y capacidad del laboratorio y su posibilidad de aplicación dentro de éste.

Igualmente, el hecho de centrarse en estos dos procesos da pie también a una comparación entre dos métodos de desinfección: los tradicionales (el cloro) y los nuevos (Procesos de Oxidación Avanzada o POAs, entre los cuales se halla el ozono) cuya popularidad está creciendo en la actualidad.

Seguidamente se muestra una pequeña tabla donde aparecen las ventajas y desventajas principales de ambos tratamientos:

Tabla 4.6: Ventajas y desventajas de los dos métodos de desinfección más utilizados. Fuente: elaboración propia.

Método		Aspectos positivos	Aspectos negativos
Agente desinfectante	Cloro	<ul style="list-style-type: none"> -Bajo coste -Fácil de aplicar -Mantenimiento de la actividad tras el tratamiento (cloro activo) -Eliminación de microorganismos -Oxidación de contaminantes inorgánicos, como algunos metales 	<ul style="list-style-type: none"> -Genera subproductos altamente tóxicos -Es corrosivo para materiales -El olor y sabor del cloro puede permanecer en el agua
	Ozono	<ul style="list-style-type: none"> -Muy eficaz -Acción rápida -Eliminación eficaz de microorganismos -No genera subproductos peligrosos - Oxidación de contaminantes inorgánicos, como algunos metales -Inodoro e insípido -Elimina olores y sabores del agua 	<ul style="list-style-type: none"> -Caro de aplicar -La generación debe ser “in situ” -Poco poder residual -Necesita gran cantidad de energía - Formación de subproductos en aguas con concentraciones de bromuros superiores a 0.10 mg/L

La principal ventaja del uso de cloro frente al ozono, es la facilidad de aplicación y bajo coste. El cloro es uno de los tratamientos de desinfección (y en este caso de regeneración) más baratos, y por ello es el más usado en todo el mundo. A esto, se le suma que su aplicación no supone ningún problema, ya que es sencilla y no hace falta una estructura grande ni compleja para llevarlo a cabo.

En comparación, el ozono, aunque su acción es entre 600 y 3000 veces más rápida que el cloro (www.eurozon.com), tiene un coste mucho mayor y requiere maquinaria especial, así como una gran cantidad de energía destinada a la generación de una corriente de oxígeno que se convierte en ozono “in situ”.

Ambos tratamientos son muy eficaces en cuanto a desinfección de microorganismos, pero el cloro posee un poder residual que permite que su acción perdure en el agua una vez tratada. Este cloro residual protege de la aparición de nuevos microorganismos o la reactivación de los ya atacados, mejorando la calidad del efluente durante cierto tiempo después del tratamiento. En el caso del ozono, éste no posee apenas poder residual ya que su vida media en el agua es de apenas 25 minutos, debido a que el ozono que no ha reaccionado tiende a degradarse rápidamente (Aplicación de la ozonización en el tratamiento de aguas: www.madrimasd.org).

Respecto a la generación de subproductos, el ozono no aumenta el contenido de sales o productos tóxicos en el agua, mientras que el cloro puede formar subproductos tóxicos, principalmente los trihalometanos (THMs). Sin embargo, actualmente no existe ninguna normativa que establezca un límite máximo de concentración de THMs en aguas regeneradas, sino que solamente existe un valor máximo legislado de estos compuestos para aguas potables.

4.3.2 Calidad del efluente tras la aplicación de los procesos de regeneración

Recalcando una vez más el objetivo principal del presente proyecto, la elección de los dos procesos de regeneración ha ido encaminada a conseguir un efluente con una calidad idónea para el riego del cultivo en cuestión. Para ello, no sólo se han tenido en cuenta aquellos parámetros que superan los límites legislados o recomendados (Huevos de nematodos, *Escherichia coli*, coliformes totales y manganeso), sino también otros que pueden resultar nocivos aunque su concentración esté dentro de unos valores habituales en esta instalación depuradora, como por ejemplo, el nitrógeno total.

Ambos procesos, ozonización y cloración, han dado buen resultado y han sido exitosos en el sentido de ser capaces de reducir todos aquellos parámetros fuera de rango y, además, disminuir las concentraciones de otros componentes importantes del efluente, como son el nitrógeno total, la Demanda Biológica de Oxígeno o los Sólidos en Suspensión.

En los siguientes apartados, donde se exponen los resultados tras la regeneración, no aparecen los datos referentes a la concentración de los metales pesados tras la aplicación de estas técnicas, ya que no han sido analizados (razones explicadas en el apartado 4.2.2).

En esta decisión influye también la imposibilidad del análisis de estos compuestos en el laboratorio donde se ha realizado el proyecto, teniendo que mandar las muestras a un laboratorio especializado capaz de llevar a cabo su determinación.

4.3.2.1 Resultados tras la ozonización

Primeramente se calcularon las demandas de ozono de las muestras previamente analizadas en laboratorio, y se obtuvo un valor medio de $11,48 \pm 0,075\text{mg O}_3/\text{L}$.

A continuación se muestran los valores medios de los parámetros analizados tras la ozonización. En el anexo Anexo II (apartado II.1), se muestran los datos de cada una de las dos aplicaciones de ozono.

Tabla 4.7: Resultados tras la aplicación de ozono al efluente de la EDAR de Tauste. Fuente: elaboración propia.

	Parámetro	Límite normativa	Recomendación	Media aritmética de valores tras las ozonizaciones
PARÁMETROS LEGISLADOS	Huevos de nematodos intestinales	1 huevo/10L		0 ± 0,0 huevos/10L
	<i>Escherichia coli</i>	1000 UFC/100mL		23,5 ± 8,5 UFC/100mL
	Sólidos en Suspensión	35 mg/L		7,5 ± 0,5 mg/L
	Turbidez		No se fija límite	4,81 ± 0,89 NTU
	Nitrógeno Total	15 mg/L		2,27 ± 1,37 mg/L
	Nitratos		<5 mg/L	0,75 ± 0,25 mg/L
	Fósforo		2 mg/L	0,87 ± 0,17 mg/L
	DBO ₅	25 mgO ₂ /L		6,75 ± 0,65 mgO ₂ /L
	DQO	125 mgO ₂ /L		11,55 ± 1,45 mgO ₂ /L
PARÁMETROS RECOMENDADOS	Coliformes totales		1-200UFC/100mL	57,5 ± 22,5 UFC/100mL
	Manganeso	0,1 mg/L		0,077 ± 0,001 mg/L
	Hierro	5 mg/L		0,18 ± 0,02 mg/L
	pH	6-9		7,56 ± 0,145
	Conductividad		0,7-3 dS/m	1,56 ± 0,09 dS/cm
	Salinidad	0,45-2 g/L		0,99 ± 0,195 g/L
	SAR		<3,0 meq/L	0,048 ± 0,001 meq/L
	Magnesio	60mg/L		31,89 ± 0,5 mg/L
	Sodio	900mg/L		80,55 ± 0,42 mg/L
	Calcio	400 mg/L		157,85 ± 0,75 mg/L
	Ozono residual			<0,01 mg/L

Los parámetros aparecen todos en color verde, debido a que su valor está en todos los casos por debajo de su límite legislado o recomendado.

La aplicación de ozono al efluente ha dado lugar a una disminución de prácticamente todos los parámetros analizados. La explicación de la disminución de cada uno de los parámetros se expone en el apartado 4.3.2.3 de este mismo capítulo, donde se detalla cuánto ha disminuido cada parámetro y porqué, acompañado de unas gráficas explicativas.

4.3.2.2 Resultados tras la cloración

Antes de la cloración, se ha calculado la demanda de cloro (DC) relativa a las dos muestras caracterizadas que se iban a clorar, obteniendo un resultado de $10,87 \pm 0,48$ mg Cl₂/L. En el Anexo II (apartado II.1), se muestran los datos de cada una de las dos aplicaciones de cloro.

Tabla 4.8: Resultados tras la aplicación de cloro al efluente de la EDAR de Tauste.
Fuente: elaboración propia.

	Parámetro	Límite normativa	Recomendación	Media aritmética de valores tras las cloraciones
PARÁMETROS LEGISLADOS	Huevos de nematodos intestinales	1 huevo/10L		0 ± 0,00 huevos/ 10L
	<i>Escherichia coli</i>	1000 UFC/ 100mL		5 ± 3 UFC/ 100mL
	Sólidos en Suspensión	35 mg/L		6,5 ± 2,5 mg/L
	Turbidez	No se fija	No se fija límite	2,81 ± 0,07 NTU
	Nitrógeno Total	15 mg/L		1,15 ± 0,25 mg/L
	Nitratos		<5 mg/L	0,405 ± 0,025 mg/L
	Fósforo		2 mg/L	0,58 ± 0,38 mg/L
	DBO ₅	15 mgO ₂ /L		4,6 ± 0,2 mg O ₂ /L
	DQO	125 mgO ₂ /L		7,45 ± 0,45 mg O ₂ /L
	Coliformes totales		1-200UFC/ 100mL	0 ± 0,00 UFC/ 100mL
PARÁMETROS RECOMENDADOS	Manganoso	0,1 mg/L		0,161 ± 0,12 mg/L
	Hierro	5 mg/L		0,29 ± 0,14 mg/L
	pH	6-9		7,65 ± 0,17
	Conductividad Eléctrica	0,7-3 dS/m		1,595 ± 0,05 dS/cm
	Salinidad	0,45-2 g/L		1,02 ± 0,04 g/L
	SAR	<3,0 meq/L		0,1145 ± 0,019 meq/L
	Magnesio	60mg/L		32,72 ± 0,19 mg/L
	Sodio	900mg/L		191,75 ± 2,85 mg/L
	Calcio	400 mg/L		157,55 ± 0,65 mg/L
	Cloro residual	<1 mg/L		0,35 ± 0,05 mg/L

Se presentan todos los valores en color verde (puesto que en todos se han logrado valores que quedan dentro del rango de obligado cumplimiento o recomendado), excepto el manganoso, el cual se presenta en color rojo por superar su máximo establecido.

La presencia de cloro residual en bajas concentraciones, como se da en este caso, supone un beneficio ya que el cloro libre que ha quedado en la muestra seguirá actuando como desinfectante residual evitando la reaparición de agentes microbiológicos.

La explicación de la variación de todos los parámetros analizados tras la cloración se detalla más adelante en este mismo capítulo, en el apartado 4.3.2.3, donde se acompañan los resultados de cada parámetro con una gráfica explicativa de la variación del mismo.

4.3.2.3 Eficiencia obtenida con los procesos de regeneración y estudio del impacto en los cultivos

Posteriormente, y a modo de resumen, se presenta una tabla que recopila todos los datos obtenidos en las caracterizaciones y tras la aplicación de los procesos de cloración y ozonización.

Tabla 4.9: Tabla resumen sobre los valores de los parámetros tras la caracterización y la aplicación de tratamientos de regeneración. Fuente: elaboración propia.

	Parámetros	Media Caracterizaciones	Media tras Ozonizaciones	Variación tras ozonización	Media tras Cloraciones	Variación tras cloración
PARÁMETROS LEGISLADOS	Huevos Nematodos	9,33	0	-100%	0	-100%
	<i>E.coli</i>	1510	23,50	-98,44%	5	-99,66%
	SS	20,73	7,50	-63,82%	6,50	-68,64%
	Turbidez	6,17	4,81	-22%	2,81	-54,45%
	Nt	10,49	2,27	-78,34%	1,15	-89%
	NO ₃ ⁻	1,34	0,75	-44%	0,405	-69,44%
	Pt	1,00	0,87	-13%	0,58	-42%
	DBO ₅	10,76	6,75	-37,3%	4,60	-57,25%
	DQO	24,30	11,55	-52,67%	7,45	-69,34%
PARÁMETROS RECOMENDADOS	Colif. total	644	57,50	-91%	0	-100%
	Mn	0,21	0,077	-63,5%	0,161	-31%
	Fe	0,53	0,183	-65,5%	0,29	-45,33%
	pH	7,00	7,56	+ 8%	7,65	+9,3%
	CE	1,35	1,55	+15,2%	1,59	+18%
	Salinidad	0,86	0,99	+15,2%	1,02	+17,97%
	SAR	0,049	0,048	-3,11%	0,114	+130%
	Mg	33,35	31,89	-4,33%	32,72	-1,85%
	Ca	161,56	157,85	-2,3%	157,55	-2,48%
	Na	84,32	80,55	-4,46%	191,75	+127%

A continuación se exponen unas gráficas representativas de las diferencias entre los valores de cada parámetro antes y después de cada tratamiento de regeneración (representación mediante columnas en cada gráfica). La primera columna representa la media de los tres valores obtenidos en los tres análisis completos del efluente (caracterizaciones); en la segunda se representa la media de los dos valores medidos tras las dos pruebas de ozonización realizadas; la tercera indica la media de los valores adquiridos tras la aplicación de cloro a las muestras.

Cada uno de estos gráficos va acompañado de una explicación de la variación de cada parámetro tras la regeneración. En estos párrafos se indican también, como se ha expuesto en la tabla anterior (Tabla 4.9), los porcentajes de aumento o disminución de cada parámetro tras la aplicación de ozono y cloro.

En los parámetros en los que hay un límite legislado, éste aparecerá en forma de línea roja en la gráfica, indicando el valor máximo permitido. Sigue lo mismo con los límites máximos recomendados, que aparecen designados en las gráficas con una línea de color amarillo.

Por último, y sólo en algunas gráficas, aparece una línea verde que representa el límite mínimo recomendado que deben tener algunos parámetros según los autores consultados.

Huevos de nematodos

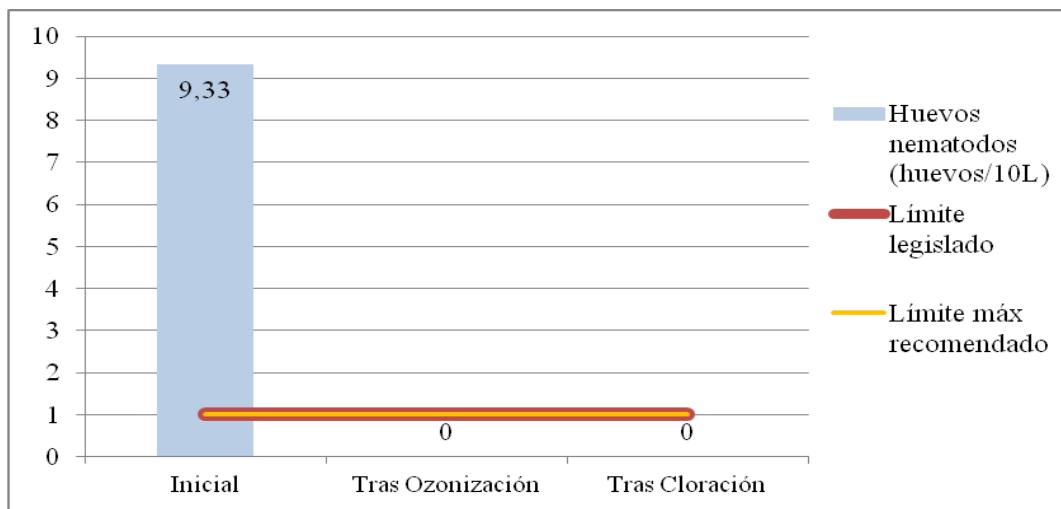


Figura 4.10: Variación de la concentración de huevos de nemátodos. Fuente: elaboración propia.

La concentración de huevos de nematodos es uno de los parámetros con más riesgo, ya que no sólo está legislado por el RD 1620/2007, sino que también es uno de los cuatro parámetros cuya disminución era obligatoria ya que su concentración inicial en el efluente superaba el límite permitido.

Los resultados obtenidos tras la aplicación de las dos técnicas de regeneración han sido satisfactorios. El efecto desinfectante ha sido completo en la erradicación de estos microorganismos, y aunque el límite legislado establece un máximo de 1 huevo/10 L de muestra, con estos dos tratamientos se ha conseguido disminuir la concentración a cero. Estos resultados confieren al efluente una calidad apta para el riego de maíz y de cualquier cultivo, sin riesgos biológicos para los trabajadores.

Escherichia coli

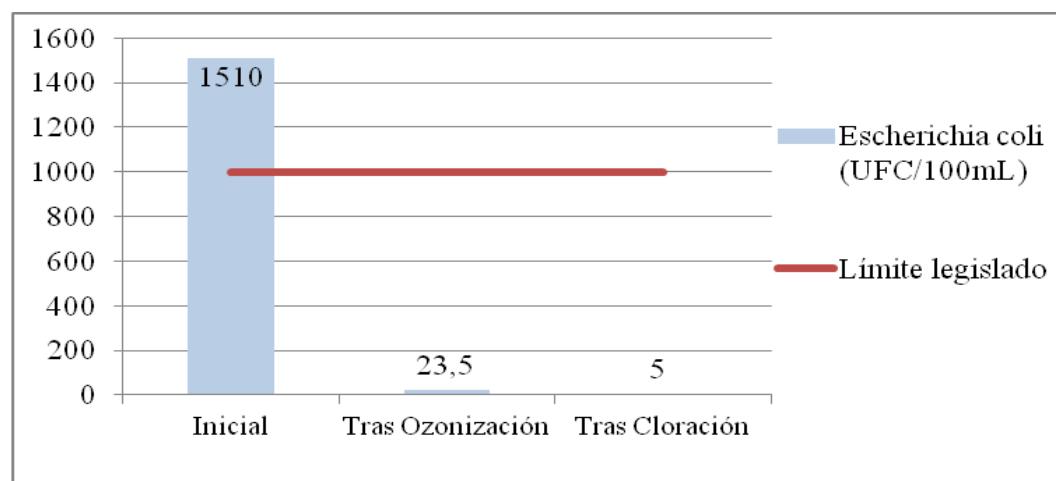


Figura 4.11: Variación de la concentración de *Escherichia coli*. Fuente: elaboración propia.

La concentración de *Escherichia coli*, que inicialmente suponía un riesgo en el efluente por superar el límite legislado, ha sido prácticamente erradicada por ambos procedimientos, obteniendo unos rendimientos de disminución del 98,44% tras la ozonización y un 99,66% tras la adición de cloro.

En gráficas como ésta se puede observar el alto poder desinfectante de los dos procesos de regeneración escogidos, y cómo ambos son una buena elección a la hora de reducir drásticamente o eliminar poblaciones de microorganismos del agua (bacterias, virus, algas...).

Sólidos en Suspensión (SS) y Turbidez

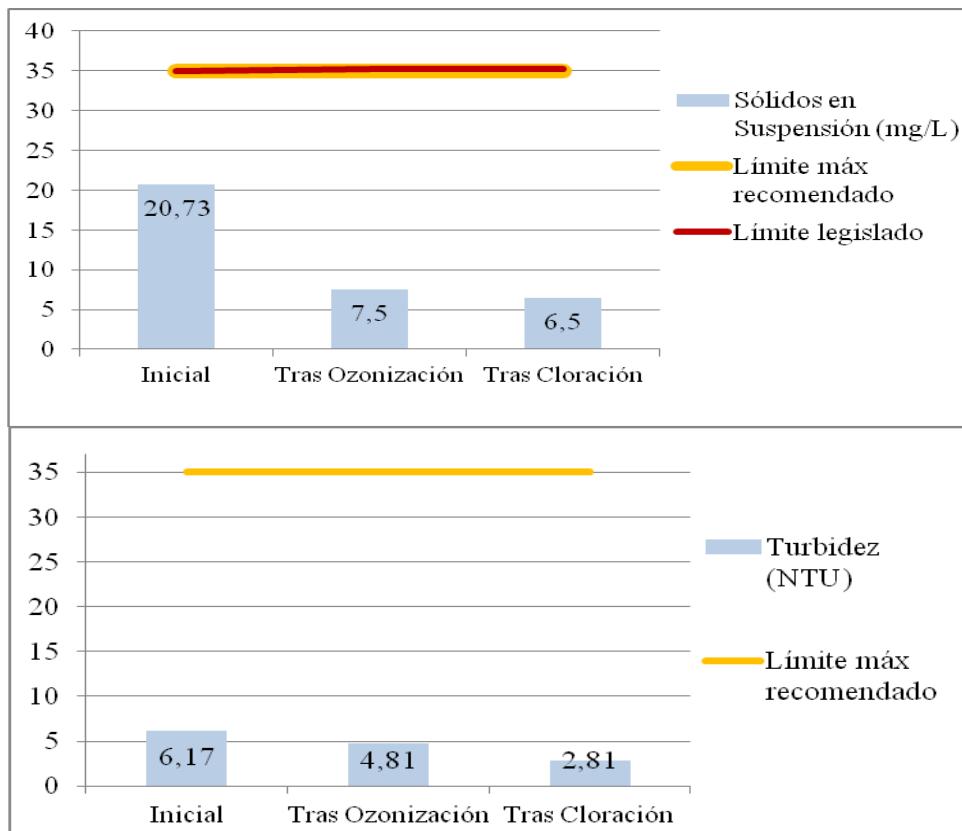


Figura 4.12: Variación del valor de Sólidos en Suspensión y Turbidez. Fuente: elaboración propia.

Ambos parámetros están relacionados con la presencia de sólidos en el efluente, aunque los porcentajes de disminución no son equivalentes. Tanto en el valor de sólidos en suspensión como en la turbidez, se puede ver una evolución similar en la que se parte de una valor dentro del rango habitual para el efluente de la EDAR de Tauste. Los dos parámetros disminuyen en cierto grado tras la aplicación de ozono, aunque disminuyen más drásticamente tras la cloración.

Gracias a la aplicación de ozono, los sólidos en suspensión se han reducido un 63,82%, y con el tratamiento de cloro ha bajado un 68,64%, quedando ambos datos muy por debajo del límite máximo recomendado y legislado (35 mg/L).

El parámetro de turbidez no ha sufrido grandes variaciones con respecto a la aplicación de ozono, con la que ha disminuido un 22%, pero sí se ha modificado notablemente con el tratamiento de cloración, que ha conseguido una disminución del 54,45%.

Aunque estaban inicialmente por debajo del límite de obligado cumplimiento, se han logrado reducir aún más consiguiendo una mayor calidad del efluente para riego. Con ello se evitan también posibles problemas derivados de altas concentraciones de SS y turbidez que se pueden dar en los cultivos, como por ejemplo la obturación en sistemas de riego localizado (este no es un problema que pueda afectar a las parcelas de estudio ya que el tipo de riego, como se ha nombrado en el punto 2.3.2, es riego a manta). Otro de los problemas que puede causar el exceso de sólidos en suspensión en los cultivos es que su acumulación puede dar lugar a

depósitos de lodos que generan condiciones anaeróbicas en el suelo, reduciendo la infiltración, respiración radicular, absorción de nutrientes, etc. (VISO RODRÍGUEZ, 2005).

Nitrógeno total y Nitratos

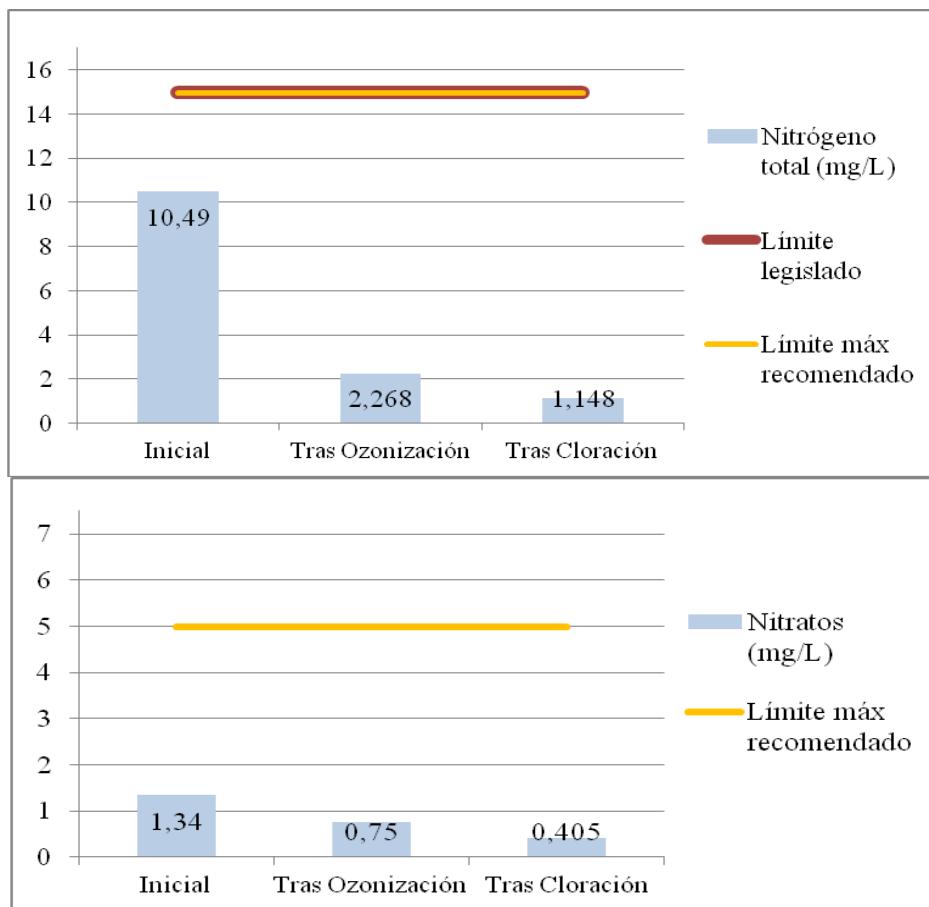


Figura 4.13: Variación de la concentración de Nitrógeno total y Nitratos. Fuente: elaboración propia.

Tras el análisis de los diferentes tratamientos de regeneración de aguas en el capítulo 2.1.4, se pudo observar que tanto la cloración como la ozonización eran bastante eficaces en cuanto a la remoción de nitrógeno total.

Gracias a su aplicación a escala de laboratorio, se ha podido corroborar esta información ya que se han conseguido reducciones de nitrógeno total del 78,34% en el caso de la ozonización, y 89% tras la cloración. Para el caso de los nitratos, se han logrado porcentajes de remoción bastante altos, aunque no tan elevados como los del nitrógeno. Los porcentajes de disminución de nitratos han sido del 44% tras la ozonización, y del 69,77% tras la cloración.

Se debe otorgar especial importancia a estos dos parámetros, y aunque ambos partían de una concentración inicial dentro del rango permitido, constituyen un factor de alto riesgo en la zona de estudio por su catalogación como Zona Vulnerable a la contaminación por nitratos. Es por ello por lo que se tomó la decisión de buscar tratamientos de regeneración que tuviesen alto rendimiento en reducción de este tipo de componentes.

La alta concentración en nitrógeno total y nitratos en el agua de riego puede dar lugar a problemas en el terreno y/o las aguas subterráneas de la zona. El problema ambiental más importante relativo al nitrógeno es la acumulación de nitratos en el subsuelo que, por lixiviación, pueden incorporarse a las aguas subterráneas o bien ser arrastrados hacia los cauces y reservorios superficiales.

Además, en el caso particular de la zona de estudio, las masas subterráneas se encuentran afectadas por la alta concentración de nitratos (Informe Medio Ambiente en Aragón, 2011), lo cual supone una razón extra para intentar reducir su concentración de partida.

Los nitratos también actúan de fertilizantes de la vegetación acuática, de tal manera que, si se concentran, puede originar eutrofización en el medio. En un ambiente eutrofizado se produce la proliferación de especies como algas y otras plantas verdes que cubren la superficie, elevando el consumo de oxígeno y su reducción en el medio acuático, y dificultando la incidencia de la radiación solar por debajo de la superficie. Estos dos fenómenos producen una disminución de la capacidad autodepuradora del medio y una merma en la acción fotosintética de los organismos acuáticos (Gonzalez, 2011).

Para mejorar todavía más la calidad del sistema, se podría descontar la cantidad de nitrógeno aportado mediante el agua de riego del aplicado en fertilizantes minerales y abonado. Para ello se debería obtener el dato medio de concentración de nitrógeno total del efluente tras el tratamiento que se seleccione, y realizar un cambio de unidades para conocer cuánto nitrógeno se aplica por metro cúbico a cada parcela. Así se hallaría la cantidad total de nitrógeno aportada al cultivo mediante agua de riego, la cual simplemente se debería descontar del aporte de fertilizantes total durante el periodo de crecimiento.

Fósforo

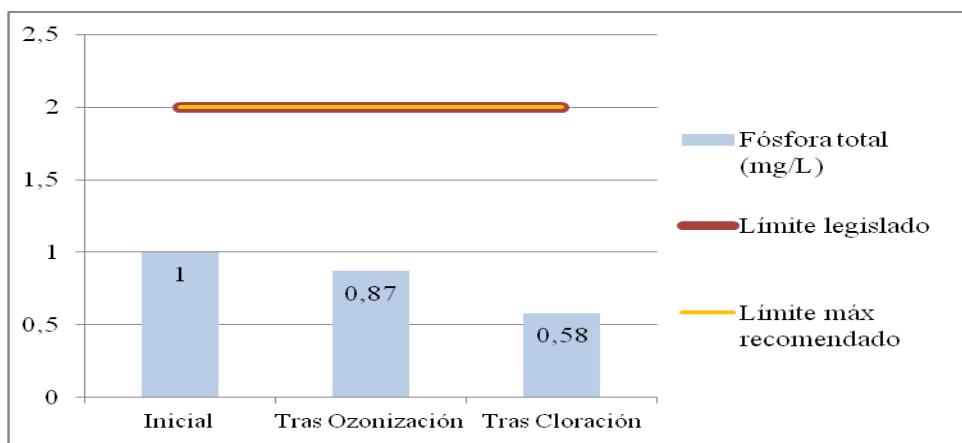


Figura 4.14: Variación de la concentración de Fósforo. Fuente: elaboración propia.

El fósforo no ha tenido una reducción significativa con el tratamiento de ozonización, pero sí tras la aplicación de cloro, con la cual se ha disminuído un 42%, frente al 13% logrado tras la dosificación de ozono.

En este caso ocurre lo mismo que en el apartado anterior (nitrógeno total y nitratos). La catalogación de la zona de la EDAR como Zona Sensible, obliga a esta instalación a verter un efluente con una concentración máxima de fósforo de 2 mg/L.

La concentración inicial estaba dentro del rango de obligado cumplimiento, pero en cuestión de concentración de nutrientes, una reducción de éstos siempre será bien recibida debido al peligro de la zona por la posible contaminación y eutrofización. Según datos del Informe de Medio Ambiente en Aragón de 2011 (Informe Medio Ambiente en Aragón, 2011), las masas de agua fluviales de la zona están clasificadas con un estado ecológico “deficiente” debido a la elevada concentración de nutrientes, y por tanto tienen un riesgo alto de incumplimiento de los objetivos medioambientales establecidos para esa área en cuanto a la disminución de la presencia de dichos nutrientes.

Demand Biológica de Oxígeno (DBO_5) y Demanda Química de Oxígeno (DQO)

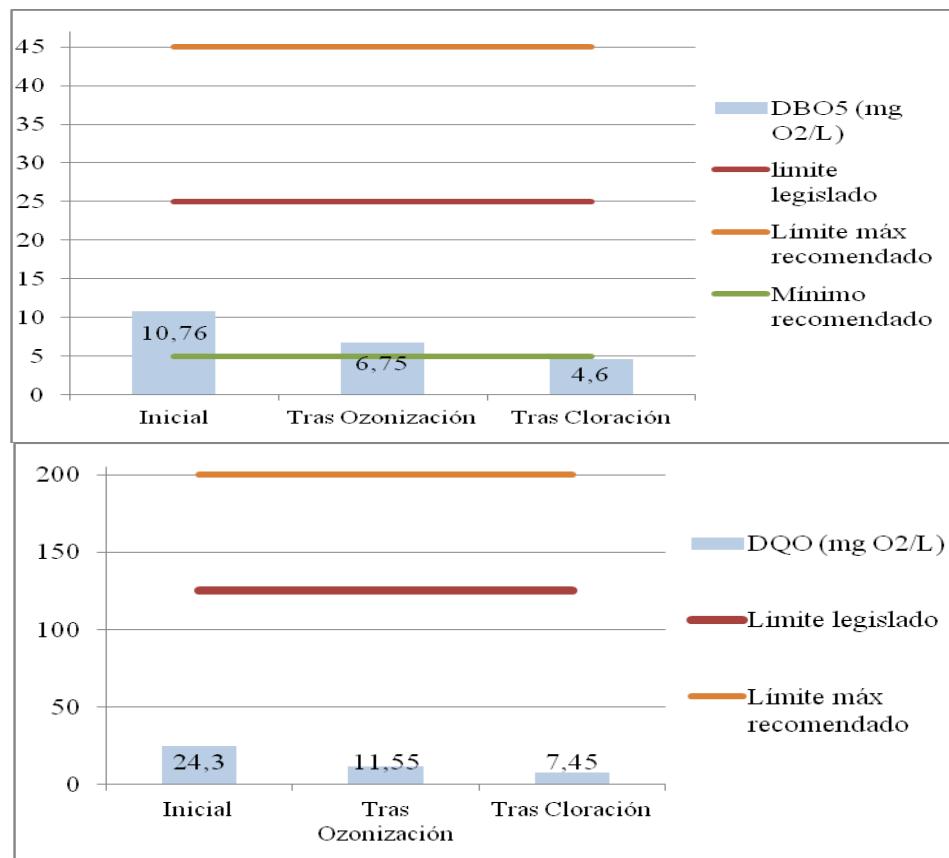


Figura 4.15: Variación de la concentración de Demanda Biológica e Oxígeno y Demanda Química de Oxígeno.
Fuente: elaboración propia.

La DBO_5 disminuye tras la aplicación de las dos técnicas de regeneración. El porcentaje de disminución de este parámetro es de 37,3% y de 57,25% tras ozonización y la cloración respectivamente.

Por su parte, la DQO también varía significativamente tras la aplicación de ambos tratamientos, siendo la cloración el más eficaz disminuyendo un 69,34% la media de la concentración inicial del parámetro, frente al 52,67% de reducción que consigue la ozonización.

Estos dos parámetros están muy relacionados ya que la disminución de ambos depende de la oxidación de la materia orgánica presente en la muestra, y por tanto siguen un mismo patrón de reducción. La aplicación de ozono y cloro tiene el mismo resultado para el efluente porque ambos son oxidantes, y realizan una oxidación de la materia orgánica transformándola en CO_2 y H_2O .

Ante la disminución de estos parámetros se debe tener en cuenta que la presencia de ambos, aunque sea en pequeña concentración, puede desencadenar la reacción de la materia orgánica con el cloro, lo que da lugar a la formación de trihalometanos. Como se ha comentado anteriormente (en el punto 4.3.1 de este mismo capítulo), no existe actualmente un límite de concentración máxima de THMs en aguas regeneradas, sólo en aguas potables.

Aunque no exista un valor límite para THMs, la disminución al máximo posible de los valores de DQO y DBO_5 reducen la posibilidad de reacción entre la materia orgánica y el cloro aplicado, y por tanto reduce la posibilidad de aparición de estos compuestos.

Coliformes totales

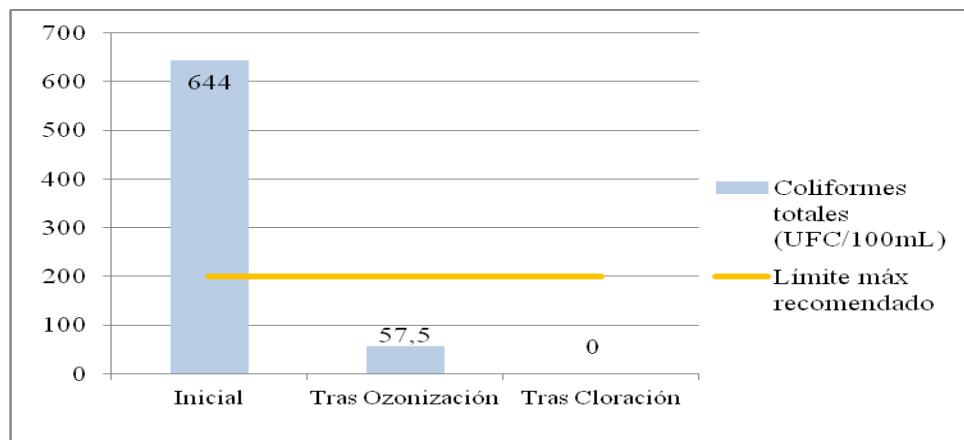


Figura 4.16: Variación de la concentración de Coliformes totales. Fuente: elaboración propia.

En este caso, la concentración de coliformes totales ha sido reducida en su totalidad por uno de las dos técnicas de regeneración. Es el caso de la cloración, la cual ha conseguido reducir el número de colonias de 640 a 0, logrando el 100% de reducción del parámetro. En el caso del ozono también se ha logrado un alto porcentaje de disminución del 91%.

Si bien la concentración inicial no rebasaba el límite recomendado, es igualmente un beneficio el hecho de disminuir todavía más el valor de concentración de estas colonias de coliformes, reduciendo así también el riesgo para los cultivos y la salud humana de los trabajadores.

Manganese

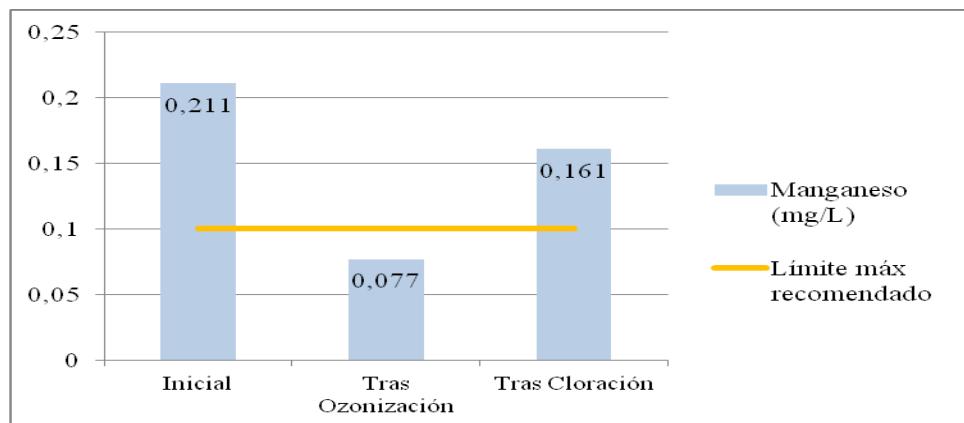


Figura 4.17: Variación de la concentración de Manganese. Fuente: elaboración propia.

El manganeso ha sufrido una variación mayor tras la aplicación de ozono que tras la de cloro, y su disminución es fruto del poder oxidante que poseen ambos desinfectantes. En este parámetro, cuya concentración inicial superaba el máximo recomendado, el ozono ha logrado una reducción del 63,5%, frente al 31% alcanzado por la cloración, el cual no es suficiente para lograr que la concentración de manganeso quede por debajo del máximo recomendado. De todas formas, este dato no supone un problema para la reutilización porque actualmente no existe un límite máximo legislado en cuanto a concentración de manganeso en aguas de riego.

En este caso, habría que diseñar algún tratamiento alternativo para la remoción del manganeso hasta una concentración que no suponga un riesgo para los cultivos, es decir, menos de 0,1 mg/L. Una posible solución, sería la implantación de un Filtro Intermitente de Arena (FIA), el cual, según la bibliografía, es capaz de eliminar un alto porcentaje de manganeso.

Este FIA podría actuar como complemento del proceso de cloración, acoplando un dispositivo de este tipo al final de la etapa de dosificación de cloro.

Hierro

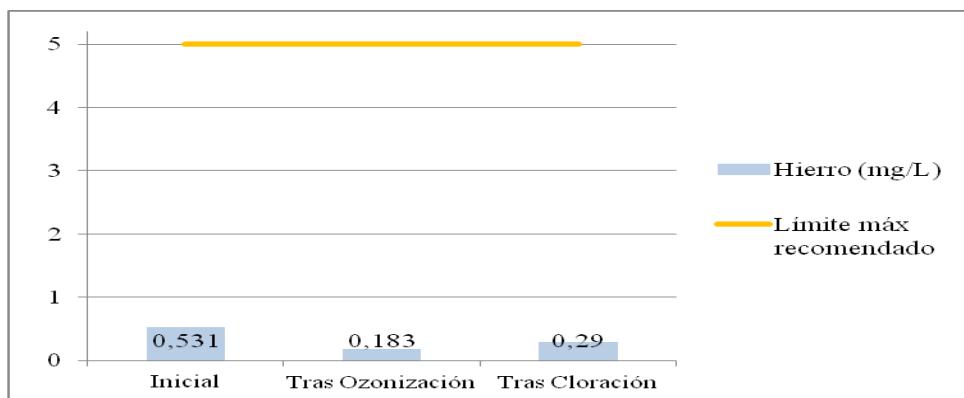


Figura 4.18: Variación de la concentración de Hierro. Fuente: elaboración propia.

Al igual que el manganeso, el hierro es uno de los únicos parámetros en los que el ozono ha obtenido mayor porcentaje de remoción que el cloro. La aplicación de ozono ha logrado una disminución del 65,5% frente al 45,38% obtenido por la cloración.

Esta disminución ha sido posible gracias a la acción oxidante de los dos tratamientos aplicados.

pH



Figura 4.19: Variación del pH. Fuente: elaboración propia.

El pH medio de las caracterizaciones se sitúa en 7, y tras las ozonizaciones y cloraciones apenas aumenta (entre 7,5 y 7,7). Realizando los cálculos de porcentaje, se obtiene que el pH ha aumentado un 8% tras la ozonización, y un 9,3% tras la cloración. Ambas cifras se consideran insignificantes, y en ningún caso limitan el uso del agua para riego ya que se encuentran dentro del rango recomendado.

Este aumento tras la aplicación de la cloración tiene su explicación química: la desinfección con cloro mediante la adición de una disolución básica de hipoclorito sódico provoca inevitablemente un aumento del pH (Gomez López, 2008). Esta ligera subida de pH ha sido desencadenada por la oxidación de las sustancias presentes en el agua, ya que ambos desinfectantes actúan de la misma forma. Todo depende de las partículas presentes en la muestra antes de la regeneración, las cuales, al oxidarse por la acción de estos desinfectantes,

pueden dar lugar a una variación del pH desencadenada por las sustancias formadas tras la oxidación.

Como inciso, se comenta que en este caso en particular, y como se ha nombrado en el punto 2.1.4 (apartado de ozonización), el ozono actúa mediante dos vías de oxidación. Para este pH entorno a 7, la acción del ozono se lleva a cabo mediante las dos vías a la vez (vía directa y radicalaria), por no ser un pH tan ácido como para oxidar directamente los compuestos vía directa, ni tan básico como para que reaccionen todos los radicales.

Conductividad Eléctrica (CE) y Salinidad

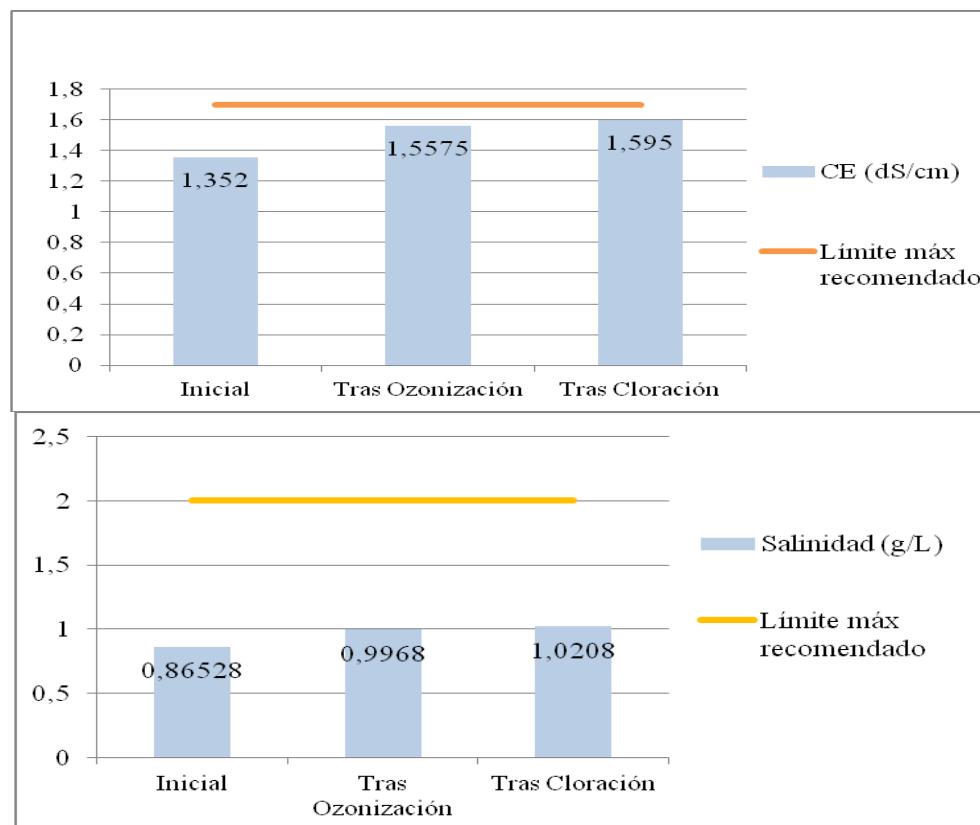


Figura 4.20: Variación de la concentración de la Conductividad Eléctrica y de la Salinidad. Fuente: elaboración propia.

En la CE se puede observar que tanto la ozonización como la cloración aumentan su concentración. Este aumento puede ser debido a que las partículas que había inicialmente en la muestra, se degradan en otras partículas más simples gracias a la oxidación por la aplicación de los tratamientos de regeneración, las cuales pueden ser contabilizadas como nuevas sales aumentando la concentración inicial.

El porcentaje de aumento de la CE con respecto al valor medio de las caracterizaciones, es de un 15,2% con la ozonización y un 18% con la cloración.

La salinidad, junto a la CE, es uno de los pocos parámetros que aumenta respecto al valor inicial tras la aplicación de las técnicas de regeneración. En este caso, el aumento ha sido del 15,2% tras la ozonización y del 17,97% tras la cloración.

Se considera que el aumento de salinidad puede haberse desencadenado por la misma razón considerada para la conductividad eléctrica, ya que ambos parámetros están relacionados con la cantidad de sales presentes en el agua. Aunque la concentración de estas sales haya aumentado tras los tratamientos, hay que tener en cuenta que siguen estando dentro del rango recomendado, siempre que no lleguen a 2 g/L, valor que simboliza un daño severo a los cultivos.

SAR (Relación de Absorción de Sodio)

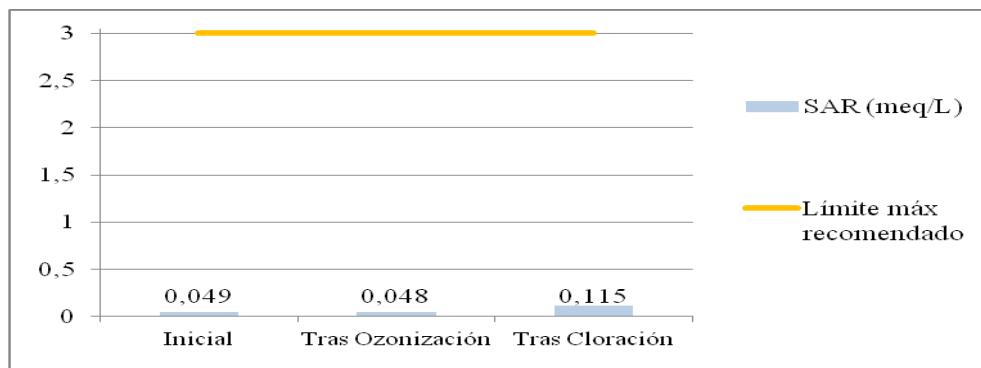


Figura 4.21: Variación del índice SAR. Fuente: elaboración propia.

La concentración inicial de SAR es extremadamente baja, y se encuentra muy lejos del límite máximo recomendado. Esta situación no ha variado tras la aplicación de ozono y cloro, ya que los valores siguen estando muy por debajo del rango de peligro para el cultivo. El valor de SAR no ha sufrido apenas disminución tras la ozonización, concretamente se ha reducido un 3,11%, mientras que ha aumentado un 130% con la cloración.

Puesto que el SAR se basa en la concentración de iones Magnesio, Calcio y Sodio, se presentan a continuación tres gráficas ilustrativas de la variación de estos parámetros.

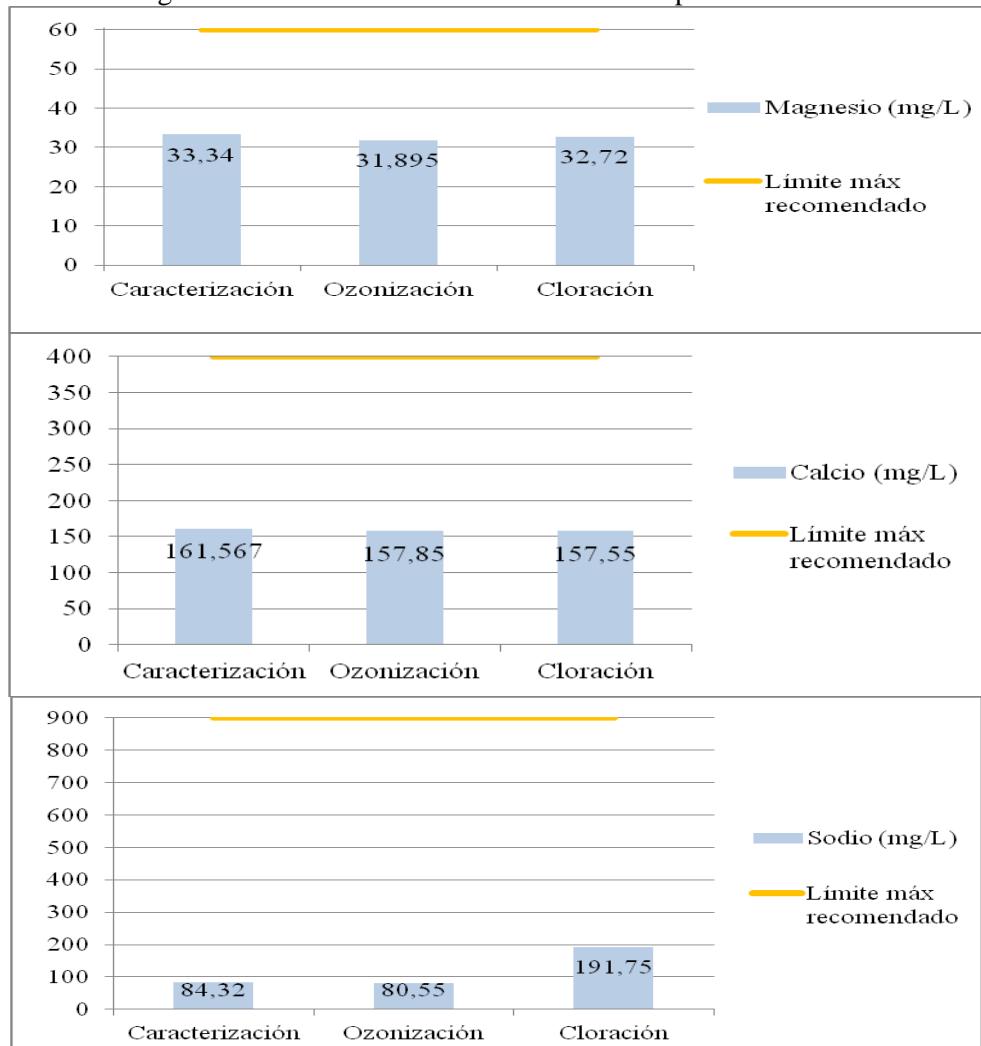


Figura 4.22: Variación de la concentración de los iones Magnesio, Calcio y Sodio. Fuente: elaboración propia.

Como se puede observar, el magnesio no sufre apenas variación tras la aplicación de ambas técnicas de regeneración. Concretamente, ha disminuido un 4,33 y 1,85% tras la ozonización y la cloración respectivamente.

El calcio, al igual que el magnesio, apenas se modifica tras la aplicación de ninguno de los dos tratamientos. Con la adición de ozono la concentración de calcio se ha reducido en un 2,3%, frente al 2,48% disminuido gracias al proceso de cloración.

El sodio ha sido el parámetro que ha tenido una de las variaciones más acusadas. Mientras que la ozonización ha logrado reducir en un 4,46% su concentración, el tratamiento de cloración la ha aumentado en un 127%, ya que todo el sodio añadido con el reactivo de cloración queda posteriormente en la muestra. De todas formas, la concentración de sodio tras la cloración no supone ningún daño para los cultivos (está muy lejos de su límite máximo).

Ya que el SAR depende de la concentración de los iones anteriores, y el magnesio y el calcio apenas han sufrido variación, se deduce que el incremento desmesurado de este índice ha sido ocasionado por la adición del reactivo de cloración, hipoclorito de sodio, lo que ha dado lugar a un incremento de la concentración de sodio en la muestra y por tanto del índice SAR.

Cloro y Ozono residuales

No se presentan gráficas de estos dos parámetros ya que no tienen variación, pues sólo aparecen tras la aplicación de sus respectivas técnicas.

Metales pesados

El resto de metales estudiados (Cobre, Níquel, Zinc, Aluminio, Boro, Mercurio, Cadmio, Cromo VI y Plomo) no poseen gráficas por ausencia de datos tras la aplicación de los tratamientos, ya que únicamente se han analizado tras el primer análisis del efluente sin tratar.

4.3.3 Análisis general de los procesos de regeneración aplicados

Para finalizar este capítulo, se ha dedicado un último apartado a una comparación final entre las dos técnicas de regeneración usadas, teniendo en cuenta los resultados obtenidos a escala de laboratorio.

En cuanto a la eficiencia de los dos procesos, ambos han obtenido buenos resultados en la reducción de los parámetros que resultaban problemáticos (aquellos cuya concentración inicial rebasaba el límite permitido por la legislación o superaban el valor máximo recomendado). Tanto el cloro como el ozono han demostrado su gran poder de desinfección ante los microorganismos presentes en el efluente, y ambos han reducido también la concentración de otros parámetros que se consideraban importantes, como por ejemplo el nitrógeno total, el fósforo o la DQO.

Sin embargo, como se ha podido comprobar en las gráficas del apartado anterior, el cloro ha alcanzado mayores porcentajes de reducción en la mayoría de los parámetros, exceptuando los metales (hierro y manganeso), en los que el ozono ha resultado ser el tratamiento más eficaz.

Aunque el ozono supone la mejor opción medioambientalmente hablando, sobre todo porque no genera subproductos altamente tóxicos (excepto en aguas con concentraciones de bromuros superiores a 0,10 mg/L), es la opción menos sostenible económicamente.

Se debe tener en cuenta igualmente que, aunque el cloro tiene el inconveniente de la generación de trihalometanos, actualmente no existe ninguna normativa que establezca un límite máximo de concentración de estos compuestos en aguas regeneradas para riego de cultivos. Además, y aunque pudiese afectar de alguna forma a los cultivos, el cloro residual es un factor muy importante que asegura el efecto de desinfección tras el tratamiento, el cual no posee el ozono. Para solucionar el posible efecto adverso del cloro residual en los cultivos, se podría ajustar al máximo la demanda de cloro y minimizar la cantidad de cloro residual, dejando siempre cierto mínimo que impida la posible reactivación de microorganismos.

Por último, y en el supuesto caso de que este proyecto se realizase a escala real, se debe recordar que la facilidad y bajo coste de aplicación que supone el tratamiento de cloración sería uno de los principales factores a tener en cuenta para la elección de uno de los procesos, ya que la EDAR donde se ha realizado el estudio pertenece a un municipio pequeño, donde una gran inversión para la instalación de un sistema generador de ozono no sería muy viable.

Se podría optar por la solución más costosa si la fiabilidad, durabilidad, sencillez de operación y disponibilidad de repuestos y suministros fuesen mejores que los del sistema menos costoso, pero en este caso el proceso más caro de aplicar tiene menor fiabilidad y eficiencia en su aplicación.

El cloro es una técnica que está bien establecida actualmente, que permite un control flexible de la dosificación, y con un mantenimiento sencillo y económico respecto a la ozonización.

5. CONCLUSIONES

Con respecto al estudio del efluente de la EDAR de Tauste

- No existe ninguna normativa vigente que regule el valor límite de ciertos parámetros en el agua de riego dependiendo del cultivo.
- Los efluentes de salida de las EDARs en general, poseen valores elevados de sólidos en suspensión, turbidez y gran variedad de gérmenes patógenos. Los contaminantes inorgánicos más comunes son el fósforo y el nitrógeno, y en algunos casos ciertos metales pesados.
- El caudal de vertido que llega a la EDAR tiene unas características de composición similares durante todos los meses del año, exceptuando ciertos parámetros en meses concretos.
- El efluente de salida de la EDAR de Tauste contiene valores altos de algunos parámetros, que impiden su reutilización sin previo tratamiento para riego de parcelas agrícolas, según el RD 1620/2007.
- Todos los parámetros del efluente analizados en laboratorio presentan valores que se encuentran dentro del rango habitual de valores para esos parámetros en la EDAR de Tauste.
- Se detectan altas concentraciones en todos los parámetros microbiológicos analizados en el efluente sin regenerar: huevos de nematodos, coliformes totales y *Escherichia coli*. Las concentraciones de estos tres parámetros sobrepasan su nivel legislado o recomendado para el riego de maíz.
- El manganeso es el único parámetro que sobrepasa su valor recomendado para el agua de riego en maíz.

Con respecto al área de estudio

- La catalogación de la zona obliga a obtener un agua de calidad superior debido a las condiciones establecidas sobre nutrientes (nitrógeno y fósforo).
- El caudal del efluente de salida disponible en la temporada de riego es mayor que el necesario para satisfacer las necesidades hídricas del parcelario de estudio, por lo que no se presentarían problemas de abastecimiento para el futuro regadío.
- La cantidad de agua de riego regenerada con la que se abastecerá a las parcelas será igual a la que anteriormente se obtenía de la acequia, y que ahora se vierte sin uso previo al río Arba, por lo que se alcanza una situación de mantenimiento de los caudales de entrada y salida de dicho río.

Con respecto a la aplicación de los tratamientos de regeneración

- Los parámetros tenidos en cuenta a la hora de elegir los tratamientos de regeneración más adecuados han sido aquellos que sobrepasaban su límite legislado o recomendado (huevos de nematodos, *Escherichia coli*, coliformes totales y manganeso), y otros importantes debido a la catalogación de la zona como sensible y vulnerable (fósforo y compuestos del nitrógeno).
- Las técnicas de regeneración elegidas para ser aplicadas en el efluente han sido la ozonización y la cloración. La razón de esta elección ha sido el alto poder desinfectante de ambos, que permite la disminución de las concentraciones de microorganismos que superan su límite legislado o recomendado, y su eficiencia en la reducción de compuestos del nitrógeno y metales como el manganeso.
- Ambos procesos de regeneración han disminuido todos los parámetros por debajo de su límite máximo legislado o recomendado, excepto el manganeso tras la cloración, que no ha alcanzado un valor por debajo de su máximo recomendado.
- El cloro tiene mayor rendimiento de reducción que el ozono en todos los parámetros excepto en los metales analizados (hierro y manganeso).
- Ambos procesos han logrado una desinfección casi completa de los microorganismos presentes inicialmente en el efluente.

- El nitrógeno total ha disminuido su concentración de forma muy acusada con la acción de los dos desinfectantes.
- La salinidad y la conductividad han aumentado tras la aplicación de las dos técnicas de regeneración, posiblemente debido a la degradación de las partículas presentes en el efluente por la acción oxidante del cloro y el ozono, que las degradan en partículas más pequeñas que se pueden contabilizar como nuevas sales.
- El valor del SAR aumenta de forma acusada tras la cloración, y, puesto que sólo uno de los tres iones en los que se basa ha sufrido variación (sodio), se deduce que el crecimiento del índice SAR se debe al aumento de la concentración de sodio. Sin embargo, su valor se sigue encontrando muy lejos de su límite máximo recomendado.

6. BIBLIOGRAFÍA

- Agriculture and Resources Management Council of Australia and New Zealand (ARMCANZ) and the Australian and New Zealand Environment and Conservation Council (ANZECC). "Australian Water Quality Guidelines for Fresh & Marine Water". 1992.
- ANDREOZZI, R.; CAPRIO, V.; INSOLA, A. (1990): "*Advanced oxidation processes (AOP) for water purification and recovery*". Università di Napoli. Napoli, Italy.
- Aplicación de la ozonización en el tratamiento de aguas: descripción y funcionamiento. Blogs Madrid. www.madrimasd.org/blogs [En línea el 7 de mayo de 2013].
- AVINASH, M.K.; PRAVIN, D.N.; OZA, G.H.; SHANKAR, H.S. (2009): "*Treatment of municipal wastewater using laterite-based constructed soil filter*". Ecological Engineering. Volume 35.
- AYERS, R. y WESTCOT, D. (1984). "*Calidad del agua para la agricultura*". Toma, Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación.
- AYRES, R.M.; DUNCAN, D. "*Analysis of Wastewater for Use in Agriculture*". Laboratory Manual of Parasitological and Bacteriological Techniques. Department of Civil Engineering University of Leeds. Leeds, England. World Health Organization (OMS). Geneva, 1996.
- BENNE, E.J.; LINDEN, J.D.; SPIKE, K. (1964): "*Composition of corn plants at different stages of growth and per-acre accumulations of essential nutrients*". Michigan State University.
- California Health Laws Related to Recycled Water. The Purple Book, June 2001 Edition. California Code of Regulations.
- Canadian Fertilizer Institute (1998): "*Nutrient uptake and removal field crops*". Western Canada. Canadian Fertilizer Institute. Ottawa, ON. United States.
- CÁRDENAS, C.; PERRUOLO, T.; OJEDA, M; CHIRINOS, M; HERRERA, F.; VARGAS, L.; TRUJILLO, A. (2006): "*Evaluación del proceso de nitrificación y desnitrificación en el tratamiento de aguas residuales utilizando un reactor por carga*". Centro de Investigación del Agua (CIA), Facultad de Ingeniería, Universidad del Zulia. Maracaibo, Venezuela.
- CEDEX (2008): "*Realización de una base de datos sobre los sistemas de reutilización de aguas depuradas en España*". Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas. Madrid. Gobierno de España, España.
- CROOK, J., JOHNSON, W.D. (1991): "*Health and Water Quality considerations with a Dual Water System*". Water Environmental and Technology.
- DOMÉNECH, J. "Ozono frente a cloro". Diplomado en ingeniería y gestión medio ambiental. www.jano.es [En línea 21 de mayo de 2013]. Sanidad Ambiental vol 23, núm 5, mayo 2004.
- DORRONSO C. "Contaminación de suelos por sales solubles". Universidad de Granada. Granada, España. 2001.
- DURON, N. S. (1985). "*Mexican experience in using sewage effluent for large-scale irrigation*". En: Pescod, M. B y Arar, A., ed., *Treatment and use of sewage effluent for irrigation*, Londres, Butterworths.
- EATON, A.D.; CLESHER, L.S.; RICE, W.E.; GREENBERG, A.E. (2005): "*Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*". 21st Edition. American Public Health Association (APHA), American Water Works Association (AWWA) & Water Environment Federation (WEF). ISBN: 9780875530475.
- ENOHSA Ente Nacional de Obras Hídricas de Saneamiento. Fundamentaciones de la desinfección. 2001. Ingeniería sanitaria. Facultad Regional Bahía Blanca. Buenos Aires, Argentina.
- Environmental Protection Agency, (1999). "*Folleto informativo de tecnología de aguas residuales. Desinfección con cloro*". EPA 832-F-99-062. United States.
- Environmental Protection Agency, (1999). "*Folleto informativo de tecnología de aguas residuales. Filtros Intermitentes de Arena*". EPA 832-F-99-067. United States.

- Environmental Protection Agency, (1999). “*Folleto informativo de tecnología de aguas residuales. Desinfección con ozono*”. EPA 832-F-99-063. United States.
- Environmental Protection Agency, (1999). “*Folleto informativo de tecnología de aguas residuales. Desinfección con luz ultravioleta*”. EPA 832-F-99-064. United States.
- España. Orden de 19 de julio de 2004, por la que se designan nuevas Zonas Vulnerables a la contaminación de las aguas por nitratos procedentes de fuentes agrarias en la Comunidad Autónoma de Aragón y se aprueba el Programa de Actuación sobre las mismas. Boletín Oficial de Aragón, 4 de agosto de 2004, núm. 91, pp. 7525-7530.
- España. Real Decreto 1620/2007, de 7 de diciembre, por el que se establece el régimen jurídico de reutilización de las aguas depuradas. Boletín Oficial del Estado, 8 de diciembre de 2007, núm. 294.
- España. Real Decreto 261/1996, de 16 de febrero, sobre la protección de las aguas contra la contaminación producida por los nitratos procedentes de fuentes agrarias. Boletín Oficial del Estado, 11 de marzo de 1996, núm. 61, pp. 9734-9737.
- EUROZON Tratamiento de Agua con Ozono. Página web www.eurozon.com [En línea el 7 de mayo de 2013].
- FAO, 1985. “*Water Quality for Agriculture. Guidelines for interpretations of water quality for irrigation*”. Food and Agriculture Organization, Rome, Italy.
- FOLCH, M.; ALCALDE, L.; TAPIAS, J.C. (2008): “*Secondary effluent reclamation: combination of pre-treatment and disinfection technologies*”. Water Science and technology. Volume 57.
- Gobierno de Aragón. Departamento de Agricultura, Ganadería y Medio Ambiente. Secretaría General Técnica. “*Medio Ambiente en Aragón*”. Informe 2011. Aragón, España.
- GOMEZ LOPEZ, M. “Parámetros de control de los procesos de regeneración del agua”. Universidad Politécnica de Cataluña. 2008.
- GONZALEZ, F. “Contaminación por fertilizantes”. Doctorado en Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible. Universidad Nacional Agraria de la Selva de Tingo María-Perú, (2011). Perú. fgonzalesh.blogspot.com.es
- GUERRERO GARCÍA, A. (1999): “*Cultivos herbáceos extensivos*”. Ed. Mundi Prensa.
- HASSANLI, A.M.; EBRAHIMIZADEH, M.A.; BEECHAM, S. (2009): “*The effects of irrigation methods with effluent and irrigation scheduling on water use efficiency and corn yields in a arid region*”. Agricultural Water Management. Volume 3.
- International Development (1992). Manual on Guidelines for Water Reuse. Center for Environmental Research Information, Cincinnati, Ohio.
- Instituto Aragonés del Agua. Gobierno de Aragón. Zaragoza.
- ISO 5815:1989: *Water Quality-Determination of biochemical oxygen demand after 5 days (DBO₅). Dilution and seeding method*.
- ISO 7027:1999: *Water Quality-Determination of turbidity*.
- BAEZA RUIZ, J. “Reutilización de aguas residuales para riego”. Proyecto Fin de Máster. Universidad de Alicante. Alicante, España.
- JORDÁN, Y. (2008). “*Regeneración de aguas residuales urbanas para su reutilización*”. Postgrado de Ingeniería de los Recursos Hídricos.
- KALAVROUZIOTIS, I.K.; KOUKOULAKIS, P.H.; SAKELLARIOU-MAKRANTONAKI, M.; PAPANIKOLAU, C. (2009): “*Effects of treated municipal wastewater on the essential nutrient interactions in the plant of Brassica oleracea var. Italica*”. Desalination. Volume 242.
- KATSOYIANNIS AND SAMARA, (2006): “*Persistent organic pollutants (POPs) in the sewage treatment plant of Thessaloniki, Northern Greece: occurrence and removal*”. Water Research. Volume 38.
- KOLTHOFF, I.M., BELCHER, R. (1957): “*Volumetric Analysis III*”. Wiley Interscience. New York, United States.
- KUSTER, M.; LÓPEZ DE ALDA, M.J.; HERNANDO, M.D.; PETROVIC, M.; MARTÍN-ALONSO, J.; BARCELÓ, D. (2008): “*Analysis and occurrence of*

- pharmaceuticals, estrogens, progestogens, and polar pesticides in sewage treatment plant effluents, river water and drinking water in the Llobregat river basin (Barcelona, Spain)".* J. Hydrology. Volume 358.
- LAZAROVA, V., AKIÇCA, B. (2004): "Water reuse for irrigation: agriculture, landscapes, and turf grass". CRC Press. United States.
 - LLORENTE, C.; LEYDA, L.; COSTA, S.; SALA, L. (2005): "Tratamiento avanzado con membranas del efluente secundario de la EDAR de Castell-Platja d'Aro (Costa brava, Girona)". Jornadas Técnicas de Gestión de Estaciones Depuradoras de Aguas Residuales.
 - MELGAREJO, J. "Efectos ambientales y económicos de la reutilización de aguas en España". 2009. Clm Economía. Num. 15, pp. 245-270.
 - METCALF & EDDY, INC. (1995): "Ingeniería de aguas residuales: tratamiento, vertido y reutilización". McGraw-Hill/Interamericana de España, S.A., Aravaca.
 - Metcalf & Eddy, Inc. 1991. Wastewater Engineering: Treatment, Disposal, and Reuse. 3d ed. The McGraw-Hill Companies. New York, United States.
 - MIGUEL SALCEDO, N. "Estudio de la eliminación de plaguicidas presentes habitualmente en aguas de la Cuenca del Ebro mediante procesos de oxidación avanzada". Dirección Peña Ormad. Tesis por la Universidad de Zaragoza. Zaragoza, Marzo 2010.
 - Ministerio de Medio Ambiente, Secretaría de Estado de Aguas y Costas (2000). "Libro Blanco del Agua en España". Dirección General de Obras Hidráulicas y Calidad de las Aguas. Centro de Publicaciones.
 - MOLLEDA, P.; BLACO, I.; ANSOLA, G.; DE LUIS, E. (2008): "Removal of wastewater pathogen indicators in a constructed wetland in Leon, Spain". Ecological Engineering.
 - Monográficos de Agua en Centroamérica. "Manual de depuración de aguas residuales urbanas". Alianza por el Agua. Fundación Ecología y Desarrollo.
 - MUJERIEGO, R. (1990): "Riego con agua residual municipal regenerada. Manual Práctico". Ediciones Universitat Politecnica de Catalunya, Barcelona.
 - ASANO T., MUJERIEGO R. (1994): "Water Quality Guidelines for Wastewater Reuse". Comunicaciones de las Jornadas Técnicas Biosólidos y aguas depuradas como recursos. Consorci de la Costa Brava. Girona
 - MUJERIEGO, R.; GARCIA, J.; JOVÉ, J.; (1993): "Factors affecting the suspended solids and organic matter concentrations of an experimental high rate oxidation pond". Progress in Biotechnology of Photoautotrophic Microorganisms.
 - MUJERIEGO, R. "La reutilización planificada del agua. Aspectos reglamentarios, sanitarios, técnicos y de gestión". Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona, España.
 - MUÑOZ, I.; GÓMEZ, M.J.; MOLINA-DÍAZ, A.; HUIJBREGTS, M.A.J.; FERNÁNDEZ-ALBA, A.R.; GARCÍA-CALVO, E. (2008): "Ranking potential impacts of priority and emerging pollutants in urban wastewater through life cycle impact assessment". Chemosphere. Volume 74.
 - Organización Mundial de la Salud, (1989). Directrices Sanitarias sobre el Uso de Aguas Residuales en Agricultura y Acuicultura. Informe del Grupo Científico de la OMS: Serie de informes técnicos 778. Ginebra, Suiza.
 - PRATS, D. (2011): "Conceptos generales sobre reutilización. Calidad del agua y usos posibles". Catedrático de Ingeniería Química de la Universidad de Alicante. España.
 - RODRIGUEZ, J.; RODRÍGUEZ, G.; SERODES, J.; SADIQ, R.: "Subproductos de la desinfección del agua potable: formación, aspectos sanitarios y reglamentación". Revista Interciencia, vol.32 no.11 Caracas, Noviembre 2007.
 - SAINZ SASTRE, J.A. (2005): Tecnologías para la sostenibilidad. Procesos y operaciones unitarias en depuración de aguas residuales. Colección EOI Medio Ambiente. Escuela de Organización Industrial, España.
 - SANTOS, J.L.; APARICIO, M.; CALLEJÓN, M.; ALONSO, E. (2009): "Occurrence of pharmaceutically active compounds during 1-year period in wastewaters from tour

- wastewater treatment plants in Seville (Spain)". Journal of Hazardous Material. Bolumen 164.*
- SEGUÍ, L. (2004). "Sistemas de Regeneración y Reutilización de Aguas Residuales. Metodología para el Análisis Técnico-Económico y Casos". Tesis Doctoral. Departamento de Ingeniería Agroalimentaria y Biotecnología. Universidad Politécnica de Cataluña.
 - Sirlene Araujo Díaz. "Persiste escasez de la harina de maíz regulada". Entrada del 2 de septiembre del 2012. Página web www.panorama.com.ve [En línea 29/04/2013].
 - STRAUSS, M. y BLUMENTHAL, U. J. (1989). "Health aspects of human waste use in agriculture and aquaculture-Utilization practices and health perspectives". Dübendorf, Centro Internacional de Referencia sobre Evacuación de Desechos.
 - UNE-EN 7888:1985: *Determinación de conductividad eléctrica por el método electrométrico.*
 - UNE-EN 5663/840. *Determination of Kjeldahl-nitrogen Method after mineralization with selenium.*
 - UNE-EN 9308-1. *Detección y recuento de Escherichia coli y de bacterias coliformes.* Parte 1: Método de filtración en membrana.
 - Unión Europea. Directiva 2006/1/CE, de 15 de febrero de 2006, relativa a la protección de aguas subterráneas contra la contaminación y el deterioro. Diario Oficial de las Comunidades Europeas, 4 de marzo de 2006, núm. 64, pp. 52-59.
 - Unión Europea. Directiva 2008/105/CE del Consejo, de 16 de diciembre de 2008, relativa a las Normas de Calidad en el ámbito de la política de aguas. Diario Oficial de las Comunidades Europeas, de 24 de diciembre de 2008, núm. 348, pp. 84-97.
 - Unión Europea. Directiva 91/271/CEE del Consejo, de 21 mayo de 1991, sobre el tratamiento de las aguas residuales urbanas. Diario Oficial de las Comunidades Europeas, 30 de mayo de 1991, núm. L135.
 - United States Environmental Protection Agency and United States Agency for International Development. (1992): "Guidelines for Water Reuse". Municipal Support Division Office of Wastewater Management Office of Water. Washington DC, United States.
 - VACA, M.; MAGDALENO, L.; SOSA, M.; MONROY, M.; JIMÉNEZ, B.: "Tratamiento terciario de aguas residuales por filtración e intercambio iónico". Universidad Autónoma Metropolitana-Azcapotzalco. Coyoacán, México.
 - VISO RODRÍGUEZ, A. Director del Centro Tecnológico de la Energía y del Medio Ambiente. "Reutilización de aguas residuales para riego. Tendencias tecnológicas". Jornadas sobre Tratamiento de Aguas Residuales Industriales conectadas a Redes Públicas de Alcantarillado (2005). Murcia, España.
 - Visor IBERPIX. Página web www2.ign.es/iberpix [En línea 29/04/2013].
 - Visor SIGPAC. Página web sigpac.mapa.es [En línea 29/04/2013].
 - VOMOCIL, J.A., HART, J. (1992): "Irrigation Water Quality. Fertilizer Guide". Fr 76. Oregon State University. United States.
 - WÉRY, N.; LHOUTELLIER, C.; DUCRAY, F.; DELGENÉS, J.P.; GODON, J.J. (2008): "Behaviour of pathogenic and indicator bacteria during urban wastewater treatment and sludge composting, as revealed by quantitative PCR". Water Research.
 - WHITE, G.C. (2010): "Handbook of Chlorination and Alternative Disinfectants". 5th edition. Wiley Interscience, New York, NY.

7. ANEXOS

ANEXO I: CARACTERIZACIONES DE LOS PARÁMETROS ANALIZADOS EN EL EFLUENTE DE SALIDA DE LA EDAR DE TAUSTE

La información se presenta a continuación dividida en tres tablas que especifican los valores de los parámetros obtenidos de cada una de las tres caracterizaciones (análisis completos del efluente), y las unidades en las que han sido medidos.

I.1 Primera Caracterización

1ª Caracterización	
Huevos	10
Nematodos	huevos/10L
<i>Escherichia coli</i>	3300 UFC/100ml
SS	19,71 mg/L
Turbidez	10,20 NTU
Nitrógeno total	11,90 mg/L
NO_3^-	0,58 mg/L
Fósforo total	0,80 mg/L
DBO_5	12,60 mgO ₂ /L

DQO	20,00 mgO ₂ /L
Coliformes totales	450 UFC/100ml
Mn	0,23 mg/L
Fe	0,14 mg/L
pH	7,1
CE	1,317 dS/cm
Salinidad	0,84 g/L
SAR	0,051 meq/L
Mg	34,52 mg/L
Na	86,85 mg/L
Ca	163,10 mg/L

Boro	0,13 mg/L
Cd	0,004 mg/L
Pb	0,076 mg/L
Al	0 mg/L
Zn	0,027 mg/L
Ni	0 mg/L
Cr+6	0 mg/L
Hg	0 mg/L
Cu	0,033 mg/L
Cl^- residual	0 mg/L

I.2 Segunda Caracterización

2ª Caracterización	
Huevos	3 huevos/10L
Nematodos	
<i>Escherichia coli</i>	1000 UFC/100ml
SS	23,50 mg/L
Turbidez	3,13 NTU
Nitrógeno total	6,70 mg/L

NO_3^-	0,95 mg/L
Fósforo total	1,01 mg/L
DBO_5	9,60 mg O ₂ /L
DQO	29,90 mgO ₂ /L
Coliformes totales	142 UFC/100ml
Mn	0,19 mg/L
Fe	1,24 mg/L

pH	6,88
CE	1,334 dS/cm
Salinidad	0,85 g/L
SAR	0,050 meq/L
Mg	34,02 mg/L
Na	85,12 mg/L
Ca	162,70 mg/L
Cl^- residual	0 mg/L

I.3 Tercera Caracterización

3ª Caracterización	
Huevos	15
Nematodos	huevos/10L
<i>Escherichia coli</i>	230 UFC/100ml
SS	19,00 mg/L
Turbidez	5,19 NTU
Nitrógeno total	12,88 mg/L
NO_3^-	2,50 mg/L

Fósforo total	1,20 mg/L
DBO_5	10,10 mg O ₂ /L
DQO	23,00 mg O ₂ /L
Coliformes totales	1340 UFC/100ml
Mn	0,21 mg/L
Fe	0,21 mg/L
pH	7,02

CE	1,405 dS/cm
Salinidad	0,89 g/L
SAR	0,048 meq/L
Mg	31,50 mg/L
Na	80,99 mg/L
Ca	158,90 mg/L
Cl^- residual	0 mg/L

ANEXO II: DATOS DE LOS PARÁMETROS ANALIZADOS TRAS LA APLICACIÓN DE LOS PROCESOS DE REGENERACIÓN

II.1 Concentraciones analizadas de cada parámetro en el efluente tras la aplicación de ozono.

	Parámetro	Límite normativa	Recomendación	Dato obtenido 1 ^a ozonización	Dato obtenido 2 ^a ozonización
PARÁMETROS LEGISLADOS	Huevos de nematodos intestinales	1 huevo/10L		0 huevos/10L	0 huevos/10L
	<i>Escherichia coli</i>	1000 UFC/100mL		15 UFC/100ml	32 UFC/100ml
	Sólidos en Suspensión	35 mg/L		8 mg/L	7 mg/L
	Turbidez		No se fija límite	5,70 NTU	3,92 NTU
	Nitrógeno Total	15 mg/L		3,64 mg/L	0,896 mg/L
	Nitratos		<5 mg/L	0,5 mg/L	1 mg/L
	Fósforo		2 mg/L	1,04 mg/L	0,7 mg/L
	DBO ₅	25 mg O ₂ /L		7,4 mgO ₂ /L	6,1 mgO ₂ /L
PARÁMETROS RECOMENDADOS	DQO	125 mgO ₂ /L		10,1 mgO ₂ /L	13 mgO ₂ /L
	Coliformes totales		1-200UFC/100mL	35 UFC/100 ml	80 UFC/100ml
	Manganeso		0,1 mg/L	0,078 mg/L	0,076 mg/L
	Hierro		5 mg/L	2,06 mg/L	0,16 mg/L
	pH		6-9	7,71	7,42
	Conductividad		0,7-3 dS/m	1,46 dS/cm	1,65 dS/cm
	Salinidad		0,45-2 g/L	0,93632 g/L	1,185 g/L
	SAR		<3,0 meq/L	0,0486	0,0478
	Magnesio		60mg/L	31,40 mg/L	32,39 mg/L
	Sodio		900mg/L	80,98 mg/L	80,13 mg/L
	Calcio		400 mg/L	157,1 mg/L	158,6 mg/L
	Ozono residual			<0,01 mg/L	<0,01 mg/L

II.2 Concentraciones analizadas de cada parámetro en el efluente tras la aplicación de cloro.

	Parámetro	Límite normativa	Recomendación	Dato obtenido 1 ^a Cloración	Dato obtenido 2 ^a Cloración
PARÁMETROS LEGISLADOS	Huevos de nematodos intestinales	1 huevo/10L		0 huevos /10 L	0 huevos/ 10L
	<i>Escherichia coli</i>	1000 UFC/100m L		8 UFC/100 ml	2 UFC/100 ml
	Sólidos en Suspensión	35 mg/L		9 mg/L	4 mg/L
	Turbidez	No se fija	No se fija límite	2,88	2,74
	Nitrógeno Total	15 mg/L		1,4 mg/L	0,896 mg/L
	Nitratos		<5 mg/L	0,38 mg/L	0,43 mg/L
	Fósforo		2 mg/L	0,96 mg/L	0,2 mg/L
	DBO ₅	25 mgO ₂ /L		4,8 mg O ₂ /L	4,4 mg O ₂ /L
	DQO	125 mgO ₂ /L		7,9 mg O ₂ /L	7 mg O ₂ /L
PARÁMETROS RECOMENDADOS	Coliformes totales		1- 200UFC/100mL	0 UFC/100ml	0 UFC/100ml
	Manganeso		0,1 mg/L	0,173 mg/L	0,149 mg/L
	Hierro		5 mg/L	0,43 mg/L	0,15 mg/L
	pH		6-9	7,82	7,48
	Conductividad Eléctrica		0,7-3 dS/m	1,65 dS/cm	1,54 dS/cm
	Salinidad		0,45-2 g/L	1,06 g/L	0,98 g/L
	SAR		<3,0 meq/L	0,1125	0,1164
	Magnesio		60mg/L	32,91 mg/L	32,53 mg/L
	Sodio		900mg/L	188,9 mg/L	194,6 mg/L
	Calcio		400 mg/L	158,2 mg/L	156,9 mg/L
	Cloro residual		<1 mg/L	0,3 mg/L	0,4 mg/L

ANEXO III: CÁLCULOS DETALLADOS DE LAS DEMANDAS DE REACTIVOS PARA LA APLICACIÓN DE LOS TRATAMIENTOS DE REGENERACIÓN

III.1 Cálculo de la demanda de ozono

Seguidamente se detalla el proceso de cálculo de la demanda de ozono. Este procedimiento se explica teóricamente en el apartado 3.3 (Procedimiento experimental).

$$O_3 \text{ consumido} = O_3 \text{ introducido} - (O_3 \text{ no consumido} + O_3 \text{ residual disuelto})$$

El O_3 introducido se mediante la recta de calibrado proporcionada por el laboratorio. Mediante la ecuación de dicha recta de calibrado se obtiene este valor:

$$\begin{aligned} Y &= 15,087x - 1,6444 & R^2 &= 0,9997 \\ Y &= (15,087 * 2,17 \text{ min}) - 1,6444 \\ Y &= 31,09 \text{ mg } O_3 \end{aligned}$$

Donde:

2,17 = minutos de ozonización necesarios para el volumen de muestra, calculados mediante la recta de calibrado.

El O_3 no consumido, en mg/h, se calcula en la siguiente expresión (donde 24 es el peso equivalente del ozono):

$$\text{mg } O_3 = 5.5mL \times 0.025N \times \left(\frac{250}{100mL} \right) \times 24$$

$$O_3 \text{ no consumido} = 8,25 \text{ mg } O_3$$

El O_3 se considera despreciable, pues el ozono que no reacciona tiene la propiedad de degradarse rápidamente tras su aplicación.

Por último, solo queda completar la ecuación inicial para obtener la cantidad de O_3 consumido:

$$\begin{aligned} O_3 \text{ consumido} &= 31,09 - (8,25 + 0) \\ O_3 \text{ consumido} &= 22,84 \text{ mg } O_3 / 2 \text{ litros de muestra} \end{aligned}$$

Si se utilizan 22,84 mg O_3 por cada 2 litros de muestra, se divide este valor por dos para obtener el dato de O_3 necesario para ozonizar un litro de muestra de efluente: 10,42 mg O_3 /L

Este resultado se repite de igual forma para el cálculo de la demanda de ozono en la segunda réplica de ozonización. Para este segundo caso se ha obtenido un valor de 11,56 mg O_3 /L de muestra.

El valor medio de la demanda de ozono en las dos pruebas es de 10,99 mg O_3 /L de muestra.

III.2 Cálculo de la demanda de cloro

Seguidamente se detalla el proceso de cálculo de la demanda de cloro (DC). Este procedimiento se explica teóricamente en el apartado 3.3 (Procedimiento experimental).

La dosis de cloro suministrada a la muestra en mg de Cl₂/L (Do) se calcula con la expresión:

$$D_o = 8,3mL * 0,025N * 35,5 * (1000 / 100mL)$$

$$D_o = 73,6625 \text{ mg Cl}_2/\text{L}$$

Gracias a este resultado se conoce también la concentración exacta del reactivo de cloración (R_c) que vendrá dada por la expresión:

$$R_c = 73,6625 * 350 / 5$$

$$R_c = 5156,375 \text{ mg Cl}_2/\text{L}$$

El cloro residual en la muestra en mg de Cl_2/L (R) vendrá dado por la expresión:

$$R = 1,7 \text{ mL} * 0,025 \text{ N} * 35,5 * (1000 / 100 \text{ mL})$$

$$\begin{aligned} R &= 15,0875 \\ \text{mg de Cl}_2/\text{L} \end{aligned}$$

Por último, para calcular la demanda de cloro de la muestra, se realiza la siguiente ecuación:

$$CD = 73,6625 - 15,0875 \text{ (mg Cl}_2/\text{L})$$

$$CD = 58,575 \text{ mg Cl}_2/\text{L}$$

Una vez calculada la demanda de cloro, se realiza el siguiente cálculo:

$$58,575 \text{ (mg Cl}_2/\text{L muestra)} * 2,5 \text{ L muestra} = 5156,375 \text{ (mg Cl}_2/\text{L reactivo)} * V$$

$$V = 0,02839 \text{ L de reactivo} = 28,39 \text{ mL de reactivo de cloración}$$

Si por cada 2,5 L de muestra, se deben añadir 28,39 mL de reactivo de cloración, por cada litro de muestra se usarán 11,356 mg Cl_2/L .

Este proceso se repite para el cálculo de la demanda de cloro de la segunda réplica de cloración, en la cual se obtiene un valor de 10,389 mL de reactivo por litro de muestra.

El valor medio de la demanda de cloro de las dos pruebas es de 10,872 mL de reactivo.

ANEXO IV: IMAGEN 2.22 CON MAYOR DETALLE

