

PROYECTO FIN DE MÁSTER

PRETRATAMIENTO DE UN AGUA DE SALIDA DE EDAR QUE VA A SER REGENERADA POR UN PROCESO DE OXIDACIÓN AVANZADA

Autor: Francisco de Asís Abad Ruiz

Director: José María Matesanz Martín

**MÁSTER UNIVERSITARIO DE INICIACIÓN A LA INVESTIGACIÓN EN
INGENIERÍA QUÍMICA Y MEDIO AMBIENTE**

Ingeniería Química y del Medio Ambiente

Universidad de Zaragoza

Septiembre 2010

Pretratamiento de un agua de salida de EDAR que va a ser regenerada por un proceso de oxidación avanzada.

Resumen

Hacia el 2050 la población expuesta a tensión hídrica o escasez de agua ascenderá 4.000 millones de personas (UNPF 1997; Garnet-Outlaw 1997), estos datos pueden verse incluso agravados por el efecto invernadero, siendo España uno de los países europeos que más riesgo corre de incrementar sus problemas de disponibilidad de agua dulce (Ministerio de Medio Ambiente 2000). Ante esta problemática la Unión Europea, a través de la Directiva Marco Europea del Agua (2.000), propuso que siempre que sea posible se lleva a cabo la reutilización de las aguas.

España ha tomado la iniciativa en la regulación de la reutilización de aguas residuales depuradas a través del RD 1620/2007 de 7 de Diciembre. En él se establece unos estándares de calidad para el agua regenerada dependiendo del uso que se le vaya a dar posteriormente. Este posible uso le otorga a este “agua usada y regenerada” un mayor valor añadido (De Bustamante et al. 2010), por lo que invita a la comunidad investigadora a reestudiar los tratamientos que se hacían en la depuración de aguas residuales en esta nueva matriz, con el objetivo de alcanzar los niveles de calidad del agua que se han establecido en el citado Real Decreto.

Este trabajo (Matesanz, J.M. 2010, anexo I) se enmarca dentro de la línea de Investigación que dirige el Prof. Doctor Ovelleiro, relativa al uso de métodos de oxidación avanzada en el tratamiento de aguas (Ormad, M.P. 1993; Ormad, M.P. 2008). En concreto este trabajo estudia la precipitación química en un agua residual sintética ya depurada como vía para:

1. Por un lado, etapa previa para un tratamiento de oxidación avanzada (eliminando sólidos en suspensión)
2. Por otro, pueda ser un tratamiento por si mismo que habilite al agua para ser empleada en otros usos.

En este trabajo se han estudiado las condiciones de operación óptimas (pH y dosis) de diversos coagulantes de aluminio (convencional, comerciales: SAF056 con 8.26% Al₂O₃ y SAF560HC con 10.50% Al₂O₃), hierro (convencional) y aluminio/hierro (comercial: SAF05670 con 28.5% FeCl₃ y 5.7% Al₂O₃) con cal como coagulantes, llegando a rendimientos de eliminación de sólidos por encima del 95%, y de DQO por encima del 80%.

Los mejores resultados encaminados a que la precipitación química fuera una etapa previa a la oxidación avanzada se han obtenido con el coagulante comercial SAF056 (96.4 % de eliminación de Sólidos en Suspensión y 97.5% de Turbidez). Sin embargo si se considera prioritaria la eliminación de DQO, los mejores resultados se obtuvieron con el SAF05670 (87.2 % de eliminación de DQO, 96.2 % de Turbidez y 96.5 % de Sólidos en Suspensión).

Además se tanteó emplear el reactivo Fenton de una forma poco habitual intentando utilizar la gran cantidad de hierro libre antes de la coagulación, añadiendo el agua oxigenada antes de la precipitación química. Los resultados obtenidos no fueron satisfactorios.

Índice:

1.- Introducción	3
1.1.- Ciclo del agua doméstica.....	3
1.1.1.- Captación y consumo	3
1.1.2.- Características del agua residual doméstica	6
1.1.3.- Agua residual doméstica depurada. Características del vertido y tratamiento.	7
1.2.- Reutilización del agua	7
1.2.1.- Legislación (RD1620/ 2007)	7
1.2.2.- Tratamiento tipo	9
1.2.3.- Ejemplos reutilización de agua en España	10
2.- Objetivos	11
3.- Metodología.....	12
3.1.- Agua residual sintética	12
3.1.- Metodología analítica	12
3.2.- Coagulación-floculación-Decantación.....	14
3.2.1.- Reactivos	14
3.2.2.- Variables.....	14
3.2.3.- Manejo de la muestra	14
3.4.- Fenton	16
3.4.1.- Reactivos	16
3.4.2.- Manejo de la muestra	16
4.- Resultados	17
4.1.- Caracterización del agua de salida de la depuradora	17
4.2.- Precipitación química.....	18
4.2.1.- Optimización pH.....	18
4.2.2.- Optimización de la dosis	20
4.3.- Influencia de la carga contaminante inicial en el tratamiento por precipitación química .	23
4.4.- Fenton	24
5.- Resumen y conclusiones.....	25
6.- Bibliografía	28
ANEXO I Comunicación-Póster.....	30
Anexo II Ejemplos de reutilización de agua residual urbana depurada en España.....	37
ANEXO III Criterios de calidad para la reutilización de aguas según sus usos.....	39
Anexo IV Tratamiento biológico.....	46
ANEXO V REACTIVOS.....	49
Anexo VI Precipitación química.....	52
Anexo VII Proceso Fenton	67
Anexo VIII Metodología analítica	69

1.- Introducción

El agua es esencial para la vida, la gran mayoría del volumen de agua disponible en la tierra es agua salada siendo el porcentaje de agua dulce aproximadamente de un 2.5% (ver tabla I) (Gleick 1996), por lo que existe un conflicto creciente en relación a la accesibilidad de este bien indispensable

Tabla I Estimación global de la distribución mundial de agua dulce (Gleick 1996)

Fuente de agua	Volumen de agua (km ³)	% agua dulce	% agua total
Lagos, pantanos	102500	0.29%	0.008%
Ríos	2120	0.006%	0.0002%
Agua total fresca	35030000	100%	2.5%
Agua total mundial	1386000000	---	100%

Dejando a un lado tanto la educación y concienciación de las personas para llevar a cabo un uso inteligente y minimizado del agua, y dejando también de lado las tecnologías de desalación del agua, la Directiva Marco Europea del Agua promueve el uso siempre que se pueda de Agua Regenerada.

Se entiende por agua regenerada las aguas residuales depuradas que han sido sometidas a un proceso de tratamiento adicional o complementario que permite adecuar su calidad a un uso posterior (RD 1620/2007).

La reutilización de las aguas es la aplicación, antes de su devolución al dominio público hidráulico y al marítimo terrestre, para un nuevo uso privativo de las aguas que, habiendo sido utilizadas por quien las derivó, se han sometido al proceso o procesos de depuración establecidos en la correspondiente autorización de vertido y a los necesarios para alcanzar la calidad requerida en función de los usos a que se van a destinar (RD 1620/2007).

1.1.- Ciclo del agua doméstica

Entendemos como ciclo del agua doméstica el recorrido que hace esta desde que es captada de un medio natural (río, pozo, mar,...) hasta que es devuelta a otro medio natural.

Se van a analizar brevemente las principales etapas de este ciclo.

1.1.1.- Captación y consumo

Captación

El agua antes de llegar al consumidor es captada, conducida hasta una Estación de Tratamiento de Agua Potable (ETAP) y posteriormente es suministrada.

Lo principal en la captación, es (RD 140/2003):

- El agua destinada a la producción de agua de consumo humano podrá proceder de cualquier origen, siempre que no entrañe un riesgo para la salud de la población abastecida.
- La calidad del agua de la captación deberá ser tal que pueda ser potabilizada con los tratamientos de potabilización previstos en el abastecimiento.

Consumo

A nivel mundial, en lo que se refiere al consumo de agua, existe una gran problemática. Como ya se ha visto, el agua es un bien escaso y además no está repartido homogéneamente. Por otro lado, la población mundial no para de crecer. El efecto de estas situaciones puede verse con claridad en las figuras I (Brandt, L., Hoechst, A.G., Niederlassung, K. 2002) y II (Hinrichsen, D., Robey, B., Upadhyay, U.D 1998)

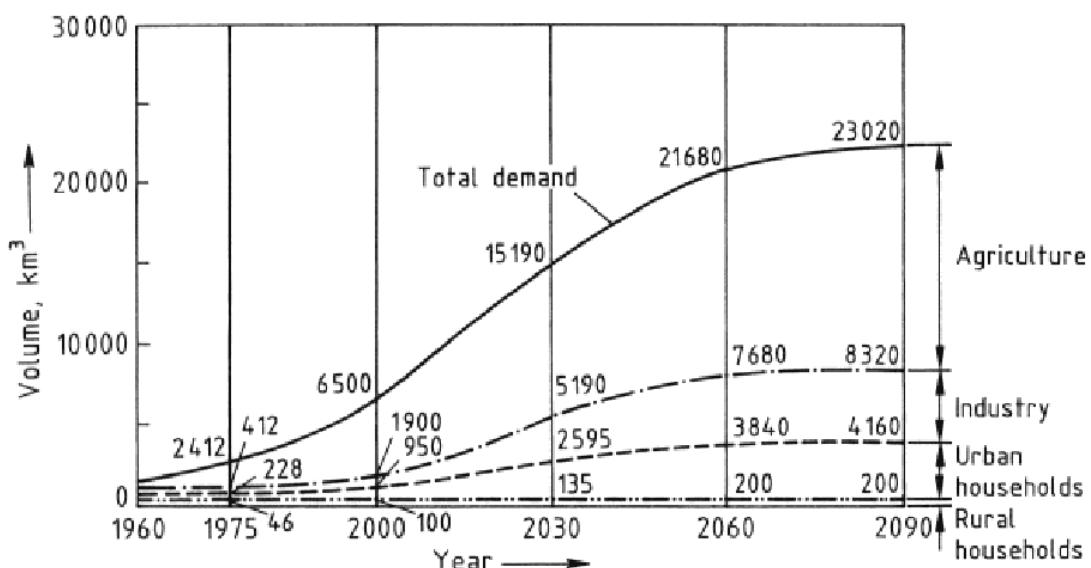


Figura I Demanda de agua a lo largo de los años

En esta figura se observa el incremento de la demanda total de agua a lo largo de los años de manera muy rápida, hasta llegar a un punto en el cual la demanda se mantiene casi constante debido a que ya se estará explotando el máximo posible de agua.

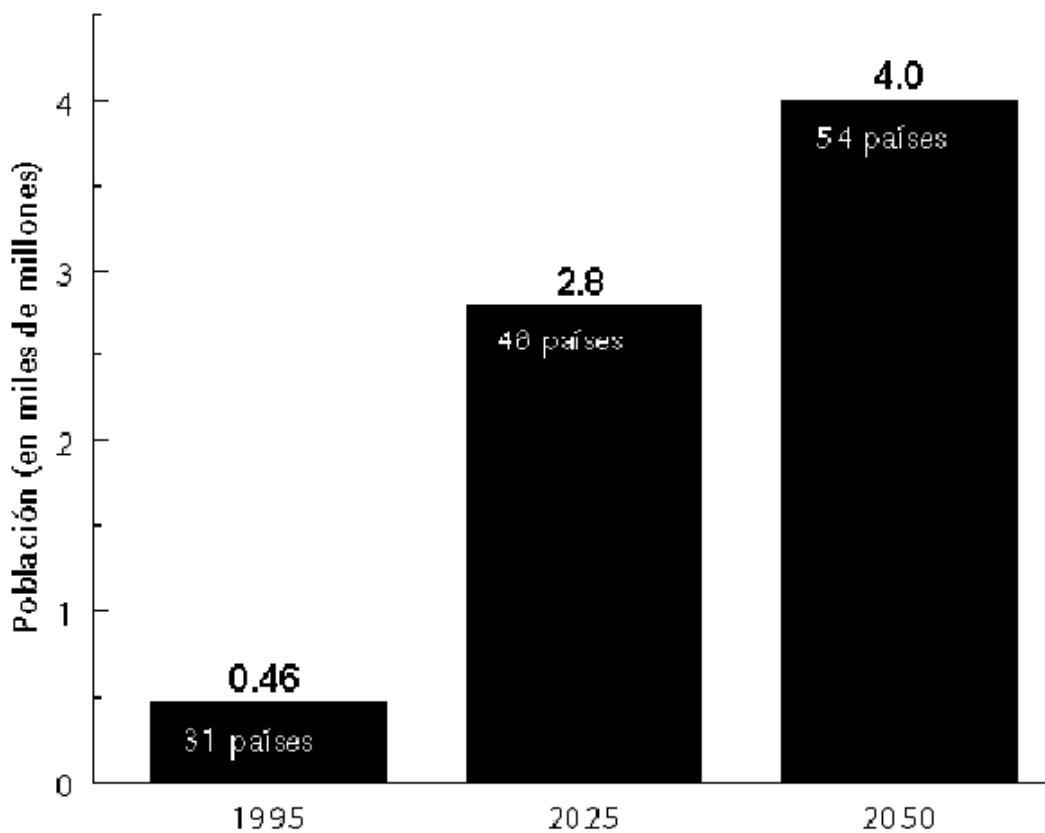


Figura II La población en países con escasez de agua y tensión hídrica, 1955-2050

En la figura II se observa un crecimiento progresivo y muy rápido de los países con escasez de agua o tensión hídrica y a su vez también la población. En el 2050 habrá 4.000.000.000 de personas con escasez de agua.

A modo de ejemplo se puede observar en la tabla II el consumo medio de agua de los hogares en España, los consumos mayor en inferior de agua y también el de Aragón en (L/hab/día) en el año 2008,(Instituto Nacional de Estadística 2010).

Tabla II Consumo de agua por comunidad autónoma (L/hab/día)

CC.AA	Consumo
Navarra (Comunidad Foral de)	131
Aragón	150
Comunitat Valenciana	189
Consumo medio en España	154

Este consumo genera un gran volumen de agua residual. Esta agua debe ser posteriormente depurada para poder devolverla a su cauce y completar el ciclo del agua.

Una alternativa antes de devolver el agua depurada al medio natural, es reutilizarla. En la figura III se puede observar el volumen de agua reutilizada en 2007 según la demarcación hidrográfica terrestre (Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino 2007).

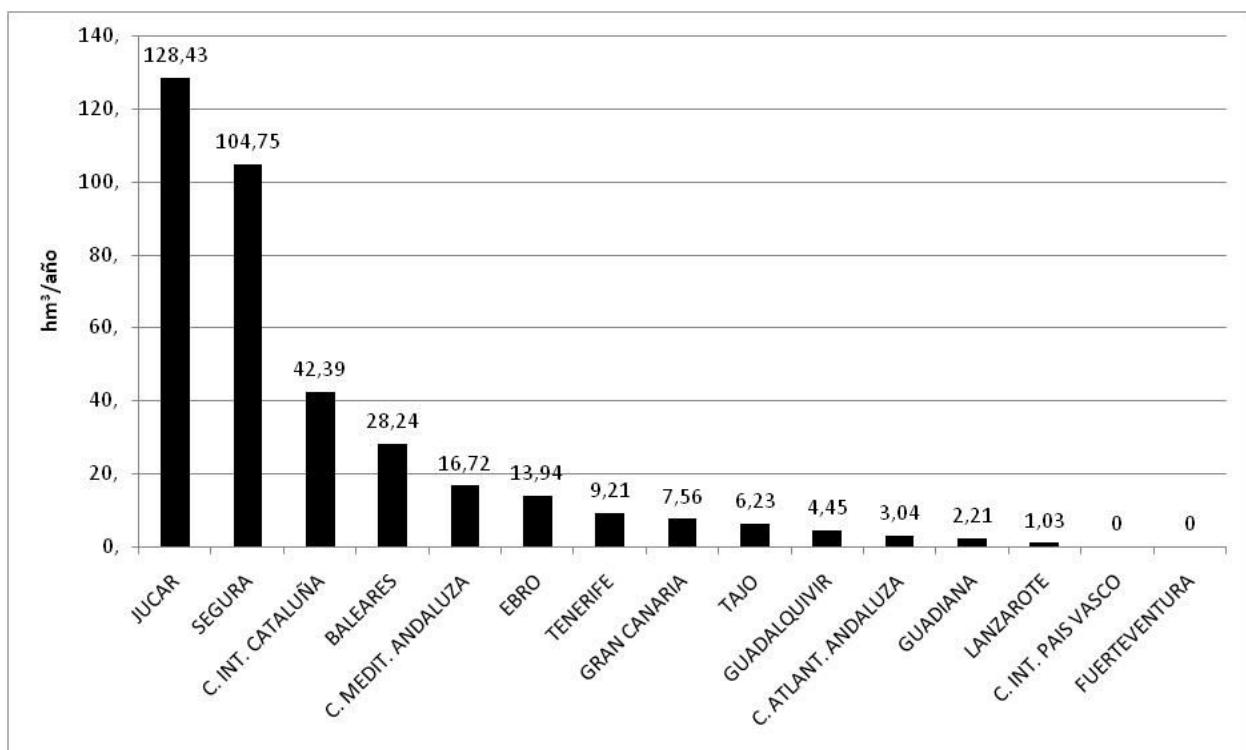


Figura III Volumen de agua reutilizada en el 2007

1.1.2.- Características del agua residual doméstica

En la tabla III se puede observar la composición típica de un agua residual doméstica (Metcalf 1995). Los diferentes valores de concentración de los contaminantes dependen del tejido industrial que vierta al alcantarillado municipal de esa población.

Tabla III Composición típica del agua residual doméstica bruta

Contaminantes	Unidades	Concentración		
		Débil	Media	Fuerte
Sólidos totales	mg/L	350	720	1200
Disueltos totales	mg/L	250	500	850
Sólidos en suspensión	mg/L	100	220	350
Sólidos sedimentables	mg/L	5	10	20
DBO ₅	mg/L	110	220	400
COT	mg/L	80	160	290
DQO	mg/L	250	500	1000
Nitrogeno total (en forma de N)	mg/L	20	40	85
Fósforo total (en forma de P)	mg/L	4	8	15
Cloruros	mg/L	30	50	100

Sulfato	mg/L	20	30	50
Alcalinidad (como CaCO ₃)	mg/L	50	100	200
Grasa	mg/L	50	100	150
Coliformes totales	nº/100 mL	10 ⁶ -10 ⁷	10 ⁷ -10 ⁸	10 ⁷ -10 ⁹
Compuestos orgánicos volátiles	µg/L	<100	100-400	>400

1.1.3.- Agua residual doméstica depurada. Características del vertido y tratamiento.

Una agua residual doméstica después del proceso de depuración debe cumplir valores máximos admisibles en una serie de parámetros (además de unos porcentajes mínimos de reducción en el proceso de depuración), como puede mostrarse en la tabla IV (RD 509/1996; Gorriaz, D. 2010):

Tabla IV Requisitos para los vertidos procedentes de instalaciones de depuración mediante tratamiento secundario

Parámetro	Concentración	Porcentaje mínimo de reducción
DBO ₅ (RD 509/1996)	25 mg O ₂ /L	70-90 %
DQO (RD 509/1996)	125 mg O ₂ /L	75 %
Sólido en Suspensión Totales (RD 509/1996)	35 mg/L	90 %
E-Coli (Gorriaz, D. 2010)	8.300 · 10 ⁴ UFC/100 mL	-

Dejando de lado el tratamiento de los fangos generados en la depuración del agua residual doméstica el tratamiento típico de depuración es mostrado en la figura IV:

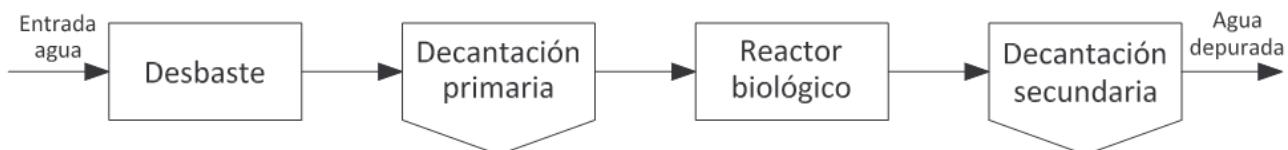


Figura IV Tratamiento de un agua residual doméstica

1.2.- Reutilización del agua

1.2.1.- Legislación (RD 1620/2007)

La entrada en vigor del RD 1620/2007 regula la reutilización de las aguas depuradas, entre otras cosa, establece unos estándares de calidad para el uso de agua regenerada en España dependiendo del uso que se les vaya a dar.

La reutilización de aguas residuales depuradas puede requerir un proceso de tratamiento adicional o complementario que permite adecuar su calidad al uso al que se destinan.

Este Real Decreto distingue 5 usos diferentes (ver Anexo III):

- Urbanos (calidad 1.1 y 1.2)
- Agrícolas (calidad 2.1, 2.2 y 2.3)
- Industriales (calidad 3.1 a, 3.1 b, 3.1 c y 3.2)
- Recreativos (calidad 4.1 y 4.2)
- Ambientales (calidad 5.1 y 5.2)

Los cuales a su vez tienen diferentes usos posibles y diferentes calidades del agua regenerada exigidas. Todos los criterios de calidad para la reutilización de las aguas según sus usos tienen en común 4 parámetros regulados, que son turbidez, sólidos en suspensión, nematodos intestinales y Escherichia Coli. Además de otros posibles criterios, dependiendo del uso que se vaya a dar al agua regenerada, como podrían ser otros contaminantes, legionella spp, salmonella,...

En la figura V están representados mediante barras los valores máximos admisibles de sólidos en suspensión y Escherichia Coli en función del uso que se les vaya a dar al agua regenerada y los valores máximos de estos en las aguas de salida de una EDAR sólidos en suspensión (RD 509/1996) y Escherichia Coli (Gorriaz 2010). El valor máximo admisible de Escherichia Coli a la salida de una EDAR no está fijado y en este caso se trata de un valor típico de salida.

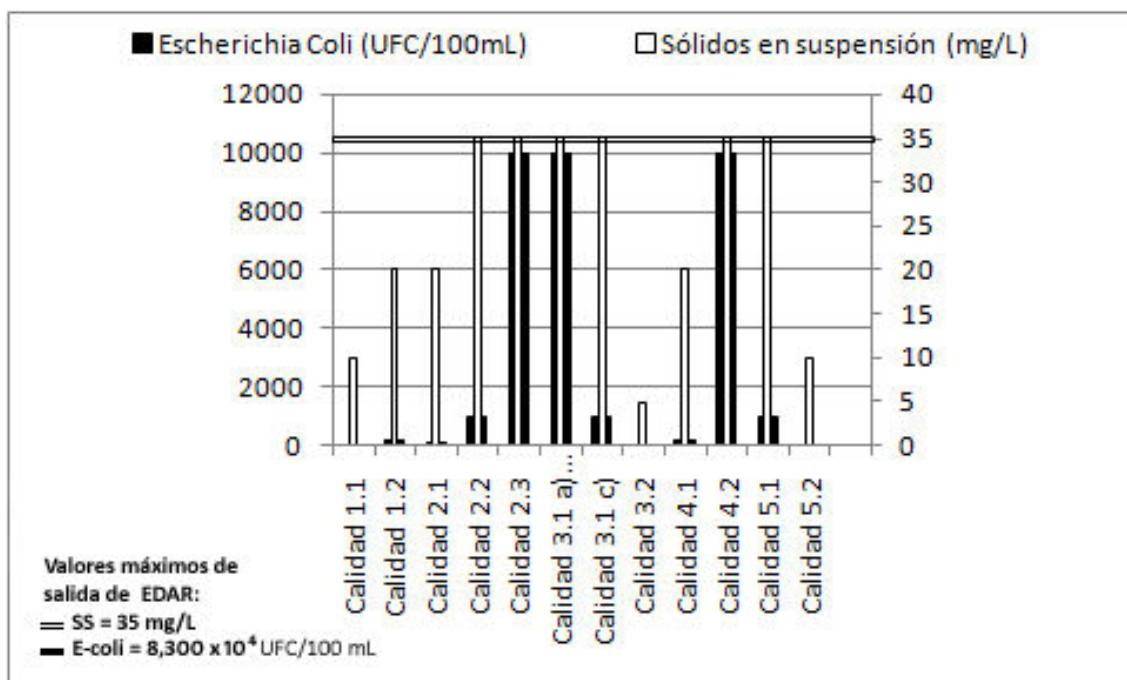


Figura V VMA de sólidos en suspensión y E-Coli atendiendo al uso que se vaya a hacer del agua regenerada

1.2.2.- Tratamiento tipo

Se ha visto como el RD 1620/2007 habla para todos los usos posibles de agua regenerada de 4 parámetros clave: dos relacionados con los sólidos q lleva el agua (turbidez y sólidos en suspensión), y otros dos con los microorganismos que suele presentar (nematodos intestinales y Escherichia Coli). Los posibles tratamientos necesarios para obtener agua regenerada a partir del agua residual depurada tendrán q atender al menos, a estos parámetros

Existen multitud de tratamientos que pueden darse al agua depurada para que esta pueda ser reutilizada, en la tabla V se puede observar un resumen de las distintas operaciones unitarias o procesos aplicables al agua depurada en función del tipo de constituyente del que se tiene interés en eliminarlo:

Tabla V Operaciones unitarias o procesos en función del constituyente a eliminar del agua (Asano 2007)

Operación unitaria o proceso	Tipo de constituyente									
	Sólidos en suspensión	Sólidos coloidales	Materia orgánica particulada	Materia orgánica disuelta	Nitrógeno	Fósforo	Oligoelementos	Sólidos disueltos totales	Bacterias	Quistes protozoarios y oocistos
Tratamiento secundario	X			X						
Secundario con eliminación de nutrientes				X	X	X				
Filtración de lecho profundo	X							X	X	
Filtración superficial	X	X	X					X	X	
Microfiltración	X	X	X					X	X	
Ultrafiltración	X	X	X					X	X	X
Flotación por aire	X	X	X						X	X
Nanofiltración		X	X			X	X	X	X	X
Ósmosis inversa			X	X	X	X	X	X	X	X
Electrodialisis	X							X		
Adsorción con carbón activado			X			X				
Intercambio iónico				X		X	X			
Oxidación avanzada		X	X			X		X	X	X
Desinfección		X						X	X	X

La eliminación de los microorganismos patógenos contenidos en un agua residual tratada se consigue mediante un proceso de desinfección. Para asegurar la inactivación total de los microorganismos indicadores presentes en un agua es necesario reducir al mínimo

posible el contenido de sólidos en suspensión y la turbidez del agua a tratar, ya que las partículas ofrecen a los microorganismos una barrera protectora frente a la acción de los desinfectantes (Aguirre et al. 2004).

La eliminación de los sólidos en suspensión y la turbidez del agua pueden conseguirse sometiendo por ejemplo al agua a una precipitación química o coagulación-floculación-sedimentación para así posteriormente poder realizar al agua residual urbana depurada una desinfección.

La desinfección del agua se realiza generalmente por cloración, ultravioletas o por Procesos de Oxidación Avanzada.

El proceso de coagulación-floculación-sedimentación además de mejorar el rendimiento de la desinfección y permitir cumplir la legislación vigente en materia de reutilización de aguas, además evitará posibles obstrucciones en las conducciones al eliminar sólidos en suspensión.

1.2.3.- Ejemplos reutilización de agua en España

La reutilización de aguas depuradas en España se realiza desde hace décadas (De Bustamante et al. 2010), siendo uno de los países en los que esta práctica está más extendida. Sin embargo, no se llega a reutilizar más del 5% del total de las aguas residuales recogidas, aunque en algunos casos, como en Canarias, el agua depurada ha llegado a suponer un 20% del agua consumida. Dos zonas interesantes a tener en cuenta en lo referente a la reutilización de aguas, en las Islas Canarias para riego de campos de Golf y Cataluña donde el agua es inyectada para generar una barrera hidráulica contra la intrusión marina del acuífero (ver Anexo II).

2.- Objetivos

El objetivo principal de este trabajo es estudiar la precipitación química en la regeneración de aguas residuales depuradas, para ello se han marcado los siguientes objetivos generales:

1. Estudiar la viabilidad de que la precipitación química en un agua residual urbana depurada pueda cumplir el Real Decreto 1620/2007.
2. Desarrollar una etapa previa para facilitar el tratamiento de oxidación avanzada en la regeneración de aguas residuales depuradas.
3. Estudiar la viabilidad de aplicar el reactivo Fenton antes de la precipitación química.

Para alcanzar estos objetivos generales se ha propuesto:

- Evaluar la eficacia del tratamiento basándose en la reducción de DQO, COT, turbidez y sólidos en suspensión.
- Estudiar distintos coagulantes :
 - Convencionales: FeCl_3 , $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$
 - Comerciales: SAF056, SAF05670 y SAF560HC
- Definir las condiciones de operación óptimas (dosis y pH de coagulación) para cada uno de estos coagulantes.
- Comparar los resultados obtenidos con lo valores máximos admisibles regulados en el Real Decreto 1620/2007.

3.- Metodología

En la figura VI, se puede observar de forma esquemática la metodología de este trabajo.

3.1.- Metodología analítica

La metodología analítica llevada a cabo en este estudio se encuentra detallada en el Anexo VIII. A continuación se puede observar en la tabla VI un resumen de esta.

Parámetro	Equipo	Norma
DQO (mgO ₂ /L)		
Sólidos en suspensión (mg/L)	Fotómetro multiparamétrico Hanna HI 83099	De acuerdo con los métodos EPA
Turbidez (UNT)	Turbidímetro Hanna LP 2000	Norma ISO 7027
Carbono orgánico total (mgC/L)	Analizador de COT Shimadzu, modelo TOC-V _{CSH}	Método estándar 5310B

Tabla VI Metodología analítica

3.2.- Agua residual sintética

Para llevar a cabo la preparación de la muestra es necesario someter a un tratamiento biológico en una planta depuradora de laboratorio un agua residual doméstica sintética.

La preparación del agua residual doméstica sintética se lleva a cabo realizando una disolución de 25 L de los siguientes productos y sus cantidades respectivas mostrados en la tabla VII.

Tabla VII productos y cantidades para la preparación del agua residual doméstica sintética

Producto	Masa (gramos)
Pectona de carne	4
Extracto de carne	2.75
Urea	0.75
NaCl	0.175
CaCl ₂ ·2H ₂ O	0.100
MgSO ₄ ·7H ₂ O	0.050
K ₂ HPO ₄	0.7
Glucosa	5

Esta agua es sometida al tratamiento biológico para obtener el agua residual doméstica depurada (ver anexo IV, tratamiento biológico).

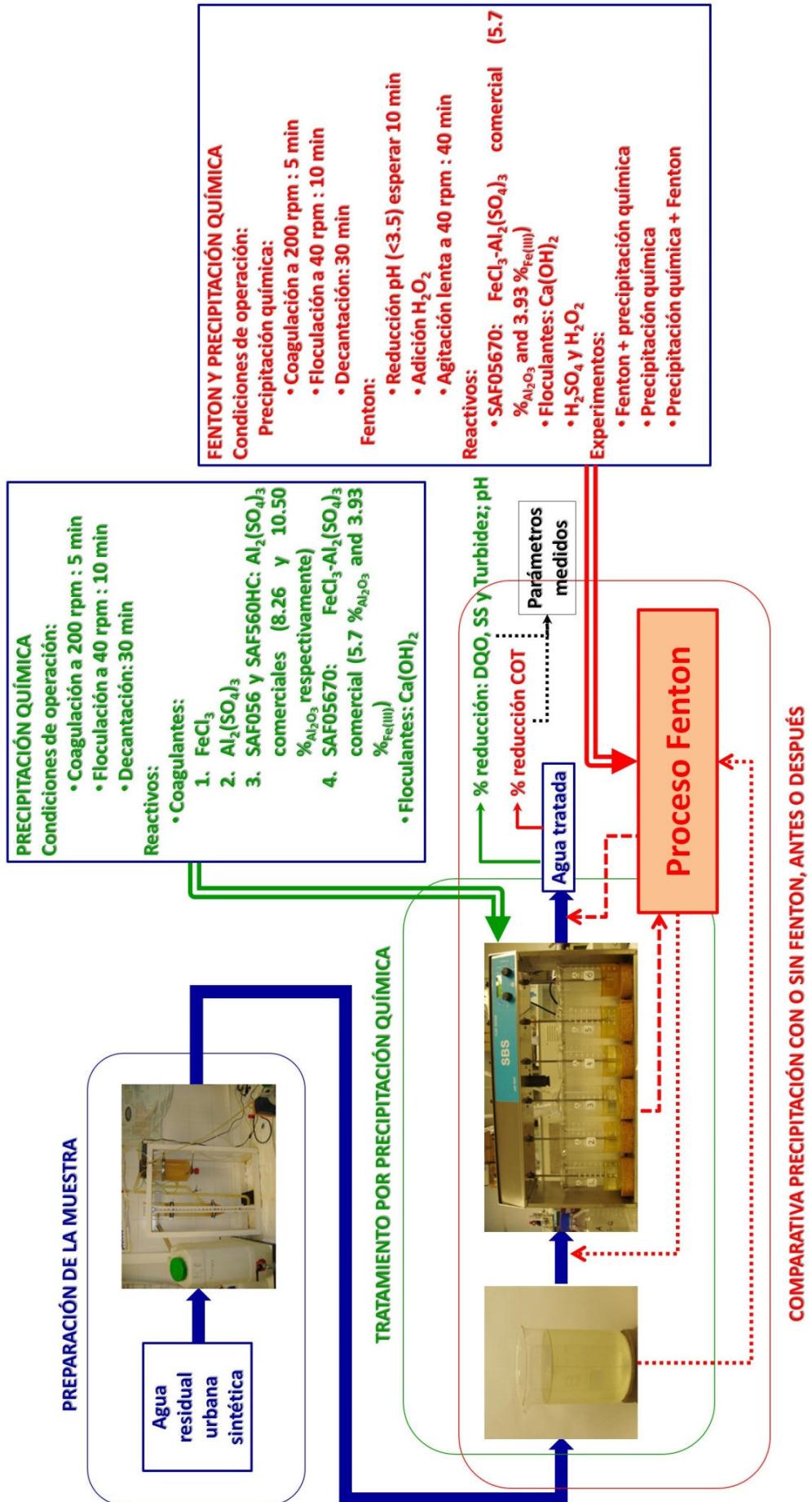


Figura VI Esquema de trabajo sobre la precipitación química

Hay que asegurarse de tener muestra suficiente para realizar toda la tanda de experimentos, esto es aproximadamente 1.8 L de agua sintética residual doméstica depurada (6 vasos con 250 mL y el resto para determinar condiciones iniciales y como reserva por si hay algún percance a lo largo del experimento).

Dada la dificultad de caracterizar la cantidad de sólidos en suspensión totales por la pequeña cantidad de estos presentes en el agua residual doméstica sintética depurada, se procede a añadir una cantidad de los lodos recirculados en la depuradora para incrementar la concentración de los sólidos en suspensión totales (con el consecuente incremento de turbidez y DQO). Esta adición además facilita trabajar con agua semejante en toda la investigación en un intervalo de sólidos en suspensión de 25-35 mg/L.

3.3.- Coagulación-floculación-Decantación

3.3.1.- Reactivos

Los reactivos utilizados son los siguientes:

Coagulantes: FeCl₃, Al₂(SO₄)₃, SAF056, SAF05670 y SAF560HC (ver anexo V, reactivos).

Floculantes: Ca(OH)₂.

3.3.2.- Variables

El rango de pH estudiado, dependiendo del coagulante empleado ha sido entre pH 6 y pH 11.

Las concentraciones de coagulantes han sido dentro de los rangos más frecuentes empleados en la depuración de aguas, entre 50 y 250 mg de Fe y/o Al por litro de vertido.

Los coagulantes estudiados se citan en el apartado anterior.

En todos los casos el floculante empleado ha sido la cal.

3.3.3.- Manejo de la muestra

Una vez obtenida la muestra sintética, se llevan a cabo la determinación de parámetros analíticos y la precipitación química.

Asegurándose que la muestra está en continua agitación para que sea homogénea la distribución de sólidos en suspensión, se miden el pH inicial, los sólidos en suspensión y la turbidez (ver anexo VIII, metodología analítica). Posteriormente se hace la corrección de sólidos en suspensión y se introducen 250 mL en cada uno de los 6 vasos.

Una vez realizado estas operaciones, se procede a realizar la precipitación química teniendo en cuenta que los experimentos se llevan a cabo en un orden determinado; primero se determina el pH óptimo del proceso y posteriormente la dosis óptima. En la tabla VIII y IX se muestran las dosis iniciales utilizadas con cada coagulante y el rango de pH al que se ha trabajado.

Tabla VIII Dosis y pH utilizados en la determinación del pH óptimo con cada coagulante

Coagulante	Dosis utilizada	Rango de pH
FeCl₃	100 mg/L de FeCl ₃ ·6H ₂ O	7-11
Al₂(SO₄)₃	100 mg/L de Al ₂ (SO ₄) ₃ ·18H ₂ O	7-11
SAF056	100 mg/L de Al ₂ (SO ₄) ₃ ·18H ₂ O	6-10
SAF560HC	150 mg/L de Al ₂ (SO ₄) ₃ ·18H ₂ O	6-10
SAF05670	150 mg/L de Al ₂ (SO ₄) ₃ ·18H ₂ O	6-10

Tabla IX Dosis y pH utilizados en la determinación de la dosis óptima con cada coagulante

Coagulante	Dosis utilizada	pH
FeCl₃	50, 100, 150 y 200 mg/L de FeCl ₃ ·6H ₂ O	8
Al₂(SO₄)₃	100, 200 y 300 mg/L de Al ₂ (SO ₄) ₃ ·18H ₂ O	7
SAF056	50, 100, 150 y 250 mg/L de Al ₂ (SO ₄) ₃ ·18H ₂ O	8.5
SAF560HC	50, 100 y 250 mg/L de Al ₂ (SO ₄) ₃ ·18H ₂ O	7
SAF05670	50, 100, 150 y 250 mg/L de Al ₂ (SO ₄) ₃ ·18H ₂ O	8

Búsqueda del pH óptimo

Se añade la misma dosis del coagulante estudiado.

Se incrementa el pH mediante la adición de Ca(OH)₂ y posteriormente se lleva a cabo la coagulación-floculación-sedimentación siguiendo los siguientes parámetros de operación:

- Coagulación: 5 min a 200 revoluciones por minuto (en el Jar test).
- Floculación: 15 min a 40 revoluciones por minuto (en el Jar test).
- Decantación: 30 minutos.

Por último se realizan las medidas que caracterizan el agua después del proceso (ver anexo VIII, metodología analítica)

Todos los experimentos se realizaron por triplicado.

Búsqueda de la dosis óptima

Una vez determinado el pH óptimo para llevar a cabo la precipitación química con el coagulante estudiado, se procede a realizar una serie de experimentos con objeto de determinar la dosis óptima del coagulante.

Se añade una dosis distinta en cada vaso (3 dosis distintas con sus respectivas réplicas).

Mediante la adición de Ca(OH)₂ se lleva el pH hasta el valor del óptimo determinado anteriormente.

Como en el caso anterior se lleva a cabo la coagulación-floculación-sedimentación siguiendo los mismos parámetros de operación anteriores:

Finalmente se realizan las medidas que caracterizan el agua después del proceso (ver anexo VIII, metodología analítica).

3.4.- Fenton

3.4.1.- Reactivos

Coagulantes: SAF05670 (sal compuesta de hierro y aluminio)

Floculante: $\text{Ca}(\text{OH})_2$

H_2SO_4 y H_2O_2 .

3.4.2.- Manejo de la muestra

Asegurándose de tener una muestra homogénea mediante agitación, se miden el pH y el COT (ver anexo VIII, metodología analítica).

Posteriormente se realizan los experimentos con esta agua residual doméstica sintética depurada.

En este apartado se distinguen tres experimentos distintos con la misma muestra y el pH y dosis óptimos determinados anteriormente.

1.- Fenton + Precipitación química.

2.- Precipitación química.

3.- Precipitación química + Fenton.

En los tres casos la precipitación química se realiza del mismo modo que anteriormente.

A la hora de realizar el proceso Fenton primero se reduce el pH de la muestra con H_2SO_4 hasta que este sea menor de 3.5 y se esperan 10 min para asegurarse de eliminar todos los carbonatos, posteriormente se añade la dosis de H_2O_2 (15 mg/L) y se deja reaccionar durante 30 min con agitación lenta continua.

Si después de realizar el proceso Fenton se realiza la precipitación química, se incrementa el pH hasta el óptimo mediante la adición de $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

Después se determina el COT del agua tratada de las tres formas (ver anexo VIII, metodología analítica).

Tanto la dosis utilizada de coagulante como el pH al que se llevo la precipitación química, son los obtenidos como óptimos en la parte de precipitación química (150 mg/L $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ y pH 8).

4.- Resultados

4.1.- Caracterización del agua de salida de la depuradora

En las figuras VII y VIII se muestra la variabilidad del agua de salida de la planta depuradora a lo largo de los experimentos realizados.

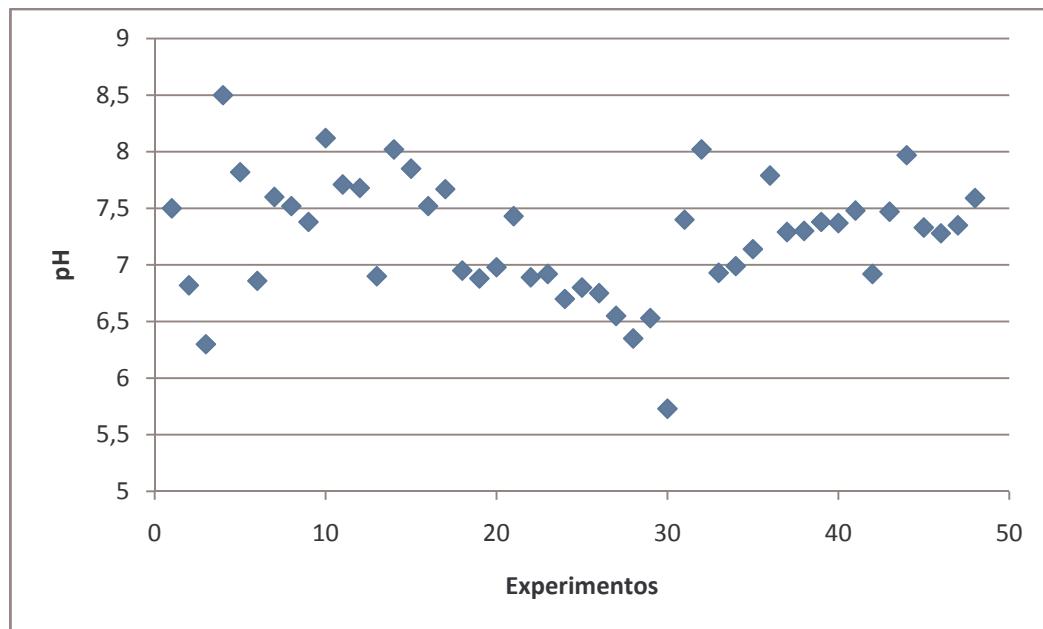


Figura VII Variación del pH del agua de salida de la depuradora frente al tiempo

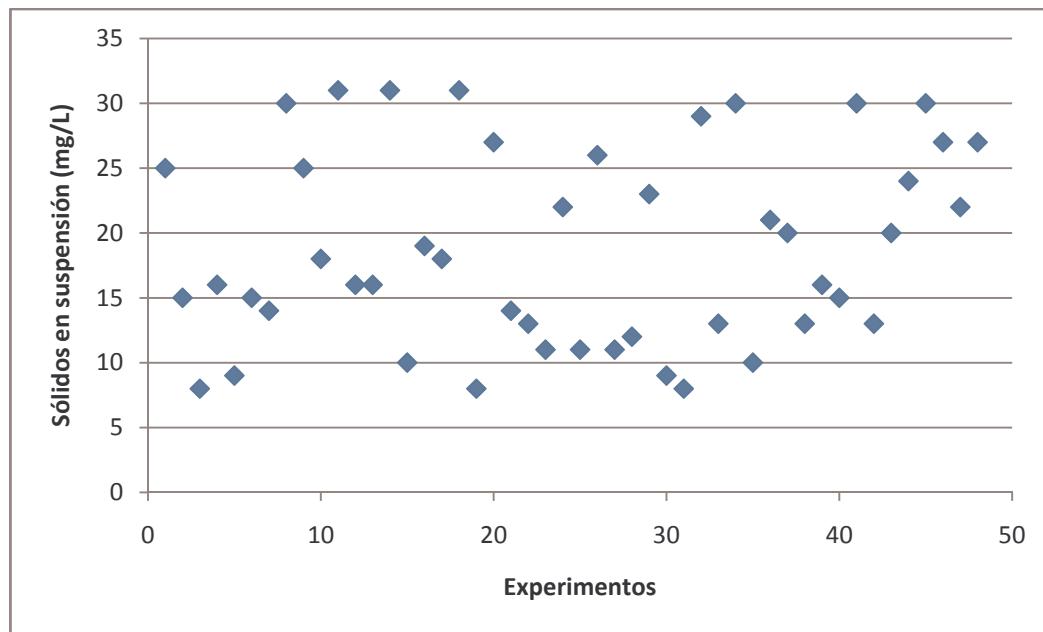


Figura VIII Variación de los sólidos en suspensión del agua de salida de la depuradora frente al tiempo

Las características de la muestra varían de un día para otro lo que dificulta enormemente la repetitividad de los resultados. Como ya se comentó en la metodología, tanto por lo heterogéneo de la muestra de partida, como por la baja concentración de sólidos

presentes en el agua en numerosas ocasiones, se optó por agregar sólidos del decantador para trabajar con muestras iniciales con concentración de sólidos en suspensión aproximadas de 30 mg/L, tomando como referencia el Real Decreto 509/1996.

Las características medias del agua de salida de la depuradora instalada en el laboratorio después de corregir los SS son las mostradas en la tabla X.

Tabla X características generales del agua residual urbana depurada después de corregir los SS

pH	DQO(mg O ₂ /L)	Turbidez (UNT)	SS (mg/L)
8.5	75	26.9	17

4.2.- Precipitación química

En este subapartado se muestran los resultados tendentes al elegir el mejor coagulante, y que condiciones (dosis y pH) son las óptimas para alcanzar los objetivos propuestos.

4.2.1.- Optimización pH

A continuación se muestran los resultados obtenidos en la optimización del pH para el proceso de precipitación química con los diferentes coagulantes.

Sales de hierro

FeCl₃:

Los resultados obtenidos son mostrados en la tabla XI.

Tabla XI Reducciones de turbidez, SS y DQO obtenidas con FeCl₃ variando el pH

pH	% reducción turbidez	% reducción SS	% reducción DQO
7	96,6	88,7	43,8
8	97,0	89,2	41,6
9	89,9	85,2	30,2
10	68,0	71,8	29,0
11	69,8	66,7	31,8

El pH óptimo es 8, consiguiendo las máximas reducción de DQO y SS aunque la reducción de DQO es ligeramente menor que a pH 7.

Sales de aluminio

$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$:

En la tabla XII se pueden observar los resultados obtenidos:

Tabla XII Reducciones de turbidez, SS y DQO obtenidas con sulfato de aluminio variando el pH

pH	% reducción turbidez	% reducción SS	% reducción DQO
7	85,9	75,0	45,1
9	13,4	31,3	47,6
11	-41,2	31,3	36,6

Así pues el pH óptimo para llevar a cabo la operación es 7.

A pH 11 se observa un incremento de la turbidez de casi el 50%, el Al(OH)_3 a pH's altos se puede disolver formando otro hidróxido de aluminio raro (Al(OH)^{2-}) que es insoluble a estos pH's, de aspecto gelatinoso y translúcido que confiere al agua depurada un incremento de la turbidez.

SAF056:

Se pueden observar los resultados obtenidos en la tabla XIII.

Tabla XIII Reducciones de turbidez, SS y DQO obtenidas con SAF056 variando el pH

pH	% reducción turbidez	% reducción SS	% reducción DQO
6	95,7	95,8	81,1
8	97,5	96,4	79,9
10	84,8	83,9	76,9

El pH óptimo para este caso fue 8 ya que con este se consiguió una máxima reducción de turbidez y sólidos en suspensión totales y aunque la reducción de DQO es ligeramente menor que a pH 6. Realmente cualquier rango de pH comprendido entre 6 y 8 sería adecuado, se recomendaría trabajar con el pH de salida de la depuradora, sin realizar sobre el ningún tipo de corrección, con objeto de simplificar el proceso y abaratizar costos.

SAF560HC:

Se utilizó una dosis del coagulante comercial SAF560HC de 150 mg/L de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$

Como en los dos casos anteriores se trabajo en el intervalo de pH's 6-10 con incrementos de 2 unidades, variándolo con Ca(OH)_2 .

En la tabla XIV se muestran los resultados obtenidos.

Tabla XIV Reducciones de turbidez, SS y DQO obtenidas con SAF560HC variando las dosis

pH	% reducción turbidez	% reducción SS	% reducción DQO
6	99,0	93,3	58,3
8	90,0	92,1	61,9
10	39,0	74,5	59,0

Tanto a pH 6 como pH 8 se obtiene muy buenos resultados, como se ha comentado en los resultados obtenidos con el SAF056 cualquier rango de pH comprendido entre 6 y 8 sería adecuado, se recomendaría trabajar con el pH de salida de la depuradora, sin realizar sobre el ningún tipo de corrección, con objeto de simplificar el proceso y abaratar costos. Para el siguiente apartado en el cual se estudiará la dosis optima, se empleará un pH 7.

Sales compuestas

SAF05670:

Los resultados obtenidos son los mostrados en la tabla XV.

Tabla XV Reducciones de turbidez, SS y DQO obtenidas con SAF05670 variando el pH

pH	% reducción turbidez	% reducción SS	% reducción DQO
6	98,6	96,6	84,7
8	96,2	96,5	84,7
10	88,1	92,5	85,4

En este caso se selecciono como pH óptimo 8 puesto que aunque la reducción de turbidez es menor que a pH 6 la diferencia no es muy grande.

4.2.2.- Optimización de la dosis

A continuación se muestran los resultados obtenidos en la optimización de la dosis para el proceso de precipitación química con los diferentes coagulantes.

Sales de hierro

FeCl₃:

La tabla XVI muestra los resultados obtenidos.

Tabla XVI Reducciones de turbidez, SS y DQO obtenidas con FeCl₃ variando las dosis

Dosis	% reducción turbidez	% reducción SS	% reducción DQO
50	62,9	65,1	47,1
100	77,8	74,6	32,2
150	72,2	84,9	30,3
200	43,2	61,1	57,6

Consideramos como la dosis óptima 150 mg/L de $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, ya que con esta dosis se consigue una gran reducción de la turbidez y de los sólidos en suspensión. La reducción de la DQO no es tan alta como con otras dosis, pero se valora más la necesidad de eliminar los sólidos como etapa previa a la oxidación avanzada que la eliminación de DQO.

Teniendo en cuenta los valores promedio de SS y Turbidez tras este tratamiento (4.53 mg/L y 13.34 UNT respectivamente), nos encontraríamos según el RD 1620/2007 (ver anexo III) ante una agua de calidades 2.2, 2.3, 3.1 c), 4.2, 5.1 y 5.3. Sin olvidar que habría que conocer el resto de parámetros (E-coli, Nematodos intestinales y otros criterios)

Sales de aluminio

$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$:

Los resultados obtenidos se muestran en la tabla XVII.

Tabla XVII Reducciones de turbidez, SS y DQO obtenidas con sulfato de aluminio variando las dosis

Dosis	% reducción turbidez	% reducción SS	% reducción DQO
100	92,1	87,5	53,6
200	93,8	90,6	75,9
300	91,5	90,6	69,9

Se determinó que la dosis óptima para llevar a cabo el tratamiento es 200 mg/L $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$, ya que en este caso se obtienen máximas reducciones tanto de turbidez, como de sólidos en suspensión totales como de DQO.

Finalmente con un agua con 2.8 mg/L de SS y 3 UNT de turbidez, según el RD 1620/2007 (ver anexo III) que se está ante un agua valida para todos los usos menos 1.1, 3.2, 5.2 y 5.4. Sin tener en cuenta el resto de parámetros necesarios para determinar la calidad del agua según el Real Decreto en cuestión.

SAF056:

En la tabla XVIII se muestran los resultados obtenidos.

Tabla XVIII Reducciones de turbidez, SS y DQO obtenidas con SAF056 variando las dosis

Dosis	% reducción turbidez	% reducción SS	% reducción DQO
50	62,9	71,5	53,5
100	78,4	86,3	72,4
150	97,5	96,4	79,9
250	84,5	87,4	77,6

La dosis óptima en este caso fué 150 mg/L, se puede observar que se está ante un máximo, teniendo en este punto las mayores reducciones tanto de turbidez, como de sólidos en suspensión como DQO.

El agua después del tratamiento tendrá 1.1 mg/L de SS y 1.2 UNT de turbidez, por lo que según el RD 1620/2007 (ver anexo III) nos encontramos ante un agua de todas las calidades, exceptuando las 3.2 y 5.4. Exceptuando el resto de parámetros contemplados en este Real Decreto.

SAF560HC:

Pueden observarse los resultados obtenidos en la tabla XIX.

Tabla XIX Reducciones de turbidez, SS y DQO obtenidas con SAF560HC variando las dosis

Dosis	% reducción turbidez	% reducción SS	% reducción DQO
50	69,7	79,6	50,6
100	78,6	83,5	55,7
250	98,9	93,6	66,9

En el caso de este coagulante, casi se podría decir que al representar los puntos de la tabla anterior estamos ante una línea recta con pendiente positiva, es decir cuanto mayor sea la dosis mayor será la reducción de turbidez, sólidos en suspensión y DQO. Por supuesto dentro del rango estudiado. Por eso en este caso la dosis óptima es de 250 mg/L.

Después de la precipitación se tiene un agua con 2 mg/L de SS y <1 UNT de Turbidez, así se está ante un agua de todas las calidades citadas en el RD 1620/2007 excepto la 5.4 (ver anexo III). Todo ello sin tener en cuenta el resto de parámetros citados en el Real Decreto.

Sales compuestas

SAF05670:

La tabla XX muestra los resultados obtenidos.

Tabla XX Reducciones de turbidez, SS y DQO obtenidas con SAF05670 variando las dosis

Dosis	% reducción turbidez	% reducción SS	% reducción DQO
50	90,6	89,7	67,9
100	91,9	89,5	65,4
150	96,2	96,5	87,2
250	84,6	84,5	75,6

La dosis óptima es 150 mg/L, obteniendo con esta dosis las mayores reducciones de todos los parámetros estudiados.

El agua después de ser tratada tiene 1.0 mg/L de SS y 1.8 UNT de turbidez, por lo que según el RD 1620/2007 (ver anexo III) se estaría ante un agua de todas las calidades excepto la 3.2 y la 5.4. Sin olvidar que no se han tenido en cuenta otros parámetros citados en este Real Decreto.

4.3.- Influencia de la carga contaminante inicial en el tratamiento por precipitación química

Ante la falta de repetitividad de la muestra bruta empleada, se intento investigar si hay una tendencia entre:

- Por un lado la carga contaminante inicial.
- Por otro lado el tratamiento de depuración.

Se realizaron una serie de experimentos con el coagulante $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ con distintas demandas químicas de oxígeno iniciales (DQO), a distintos pH's y con la misma dosis del coagulante (100 mg/L). La $\text{DQO}_{\text{inicial}}$ varió desde 47 hasta 125 mg/L, y el pH desde 7.5 a 12.

Se realizó una agrupación de valores obtenidos en un intervalo determinado de pH's obteniéndose los resultados mostrados en la figura IX.

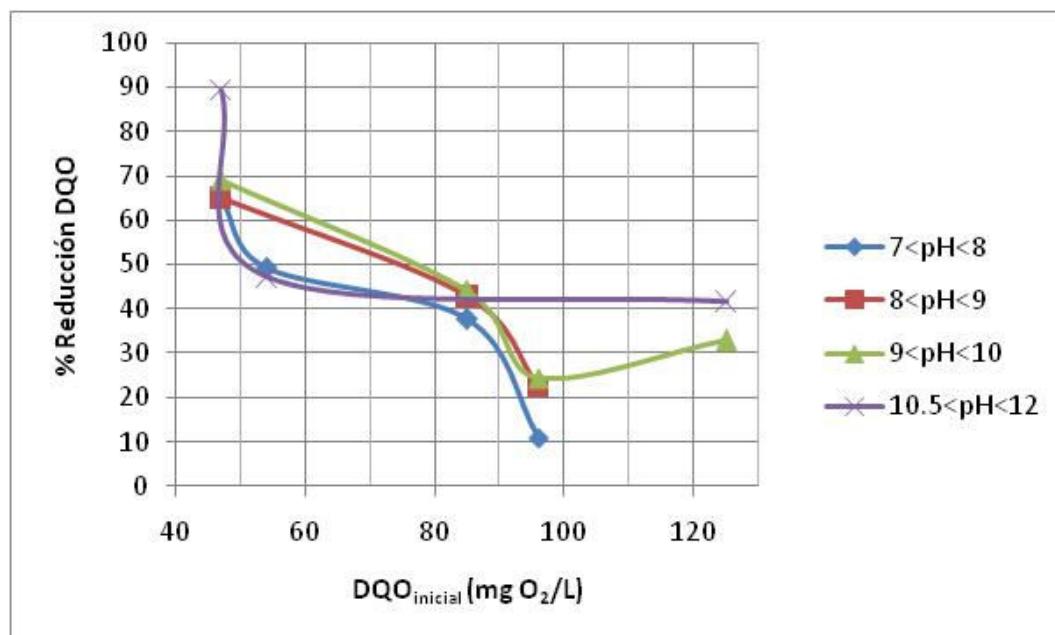


Figura IX Variación de la reducción de DQO respecto a la $\text{DQO}_{\text{inicial}}$

De la siguiente gráfica se puede obtener como conclusión que cuanta menos $\text{DQO}_{\text{inicial}}$ tenga el agua a tratar, mayor será el rendimiento obtenido mediante el tratamiento de precipitación química.

4.4.- Fenton

Se realizaron una serie de experimentos de tanteo para comparar un proceso fenton llevado a cabo utilizando el hierro del coagulante y ver la importancia o no de hacerlo antes de la precipitación química.

Los resultados obtenidos son mostrados en la tabla XXI.

Tabla XXI Resultados obtenidos en el tratamiento de precipitación con proceso Fenton

Tratamiento	COT	% reducción COT
Agua bruta	19,5 y 20,3	
Fenton → Precipitación química	17,6 y 17,2	12,6
Precipitación química	14,4 y 15,7	24,4
Precipitación química → Fenton	15,1 y 15,2	23,9

Se puede observar una reducción de rendimiento muy importante al aplicar el proceso fenton antes de la precipitación. También un rendimiento muy similar al realizar la precipitación química y al realizar la precipitación química → fenton, seguramente debido a la falta de hierro disuelto en el agua después de la precipitación, siendo este fundamental para llevar a cabo el proceso fenton.

5.- Resumen y conclusiones.

Los problemas de disponibilidad de agua dulce nos aconsejan reutilizar el agua ya empleada. Para ello podemos emplear en aguas residuales depuradas distintos tratamientos, como:

- volver a estudiar los sistemas tradicionales depuración de aguas residuales (como la precipitación química).
- emplear sistemas de tecnología emergente (como los tratamientos de oxidación avanzada),

Este trabajo estudia la precipitación química de un agua residual sintética ya depurada como vía para:

1. Por un lado, sirva de etapa previa para un tratamiento de oxidación avanzada
2. Por otro, pueda ser un tratamiento por si mismo que habilite al agua para ser empleada en otros usos.

Se ha partido de una agua residual urbana depurada sintética y aun así ha mostrado una gran heterogeneidad durante el tiempo que ha durado este trabajo, por ejemplo, los sólidos en suspensión han fluctuado entre 7 y 32 mg/L. Por ello fue necesario antes de llevar a cabo los experimentos hacer una corrección de los sólidos (conc. Aprx.30mg/l)

Para este estudio se han elegido los coagulantes más empleados en el mercado, basados en sales de hierro y de aluminio. En concreto los coagulantes estudiados han sido:

- Convencionales: FeCl_3 , $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$
- Comerciales: SAF056, SAF05670 y SAF560HC

Se ha determinado para cada coagulante las condiciones de operación óptimas (dosis y pH de coagulación) atendiendo a las máximas reducciones de DQO, SS y turbidez. En la tabla XXII se muestran las condiciones de operación óptimas; y en la figura X se muestran los resultados obtenidos en estas condiciones.

Tabla XXII pH y dosis óptimos para cada coagulante

	FeCl_3	$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$	SAF056	SAF560HC	SAF05670
pH	8	7	8.5	7	8
Dosis	47 mg Fe^{3+}/L	16 mg Al^{3+}/L	12 mg Al^{3+}/L	20 mg Al^{3+}/L	12 mg Al^{3+}/L

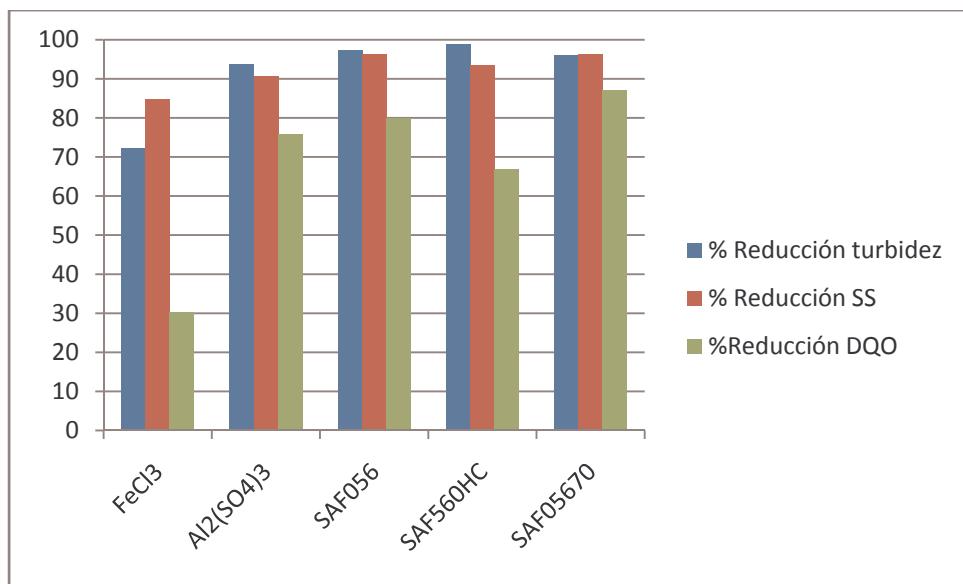


Figura X Reducciones obtenidas con cada coagulante a pH y dosis óptimos

A la vista de estos resultados podemos concluir que la precipitación química es una herramienta eficaz en la eliminación de sólidos en suspensión (y también DQO), por lo que es un tratamiento adecuado para la regeneración de guas depuradas (RD 1620/2007), como tratamiento previo para llevar tratamientos de oxidación avanzada (Aguirre et al. 2004).

En la tabla XXII se muestran los distintos tipos de calidad que tendrá el agua residual urbana depurada después del tratamiento con cada uno de los coagulantes, según el Real Decreto 1620/2007, atendiendo a los SS y Turbidez y sin tener en cuenta el resto de parámetros legislados en dicho Real Decreto.

Tabla XXIII Calidades del agua residual urbana depurada después del tratamiento con cada coagulante

Coagulante	Calidad												
	1.1	1.2	2.1	2.2	2.3	3.1a) y b)	3.1c)	3.2	4.1	4.2	5.1	5.2	5.3
Cloruro de hierro			X	X		X			X	X			X
Sulfato de aluminio	X	X	X	X	X	X	X		X	X	X		X
SAF056	X	X	X	X	X	X	X		X	X	X	X	X
SAF05670	X	X	X	X	X	X	X		X	X	X	X	X
SAF560HC	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X

En este estudio también se ha constatado que cuanto mejor es el tratamiento de la estación depuradora, mayor es el rendimiento de los tratamientos posteriores tendentes a mejorar la calidad de esta agua para posteriores usos (Asano 2007)

Además se estudio emplear el reactivo Fenton de una forma poco habitual intentando utilizar la gran cantidad de hierro libre antes de la coagulación, añadiendo el agua oxigenada antes de la precipitación química. Los resultados obtenidos no fueron satisfactorios.

6.- Bibliografía

- Aguilar, M. (2002). *Tratamiento físico-químico de aguas residuales: coagulación-floculación*, Ediciones Universidad de Murcia.
- Aguirre, P., Garcia, J., Mujeriego, R. (2004). *Desinfección con cloro y luz UV en un proceso convencional de regeneración de agua*. Ingeniería del agua, 11 (1): 75-89.
- Aliaga, S. (2010). *Aplicación del proceso Fenton y Coagulación-Floculación para la regeneración de aguas depuradas*. (Proyecto Fin de Carrera). Universidad de Zaragoza.
- Arboleda Valencia, J. (2000). *Teoría y práctica de la purificación del agua*, McGraw-Hill-Interamericana, Bogotá.
- Asano, T. (2007). *Water reuse: issues, technologies, and applications*, McGraw-Hill, New York.
- Barrenechea Martel, A. (2004). Coagulación. Tratamiento de agua para consumo humano. Plantas de filtración rápida. Biblioteca Virtual de Desarrollo Sostenible y Salud Ambiental, Organización Panamericana de la Salud, Lima. Manual I: teoría. 1. www.cepis.ops-oms.org.
- Brandt, L., Hoechst, A.G., Niederlassung, K. (2002). In *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry* (6th edn, electronic release), Wiley-VCH: Weinheim.
- De Bustamante, I., Cabrera, M.C., Lledó, C., Lillo, J., Palacios, M.P. (2010). *La reutilización de aguas regeneradas en España: ejemplos de aplicación en el marco del proyecto CONSOLIDER-TRAGUA*. Aqua-LAC: revista del Programa Hidrológico Internacional para América Latina y el Caribe, 2 (1): 1-17
- Domènech, X., Jardim, W.F., Litter, M.I. (2001). *Procesos avanzados de oxidación para la eliminación de contaminantes*. En: Eliminación de contaminantes por fotocatálisis heterogénea (Blesa, M.A., ed.). Digital Graf, La Plata, 3-26.
- Gardner-Outlaw, T., Engelman, R. (1997). *Sustaining water, easing scarcity. A second update*, Population Action International (PAI), Population and Environment Program. Washington, DC, USA: 2-19.
- Gleick, P. H. (1996). *Water resources*. En: Encyclopedia of Climate and Weather (S. H. Schneider, ed.). Oxford University Press, New York. 2: 817-823.
- Gobierno de Canarias (2006). *El agua en Canarias*. (Consultado el 22 de Julio, 2010). <http://www.gobiernodecanarias.org/citv/dga/aguacanarias.html>
- Gorraiz, D. (2010). *Estudio de la degradación de sustancias peligrosas presentes en aguas de salida de EDAR mediante tratamiento Fenton*. (Proyecto Fin de Carrera). Universidad de Zaragoza.
- Hinrichsen, D., Robey, B., Upadhyay, U.D. (1998). *Solutions for a water-short world*. Population Reports, Series M, Baltimore. 14.
- Instituto Nacional de Estadística (2010). *Encuesta sobre el suministro y saneamiento del agua, año 2008*. (Nota de prensa). www.ine.es.

Matesanz, J.M., Abad, F., Mosteo, R., Sarasa, J., Ormad, M.P. (2010). *Water reclamation by means of chemical precipitation and Fenton process*. Comunicación-póster (Área de Ingeniería Química y Tecnologías del Medio Ambiente. Universidad de Zaragoza.) al 7º Congreso Internacional de la ANQUE, Oviedo, Junio 2010.

Metcalf & Eddy, Inc. (1995). *Ingeniería de aguas residuales*, McGraw-Hill. New York.

Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino (2007). *Volumen de Agua Reutilizada*. (Consultado el 3 de Agosto 2010) http://servicios3.mma.es/siagua/indicadores/ind/ficha.jsp?cod_indicador=45&factor=respuesta.

Ministerio de Medio Ambiente. Secretaría de Estado de Aguas y Costas. Dirección General de Obras Hidráulicas y Calidad de Aguas (2000). *Libro blanco del agua*. Madrid

Ormad, M.P., Miguel, N., Claver, A., Matesanz, J.M., Ovelleiro, J.L. (2008). *Pesticides removal in the process of drinking water production*. Chemosphere 71(1): 97-106.

Ormad, M.P., Puig, A., Sarasa, J., Roche, P., Mutuberría, M.S., Ovelleiro, J.L. (1993). *Ozonation of wastewater resulting from the production of organochloride plaguicides derived from DDT and trichlorobenzene*. Ozone Sci. Eng. 16: 487-503

Plan Estratégico Metropolitano de Barcelona (2010). *Barrera hidráulica contra la intrusión salina para preservar el acuífero del Llobregat*. (Consultado el 21 de Julio, 2010). <http://www.pemb.cat/ca-es/projectes-estrategics/mapa-projectes-estrategics-projecte.aspx?gIdMapa=2&gIdLocalizacion=605&gIdContexto=1&idioma=ES>.

RD 140/2003. *Real Decreto 140/2003, de 7 de febrero, por el que se establecen los criterios sanitarios de la calidad del agua de consumo humano*. BOE 45: 7228-45.

RD 509/1996. *Real Decreto 509/1996, de 15 de marzo, de desarrollo del Real Decreto-ley 11/1995, de 28 de diciembre, por el que se establecen las normas aplicables al tratamiento de las aguas residuales urbanas.*, BOE. 77: 12038-12041.

RD 1620/2007. *Real Decreto 1620/2007 de 7 de Diciembre de 2007, por el que se establece el régimen jurídico de la reutilización de las aguas depuradas.*, BOE. 294: 50639-50661.

United Nations Population Fund (UNFP) (1997). *Population and sustainable development-Five years after Rio*. New York, UNFPA.