Escola Tècnica Superior d'Enginyers
de Camins, Canals i Ports de Barcelona
UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

# PROJECTE O TESINA D'ESPECIALITAT

## Títol

**Eficacia y fiabilidad de los procesos de regeneración de agua**

## Autor

**Raúl Blay Gil**

## Tutor

**Rafael Mujeriego Sahuquillo**

## Departament

**Ingeniería Hidráulica, Marítima y Ambiental**

## Intensificació

**Ingeniería Sanitaria y Ambiental**

## Data

**Octubre 2009**

# RESUMEN

## EFICACIA Y FIABILIDAD DE LOS PROCESOS DE REGENERACIÓN DE AGUA

Autor: Raúl Blay Gil Tutor: Rafael Mujeriego Sahuquillo

La regeneración de agua es el proceso necesario para adecuar su calidad al uso concreto al que se piensa dedicar. La reutilización consiste en poner el agua regenerada a disposición del usuario para que la pueda usar. La regeneración y la reutilización planificada son componentes fundamentales de la gestión de los recursos hídricos, que la hacen mucho más sostenible, racional y respetuosa con el medio ambiente.

El proceso habitual de tratamiento llevado a cabo en las estaciones depuradoras de aguas residuales no inactiva de forma suficiente los microorganismos presentes en el agua. El principal objetivo del proceso de regeneración es eliminar una parte de la carga contaminante residual del efluente a regenerar y desinfectarlo completamente, a fin de inactivar los microorganismos patógenos presentes en el agua antes de su reutilización. La principal exigencia planteada por la reutilización planificada es la implantación, explotación y mantenimiento de procesos de regeneración eficaces y fiables.

El objetivo principal de esta tesina ha sido el estudio de la eficacia y la fiabilidad de los procesos de regeneración de agua llevados a cabo en tres estaciones de regeneración de agua (ERA) de diferentes características: Castell-Platja d'Aro, Tossa de Mar y Lloret de Mar. El estudio se ha realizado a partir de los parámetros físico-químicos (MES, turbiedad, transmitancia a 254 nm y potencial redox) y sanitarios (coliformes fecales, *E. coli* y clostridium sulfito-reductores) más representativos de la calidad del agua y comúnmente utilizados en las normativas correspondientes. Se ha evaluado la conformidad del agua regenerada con la normativa existente, a fin de determinar si se alcanzan o no los objetivos de calidad exigidos a un proceso de regeneración. El estudio realizado abarca generalmente desde el año 2004 hasta el 2009, lo que ha permitido realizar una valoración realista y precisa del proceso de regeneración y de su evolución, y proponer una serie de recomendaciones o mejoras con el objetivo de aumentar la eficacia y la fiabilidad de los procesos de regeneración.

El agua regenerada en las tres ERA satisface los valores límite fijados para los usos actuales, durante todos los años estudiados, pero no para los relativos al uso más restrictivo del RD 1620/2007 (uso 1.1), dependiendo de la ERA estudiada. La turbiedad es el parámetro determinante de la evaluación de la calidad del agua durante el proceso de regeneración. La incorporación de sondas de potencial redox en los procesos de regeneración de agua proporciona notables ventajas sobre las tradicionales sondas de cloro, especialmente en aquellas ERA que disponen de dosificación de cloro con retroalimentación por sonda redox (ERA de Castell-Platja d'Aro).

La evaluación de los datos experimentales mediante gráficas de distribución logarítmico-normal ofrece ventajas superiores a los métodos numéricos convencionales, pues permiten visualizar claramente la evolución absoluta y relativa de los parámetros de calidad, y estimar cualitativa y cuantitativamente la eficacia y la fiabilidad de los procesos de depuración y de regeneración de agua.

Palabras clave: regeneración de agua, reutilización de agua, fiabilidad de la regeneración, eficacia de la regeneración, Real Decreto 1620/2007.

# ABSTRACT


## EFFICIENCY AND RELIABILITY OF WATER RECLAMATION PROCESSES

Author: Raúl Blay Gil Supervisor: Rafael Mujeriego Sahuquillo

Water reclamation is the process necessary to adapt water quality to the specific use for which it is planned for. Water reuse consists in delivering reclaimed water to users so they can use it. Water reclamation and planned water reuse are fundamental components of water resources management, which render it much more sustainable, rational and respectful with the environment.

The conventional treatment processes carried out in wastewater treatment plants do not sufficiently inactivate the microorganisms present in wastewater. The main objective of water reclamation process is to eliminate a portion of the residual pollution load in the effluent to be reclaimed and to disinfect it completely, in order to inactivate the pathogenic microorganisms present in reclaimed water before it is reused. The main requirement associated to planned water reuse is the implementation, operation and maintenance of an effective and reliable reclamation process.

The main aim of this study has been to evaluate the efficiency and the reliability of the water reclamation processes used at three water reclamation plants of different characteristics: Castell-Platja d'Aro, Tossa de Mar and Lloret de Mar. The study has been conducted using the more representative physico-chemical (suspended solids, turbidity, transmittance to 254 nm and potential redox) and sanitary parameters (fecal coliforms, E. coli and clostridium sulfite-reducers) of water quality, commonly adopted by official regulations. An evaluation has been conducted to determine conformity of reclaimed water with existing regulations, as to determine whether water reclamation processes are able to satisfy water quality objectives. The results included in the study were generally obtained from 2004 to 2009, and thus allow for a realistic and precise evaluation of reclamation processes and its evolution, and for proposing a series recommendations or improvements to increase the efficiency and reliability of the different reclamation processes.

Reclaimed water produced at the three water reclamation plants satisfies quality requirements for current uses, during all years studied, but not for those required by the most restrictive use of the RD 1620/2007 (use 1.1), depending on the water reclamation plant considered. Turbidity is the limiting parameter for evaluating water quality during the reclamation process. The use of Redox potential probes in water reclamation processes provides significant advantages over traditional residual chlorine probes, and more especially so in water reclamation plants where chlorine dosing is controlled by feedback from a Redox probe (water reclamation plant of Castell-Platja d'Aro).

Experimental data evaluation by means of logarithmic - normal distribution graphs has significant advantages over conventional numerical methods, since they help to clearly visualize the absolute and relative evolution of water quality parameters, and to estimate qualitatively and quantitatively the efficiency and the reliability of water treatment processes and water reclamation processes.


Key words: water reclamation, water reuse, reliability, efficiency, Real Decreto 1620/2007.

# ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3.1. Porcentajes de HOCl y $OCl^-$ a 10ºC y 20ºC en función del pH (Arboleda, 2000) …….....27

Figura 3.2. Descripción de la reacción del cloro con un agua con 0,1 mg $NH_3$-N/L ….29

Figura 3.3. Evolución de la producción de agua regenerada en la Costa Brava (Sala, 2009) ……...35

Figura 3.4. Distribución del agua regenerada producida por el CCB en 2008 según los usos a los que se destina (Sala, 2009) …….……35

Figura 4.1. Vista aérea de la EDAR de Castell-Platja d'Aro ……...……..38

Figura 4.2. Vista general de la ERA de Castell-Platja d'Aro ……...……..39

Figura 4.3. Esquema básico y puntos de muestreo del proceso de regeneración en la ERA de Castell-Platja d'Aro …….. 39

Figura 4.4. Equipo de filtración mediante filtros de arena en la ERA de Castell-Platja d'Aro ……...40

Figura 4.5. Equipos de desinfección con luz UV en la ERA de Castell-Platja d'Aro …40

Figura 4.6. Laberinto de desinfección de la ERA de Castell-Platja d'Aro ……41

Figura 4.7. Agua regenerada obtenida en la ERA de Castell-Platja d'Aro ……41

Figura 4.8. Vista aérea de la EDAR de Tossa de Mar ……42

Figura 4.9. Vista general de la ERA de Tossa de Mar ……...…43

Figura 4.10. Esquema básico y puntos de muestreo del proceso de regeneración en la ERA de Tossa de Mar ……...…..43

Figura 4.11. Sonda de turbiedad en la ERA de Tossa de Mar ……...…44

Figura 4.12. Vista general de tratamiento terciario en la ERA de Tossa de Mar ... …...44

Figura 4.13. Decantación lamelar en la ERA de Tossa de Mar ……..……...45

Figura 4.14. Filtro de arena en ERA de Tossa de Mar ……..……...45

Figura 4.15. Dos módulos de desinfección con luz UV en la ERA de Tossa de Mar …45

Figura 4.16. Zona de vegetación arbórea regada con agua regenerada en el parque de Sa Riera de Tossa de Mar ……..……..45

Figura 4.17. Vista aérea de la EDAR y la ERA de Lloret de Mar ……46

Figura 4.18. Vista general de la EDAR y ERA de Lloret de Mar ……..47

Figura 4.19. Esquema básico y puntos de muestreo del proceso de regeneración de la ERA de Lloret de Mar …..……47

Figura 4.20. Tanques de hipoclorito sódico (izquierda) y de policloruro de aluminio (derecha) en la ERA de Lloret de Mar ……..……48

Figura 4.21. Equipo de preparación de polielectrolito en la ERA de Lloret de Mar …..48

Figura 4.22. Decantación lamelar en la ERA de Lloret de Mar ……... ……49

Figura 4.23 y 4.24. Detalle del filtro Hydrotech en la ERA de Lloret de Mar ...… …...49

Figura 4.25. Equipo de desinfección con luz UV en la ERA de Lloret de Mar …...… .49

Figura 5.1. Distribución de probabilidad de la MES durante los años comprendidos entre 2004 y 2009 en la ERA de Castell-Platja d'Aro ……54

Figura 5.2. Distribución de probabilidad de la turbiedad durante los años comprendidos entre 2004 y 2009 en la ERA de Castell-Platja d'Aro ……...…….56

Figura 5.3. Distribución de probabilidad de la transmitancia a 254 nm durante los años comprendidos entre 2004 y 2009 en la ERA de Castell-Platja d'Aro ……....59

Figura 5.4. Distribución de probabilidad del potencial redox durante los años 2008 y 2009 en la ERA de Castell-Platja d'Aro …….62

Figura 5.5. Distribución de probabilidad de *E. coli* y Coliformes Fecales durante los años comprendidos entre 2004 y 2009 en la ERA de Castell-Platja d'Aro ……..……..64

Figura 5.6. Distribución de probabilidad de CSR durante los años comprendidos entre 2005 y 2009 en la ERA de Castell-Platja d'Aro …….66

Figura 5.7. Representación de las parejas de valores de CSR en la ERA de Castell-Platja d'Aro …….……..68

Figura 5.8. Relación entre turbiedad y MES durante los años comprendidos entre 2004 y 2009 en la ERA de Castell-Platja d'Aro …….69

Figura 5.9. Relación entre *E. coli*-CF y transmitancia 254 nm durante los años comprendidos entre 2004 y 2009 en la ERA de Castell-Platja d'Aro ……71

Figura 5.10. Representación gráfica de *E. coli* y CF con valores con transmitancia superior al 60% (parte izqda) e inferiores (parte derecha) durante los años 2004, 2008 y 2009 en la ERA de Castell-Platja d'Aro …….……....73

Figura 5.11. Relación entre CSR y transmitancia a 254 nm durante los años comprendidos entre 2004 y 2009 en la ERA de Castell-Platja d'Aro ……74

Figura 5.12. Relación entre la inactivación absoluta de *E. coli* y CF producida por la luz UV y la transmitancia a 254 nm durante los años comprendidos entre 2004 y 2009 en la ERA de Castell-Platja d'Aro ……..76

Figura 5.13. Relación entre la inactivación de *E. coli* y CF normalizada (absoluta) producida por la luz UV y la transmitancia a 254 nm durante los años comprendidos entre 2004 y 2009 en la ERA de Castell-Platja d'Aro ……77

Figura 6.1. Distribución de probabilidad de la MES durante los años comprendidos entre 2005 y 2009 en la ERA de Tossa de Mar……...82

Figura 6.2. Distribución de probabilidad de la turbiedad durante los años comprendidos entre 2005 y 2009 en la ERA de Tossa de Mar……...84

Figura 6.3. Distribución de probabilidad de la transmitancia a 254 nm durante los años comprendidos entre 2005 y 2009 en la ERA de Tossa de Mar……...87

Figura 6.4. Distribución de probabilidad del potencial redox durante el año 2009 en la ERA de Tossa de Mar……..89

Figura 6.5. Distribución de probabilidad de CF y *E. coli* durante los años comprendidos entre 2005 y 2009 en la ERA de Tossa de Mar ……..91

Figura 6.6. Distribución de probabilidad de CSR durante los años comprendidos entre 2005 y 2009 en la ERA de Tossa de Mar……93

Figura 6.7. Relación entre turbiedad y MES durante los años comprendidos entre 2005 y 2009 en la ERA de Tossa de Mar ……...95

Figura 6.8. Relación entre *E. coli*-CF y transmitancia a 254 nm durante los años comprendidos entre 2005 y 2009 en la ERA de Tossa de Mar……...97

Figura 6.9. Relación entre CSR y transmitancia a 254 nm durante los años comprendidos entre 2005 y 2009 en la ERA de Tossa de Mar……...98

Figura 6.10. Relación entre la inactivación absoluta de *E. coli* y CF producida por el proceso de regeneración y la transmitancia a 254 nm durante los años comprendidos entre 2005 y 2009 en la ERA de Tossa de Mar ……100

Figura 6.11. Relación entre la inactivación de *E. coli* y CF normalizada (relativa) producida por el proceso de regeneración y la transmitancia a 254 nm durante los años comprendidos entre 2005 y 2009 en la ERA de Tossa de Mar ……101

Figura 7.1. Distribución de probabilidad de la MES durante los años comprendidos entre 2005 y 2009 en la ERA de Lloret de Mar……106

Figura 7.2. Distribución de probabilidad de la turbiedad durante los años comprendidos entre 2005 y 2009 en la ERA de Lloret de Mar…….109

Figura 7.3. Distribución de probabilidad de la transmitancia a 254 nm durante los años comprendidos entre 2005 y 2009 en la ERA de Lloret de Mar…….112

Figura 7.4. Distribución de probabilidad del potencial redox durante los años 2008 y 2009 en la ERA de Lloret de Mar……..113

Figura 7.5. Distribución de probabilidad de Coliformes Fecales y *E. coli* durante los años comprendidos entre 2005 y 2009 en la ERA de Lloret de Mar ……115

Figura 7.6. Distribución de probabilidad de CSR durante los años comprendidos entre 2005 y 2009 en la ERA de Lloret de Mar……..118

Figura 7.7. Relación entre turbiedad y MES durante los años comprendidos entre 2005 y 2009 en la ERA de Lloret de Mar …….119

Figura 7.8. Relación entre *E. coli* y transmitancia a 254 nm durante los años 2008 y 2009 en la ERA de Lloret de Mar……..121

Figura 7.9. Relación entre CSR y transmitancia a 254 nm durante los años 2008 y 2009 en la ERA de Lloret de Mar……...122

Figura 7.10. Relación entre la inactivación absoluta de *E. coli* producida por el proceso de regeneración y la transmitancia a 254 nm durante los años 2008 y 2009 en la ERA de Lloret de Mar ……123

Figura 7.11. Relación entre la inactivación de *E. coli* normalizada (relativa) producida por el proceso de regeneración y la transmitancia a 254 nm durante los años 2008 y 2009 en la ERA de Lloret de Mar……..124

# ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1 Agentes potencialmente infecciosos presentes en el agua residual (Crook, 1998) ……...13

Tabla 3.2. Parámetros de control considerados por las principales normativas internacionales para la reutilización de aguas residuales para riego (Salgot et al., 1999) ……16

Tabla 3.3. Criterios de calidad para la reutilización de agua residual depurada (MMA, 2007) ……...19

Tabla 3.4. Rango de dosis recomendadas de coagulante por tratamiento (Metcalf y Eddy, 2000) ……23

Tabla 3.5. Análisis comparativo ntre la desinfección con cloro libre y con cloro combinado ……..29

Tabla 3.6. Lámparas de luz UV (Rodieck y Jeyanayagam, 1999) ..……..32

Tabla 3.7. Volumen de agua residual y de agua regenerada en el ámbito del Consorci de la Costa Brava en el año 2008 (Sala, 2009) ……34

Tabla 5.1. Percentiles 50 y 90 y desviación típica de la distribución normal de la MES en la ERA de Castell-Platja d'Aro ……..55

Tabla 5.2. Cumplimiento del RD 1620/2007 en términos de la MES en la ERA de Castell-Platja d'Aro ……55

Tabla 5.3. Percentiles 50 y 90 y desviación típica de la distribución normal de la turbiedad en la ERA de Castell-Platja d'Aro ……..57

Tabla 5.4. Cumplimiento del Real Decreto 1620/2007 en términos de la turbiedad y la MES en la ERA de Castell-Platja d'Aro ……....58

Tabla 5.5. Percentiles 50 y 90 y desviación típica de la distribución normal de la transmitancia a 254 nm en la ERA de Castell-Platja d'Aro ……...60

Tabla 5.6. Percentil de muestras con una transmitancia a 254 nm inferior o igual al 60% en la ERA de Castell-Platja d'Aro ……..61

Tabla 5.7. Percentiles 50 y 90 y desviación típica de la distribución normal del potencial redox en la ERA de Castell-Platja d'Aro ……62

Tabla 5.8. Percentiles 50 y 90 y desviación típica de la distribución normal de *E. coli* y CF en la ERA de Castell-Platja d'Aro …….....65

Tabla 5.9. Porcentaje de muestras con ausencia de *E. coli* y CF en la ERA de Castell-Platja d'Aro …….65

Tabla 5.10. Cumplimiento del Real Decreto 1620/2007 en términos de *E. coli* en la ERA de Castell-Platja d'Aro …..……...65

Tabla 5.11. Percentiles 50 y 90 y desviación típica de la distribución normal de CSR en la ERA de Castell-Platja d'Aro ……..67

Tabla 5.12. Porcentaje de muestras que no cumplen los límites de MES y de turbiedad para el uso 1.1 del RD 1620/2007 en la ERA de Castell-Platja d'Aro……..……..70

Tabla 5.13. Valor límite de MES con la misma restrictividad que 2 UNT en la ERA de Castell-Platja d'Aro …… ……...71

Tabla 6.1. Percentiles 50 y 90 y desviación típica de la distribución normal de la MES en la ERA de Tossa de Mar ……83

Tabla 6.2. Cumplimiento del RD 1620/2007 en términos de la MES en la ERA de Tossa de Mar …….83

Tabla 6.3. Percentiles 50 y 90 y desviación típica de la distribución normal de la turbiedad en la ERA de Tossa de Mar ……85

Tabla 6.4. Cumplimiento del RD 1620/2007 en términos de turbiedad y MES en la ERA de Tossa de Mar ……..86

Tabla 6.5. Percentiles 50 y 90 y desviación típica de la distribución normal de transmitancia a 254 nm en la ERA de Tossa de Mar ……..88

Tabla 6.6. Percentil de muestras con una transmitancia a 254 nm inferior o igual al 60% en la ERA de Tossa de Mar…….88

Tabla 6.7. Percentiles 50 y 90 y desviación típica de la distribución normal del potencial redox en la ERA de Tossa de Mar ……..89

Tabla 6.8. Percentiles 50 y 90 y desviación típica de la distribución normal de la *E. coli* y CF en la ERA de Tossa de Mar ……...90

Tabla 6.9. Cumplimiento del RD 1620/2007 en términos de *E. coli* en la ERA de Tossa de Mar …….92

Tabla 6.10. Percentiles 50 y 90 y desviación típica de la distribución normal de CSR en la ERA de Tossa de Mar …….92

Tabla 6.11. Porcentaje de muestras con ausencia de CSR en la ERA de Tossa de Mar.94

Tabla 6.12. Porcentaje de muestras que no cumplen los límites de MES y de turbiedad para el uso 1.1 del RD 1620/2007 en la ERA de Tossa de Mar …….. ……..…….96

Tabla 6.13. Valor límite de MES con la misma restrictividad que 2 UNT en la ERA de Tossa de Mar ……..96

Tabla 7.1. Percentiles 50 y 90 y desviación típica de la distribución normal de la MES en la ERA de Lloret de Mar ……..106

Tabla 7.2. Cumplimiento del RD 1620/2007 en términos de la MES en la ERA de Lloret de Mar ……...108

Tabla 7.3. Percentiles 50 y 90 y desviación típica de la distribución normal de la turbiedad en la ERA de Lloret de Mar …….110

Tabla 7.4. Cumplimiento del RD 1620/2007 en términos de la turbiedad y de la MES en la ERA de Lloret de Mar …….....111

Tabla 7.5. Percentiles 50 y 90 y desviación típica de la distribución normal de la transmitancia a 254 nm en la ERA de Lloret de Mar ……...111

Tabla 7.6. Percentil de muestras con una transmitancia a 254 nm inferior o igual al 60% en la ERA de Lloret de Mar……...113

Tabla 7.7. Percentiles 50 y 90 y desviación típica de la distribución normal del potencial redox en la ERA de Lloret de Mar ……...114

Tabla 7.8. Percentiles 50 y 90 y desviación típica de la distribución normal de *E. coli* y CF en la ERA de Lloret de Mar ……116

Tabla 7.9. Porcentaje de muestras con ausencia de *E. coli* y CF en la ERA de Lloret de Mar ……116

Tabla 7.10. Cumplimiento del RD 1620/2007 en términos de *E. coli* en la ERA de Lloret de Mar ……117

Tabla 7.11. Percentiles 50 y 90 y desviación típica de la distribución normal de CSR en la ERA de Lloret de Mar ……..117

Tabla 7.12. Porcentaje de muestras que no cumplen los límites de MES y de turbiedad para el uso 1.1 del RD 1620/2007 en la ERA de Lloret de Mar ……..…120

Tabla 7.13. Valor límite de MES con la misma restrictividad que 2 UNT en la ERA de Lloret de Mar ……121

# ÍNDICE

**Capítulo 1. INTRODUCCIÓN**…….…1

**Capítulo 2. OBJETIVOS**……...3

**Capítulo 3. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA**……..5

3.1 Introducción…….5

3.2 Antecedentes……6

3.3 Agua residual y procesos de depuración……...……...…7

3.4 Regeneración y reutilización de agua ……9

3.5 Calidad físico-química y microbiológica……..……11

3.6 Normas y recomendaciones……...…14

*3.6.1 Normas y recomendaciones internacionales*……..15

*3.6.2 Normativa española*……17

3.7 Procesos de tratamiento de regeneración…… ……..20

*3.7.1 Tratamientos físico-químicos*……21

*3.7.2 Tratamientos naturales.*……24

*3.7.3 Procesos de desinfección*……..……25

3.8 Un ejemplo práctico: El Consorci de la Costa Brava……33

**Capítulo 4. MATERIALES Y MÉTODOS**……37

4.1 Introducción……...37

4.2 ERA de Castell-Platja d'Aro (CPA)……...……..38

4.3 ERA de Tossa de Mar (TDM)……...……...……41

4.4 ERA de Lloret de Mar (LDM)……...……...46

4.5 Tratamiento y representación de datos……..50

*4.5.1 Método de representación y valoración*……...……..50

*4.5.2 Test estadístico de Kolmogorov-Smirnov*……...…51

**Capítulo 5. EFICACIA Y FIABILIDAD DE LA ERA DE CASTELL-PLATJA D'ARO**……...……53

5.1. Materia en suspensión (MES)……...53

5.2 Turbiedad……...56

5.3 Transmitancia 254 nm……...58

5.4 Potencial redox……..61

5.5 Escherichia coli (*E. coli*) y Coliformes Fecales (CF)……63

5.6 Clostridium Sulfito-Reductores (CSR)……..66

5.7 Relación entre turbiedad y materia en suspensión……68

5.8 Relación entre *E. coli*-CF y transmitancia 254 nm……..……71

5.9 Relación entre CSR y transmitancia 254 nm……74

5.10 Relación entre la inactivación de *E. coli* o CF y transmitancia 254 nm……..75

5.11 Conclusiones y recomendaciones……77

**Capítulo 6. EFICACIA Y FIABILIDAD DE LA ERA DE TOSSA DE MAR**……81

6.1 Materia en suspensión (MES)……81

6.2 Turbiedad……...84

6.3 Transmitancia 254 nm……...86

6.4 Potencial redox……..88

6.5 Escherichia coli (*E. coli*) y Coliformes Fecales (CF)……90

6.6 Clostridium Sulfito-Reductores (CSR)…….……92

6.7 Relación entre turbiedad y materia en suspensión…..……...94

6.8 Relación entre *E. coli* - CF y transmitancia 254 nm……..96

6.9 Relación entre CSR y transmitancia 254 nm…….……98

6.10 Relación entre la inactivación de *E. coli* o CF y transmitancia 254 nm……..99

6.11 Conclusiones y recomendaciones……..101

**Capítulo 7. EFICACIA Y FIABILIDAD DE LA ERA DE LLORET DE MAR**……..105

7.1 Materia en suspensión (MES)……..105

7.2 Turbiedad……108

7.3 Transmitancia 254 nm ……111

7.4 Potencial redox……113

7.5 Escherichia Coli (*E. coli*) y Coliformes Fecales (CF)……114

7.6 Clostridium Sulfito-Reductores (CSR)……117

7.7 Relación entre turbiedad y materia en suspensión……...119

7.8 Relación entre *E. Coli* y transmitancia 254 nm……...121

7.9 Relación entre CSR y transmitancia 254 nm……...122

7.10 Relación entre la inactivación de *E. coli* y transmitancia 254 nm…….123

7.11 Conclusiones y recomendaciones……..124

**Capítulo 8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**…..……...127

**Capítulo 9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**……...131

**Anejo 1. Análisis estadístico de normalidad de los resultados experimentales**…..133

**Anejo 2. REAL DECRETO 1620/2007, por el que se establece el régimen jurídico de la reutilización de las aguas depuradas**……143

# AGRADECIMIENTOS

En estas líneas quisiera dejar constancia de mi más sincero agradecimiento a aquellas personas que han hecho posible la realización de esta tesina.

Deseo agradecer a mi tutor, Rafael Mujeriego Sahuquillo, su atención esmerada y excelente trato humano durante el tiempo que ha durado la realización de esta tesina. Gracias por el apoyo, la dedicación y los excelentes consejos proporcionados.

Agradezco igualmente la información y la colaboración prestada por el personal del Consorcio de la Costa Brava y del personal de las estaciones de regeneración de agua de Tossa de Mar, Lloret de Mar y Castell-Platja d'Aro: Lluís Sala, Jordi Sala, Maribel Muñoz, Amanda Con, Jordi Muñoz y Silvia Quintana.

Gracias a mis amigos por tenerme que soportar durante todos estos años, especialmente a Bruno, Jesús y Rafa.

Por último y muy especialmente, gracias a mi familia. Gracias por vuestra paciencia, por vuestra ilusión y por vuestro apoyo incondicional. **Gracias.**

# CAPÍTULO 1

# INTRODUCCIÓN

El agua ha sido considerada hasta hace relativamente pocos años como un recurso prácticamente ilimitado. La aparición de los primeros indicios del cambio climático, la variabilidad temporal y espacial de las precipitaciones, el aumento de la demanda de agua por determinadas zonas urbanas con un gran aumento de población y la sobreexplotación de los acuíferos, entre otros, han provocado una disminución y un agotamiento de los recursos hídricos naturales en determinadas zonas del planeta. Si estos hechos no son excesivamente preocupantes en aquellos territorios donde se dispone de suficientes recursos hídricos, sí es alarmante en aquellas zonas áridas o semiáridas con una limitación de recursos hídricos disponibles, como es el caso de nuestro país. Ante este nuevo contexto es necesario el planteamiento de una nueva concepción en la gestión del agua mucho más sostenible, racional y respetuosa con el medio ambiente.

Esta nueva estrategia de gestión incluye necesariamente la adopción de una serie de medidas correctoras, que son (Mujeriego, 2008): 1) la protección y mejora de las fuentes convencionales de agua, 2) el ahorro de agua, mediante su uso eficiente, 3) la regulación o almacenamiento de agua, 4) el intercambio de recursos entre diferentes usuarios, 5) la regeneración y la reutilización planificada, y 6) la desalación. En este sentido, la regeneración y la reutilización planificada son un elemento esencial de esta nueva gestión de los recursos hídricos debido a las múltiples ventajas que presentan (Mujeriego, 2008): 1) proporcionan recursos hídricos adicionales (nuevos, alternativos, no convencionales), 2) es una fuente local de agua, 3) ofrece un agua de gran calidad, 4) amplía la auto-suficiencia de recursos, y 5) mejora significativamente la garantía (fiabilidad) de suministro.

La regeneración y la reutilización planificada se plantean originariamente en aquellas zonas del planeta donde históricamente han tenido problemas de abastecimiento de agua, con déficit geográfico importante pero con disponibilidad de recursos técnicos y económicos suficientes. En este sentido, el estado de California es pionero a nivel mundial en el campo de la regeneración de agua, tanto en tecnología como en pautas a seguir. La territorialidad que conlleva la regeneración supone la existencia de numerosas normativas, situadas frecuentemente entre los criterios más estrictos de la ley californiana y las exigencias básicas recomendadas por la Organización Mundial de la Salud (OMS).

En el ámbito de la Unión Europea, las normativas cada vez más exigentes sobre los vertidos de aguas residuales depuradas al medio permite que con un tratamiento adicional ésta pueda alcanzar una calidad de agua tal que pueda utilizarse para diferentes usos. El proceso habitual de las estaciones depuradoras de aguas residuales (EDAR) no inactiva de manera suficiente los microorganismos presentes en el agua. De esta forma, los principales objetivos del tratamiento de regeneración es eliminar la carga contaminante residual del efluente a regenerar y desinfectarlo completamente para inactivar los microorganismos patógenos presentes en el agua antes de su reutilización. En definitiva, el tratamiento regenerador produce una disminución de los valores de

MES y de turbiedad, y un aumento de los de transmitancia, con objeto de asegurar la eficacia y la fiabilidad del proceso de desinfección.

Los procesos que conforman un tratamiento de regeneración dependen de la calidad del agua residual a regenerar y del uso que se quiera dar al agua. Igualmente, la aceptabilidad del agua regenerada para un uso determinado depende de su calidad física, química y microbiológica y, básicamente, del riesgo sanitario relacionado con esta calidad. Un tratamiento terciario básico consiste generalmente en una coagulación-floculación, una decantación, una filtración y una desinfección.

Centrándonos en la normativa española, hasta la aprobación del Real Decreto 1620/2007 por el que se regula la regeneración y la reutilización de aguas en España, no existía una legislación nacional. Sólo Baleares, Cataluña y Andalucía disponían de recomendaciones. El RD 1620/2007 es un documento intermedio entre la exigente normativa californiana y las recomendaciones básicas de la OMS. Con la aprobación de este Decreto se proporciona un enorme impulso al agua regenerada en nuestro país, principalmente en aquellas zonas con graves déficits de agua. En este sentido, cabe esperar una mejoría y un aumento del uso de agua regenerada, en los próximos años.

Todas estas circunstancias han conducido a que la instalación de estaciones de regeneración de agua (ERA) en España sea mucho más reciente que en otros países. Ante el previsible aumento de éstas en los próximos años es conveniente realizar estudios para determinar la eficacia y la fiabilidad de los procesos de regeneración de agua llevados a cabo en las ERA existentes. Este es el objetivo principal de la presente tesina, en la que se ha procedido al estudio de la eficacia y fiabilidad de tres ERA a través de los parámetros físico-químicos y microbiológicos más representativos del agua.

Las tres ERA estudiadas pertenecen al Consorci de la Costa Brava (CCB). El CCB es una entidad pública de carácter supramunicipal de gran prestigio internacional en cuanto a regeneración y reutilización. El CCB se encarga de la gestión integral del agua en los 27 municipios del ámbito de la Costa Brava; la gran variedad de aplicaciones de las que dispone actualmente le permiten reutilizar 5,5 $hm^3$/año de agua regenerada, lo que representa un 18% de los 30 $hm^3$/año de agua que depura.

# CAPÍTULO 2

# OBJETIVOS

El objetivo principal de esta tesina es determinar la eficacia y la fiabilidad de diversos procesos de regeneración de agua. Para la consecución de este objetivo ha sido necesario estudiar los parámetros físico-químicos y sanitarios más representativos del agua, observando la evolución de estos a lo largo de los diferentes años muestreados. Asimismo, se ha estudiado la conformidad del agua regenerada con la normativa existente a fin de determinar si se alcanzan o no los objetivos de calidad exigidos a un proceso de regeneración. El estudio se ha realizado en 3 estaciones de regeneración de agua de diferentes características, Castell-Platja d'Aro, Lloret de Mar y Tossa de Mar, lo que ha permitido realizar una valoración del proceso de regeneración y su evolución, y proponer una serie de recomendaciones o mejoras con el objetivo de aumentar la eficacia y la fiabilidad de los procesos de regeneración.

Los objetivos específicos de este estudio son los siguientes:

1. Realizar una revisión bibliográfica sobre la regeneración de agua, los principales estudios efectuados sobre procesos de regeneración y la normativa existente sobre regeneración de agua.

2. Determinar la eficacia y la fiabilidad de diversos procesos de regeneración.

3. Evaluar los parámetros físico-químicos y sanitarios más representativos de diversos procesos de regeneración de agua y estudiar su evolución a lo largo de los diferentes años muestreados.

4. Estudiar la relación existente entre los diferentes parámetros de control considerados y su influencia sobre el proceso de regeneración.

5. Determinar la conformidad de los procesos de regeneración con la normativa existente.

# CAPÍTULO 3

# REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

## 3.1 INTRODUCCIÓN

Regeneración y reutilización son dos procesos estrechamente relacionados entre sí. Debido a su estrecha relación, a menudo se utilizan las mismas palabras para referirse a estos dos conceptos y, por tal motivo, con mucha frecuencia se confunden uno con otro. La regeneración de un agua es el proceso necesario para adecuar su calidad al uso concreto al que se piensa dedicar (Mujeriego, 2007). Por su parte, la reutilización consiste en poner el agua regenerada a disposición del usuario que la desea usar (Mujeriego, 2007). De este modo, la regeneración precisa únicamente de una estación de regeneración de agua (ERA), mientras que la reutilización requiere de tres elementos principales (Mujeriego, 2007): 1) una red de distribución que transporte el agua desde el punto de regeneración hasta el punto de utilización, 2) un dispositivo que permita regular la producción/oferta de agua regenerada a la demanda de la misma, y 3) diversos requisitos de uso, tales como el color de los conductos o las formas de realizar la reutilización.

La regeneración y la reutilización planificada se han convertido en un elemento esencial de la nueva gestión de los recursos hídricos, mucho más sostenible, racional y respetuosa con el medio ambiente. Los usos a los que se destina el agua regenerada son muy diversos (Mujeriego, 2008):

1. Usos urbanos: jardinería, incendios, baldeo de calles y automóviles.
2. Usos industriales: torres de refrigeración, lavado de vagones de ferrocarril.
3. Riego agrícola, forestal y de jardinería.
4. Usos ornamentales y recreativos.
5. Mejora y preservación del medio natural (humedales y ríos).
6. Recarga de acuíferos (infiltración e inyección).
7. Aumento de aguas de abastecimiento: indirecta o directa.
8. Mejora de reservas de aguas de abastecimiento.

La aprobación del RD 1620/2007 en diciembre de 2007 supone la introducción de una normativa a nivel nacional de la que se carecía hasta entonces respecto a la regeneración y la reutilización del agua. La aprobación de esta normativa (RD 1620/2007) permitirá impulsar el desarrollo del agua regenerada en nuestro país y superar los múltiples retos a los que se enfrenta la reutilización en el futuro. Entre los principales retos de la regeneración y reutilización del agua, cabe mencionar los siguientes (Mujeriego, 2008):

1. Avanzar en la gestión integrada de los recursos.
2. Adoptar una terminología coherente.
3. Desarrollar una normativa adecuada.
4. Utilizar una marca de calidad.
5. Asegurar la viabilidad y el respeto ambiental.
6. Promover la información y la participación del público.
7. Ampliar la colaboración nacional e internacional.

En este contexto de futuro, son igualmente importantes las estrategias a seguir para que la regeneración y la reutilización del agua adquieran las máximas cotas posibles de desarrollo, utilización, aceptación y apoyo. Entre las estrategias de futuro a incorporar pueden mencionarse las siguientes (Mujeriego 2008):

1. Considerar el agua regenerada como una nueva fuente local y fiable de agua.
2. Promover la gestión integrada de los recursos.
3. Impulsar la mejor calidad del agua regenerada posible.
4. Proporcionar un toque de naturalidad.
5. Impulsar la información y la participación del público.
6. Asegurar la aceptación y el apoyo de la población.
7. Documentar y divulgar proyectos emblemáticos.
8. Plantearse definitivamente la reutilización potable indirecta (proyecto de demostración).

Un ejemplo cercano y de gran prestigio internacional en cuanto a la regeneración y la reutilización es el llevado a cabo por el Consorcio de la Costa Brava (CCB). El CCB se encarga de la gestión integral del agua en los 27 municipios del ámbito de la Costa Brava y dispone actualmente de un gran abanico de aplicaciones que le permite reutilizar 5,5 $hm^3$/año de agua regenerada, lo que representa un 18% de los 30 $hm^3$/año de agua residual que depura. Suponiendo una dotación por habitante de 150 litros/día, el volumen reutilizado actualmente correspondería al agua consumida en un año por una población de 110.000 habitantes.

## 3.2 ANTECEDENTES

Esta tesina tiene como objetivo principal determinar la eficacia y la fiabilidad de diversos procesos de regeneración llevados a cabo en diferentes estaciones de regeneración de agua (ERA). Anteriormente a esta tesina, el alumno Marc Gómez López (2008) realizó su tesina sobre los parámetros de control de los procesos de regeneración de agua. A pesar de las partes comunes de ambas tesinas, tienen también numerosas diferencias. La tesina de Marc Gómez ha sido una excelente base de partida para la realización de nuestra tesina. La complementariedad de ambas tesinas permitirá caracterizar con mayor exactitud, claridad y objetividad los procesos de regeneración de agua.

A continuación se procede a una descripción preliminar de las diferencias entre ambos estudios. A diferencia de la anterior tesina, donde sólo se tuvieron en consideración parámetros físico-químicos, esta tesina estudia el comportamiento de parámetros tanto físico-químicos como sanitarios. La anterior tesina también procedía a un estudio estadístico mucho más intenso y exhaustivo que la que nos ocupa. Otra importante diferencia radica en que Gómez (2008) estudiaba la variación de cada parámetro en función del tratamiento al que se sometía el agua, mientras que en esta tesina sólo se estudia generalmente el afluente y el efluente del proceso de regeneración. No menos importante es el hecho de que sólo una de las ERAs estudiadas en esta tesina coincide con las estudiadas en la anterior tesina, concretamente la ERA de Castell-Platja d'Aro. Por último, el estudio del proceso de regeneración a lo largo de una serie de años permite observar su evolución a partir de los cambios o medidas incorporadas, a diferencia de la tesina anterior donde el estudio se llevaba a cabo con datos de un único año.

## 3.3 AGUA RESIDUAL Y PROCESOS DE DEPURACIÓN

### Agua residual y agua depurada

El agua residual es el residuo líquido recogido por los sistemas de alcantarillado de una población que es conducido hasta una estación depuradora de aguas residuales (EDAR) para que pueda ser tratado y devuelto posteriormente al medio, de acuerdo con los requisitos legales aplicados, de modo que no produzcan un impacto negativo sobre éste. El agua residual es una mezcla de diferentes aguas residuales: agua residual doméstica, agua residual industrial, agua de escorrentía y agua de infiltración. Su composición dependerá en gran medida del lugar y del tiempo en los que se encuentre. Por ejemplo, el agua residual doméstica depende de las pautas de comportamiento humano (invierno-verano, día-noche), y varía enormemente en lugares con población estacional. Por su parte, el agua residual industrial es mucho más diversa, dependiendo de su proceso técnico que la genera.

El agua residual puede ser caracterizada a partir de numerosos parámetros:

1. Parámetros físicos como color, olor, sólidos y temperatura.
2. Parámetros químicos: a) orgánicos como C, H y $O_2$.
   b) inorgánicos como cloruros, conductividad y pH.
   c) gases como $O_2$, $CO_2$, $CH_4$, $H_2S$ y $N_2$.
3. Parámetros biológicos como microorganismos, algas y protozoos.

La EDAR somete al agua residual a un tratamiento de depuración, definido como el conjunto de procesos aplicados al agua con el objetivo de reducir su nivel de contaminación hasta aquel que la convierta en apta para su vertido al medio (suelo, río, mar u océano); el agua resultante se denomina agua residual depurada.

Las prioridades del proceso de depuración son generalmente las siguientes: la materia en suspensión orgánica, la materia disuelta orgánica, el nitrógeno, el fósforo y los microorganismos (se confía en que estos se inactivan durante su dilución en el medio natural). La Directiva 91/271/CEE sobre tratamiento de las aguas residuales urbanas establece los niveles de calidad exigidos al agua residual depurada. Estos niveles de calidad son los siguientes:

- Requisitos por los vertidos procedentes de instalaciones de tratamiento de aguas residuales urbanas:

  a) Demanda bioquímica de oxígeno ($DBO_5$ a 20 ºC): 25 $mgO_2$/L.
  b) Demanda química de oxígeno (DQO): 125 mg/L.
  c) Materia en suspensión (MES): 35mg/L(+ de 10.000 hab. equivalentes).
  60mg/L(de 2.000 a 10.000 hab. equivalentes).

- Requisitos para los vertidos procedentes de instalaciones de tratamiento de aguas residuales urbanas realizados en zonas sensibles propensas a eutrofización:

  a) Fósforo total: 2 mg/L P (de 10.000 a 100.000 hab. equivalentes).
  1 mg/L (+ de 100.000 hab. equivalentes).
  b) Nitrógeno total: 15 mg/L (de 10.000 a 100.000 hab. equivalentes).
  10 mg/L (+ de 100.000 hab. equivalentes).

**Tratamiento de depuración de aguas residuales**

El objetivo principal de un proceso de depuración de aguas es reducir la carga de contaminantes de la misma y de manera especial la de origen orgánico. De este modo, conseguimos que esa agua pueda verterse a un medio receptor natural limitando los posibles daños ambientales en él. Los porcentajes de eliminación actuales para una estación depuradora convencional se sitúan entre el 90% y el 95%, expresado en términos de demanda bioquímica de oxígeno ($DBO_5$) y de materia en suspensión (MES). Nótese que en la depuración no suele incorporarse la desinfección por 3 motivos principales: 1) tiene un coste adicional, 2) eficacia cuestionable (la eficacia de la desinfección es menor debido a la MES presente), y 3) generación de subproductos. Los procesos de depuración se estructuran en diferentes niveles en función del tipo de equipos utilizados y sus rendimientos:

1. Pretratamiento. Consiste en la eliminación de elementos constituyentes que generan problemas (uso, reparación, funcionamiento,…) a los tratamientos posteriores. Los tratamientos más usuales de pretratamiento son el desbaste, la eliminación de arenas y grasas, y los depósitos de homogeneización de caudales y cargas. El desbaste consiste en la colocación de rejas o tamices para retener las partículas con una sección mayor que la impuesta por los elementos del proceso. El desarenador permite la eliminación de arena, grasas y aceites. La eliminación de arena es de enorme importancia debida a su carácter abrasivo y a la existencia de numerosos elementos mecánicos en las plantas. La homogeneización de caudales y cargas se realiza por medio de un depósito con el objetivo de conseguir una carga contaminante y un caudal lo más constante posible para que el rendimiento alcanzado en los tratamientos posteriores sea mayor.

2. Tratamiento primario. El tratamiento primario consiste en separar del agua la materia orgánica fácilmente sedimentable por efecto exclusivo de la gravedad; para llevarlo a cabo, se usan unos depósitos de precipitación llamados decantadores. Este proceso tiene un efecto bastante limitado de eliminación de la mayoría de especies biológicas presentes en el agua residual y no consigue reducir de forma eficaz la concentración de bacterias o virus contenidos en ella. Es pues, un paso necesario pero no suficiente para conseguir un agua bien depurada. El rendimiento de retención de un tratamiento primario es de aproximadamente un 60% de la MES afluente y un 30% de la $DBO_5$ afluente, aumentando aproximadamente a un 80% y a un 50% respectivamente en el caso de utilización de coagulantes.

3. Tratamiento secundario. El tratamiento secundario consiste en la eliminación de la materia orgánica soluble y coloidal y es llevado a cabo por un proceso biológico aerobio en tanques de aireación por medio de microorganismos aerobios. De esta forma se reduce la concentración de microorganismos en el efluente del tratamiento primario, pero no llega a eliminarlos por completo. En general, los procesos de fangos activados son más eficaces que otros sistemas de tratamiento secundario para reducir las poblaciones de bacterias y virus.

4. Tratamiento terciario. El tratamiento terciario de un proceso de depuración permite rebajar algunos de los componentes del agua residual que no ha sido posible reducir mediante el tratamiento secundario. Un tratamiento terciario

completo suele consistir en una coagulación-floculación, una decantación, una filtración y una desinfección. Con ello se elimina una fracción elevada de los virus y las bacterias presentes en el agua afluente. Además, los procesos terciarios reducen la turbiedad del agua tratada hasta niveles muy bajos, lo que asegura la eficacia del proceso de desinfección que se efectúa después de la filtración. Una alternativa al tratamiento terciario tradicional son los humedales.

## 3.4 REGENERACIÓN Y REUTILIZACIÓN DE AGUA

La regeneración de un agua es el proceso necesario para adecuar su calidad al uso concreto al que se piensa dedicar (Mujeriego, 2007). La reutilización consiste en poner el agua regenerada a disposición del usuario que la desea usar (Mujeriego, 2007).

En función de la forma en la que se hace llegar el agua regenerada al usuario, la reutilización se clasifica (Mujeriego, 2007) en indirecta (si se mezcla con aguas de otros cauces) o directa (cuando se realiza sin mediar con otras aguas). Otra posible clasificación atiende al destino final del agua regenerada (Mujeriego, 2007), siendo reutilización potable si se destina a la ingestión humana en algún momento, o no potable si no se destina a la ingestión humana.

En el caso de los usos potables, cuando existe la posibilidad de que la población pueda ingerir el agua, el tratamiento debe adecuarse a la necesidad de reducir la probabilidad de que las personas entren en contacto con los microorganismos patógenos. Por lo tanto, es importante controlar y valorar el riesgo potencial para la salud pública asociado con la presencia de microorganismos patógenos (Botero et al., 1997). De esta forma, queda totalmente justificado el estudio en la tesina de un conjunto de indicadores (Escherichia coli, coliformes fecales y clostridium sulfito reductores) para detectar la posible presencia de microorganismos, bacterias y virus en el agua.

El proceso habitual de las estaciones depuradoras de aguas residuales (EDAR) no inactiva de manera suficiente los microorganismos presentes en el agua, y dado que este hecho es de vital importancia, para la reutilización es necesario realizar algún tratamiento adicional para garantizar la eliminación de microorganismos patógenos antes de reutilizar el agua (Botero et al., 1997). La inactivación de los microorganismos patógenos contenidos en un agua residual tratada se consigue mediante un proceso de desinfección (Asano et al., 1990). Para asegurar la inactivación total de los microorganismos indicadores presentes en un agua es necesario reducir al mínimo posible el contenido de materia en suspensión (MES) y la turbiedad del agua a tratar, ya que las partículas ofrecen a los microorganismos una barrera protectora frente a la acción de los desinfectantes (Mujeriego, García, y Aguirre, 2004). Por ello, dos de los parámetros físico-químicos utilizados en el estudio que nos ocupa son la turbiedad y la MES.

Los sistemas de desinfección más comúnmente utilizados en los procesos de regeneración de agua son:

a) La adición de productos químicos (principalmente cloro y derivados, y ozono).
b) La aplicación de luz ultravioleta (UV).
c) La filtración en medio granular o con membranas.

d) La instalación de lagunas de afino.

El cloro es el desinfectante por excelencia debido a su alta eficacia en condiciones habituales, su bajo coste y a sus características bien conocidas por su extensa aplicación. Sin embargo, la reacción del cloro con la materia orgánica genera compuestos organoclorados, que han llevado a considerar sistemas que eviten la formación de esas sustancias, tales como la luz UV. La luz ultravioleta ha venido siendo utilizada con éxito en aguas de abastecimiento desde hace varias décadas y su desarrollo tecnológico ha avanzado notablemente en los últimos años.

Los sistemas de luz ultravioleta, además de no generar subproductos de la desinfección, son equipos muy compactos que requieren un espacio mínimo para su instalación. No obstante, la aplicación de la luz ultravioleta para la desinfección de aguas residuales todavía presenta algunas limitaciones, especialmente cuando existen grandes variaciones de la calidad del agua que provoca un descenso notable en su eficacia. Para obtener un buen rendimiento, se requiere una calidad constante del agua, cosa que sí que ocurre en las aguas de abastecimiento pero que es más difícil de encontrar para las aguas residuales. Previamente a la desinfección con luz UV pues, es importante mejorar la calidad del agua, especialmente con respecto a la transmitancia (la directrices internacionales recomiendan un valor mínimo de 60%). Este es un parámetro clave en el estudio de esta tesina.

Una vez obtenida el agua regenerada, su correcto aprovechamiento requiere de los siguientes elementos (Mujeriego, 2000):

a) El almacenamiento o regulación para adecuar el caudal suministrado por la planta a los caudales consumidos.

b) El transporte desde la estación de regeneración hasta el lugar de utilización.

c) La definición de unas normas de utilización del agua para minimizar los posibles riesgos directos o indirectos para el medio ambiente, las personas que la van a utilizar, la población colindante al lugar de uso y los consumidores de cualquier producto cultivado con el agua regenerada.

Estos tres elementos técnicos constituyen el núcleo central de un programa de reutilización planificada de agua residual. La reutilización planificada ha alcanzado una gran aceptación en zonas con déficits estacionales y geográficos de agua convirtiéndose en un elemento esencial de la gestión de los recursos hídricos. Los beneficios que presenta la reutilización planificada son numerosos (Mujeriego, 2008):

1. Es una nueva fuente de suministro de agua, capaz de aportar recursos hídricos adicionales.
2. Es una fuente local de agua.
3. Ofrece un agua de gran calidad.
4. Permite una gestión integrada del agua más sostenible.
5. Mejora la gestión de la calidad del agua.
6. Amplía la auto-suficiencia de los recursos.
7. Mejora significativamente la garantía (fiabilidad) de suministro, respecto a la de zonas semi-áridas.

No obstante, la reutilización planificada plantea también una serie de exigencias (Mujeriego, 2008):

1. Establecimiento de unas normas de calidad del agua regenerada (RD 1620/2007).
2. Un proceso de regeneración eficiente y fiable.
3. Unas normas de uso del agua regenerada.
4. Una doble red de suministro (infraestructura).
5. Una nueva mentalidad: elaborar un producto en lugar de generar un residuo (optimizar el uso y no el vertido).
6. La voluntad política: hacer de la regeneración y la reutilización un elemento básico de la gestión integrada.

## 3.5 CALIDAD FÍSICO-QUÍMICA Y MICROBIOLÓGICA

El estudio de la eficacia y fiabilidad de los procesos de regeneración de agua se lleva a cabo mediante los parámetros más representativos de las características físico-químicas y microbiológicas del agua. En este apartado se realiza una breve descripción de cada uno de los parámetros utilizados en el desarrollo de la tesina.

### Calidad físico-química

Los parámetros físico-químicos que caracterizan un agua son muy numerosos: color, turbiedad, olor, pH, acidez, alcalinidad, dureza, conductividad, sólidos en suspensión, salinidad, potencial redox, transmitancia, temperatura, $DBO_5$, DQO, P y N. En esta tesina, la caracterización de la calidad físico-química del agua se realiza a partir de 4 parámetros:

1. Materia en suspensión (MES). Los sólidos totales de un agua son aquellos residuos de material que quedan en un recipiente tras la evaporación del agua de la muestra a temperaturas de 103, 130 ó 180ºC. Los sólidos totales incluyen los sólidos suspendidos (MES) y los sólidos disueltos, diferenciados a través de una filtración de agua mediante un filtro de 0,45 µm, de modo que las sustancias disueltas pasen y la MES quede retenida. La diferenciación entre materia orgánica/volátil e inorgánica/mineral se realiza a través de la incineración (550±50ºC) de la muestra desecada, de modo que la materia orgánica se volatilice en dióxido de carbono y agua, y la materia inorgánica permanezca en el recipiente utilizado (mufla).

   El análisis de sólidos, y en particular de MES, son enormemente importantes para el control de la depuración de aguas residuales. Concretamente, la MES es uno de los parámetros de obligado cumplimiento en las normativas. Además, el control de la MES es de alta importancia antes de un proceso de desinfección, pues la presencia de MES disminuye la eficacia de la desinfección.

2. Turbiedad. La turbiedad es una propiedad óptica del agua que se manifiesta por la dispersión de la luz visible producida por la presencia de materia en suspensión en la muestra de agua. La turbiedad es de enorme importancia en la gestión de la calidad de un agua, pues es un parámetro de calidad estético

(aspecto visual del agua) y de calidad sanitaria (la presencia de materia en suspensión indica la posible presencia de microorganismos frente a la desinfección). La turbiedad es un parámetro a controlar en las normativas actuales. Un aspecto interesante frente a la MES es el hecho de que la medición de la turbiedad es mucho más sencilla y rápida que la anterior. Como curiosidad, basta indicar que para que la vista humana considere el agua libre de MES es suficiente una turbiedad inferior a 10 UNT.

Históricamente, el método para determinar la turbiedad se basa en el turbidímetro de Jackson; sin embargo, el valor más bajo de turbidez que puede medirse directamente con este instrumento es de 25 unidades. En la actualidad, el método utilizado para determinar la turbiedad es el nefelométrico. Este método se basa en la comparación de la intensidad de la luz dispersada en dirección ortogonal por la muestra en condiciones definidas y la dispersada por una solución patrón de referencia en idénticas condiciones. Cuanto mayor es la intensidad de la luz dispersada, más intensa es la turbiedad. Como suspensión patrón de referencia se utiliza la formacina. Los aparatos de medida se denominan turbidímetros de dispersión o nefelómetros cuyo objetivo es la medida de la intensidad de la luz dispersada en la dirección ortogonal (90º) a la luz incidente.

3. Transmitancia. La transmitancia de un agua es el cociente entre la intensidad de luz transmitida y la intensidad de luz emitida, usualmente en tanto por ciento. La transmitancia está relacionado con la absorbencia, pues esta se define como el logaritmo cambiado de signo de la transmitancia en tanto por uno. La transmitancia viene referida a la longitud de onda de la luz utilizada. La longitud de onda normalmente utilizada es de 254 nm, representativa de la absorción preferente de la materia orgánica disuelta.

   La transmitancia a 254 nm es un parámetro de calidad estético y de enorme importancia en los procesos de regeneración de agua. Para que un proceso de desinfección con luz UV tenga garantía de ser eficiente se recomiendan valores mínimos de transmitancia del 60%. La transmitancia determina la capacidad para permitir el paso de la luz UV sin ser absorbida por las sustancias orgánicas que ésta pueda contener, pues ello permite que una mayor proporción de la luz UV incidente esté disponible para actuar sobre los microorganismos que se trata de inactivar.

4. Potencial redox. El potencial redox mide la capacidad global de un agua de proceder por sí misma a la oxidación o reducción de sustancias. Es decir, un agua con elevado potencial redox contendrá apreciable cantidad de oxígeno, siendo rica en compuestos en estado oxidado: Fe y Mn en sus estados superiores de oxidación, sulfatos, nitratos, fosfatos, y materia orgánica, y estando, en general, fuertemente mineralizada. Por contra, un agua con bajo potencial redox contendrá abundantes compuestos en estado reducido, apenas oxígeno y sí sulfuros, amoníaco y materias orgánicas difícilmente mineralizables. El potencial redox es análogo al pH pues mientras el potencial redox mide la actividad de los electrones, el pH mide la de los protones.

## Calidad microbiológica

El control de los parámetros físico-químicos es de enorme importancia en los sistemas de tratamiento de agua residual y potable, al igual que lo es el de los parámetros microbiológicos. En aquellos lugares donde el agua residual regenerada pueda tener un contacto directo con las personas, el factor de riesgo más importante es la exposición a agentes biológicos tales como bacterias patógenas, helmitos, protozoos y virus entéricos. La Tabla 3.1 muestra los agentes microbianos infecciosos que se pueden encontrar en el agua residual y las enfermedades que ocasionan.

Tabla 3.1 Agentes potencialmente infecciosos presentes en el agua residual (Crook, 1998).

| **Agente patógeno** | **Enfermedad** | **Agente patógeno** | **Enfermedad** |
|---|---|---|---|
| *Bacterias* | | *Protozoos* | |
| Cambylobacter | Gastroenteritis | Balantidium coli | Disenteria |
| Escherichia Coli | Gastroenteritis | Crytosporidium | Diarrea |
| Salmonella Typha | Fiebre tifoidea | Entamoeba | Amebiasis |
| Vibrio cholerae | Cólera | Giardia lamblia | Giardiasis |
| *Helmitos* | | *Virus* | |
| Echinococcus | Hidatidosis | Astrovirus | Gastroenteritis |
| Enterobius | Enterobiasis | Enterovirus | Meningitis, otros |
| Necator | Necatoriasis | Hepatitis A | Hepatitis infecciosa |
| Taenia | Taeniasis | Parvovirus | Gastroenteritis |

La dificultad de determinar la presencia de todos los microorganismos patógenos presentes en un agua residual hace necesario identificar microorganismos, o grupos de ellos, que puedan utilizarse para el seguimiento y evaluación de patógenos. Estos microorganismos son conocidos como indicadores. Según Yates (1992), un indicador ideal debe cumplir las siguientes condiciones:

1. Su concentración debe ser estable y en relación directa con la del patógeno.
2. Debe estar presente y ser detectable en todos los medios contaminados.
3. No debe ser patógeno para humanos y ser fácilmente identificable.
4. Debe sobrevivir como mínimo el mismo tiempo que los patógenos frente a efectos ambientales.
5. Debe ser detectable por métodos simples, rápidos y económicos.

En cuanto a indicadores bacterianos, los indicadores de contaminación fecal más utilizados son los coliformes. Estas bacterias viven en grandes cantidades en el intestino de las personas y los animales de sangre caliente, desde donde son expulsadas al exterior con los excrementos. Los coliformes no son dañinos para las personas, pero indican que el agua ha estado en contacto con materia fecal y por lo tanto puede contener algún microorganismo del intestino humano o de animales, que sí puede ser patógeno. El grupo de organismos coliformes es un indicador adecuado de contaminación fecal bacteriana por las siguientes razones:

1. Son huéspedes comunes del tracto intestinal de las personas como de los animales de sangre caliente.
2. Están presentes en el tracto intestinal en grandes cantidades.

3. Permanecen en el agua más tiempo que las bacterias patógenos.
4. Se comportan de igual manera que los patógenos.

Los indicadores utilizados en esta tesina son los coliformes fecales (CF) y la Escherichia Coli. Los CF son bacterias coliformes capaces de crecer a 44,5 ºC, entre las cuales se encuentra la Escherichia coli. Las ventajas que representa usar estos indicadores son las siguientes: 1) su evaluación es relativamente simple y directa, 2) se considera que niveles bajos de CF son buenos indicadores de ausencia de organismos patógenos (Hood et al., 1983), y 3) no se multiplican fuera del tracto intestinal de animales de sangre caliente, por lo que su presencia en sistemas acuáticos es evidencia de contaminación de origen fecal (Laws, 1981).

Para cuantificar con precisión la eficiencia de la eliminación de virus y de parásitos es necesario disponer de microorganismos indicadores de tipo vírico. En particular, los bacteriófagos permiten establecer, con una aproximación aceptable, la eficacia de los tratamientos para eliminar los virus que pueda contener un agua. Cabe destacar que los virus no se encuentran generalmente en las heces humanas, estando presentes sólo en las heces de los individuos que han sido infectados a través del contacto con personas portadoras, o con agua o comida contaminadas (Baudisová, 1997; Yates y Gerba, 1998).

Finalmente, un último grupo indicador utilizado para evaluar la calidad higiénica del agua es el de los clostridium sulfito-reductores (CSR). El grupo bacteriano de los sulfito-reductores está integrado por gérmenes pertenecientes al género Clostridium, que tienen en común reducir el sulfito a sulfuro. El sulfuro con el hierro forma el sulfuro de hierro que produce un halo de color negro. Son bacterias de morfología bacilar, gram positivos, anaerobios estrictos. Las esporas de estas bacterias pueden resistir en el agua mayor tiempo que los organismos coliformes, siendo además más resistentes a la desinfección que aquéllos (la filtración suele ser, sin embargo, un medio eficaz para su eliminación). Si bien, en ocasiones, son de origen telúrico, su presencia, acompañada de coliformes y/o estreptococos, viene a confirmar la contaminación fecal.

## 3.6 NORMAS Y RECOMENDACIONES

La implantación de un proyecto de regeneración de agua tiene dos requisitos esenciales y complementarios (Mujeriego, 1998):

1. Definir los niveles de calidad adecuados para cada uno de los posibles usos que se piense dar al agua.

2. Establecer los procesos de tratamiento y los límites de calidad del efluente recomendados para cada uno de los usos previos.

La elaboración y aprobación de estos dos aspectos técnicos de la regeneración de agua constituyen generalmente la faceta más discutida de todo programa de regeneración. Prueba de ello son la diversidad y la heterogeneidad de los criterios y las normas de calidad establecidas por diversos países y organizaciones internacionales sobre la reutilización de agua.

La aceptabilidad del agua regenerada para un uso determinado depende de su calidad física, química y microbiológica y, básicamente, del riesgo sanitario relacionado con

esta calidad. Los contaminantes presentes en un agua residual pueden clasificarse de forma general en agentes biológicos y agentes químicos, siendo en la mayoría de los casos los agentes biológicos los que plantean los mayores riesgos sanitarios y, por ello, son objeto de limitaciones mediante las correspondientes normas de calidad.

Las disposiciones legales tienen un rango diferente según las organizaciones o países que las aprueban. Algunas normas tienen rango de ley (California y España), y otras rango de recomendaciones (OMS, 1989). En este sentido, Anderson (2001) recomienda una unificación del marco de trabajo que reúna las dos vertientes actuales existentes con el objetivo de conseguir un único marco de investigación a nivel mundial, una mejor gestión en el control de riesgos y principalmente, una mayor aceptación de la reutilización por el público en general.

De esta forma, para el establecimiento de normas de calidad para el agua regenerada se discuten dos planteamientos muy diferenciados. Por un lado, la propuesta de la denominada "Escuela de California" cuyo planteamiento consiste en el establecimiento de unos límites estrictos en cuanto a la calidad del agua con el objetivo de minimizar el riesgo al usar agua regenerada. Por otro lado, la propuesta de la Organización Mundial de la Salud (OMS) consistente en el establecimiento de unos límites menos estrictos a los anteriores asumiendo de esta forma un cierto riesgo a valorar y estudiar en cada caso. De esta última forma, el agua regenerada alcanzará cotas de utilización más elevadas a nivel mundial extendiéndola a los países con menos recursos económicos, que a menudo suelen tener problemas de abastecimiento de agua. Por el contrario, la primera opción necesita de una tecnología costosa que dificultaría enormemente la utilización del agua regenerada en aquellos países con menos recursos económicos.

### 3.6.1 Normativas y recomendaciones internacionales

Aquellos territorios en los que el abastecimiento de agua ha sufrido graves problemas de suministro o incluso se ha visto restringido, y cuyo desarrollo y recursos económicos disponibles han sido elevados, se han convertido en zonas pioneras a nivel mundial tanto en tecnología de regeneración como en establecimiento de normas de calidad del agua regenerada. En este sentido, en 1918 el estado de California estableció por primera vez una calidad microbiológica de 2,2 coliformes totales/100 mL para aguas regeneradas destinadas al riego agrícola. Posteriormente, en 1952 otro país con importantes déficits de agua y con problemas en el suministro, Israel, publicó en 1952 normas sanitarias basadas en las de California. Fue en el año 1973 cuando se dió a la regeneración un ámbito más global, al recomendar a nivel nacional la Agencia de Protección del Medio Ambiente de los Estados Unidos (USEPA) que el agua de riego no superara los 1000 coliformes totales en 100 mL. También en ese año, la Organización Mundial de la Salud (OMS) emitió un informe recomendando ciertos procesos de tratamiento para conseguir un agua que cumpliera con unos criterios sanitarios de <100 ufc CF/ 100ml en al menos el 80% de las muestras. A partir de este año, las normas se extendieron y ampliaron, primero en los Estados Unidos y posteriormente con las recomendaciones emitidas por la OMS en el año 1989 (<1000 ufc CF/100ml y <1 huevo de nematodo/L) en Europa, iniciada en Francia en el año 1991.

La tabla 3.2 ilustra los criterios de calidad adoptados en las normativas de diferentes países. En ella podemos observar como casi todos los países adoptan los CF y el contenido de huevos de nemátodos como criterio de evaluación, a excepción de California que adopta los coliformes totales.

Tabla 3.2. Parámetros de control considerados por las principales normativas internacionales para la reutilización de aguas residuales para riego (Salgot et al., 1999).

| País/Estado | Parámetro principal | Comentario |
|---|---|---|
| California (USA) | CT: 2,2-23 ufc/100 mL | El tratamiento es función del uso. Tratamiento terciario exigido |
| USEPA (USA) | CF: 0 ufc/100 mL.<br>Presencia de cloro residual | Indica el tratamiento a realizar |
| Francia | CF: 200-1000 ufc/100 mL | Sigue las recomendaciones de la OMS |
| Israel | CF: 12-250 ufc/100 mL. Limitaciones de $DBO_5$, MES y cloro residual | Calidad en función del uso |
| Australia | En función del contacto:<br>Alto: CF<10 ufc/100 mL<br>Bajo: CF<10000 ufc/100 mL | Indica el tipo de contacto al que pertenece cada forma de riego |
| OMS | CF: 200-1000 ufc/100 mL<br>1 huevo nematodo/L | Indica el grupo de exposición asociado a cada calidad |

La tabla 3.2 muestra que las normativas que con más frecuencia se utilizan como punto de referencia para evaluar la calidad del agua regenerada son la de la OMS y la del estado de California. La normativa de la OMS se basa en el establecimiento de unos límites amplios de dos parámetros microbiológicos, como son los coliformes fecales (CF) y los nemátodos intestinales. En cambio, las limitaciones impuestas por el estado de California son más exigentes y están basadas en los coliformes totales (CT). Estas normativas no sólo discrepan en los parámetros de control del agua regenerada sino también en los tratamientos asociados. La OMS plantea un tratamiento natural mediante una serie de lagunas de estabilización y la normativa californiana plantea un tratamiento biológico convencional de aguas residuales seguido de un tratamiento terciario constituido por coagulación, floculación, filtración y desinfección. El planteamiento que establece la OMS tiene un coste de construcción y mantenimiento bajos, mientras que la tecnificación del sistema, el coste de construcción, mantenimiento y explotación del sistema californiano es mucho más elevado. La OMS fija los límites mínimos exigidos al agua regenerada con el objetivo de expandir la reutilización del agua a los países con menos recursos económicos y que esta se convierta en una herramienta básica de la gestión del agua en estos países. No obstante, la OMS permite a aquellos países con mayores recursos económicos unos límites de calidad microbiológica más exigentes que los mínimos con el objetivo de disminuir el riesgo.

Al ser el estado de California el pionero a nivel mundial en cuanto a regeneración, describiremos las principales características de su normativa. El estado de California establece los criterios de regeneración de agua residual en el Título 22 del Código del Derecho Administrativo de California, división 4, artículo 3 correspondiente a “Riego

de cultivos comestibles" (California Health Laws Related to Recycled Water, 2001). Según esta normativa, el agua regenerada utilizada será en todo momento un agua residual oxidada, coagulada, clarificada, filtrada y adecuadamente desinfectada. El agua residual se considerará que ha sido adecuadamente desinfectada si en algún punto del proceso de tratamiento la concentración media de coliformes totales no sobrepasa 2,2 NMP (número más probable) de coliformes por 100 mililitros y la concentración de coliformes totales no sobrepasa 23 NMP por 100 mililitros en más de una muestra dentro de cualquier período de 30 días. La concentración media se obtendrá a partir de los resultados de los análisis bacteriológicos realizados durante los 7 días en que se han efectuado estas determinaciones. Ninguna de las muestras analizadas podrá sobrepasar 240 NMP de coliformes totales por 100 mililitros de muestra.

Tras la última revisión de junio de 2001, el Título 22 incluye una nueva especificación orientada a asegurar la desinfección vírica. El agua residual filtrada será desinfectada de acuerdo con algunos de los siguientes criterios:

1. Un proceso de desinfección con cloro, subsiguiente a la filtración, que garantice un valor de CxT (producto de la concentración total de cloro residual y del tiempo de contacto modal, medidos ambos en un mismo punto) no inferior a 450 mg·minuto/l en todo momento, con un tiempo de contacto modal de al menos 90 minutos, para el caudal punta de diseño de la estación seca.

2. Un proceso de desinfección que, combinado con el de filtración, haya demostrado ser capaz de eliminar un 99,999 % (5 unidades logarítmicas) de los bacteriófagos F+-específicos MS2, o virus de la polio en el agua residual. Alternativamente también pueden utilizarse otros virus que sean al menos tan resistentes a la desinfección como el virus de la polio.

### 3.6.2 Normativa española

En la actualidad, España dispone de normativa propia sobre reutilización de aguas regeneradas desde la entrada en vigor mediante el Real Decreto 1620/2007 del 7 de diciembre del 2007, por el que se establece el régimen jurídico de la reutilización de las aguas depuradas. Hasta la aprobación de este RD la legislación existente relativa a reutilización era muy precaria. Sólo las Comunidades Autónomas de Baleares (1992), Cataluña (1994) y Andalucía (1994) tenían normativa específica sobre reutilización que afectaba únicamente a su territorio, quedando el resto de las Comunidades Autónomas sin normativa de obligado cumplimiento.

El RD 1620/2007 es una normativa completa, estricta y exigente, y puede observarse en su totalidad en el Anejo 2 de la presente tesina. A grosso modo posee la siguiente estructura: 1) definiciones, 2) régimen jurídico (concesión o autorización), 3) usos admitidos y usos prohibidos, 4) criterios de calidad, 5) contratos de cesión, 6) procedimiento para la reutilización (con iniciativas o planes de las administraciones públicas; para obtener la concesión; para obtener la autorización), y 7) anexos. Los anexos de los que dispone el RD son cuatro:

- Anexo I.A: criterios de calidad para la reutilización de las aguas según sus usos.

- Anexo I.B: frecuencia mínima de muestreo y análisis de cada parámetro.

- Anexo I.C: evaluación de la calidad de las aguas regeneradas. Establece los criterios de conformidad, las medidas de gestión frente a incumplimientos y propone los métodos o técnicas analíticas de referencia para el análisis de cada parámetro.

- Anexo II: Solicitud para obtener la concesión o autorización de reutilización de aguas.

En el anexo I.A del RD se establecen los valores de calidad que debe cumplir el agua regenerada en función del uso al que se vaya a destinar esta agua. La tabla 3.3 (página siguiente) muestra un resumen de este anexo. Los parámetros microbiológicos básicos son los nematodos intestinales y la *E. coli*, y los parámetros físico-químicos son los sólidos en suspensión y la turbiedad.

La tabla 3.3 debe ser completada con las siguientes indicaciones:

1) Para otros contaminantes contenidos en la autorización de vertido de aguas residuales se deberá limitar su entrada al medio ambiente. En el caso de que se trate de sustancias peligrosas deberá asegurarse el respeto de las normas de calidad ambiental (artículo 245.5 del RD 849/1986 modificado por el RD 606/2003).

2) Para el uso 2.2 y 3.1.c) es obligatorio llevar a cabo detección de patógenos presencia/ ausencia (salmonella, etc) cuando se repita habitualmente que en 3 de cada 10 unidades de muestras el número máximo de E.coli sea de 10.000 ufc/100 mL. Para el uso 2.1 el valor máximo es exigible para 1000 ufc/100 mL.

3) Para el uso 3.2, la autorización de la instalación requerirá: a) la aprobación, por la autoridad sanitaria, del programa específico de control de las instalaciones contemplado en el RD 865/2003, y b) un uso exclusivo industrial y en localizaciones no ubicadas en zonas urbanas ni cerca de lugares con actividad pública o comercial

4) Para el uso 4.1, en el caso de que el riego se aplique directamente a la zona del suelo (goteo, microaspersión) se fijan los criterios del grupo de calidad 2.3.

5) Para la calidad 5.1 y 5.2 se deben cumplir los artículos 257 a 259 del RD 849/1986.

Otro aspecto importante de la normativa española es que el RD no propone el proceso de regeneración que debe seguir el agua. De esta forma, el RD se encuentra entre la normativa californiana y las recomendaciones de la OMS. Con el cumplimiento de las exigencias del RD se cumplen automáticamente las exigencias de la OMS pero no al revés. Del mismo modo, el cumplimiento de la normativa californiana implica el cumplimiento del RD pero no el sentido inverso.

Tabla 3.3. Criterios de calidad para la reutilización de agua residual depurada (MMA, 2007).

| **Usos del agua regenerada** | **Parámetros microbiológicos** | | **Parámetros físico-químicos** | | **Otros criterios** |
|---|---|---|---|---|---|
| | **Nemátodos intestinales** | ***E. coli* (ufc/100ml)** | **MES (mg/L)** | **Turbiedad (UNT)** | |
| 1.1 Urbano residencial: riego de jardines privados descarga de aparatos sanitarios | < 1huevo/ 10L | 0 | < 10 | <2 | Legionella spp. < 100 ufc/L |
| 1.2 Servicios urbanos: riego de zonas verdes urbanas, baldeo de calles, sistemas contra incendios y lavado industrial de vehículos. | < 1huevo/L | < 200 | <20 | <10 | Legionella spp. < 100 ufc/L |
| 2.1 Riego de cultivos con sistema de aplicación del agua que permita el contacto directo del agua regenerada con las partes comestibles para consumo humano en fresco. | <1 huevo/ 10L | < 100 | <20 | <10 | Legionella spp. < 1000 ufc/L |
| 2.2 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 con consumo no fresco; riego de pastos; acuicultura. | < 1 huevo/ 10L | < 1000 | <35 | No se fija límite | Taenia saginata y taenia solium < 1huevo/L (si se riegan pastos para consumo de animales productores de carne). |
| 2.3 Riego localizado de cultivos leñosos que impida el contacto del agua regenerada con los frutos consumidos en la alimentación humana; riego de cultivos de flores ornamentales, viveros, invernaderos sin contacto directo del agua regenerada co las producción y riego de cultivos industriales no alimentarios, viveros, forrajes ensilados y cereales. | < 1 huevo/ 10L | < 10000 | <35 | No se fija límite | Legionella spp. < 100 ufc/L |
| 3.1.a).b) Aguas de proceso y limpieza excepto en la industria alimentaria; otros usos industriales. | No se fija límite | < 10000 | <35 | <15 | Legionella spp. < 100 ufc/L |
| 3.1.c) Aguas de proceso y limpieza para uso en la industria alimentaria. | < 1 huevo/ 10L | < 1000 | <35 | No se fija límite | Legionella spp. < 100 ufc/L |
| 3.2 Torres de refrigeración y condensadores evaporativos. | < 1 huevo/ 10L | ausencia | <5 | <1 | Legionella spp. Ausencia ufc/L |
| 4.1 Riego de campos de golf | < 1 huevo/ 10L | < 200 | <20 | <10 | Legionella spp. < 100 ufc/L |
| 4.2 Estanques, masas de agua y caudales circulantes ornamentales, en los que está impedido el acceso del público al agua. | No se fija límite | < 10000 | <35 | No se fija límite | $P_T$ < 2 mg/L |
| 5.1 Recarga de acuíferos por percolación localizada a través del terreno. | No se fija límite | < 1000 | <35 | No se fija límite | $N_T$<10 mg N/L $NO_3$<25mg$NO_3$/l |
| 5.2 Recarga de acuíferos por inyección directa. | < 1 huevo/ 10L | 0 | <10 | <2 | $N_T$<10 mg N/L $NO_3$<25mg$NO_3$/l |
| 5.3 Riego de bosques, zonas verdes y de otro tipo no accesible al público; Silvicultura. | No se fija límite | No se fija límite | <35 | No se fija límite | $N_T$ < 50 mg/L |
| 5.4 Otros uso ambientales (mantenimiento de humedales, caudales mínimos y similares). | La calidad mínima requerida se estudiará caso por caso. | | | | |

Un aspecto de enorme importancia en la actualidad es el debate técnico generado sobre la conveniencia de impulsar la reutilización indirecta para usos potables o de restringir el alcance de la reutilización a los usos no potables. En la actualidad existen dos enfoques distintos sobre este tema, por una parte la American Water Works Association (AWWA), y por otra, la Water Environment Federation (WEF).

La American Water Works Association (AWWA) postula por la conveniencia de que la reutilización potable indirecta debe ser considerada una alternativa de gestión de los recursos hídricos pero sólo cuando las circunstancias de las otras alternativas lo hagan necesario. Es decir, otorgarle un papel secundario y de apoyo a los tratamientos naturales; es una posición claramente conservadora. En cambio, la Water Environment Federation (WEF) apuesta porque la reutilización potable indirecta sea considerada como una fuente adicional, aún cuando no sea estrictamente necesaria. Esto es, aboga por darle un papel más importante, en una posición mucho más emprendedora.

La argumentación de la AWWA consiste en la existencia de ciertas incertidumbres con respecto a los posibles riesgos sanitarios que la reutilización indirecta para usos potables puede conllevar, incluso estableciendo unos criterios de los más estrictos. Por el contrario, la WEF argumenta que la experiencia en proyectos de reutilización indirecta para usos no potables, como el "Upper Occoquan Sewage Authority in Fairfax (Virginia)", demuestra que no existen motivos técnicos ni sanitarios para no usar el agua regenerada para uso potables.

La normativa española se ha decantado por la primera opción ante la demostración evidente internacionalmente de la alta fiabilidad, rendimiento y aceptación alcanzados en los proyectos de regeneración de agua para usos no potables. El RD 1620/2007 prohíbe explícitamente los siguientes usos de agua regenerada:

1. Para el consumo humano (salvo situaciones de catástrofe en las cuales la autoridad sanitaria fijaría los niveles de calidad exigibles y los usos).
2. Para los usos propios de la industria alimentaria, salvo lo dispuesto en el anexo I.A.3 calidad 3.1c) para el uso de aguas de proceso y limpieza en la industria alimentaria.
3. Para uso en instalaciones hospitalarias y otros usos similares.
4. Para el cultivo de moluscos filtradores en acuicultura.
5. Para el uso recreativo como agua de baño.
6. Para el uso en torres de refrigeración y condensadores evaporativos, excepto en lo previsto para uso industrial en el anexo I.A.3 calidad 3.2.
7. Para el uso en fuentes y láminas ornamentales en espacios públicos o interiores de edificios públicos.
8. Para cualquier otro uso que la autoridad sanitaria considere un riesgo para la salud de las personas o un perjuicio para el medio ambiente, cualquiera que sea el momento en el que se aprecie dicho riesgo o perjuicio.

## 3.7 PROCESOS DE TRATAMIENTO DE REGENERACIÓN

El proceso de obtención de un agua regenerada consta fundamentalmente de cuatro elementos (Mujeriego, 1998):

1. La implantación de un control de vertidos a la red de saneamiento que asegure la ausencia de contaminantes que puedan impedir la reutilización del agua regenerada.
2. Un tratamiento biológico secundario capaz de producir un efluente con un contenido de MES inferior a 10-20 mg/L y valores equivalentes de $DBO_5$.
3. Un tratamiento terciario destinado a eliminar la MES del efluente secundario hasta los niveles exigibles y una correcta desinfección del mismo. Este tratamiento es el proceso regenerador del agua residual.
4. Un depósito regulador de los caudales de agua regenerada, a fin de adecuar la producción de la planta a la demanda de uso y asegurar una cierta reserva de agua regenerada.

Los extensos trabajos de experimentación y de seguimiento de las instalaciones de regeneración de agua residual existentes en California y Florida ponen de manifiesto que un buen efluente secundario, filtrado mediante un filtro de arena, o de arena y carbón, con la adición de coagulante (alúmina, generalmente), y una desinfección con cloro con un tiempo de contacto de entre 30 minutos (Florida) y 2 horas (California), hasta alcanzar la eliminación de coliformes, permite obtener un agua regenerada desprovista de virus y bacterias patógenas (Mujeriego, 2007). Por lo tanto, esta agua residual regenerada ofrece una garantía de calidad similar a la de un agua potable de consumo público (Asano y col., 1990), cuando se trata de utilizarla para usos no potables.

El grado de automatización de las estaciones de regeneración de agua existentes es muy variado, pero exige en todos los casos un buen seguimiento del proceso de tratamiento biológico (mediante muestreos integrados diarios, como mínimo), un control continuo de la turbiedad del efluente secundario y del efluente filtrado y de la concentración de desinfectante al término del proceso de desinfección, y un análisis diario de coliformes, sobre muestra integrada obtenida a la salida del proceso de desinfección (Mujeriego, 2007).

Los tratamientos terciarios se utilizan para eliminar contaminantes disueltos o en suspensión, elementos nutritivos, metales específicos, y otros componentes peligrosos. La gama de tratamientos terciarios disponibles actualmente incluye los físico-químicos, los biológicos y los desinfectantes. En los apartados siguientes se realiza una breve descripción de los tratamientos de regeneración utilizados.

### 3.7.1 Tratamientos físico-químicos

El objetivo de este tipo de tratamientos es la reducción de la concentración de MES, la disminución de la turbiedad y el aumento de la transmitancia a 254 nm. Los procesos unitarios normalmente utilizados para lograr estos objetivos son: 1) la coagulación, 2) la floculación, 3) la decantación, y 4) la filtración.

En la actualidad, los tratamientos físico-químicos más utilizados para la regeneración de agua son: 1) el tratamiento completo, 2) la filtración directa, y 3) la filtración por contacto.

El tratamiento completo está formado por los cuatro procesos básicos anteriores, es decir, la coagulación, la floculación, la decantación y la filtración. Se realiza cuando el efluente secundario es de una calidad muy baja.

La filtración directa, llevada a cabo sin el proceso de decantación, es recomendable para aquellas situaciones donde el efluente secundario tiene una calidad muy buena. En este caso, con un efluente de calidad buena y estable se puede obtener una calidad de agua regenerada similar a la del tratamiento completo. Su principal ventaja es el ahorro en la inversión y su desventaja es la menor fiabilidad del proceso.

La filtración por contacto consiste en la inyección de coagulante en línea para luego pasar directamente a la filtración. En este caso la dosis de coagulante es mucho menor que en el tratamiento completo ya que unos flóculos de gran tamaño colmatarían rápidamente el filtro. La ausencia de floculadores y de decantadores requiere necesariamente un efluente secundario de gran calidad. En general, para aplicar la filtración por contacto y obtener un efluente filtrado con una turbiedad menor que 2 UNT, se requiere un efluente secundario con una turbiedad entre 7 y 9 UNT. Cuando la turbiedad supera en ocasiones el nivel de 10 UNT, debe emplearse un proceso de filtración directa con adición de coagulante.

En resumen, si el efluente secundario no cumple con los requisitos de calidad comentados anteriormente o presenta una calidad irregular, se debe emplear un sistema de tratamiento completo. Esto es igualmente aplicable si se quiere garantizar una máxima calidad y un mínimo riesgo.

**Coagulación-floculación**

La coagulación es un proceso destinado a neutralizar, desestabilizar, reducir la carga eléctrica superficial de las partículas, de modo que las fuerzas de repulsión sean lo menos intensas posibles (Mujeriego, 2007). La coagulación se consigue añadiendo al agua una sustancia denominada coagulante que se adhiere a la superficie de las partículas, neutralizando su carga superficial. Los coagulantes más usados son las sales de cationes polivalentes, principalmente $Al^{+3}$ y $Fe^{+3}$. La floculación es un proceso destinado a promover la unión permanente de partículas primarias, de modo que formen una unidad de mayor tamaño y mayor densidad. La floculación se consigue agitando las partículas para que adquieran energía cinética, se choquen entre sí, venciendo las posibles fuerzas eléctricas de repulsión, y queden retenidas por acción de las fuerzas de atracción de las masas (Mujeriego, 2007). En las últimas etapas de la floculación suele añadirse polielectrolitos, que son sustancias destinadas a promover la unión de flóculos entre sí, de modo que las nuevas asociaciones de partículas tengan mayor tamaño, mayor densidad y mayor resistencia a la abrasión por efecto de la turbulencia del agua (Mujeriego, 2007).

La coagulación puede producirse mediante una desestabilización de las cargas de las partículas a partir de bajas dosis de coagulantes o mediante una floculación por barrido mediante precipitación química con dosis de coagulantes mayores. En el primer caso se debe tener un control exhaustivo del pH entre 7,0 y 7,5 y en el segundo caso, no se requiere un control especial del pH.

Cuando no se dispone de decantador, debe evitarse que los flóculos formados sean demasiado grandes, pues se puede producir una colmatación rápida de los filtros. En

estos casos, se utilizan dosis pequeñas de coagulante. La tabla 3.4 muestra la dosis recomendada para cada uno de los tratamientos terciarios.

Tabla 3.4. Rango de dosis recomendadas de coagulante por tratamiento (Metcalf y Eddy, 2000).

| Tratamiento | Dosis de $Al^{+3}$ (mg/l) | Control de pH |
|---|---|---|
| Completo | 10-100 | No necesario |
| Filtración directa | 2-5 | Estricto 7,0-7,5 |
| Filtración por contacto | 2-5 | Estricto 7,0-7,5 |

**Sedimentación y/o decantación**

La sedimentación consiste en la separación mediante gravedad de las partículas en suspensión cuyo peso específico es mayor que el del agua. Los decantadores se utilizan para eliminar los flóculos químicos formados en la etapa de coagulación-floculación. El objetivo principal es la disminución de la MES y de la turbiedad.

Actualmente, los decantadores con un mayor rendimiento de eliminación son los lamelares. Las principales ventajas de estos decantadores son su elevado rendimiento de eliminación, el ahorro de espacio que producen y la autolimpieza de las lamelas. Su inconveniente principal es la aparición potencial de olores debido al crecimiento biológico y la inefectividad del proceso de auto-limpieza de las lamelas en el caso de que éstas retengan materia orgánica.

**Filtración**

La filtración en medio granular es un proceso de tratamiento consistente en hacer pasar el agua a través de un medio poroso con el objetivo de eliminar la MES. El proceso tiene lugar mediante dos mecanismos principales: 1) la MES se filtra físicamente en base a los distintos tamaños entre partícula y poro, y 2) la MES queda adherida a la superficie del medio granular por fuerzas moleculares o electrocinéticas cuando pasan suficientemente cerca y a una velocidad adecuada.

Existen tres categorías de filtración granular: filtración rápida, filtración lenta y filtración en tierra de diatomeas. Uno de los filtros más usados en la actualidad son los bicapa (2 capas) o multicapa (hasta 4 capas) que están formados por una serie de capas con materiales de distintas densidades y tamaños de grano. Un filtro bicapa estaría constituido por una capa de antracita (densidad baja y tamaño de grano grande) en la parte superior y una de arena (densidad mayor y tamaño de grano menor) en la inferior.

Los parámetros de control de un filtro son la turbiedad del agua, la disminución de la carga hidráulica y el tiempo entre lavados. Se deben evitar los tiempos de lavados cortos, porque esto disminuye la producción de agua filtrada. Para evitar la colmatación rápida de los filtros y trabajar de forma continua se recomienda que el agua de alimentación de los filtros tenga una turbiedad inferior o igual a 6,0 UNT.

En la actualidad, un mecanismo de filtración muy utilizado por el gran rendimiento obtenido es la filtración con membranas. Este método permite obtener un agua de gran calidad y totalmente desinfectada (en la microfiltración, sólo parcialmente). Los 4 tipos de membranas existentes son la microfiltración (MF), la ultrafiltración (UF), la

nanofiltración (NF) y la ósmosis inversa (OI) cuyos tamaños de retención son de aproximadamente 0,1 µm, de 0,01µm, de 0,001 µm y de 0,0001 µm, respectivamente. El mecanismo de retención de partículas en las membranas de MF y UF es el de tamizado, es decir, las partículas mayores quedan retenidas y las menores pasan por los poros de la membrana. En cambio, en las membranas de NF y OI es la difusión de las moléculas a través del material de la membrana. Las principales ventajas de los procesos de membrana son la desinfección total del efluente si se trabaja con UF, NF y OI, y la separación física de los residuos producida sin formación de subproductos. No obstante, sus principales desventajas son el elevado coste, tanto de material como de energía, y el tratamiento posterior que debe llevarse a cabo de las aguas de rechazo del tratamiento así como la limpieza de las membranas.

### 3.7.2. Tratamientos naturales

Ante la ausencia de estos tratamientos en las tres estaciones de regeneración de agua (ERA) estudiadas se efectuará una breve descripción de los tratamientos biológicos naturales utilizados en otras ERA.

Los tratamientos biológicos naturales son aquellos en los que la depuración se realiza a partir del crecimiento natural de los microorganismos, la vegetación y la fauna. Son sistemas que funcionan con energía natural y no requieren de energía externa. Debido a la mayor lentitud del crecimiento natural son sistemas con mayor superficie que los convencionales y tiene unos costes de explotación y mantenimiento muy bajos. Con estos sistemas se produce una disminución de la MES, la turbiedad y la materia orgánica ($DBO_5$) del agua afluente, así como una mejora microbiológica debido a la inactivación natural que se produce. Los grupos de tratamiento biológicos naturales se dividen en aquellos basados en el suelo (sistemas de infiltración-percolación) y aquellos basados en el agua (lagunaje natural y los humedales).

#### Infiltración-percolación

Este tipo de tratamiento combina la acción física, química y biológica de forma sencilla y eficaz. Es un sistema de depuración aerobio que consiste en infiltrar los efluentes a través de un terreno natural o un material granular, habitualmente 1,5 m de arena de granulometría definida. Intervienen tres procesos: 1) la infiltración de los sólidos en suspensión, 2) la adsorción de los microorganismos, y 3) la degradación de los microorganismos. El proceso también produce la oxidación de la materia orgánica.

Este tratamiento presenta la ventaja de no necesitar reactivos químicos y tener un mantenimiento relativamente sencillo. El agua tratada puede servir directamente para su reutilización en muchos casos. Su principal exigencia es que si se quiere conseguir una alta calidad del agua, se requiere un efluente secundario muy bueno y generalmente hay que desinfectar con cloro; otra exigencia es que ocupa gran espacio.

#### Lagunaje

El tratamiento por lagunaje de las aguas residuales consiste en almacenar esta agua durante un tiempo variable en función de la carga aplicada y las condiciones climáticas, de forma que la materia orgánica resulte degradada mediante la actividad de bacterias heterótrofas presentes en el medio. Las lagunas son depósitos o reactores excavados en

el terreno de gran superficie y con una profundidad que varía entre 0,5 y 2 metros. En función de la oxigenación las lagunas pueden ser aerobias (presencia de oxígeno), anaerobias (ausencia de oxígeno) y facultativas (mezcla de ambas).

Las principales ventajas son su bajo coste de explotación, la no adición de reactivos y la facilidad de mantenimiento. Por el contrario, sus inconvenientes son la gran superficie que necesitan, la incapacidad de tratar sustancias no biodegradables y la presencia de microalgas en el efluente.

**Humedales**

Los humedales son sistemas de depuración naturales constituidos por lagunas o canales poco profundos (normalmente de menos de 1 m) provistos con plantas propias de zonas húmedas y en los que los procesos de descontaminación son ejecutados simultáneamente por componentes físicos, químicos y biológicos. Los agentes responsables de la depuración del agua son las bacterias, que mineralizan la materia orgánica, y las plantas superiores, que producen el oxígeno, incluso por sus raíces, y consumen los nutrientes.

Los humedales construidos se han clasificado tradicionalmente en dos tipologías atendiendo al proceso de circulación del agua: subterránea o superficial. En los humedales de flujo superficial el agua está expuesta directamente a la atmósfera y circula preferentemente a través de los tallos de los macrófitos. Este tipo de humedales suelen utilizarse para tratar efluentes secundarios y pueden entenderse como una modificación del lagunaje convencional con menor profundidad (no más de 0,4 m) y con plantas. En los humedales de flujo subsuperficial la circulación del agua es subterránea a través de un medio granular y en contacto con los rizomas y raíces de los macrófitos. Este tipo de humedales suelen instalarse para tratar aguas residuales de pequeños municipios (menos de 2000 hab-eq) y pueden entenderse como una modificación de los sistemas clásicos de infiltración en el terreno. Así, los humedales de flujo subsuperficial forman parte de los sistemas naturales de depuración basados en la acción del terreno, mientras que los de flujo superficial pertenecen al grupo de los basados en la acción de mecanismos que suceden en el agua (como los lagunajes).

Las principales ventajas de los humedales son su simplicidad de operación, un bajo o nulo consumo energético y una baja producción de residuos. Su principal inconveniente es la gran superficie necesaria para su instalación.

### 3.7.3 Procesos de desinfección

La desinfección del agua tiene como objetivo la inactivación de los microorganismos potencialmente infecciosos, ofreciendo así una protección esencial de la salud pública ante enfermedades transmisibles por el agua. Los tratamientos de desinfección se clasifican en dos grupos: energía química y energía física. Los compuestos químicos están formados principalmente por el cloro y sus derivados, y por el ozono. En los compuestos físicos se incluyen el calor y la luz ultravioleta (UV).

Las aportaciones aparecidas en la literatura técnica han llevado al reconocimiento de cinco mecanismos principales que explican la acción de los desinfectantes: 1) daños a la

pared celular, 2) alteración de la permeabilidad de la célula, 3) alteración de la naturaleza coloidal del protoplasma, 4) inhibición de la actividad enzimática, y 5) alteración de las moléculas de ADN o ARN.

Los métodos de desinfección química más utilizados son los compuestos de cloro aplicados mediante el cloro libre, el dióxido de cloro, el hipoclorito sódico o las cloraminas. El ozono es una tecnología mucho menos utilizada debido al coste energético que comporta. Actualmente, el 95% de la desinfección mundial se realiza mediante cloro. La eficiencia de cualquiera de estos productos desinfectantes es función de su concentración y del tiempo de contacto con la muestra que se quiere desinfectar, de manera que la eficiencia del desinfectante aumenta cuando lo hacen los valores de las dos variables citadas. Varios estudios (Hoff, 1986) ponen de manifiesto la eficacia relativa de estos productos químicos después de haberlos evaluado con respuesta a diversos microorganismos, llegando a la conclusión de que, en general, el ozono presenta un mayor poder desinfectante, seguido por el cloro y, en último lugar, por las cloraminas formadas durante el proceso de desinfección.

La aplicación de productos químicos para desinfectar un efluente secundario debe tener en cuenta los siguientes aspectos (Hoff, 1986):

1. El momento de introducción del producto en el proceso y el orden de introducción si se trata de más de un producto.
2. El pH del efluente secundario, que puede modificar el efecto desinfectante del agente químico.
3. La mezcla adecuada del producto con la muestra, con objeto de asegurar la presencia de desinfectante en todo el volumen de agua a desinfectar.
4. El carácter volátil de algunos productos químicos, que pueden provocar efectos graves en la población.
5. La eficacia del desinfectante, así como la cantidad de desinfectante que pueda absorber la MES y hacer disminuir su actividad frente a los microorganismos.
6. Los problemas que se puedan derivar de una concentración elevada de desinfectante.

Entre los métodos físicos de desinfección más utilizados se encuentra la luz UV. La principal ventaja de la luz UV sobre los anteriores procesos es que no genera subproductos de la desinfección, lo que ha permitido a este método de desinfección gozar de un enorme auge en la actualidad. También son numerosos los tratamientos de desinfección que combinan el tratamiento con cloro y con luz UV, aprovechando de esta forma las ventajas proporcionadas por cada una de ellas individualmente.

**Desinfección con cloro**

La desinfección con cloro se inicia en el año 1907 en Escocia y en el estado de Michigan (Estados Unidos). La desinfección con cloro consiste en un proceso de inactivación de bacterias mediante una actuación en la pared celular que daña los ácidos nucleicos.

El cloro puede presentarse como desinfectante en diferentes estados: cloro gas, cloro líquido (hipoclorito sódico) y cloro sólido (hipoclorito cálcico). La desinfección con hipoclorito sódico o lejía (NaOCl) es la más frecuentemente utilizada en las plantas de

tratamiento de agua. Otros derivados del cloro son el dióxido de cloro ($ClO_2$) y las cloraminas.

Cloro libre

Cuando el cloro gas ($Cl_2$) se añade al agua se producen dos reacciones químicas: una de hidrólisis que da lugar a la formación de ácido clorhídrico (HCl) y de ácido hipocloroso (HOCl), y otra de ionización o disociación en la que HOCl se disocia en ión hidrógeno ($H^+$) y en ión hipoclorito ($OCl^-$). El contenido conjunto de HOCl y de $OCl^-$ se denomina cloro libre disponible. La distribución relativa de estos dos desinfectantes es de enorme importancia, pues la capacidad desinfectante de HOCl es de dos órdenes de magnitud mayor que la de $OCl^-$. La constante de ionización ($K_i$) depende de la temperatura y junto con el pH del medio regula la proporción de HOCl y de $OCl^-$ presentes en el agua.

Reacción de hidrólisis: $Cl_2 + H_2O \leftrightarrow HOCl + H^+ + Cl^-$
Reacción de ionización: $HOCl \leftrightarrow H^+ + OCl^-$

La desinfección con hipoclorito sódico (NaOCl) produce una reacción de hidrólisis en ácido hipocloroso (HOCl) y en hidróxido de sodio (NaOH), tras la cual se produce una disociación del HOCl.

Reacción de disociación 1: $NaOCl + H_2O \leftrightarrow HOCl + Na^+ + OH^-$
Reacción de disociación 2: $HOCl \leftrightarrow H^+ + OCl^-$

La figura 3.1 muestra las proporciones de HOCl y $OCl^-$ en función del pH para las temperaturas de 10ºC y 20ºC. Para valores del pH menores de aproximadamente 7,5, la especie predominante es el HOCl y para valores superiores del pH, la especie mayoritaria es el $OCl^-$.

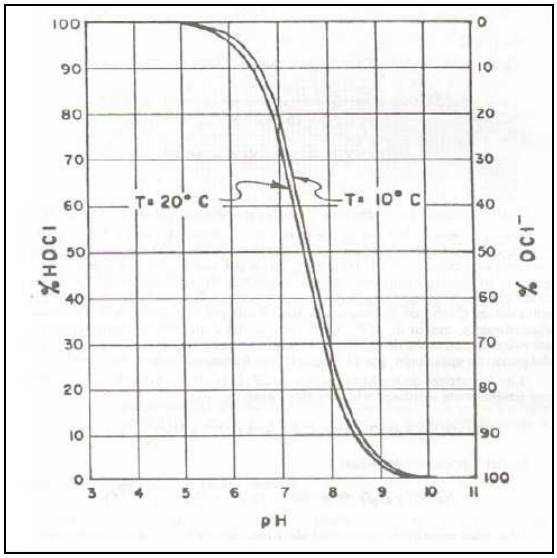



Figura 3.1. Porcentajes de HOCl y $OCl^-$ a 10ºC y 20ºC en función del pH (Arboleda, 2000).

El proceso de desinfección con cloro libre viene determinado por el pH y la temperatura junto con otros diversos factores, entre los que cabe mencionar:

a) El tiempo de contacto, la concentración y el tipo de agente químico. La concentración del desinfectante y el tiempo de contacto con el agua son los dos factores más importantes en la eficiencia de la desinfección. La ley de Chick-Watson comporta que el aumento del tiempo de contacto o de la concentración de desinfectante, manteniendo las otras variables constantes, aumenta la efectividad del proceso de inactivación microbiana.

Ley de Chick-Watson: $\frac{dN}{dt} = -k \cdot C \cdot N \quad \rightarrow \quad \ln(\frac{N}{N_0}) = -k \cdot C \cdot t$

Donde:
N = concentración de microorganismos.
C = concetración de desinfectante.
t = tiempo de contacto.
k = constante de inactivación (depende del tipo de microorganismos, del desinfectante y de la temperatura).

b) El tipo de microorganismos. La efectividad de los distintos desinfectantes está influenciada por la naturaleza y la condición de los microorganismos. Las esporas bacterianas, por ejemplo, son extremadamente resistentes y muchos desinfectantes químicos normalmente utilizados tienen escaso o nulo efecto sobre ellas.

c) La MES y la materia orgánica. La calidad físico-química del agua a desinfectar determina la eficacia de la desinfección, pues la presencia de materia orgánica que reaccione con el cloro o sus compuestos, reducirá su eficacia y generará compuestos organoclorados.

<u>Cloraminas</u>

La presencia de amoníaco ($NH_3$) en el agua a desinfectar propicia una reacción con el cloro libre contenido en el agua que da lugar a cloro combinado o cloraminas, que se dividen en monocloraminas, dicloraminas y tricloraminas.

Monocloramina: $NH_3 + HOCl \leftrightarrow NH_2Cl + H_2O$
Dicloramina: $NH_2Cl + H_2O \leftrightarrow NHCl_2 + H_2O$
Tricloramina: $NHCl_2 + H_2O \leftrightarrow NCl_3 + H_2O$

La figura 3.2 muestra las diferentes reacciones del cloro con un agua con 0,1 mg $NH_3$-N/L, en la que pueden observarse 4 partes claramente diferenciadas:

1. Las dosis de cloro inferiores al punto A de la gráfica, hacen que todo el cloro añadido reaccione con sustancias fácilmente oxidables ($Fe^{+2}$, $Mn^{+2}$, $H_2S$ y materia orgánica) por lo que consecuentemente no hay presencia de cloro residual.

2. Las dosis de cloro situadas en el intervalo AB hacen que el cloro continúe reaccionando con el amoniaco, aumentando el nivel de cloro residual en forma de cloraminas.

3. Las dosis de cloro superiores al punto B hacen que el cloro añadido se utilice para oxidar progresivamente el amoniaco presente, dejando escasos restos de cloro y amoniaco. El amoniaco se convierte en óxido nitroso, nitratos y nitrógeno, y el cloro se reduce a ión cloruro. Esto sucede hasta llegar al punto de ruptura (breakpoint) donde el cloro residual alcanza un mínimo.

4. Las dosis de cloro superiores al punto de ruptura, se traducen en un aumento del cloro residual libre directamente proporcional a la dosis de cloro.

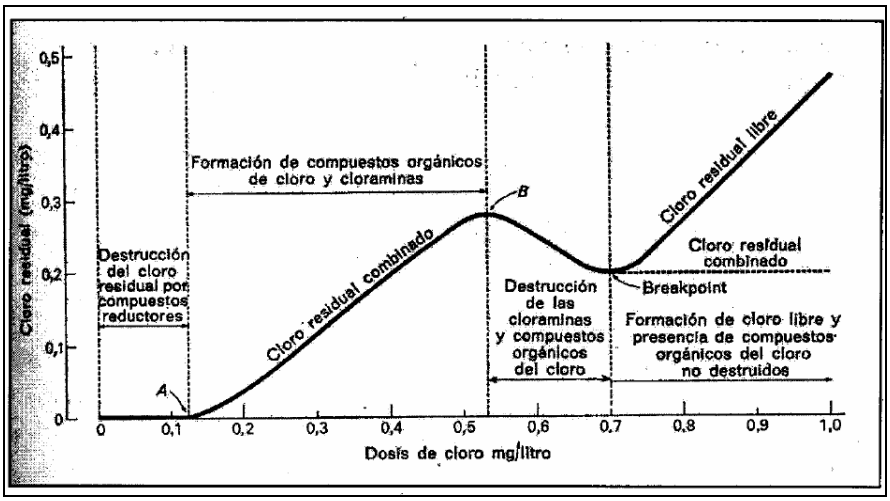


Figura 3.2. Descripción de la reacción del cloro con un agua con 0,1 mg $NH_3$-N/L.

La tabla 3.5 muestra un análisis comparativo entre la desinfección con cloro libre y con cloro combinado. La tabla 3.5 muestra que la desinfección con cloro combinado presenta dos ventajas sobre el cloro libre: 1) es más duradero/estable y 2) es menos reactivo con la materia orgánica del agua, lo que genera menos subproductos de la desinfección. Estas ventajas han llevado a que diversos países, como por ejemplo Estados Unidos, hayan cambiado a desinfectar con cloro libre un tercio de las instalaciones en los últimos 10 años.

Tabla 3.5. Análisis comparativo entre la desinfección con cloro libre y con cloro combinado.

| Característica | Cloro libre | Cloro combinado |
|---|---|---|
| Intensidad poder desinfectante | +++ | + |
| Durabilidad/persistencia en el agua | + | +++ |
| Reactividad con la materia orgánica | +++ | + |

La desinfección con dióxido de cloro ($ClO_2$) es una alternativa a estos procedimientos más tradicionales. El $ClO_2$ es un gas soluble en agua pero que no se disocia ni reacciona con ella. No obstante, debido a sus notables exigencias no es muy utilizado: 1) su carácter inestable requiere un mayor control, un mayor mantenimiento y un personal más cualificado, 2) su coste es mayor que el del cloro, y 3) no reacciona formando cloraminas pero si cloritos, considerados tóxicos a muy bajas concentraciones. Por contra, sus ventajas frente al cloro son: 1) su poder oxidante es 5 veces superior al cloro y no genera cloraminas, 2) la dosis a aplicar es menor que la del cloro, pues su efecto remanente es mayor, y 3) elimina los malos olores y gusto del agua.

**Ozono**

La desinfección con ozono es una tecnología de desinfección química mucho menos utilizada que las anteriores. El ozono es un desinfectante con una elevada capacidad oxidante superior a la del cloro libre o combinado. Permite oxidar las bacterias e inactivar los virus, quistes, hongos, toxinas, algas y protozoos, algunos de los cuales no son sensibles a la desinfección con cloro. En solución acuosa, el ozono reacciona instantáneamente con los compuestos reductores (como el hierro ferroso, el manganeso y los nitritos) aunque no reacciona con el amoníaco (los niveles habituales de pH de las aguas residuales urbanas). Al ser muy reactivo con la materia orgánica, la calidad físico-química del afluente influye mucho en la efectividad desinfectante, sobre todo medidas en términos de DQO y de su pH.

Las principales ventajas de la desinfección con ozono son las siguientes:

1. La calidad global del agua tratada mejora.
2. La escasa generación de subproductos tóxicos es un beneficio para el medio ambiente.
3. La inactivación de virus, Giardia y Cryptosporidium es efectiva.
4. La reducción del olor y del color del agua mejora notablemente la calidad del agua.

Por el contrario, los principales inconvenientes de la desinfección con ozono son:

1. No permite disponer de un efecto residual. Conviene combinarlo con otro sistema de desinfección.
2. El coste de producción es elevado.
3. La potencial formación de bromatos debe ser tenido en cuenta.

**Luz UV**

El efecto desinfectante de la luz UV se produce a través de la alteración de las moléculas de ADN de las células mediante la modificación de los enlaces químicos entre las dos hélices del ADN, lo que dificulta o impide la duplicación (copia) del ADN y por tanto la producción de las proteínas necesarias para la vida de la célula. En la actualidad es un tratamiento que se encuentra en pleno auge.

La luz UV es el componente del espectro magnético cuya longitud de onda se encuentra entre 100 y 400 nm (entre rayos X y luz visible). No obstante, la luz UV con mayor eficiencia en el proceso de desinfección es aquella con longitud de onda de 254 nm al ser la que registra mayor absorción por parte de las moléculas de ADN.

La eficiencia de la desinfección con luz UV depende de los siguientes factores:

a) La dosis de luz aplicada al agua.
b) Las características físico-químicas y microbiológicas del agua a tratar.
c) El caudal y el tiempo de permanencia del agua residual en el reactor.
d) El estado de mantenimiento del equipo.

Dosis

Tchobanoglous (1991) estableció que la dosis aportada en forma de luz UV es directamente proporcional a la intensidad media dentro del reactor y al tiempo de exposición:

$$D = I \cdot t$$

Donde:
D = dosis de luz UV ($mJ/cm^2$).
I = intensidad de la energía ($mW/cm^2$).
t = tiempo de exposición de la muestra (s).

Se dispone de diferentes metodologías para determinar la dosis de luz UV aplicada al agua, aunque ninguna de ellas pueda considerarse totalmente válida. No obstante, en la práctica se trabaja habitualmente con tablas facilitadas por los fabricantes de sistemas de luz UV que determinan la dosis a partir de la interpolación lineal entre la transmitancia del agua medida a 254 nm y el caudal tratado por el sistema. La limitación de los valores así obtenidos (por ejemplo, la limpieza y vida útil de las lámparas) y la diversidad de tablas utilizadas por cada fabricante para cada equipo para calcular la dosis teórica evitan realizar comparaciones de dosis entre diferentes equipos.

La dosis de luz UV necesaria para inactivar los microorganismos patógenos depende de la calidad del agua y del grado de inactivación que se desee. Tchobanoglous (1997) estableció la siguiente relación entre la concentración de coliformes y la dosis de luz UV:

$$N = f \cdot D^n$$

Donde:
N = concentración de coliformes en el efluente (ulog/100 mL).
D = dosis de luz UV (en $mJ/cm^2$).
n = coeficiente en función de la dosis.
f = factor dependiente de la calidad del agua.

Los coeficientes n y f tienen en consideración las interferencias producidas debidas a la transmitancia y a la concentración de MES del agua, haciendo que la dosis real recibida por los microorganismo será inferior a la aplicada. Como órdenes de magnitud, la dosis de luz UV necesaria para desinfectar aguas de gran calidad se sitúa entre 20 y 40 $mW/cm^2$, y en aguas muy contaminadas la dosis es superior a 120 $mW/cm^2$.

Características físico-químicas y microbiológicas

La transmitancia, la MES, la turbiedad y el color del agua a tratar son los principales parámetros que controlan la desinfección de un agua con luz UV.

La transmitancia del agua a 254 nm determina su capacidad para permitir el paso de la luz UV sin que sea absorbida por las sustancias que ésta pueda contener. De esta forma, una transmitancia elevada permite asegurar que una mayor proporción de la luz UV incidente estará disponible para actuar sobre los microorganismos que se trata de inactivar y su eficiencia será mayor.

La MES también afecta al rendimiento de la desinfección con luz UV. Los virus presentes normalmente en un agua residual se encuentran adsorbidos sobre la superficie

de la MES. El tamaño de estas partículas hace que las bacterias y los virus queden ocultos y queden protegidos ante la luz UV aplicada en el interior del reactor. Todo ello hace que la eficacia de la inactivación disminuya dado que estas partículas pueden bloquear, dispersar y absorber la luz UV.

Caudal y tiempo de permanencia del agua en el reactor

El caudal circulante por el reactor y el tiempo de permanencia hidráulico son dos valores inversamente proporcionales (Q=V/T). La inactivación de los microorganismos será mayor cuanto mayor sea el tiempo de exposición. No obstante, un estudio previo debe determinar cuáles son los valores adecuados para cada reactor, el tipo de agua y el grado de desinfección que se desee alcanzar. Se debe establecer un valor óptimo que no conlleve un gasto energético innecesario.

Estado de mantenimiento del equipo

Un buen mantenimiento y limpieza de los equipos es enormemente importante para la consecución de una constante eficiencia de desinfección. La acumulación de sólidos en la superficie de las lámparas provoca una disminución en la intensidad de la luz UV con lo que se deberá tener una especial consideración en la limpieza automática o periódica de estas lámparas. Otras consideraciones importantes son la vida útil y la temperatura de las lámparas. Para reducir las fluctuaciones de la luz UV cuando los niveles de temperatura son excesivamente altos o bajos, se utiliza una vaina de cuarzo que impide el contacto agua-lámpara reduciendo de este modo las fluctuaciones de temperatura. La temperatura óptima se sitúa cerca de 40ºC.

Los sistemas de desinfección con luz UV disponen de diferentes alternativas en lo relativo a las lámparas de desinfección. La tabla 3.6 muestra estas alternativas tecnológicas, en las que las lámparas con mayor potencia son las de menor rendimiento (menor proporción de luz UV germicida). En la práctica se busca un equilibrio con el mínimo número posible de lámparas a instalar.

Tabla 3.6. Lámparas de luz UV (Rodieck y Jeyanayagam, 1999).

| Tecnología | Potencia lámpara (W) | Rendimiento (%) |
|---|---|---|
| Baja presión – baja intensidad | 75 – 88 | 35 – 38 |
| Baja presión – Alta intensidad | 270 – 1600 | 30 – 35 |
| Media presión – Alta intensidad | 2800 – 5000 | 15 – 10 |

Las principales ventajas de desinfección con luz UV son las siguientes:

1. Son equipos compactos y por ello reducen el espacio necesario.
2. No emplea productos químicos.
3. No genera subproductos.
4. Es compatible con otros procesos de desinfección.
5. Es más eficiente sobre los ooquistes, protozoos y virus (el cloro es más efectivo sobre las bacterias).
6. Inactiva Cryptosporidium y Giardia (el cloro y sus derivados no).

Los principales inconvenientes de la desinfección con luz UV son:

1. No permiten disponer de desinfectante residual. Sólo actúa en el instante en el que el agua está frente a las lámparas de la luz UV y por tanto no ofrece un efecto protector permanente.
2. Diversos estudios realizados en instalaciones reales ponen de manifiesto que la tecnología no es totalmente fiable en la práctica debido a la dificultad para ajustarse a grandes variaciones de la calidad del agua.
3. La existencia de la foto-reactivación. La foto-reactivación es un proceso de reparación que experimentan los microorganismos tras su exposición a la luz UV. La exposición a la luz natural permite la reparación de las alteraciones causadas por la luz UV en el ADN de las células.
4. Sus exigencias tecnológicas y de calidad del agua. Una correcta desinfección obliga a que el agua tenga una transmitancia elevada (se recomienda un valor mínimo de 60%) y un bajo contenido en materia orgánica disuelta.
5. Un rendimiento energético bajo (el sistema de luz UV genera unas enormes pérdidas de calor).

En la actualidad, una estrategia comúnmente adoptada en las plantas de tratamiento de aguas es incorporar un proceso de desinfección con luz UV seguido de un tratamiento con cloro. Esta estrategia permite beneficiarse de las facetas positivas de ambos desinfectantes procediendo en primer lugar a una desinfección con luz UV y posteriormente a la adición de una pequeña dosis de cloro al agua que aporte la protección necesaria durante la circulación del agua desde la planta hasta el punto de uso.

## 3.8 UN EJEMPLO PRÁCTICO: EL CONSORCI DE LA COSTA BRAVA

El Consorci de la Costa Brava (CCB) es un organismo creado en 1971 y formado por los 27 municipios del litoral gerundense y la Diputación de Girona, que se ocupa de la gestión del ciclo integral del agua en dicha zona. El objetivo fundacional del CCB fue dar respuesta a la entonces incipiente problemática de la gestión de los recursos hídricos de la zona y a la preservación de la calidad de las aguas, especialmente las de baño, ante la creciente importancia del turismo como principal actividad económica de la zona.

Desde su creación, el CCB ha sido un organismo con grandes inquietudes científicas, técnicas y profesionales, siendo una de las instituciones pioneras en el conjunto de España en el desarrollo de proyectos de reutilización de agua. Ya en el año 1985 se organizaron las primeras jornadas técnicas sobre reutilización de agua celebradas en España, y en las que participaron los principales expertos internacionales, tales como el Dr. Takashi Asano, ganador en el año 2001 del prestigioso Stockholm Water Prize. Los trabajos y reflexiones de estas jornadas permitieron establecer las bases teóricas y experiencia práctica sobre las que iniciar la reutilización de aguas en el ámbito del Consorci de la Costa Brava.

El proceso de regeneración de agua en el ámbito del CCB se inicia en el año 1989 mediante un tratamiento de regeneración consistente en una desinfección con cloro del efluente secundario de la EDAR de Castell-Platja d'Aro para el uso como riego del entonces denominado Golf Mas Nou (actualmente Golf d'Aro). Paralelamente, entre 1989 y 1992 se realizó un seguimiento intensivo de la calidad del agua regenerada y de

las implicaciones que ésta podía tener para la gestión agronómica, con el objetivo de obtener las directrices principales del agua regenerada para el riego. No obstante, es a partir del año 1994 cuando se inicia la expansión de la regeneración y reutilización en la zona, recibiendo el impulso más importante en 1996 con la obtención de financiación por parte de la Unión Europea para la construcción de las instalaciones de regeneración de varias EDAR. De esta forma, en 1998 entran en funcionamiento los procesos de regeneración actuales de Empuriabrava y de Castell-Platja d'Aro, y en el año 2000 los de Portbou, Colera, Port de la Selva y Cadaquès. Posteriormente, con la financiación de la Agencia Catalana del Agua entran en funcionamiento las ERA de Blanes (2002), Torroella de Montgrí (2003) y Tossa de Mar (2003).

Los motivos que han llevado a adoptar la reutilización del agua como un elemento esencial en la gestión de los recursos hídricos en la Costa Brava son los siguientes:

1. La sobreexplotación, el agotamiento y la contaminación de los acuíferos costeros en los últimos 40 años.
2. El aumento de la demanda urbana no-potable, debida al aumento del número de campos de golf y zonas ajardinadas.
3. Las inversiones muy importantes en los años 80 y 90 para la traída de aguas potables a la costa, y a primeros de año 2000 en desalación.
4. La elevada inversión en saneamiento y depuración de aguas residuales hasta nivel secundario, y su posterior vertido al mar.
5. La conveniencia de implantar un tratamiento adicional para producir un agua segura desde el punto de vista sanitario y que permita cubrir la demanda no potable realizando así una gestión más eficiente y lógica de los recursos hídricos.

La gestión integral del agua realizada por el CCB comprende el abastecimiento en alta a diversos municipios, que en la actualidad se sitúa alrededor de los 20 millones de metros cúbicos al año, el saneamiento y depuración de las aguas residuales de los 27 municipios, con un volumen total depurado de unos 35 millones de metros cúbicos al año, y la regeneración y la reutilización de aguas, que se sitúa entre 5 y 6 millones de metros cúbicos al año (Tabla 3.7). Suponiendo una dotación por habitante de 150 litros/día, este volumen reutilizado correspondería al agua que consumiría anualmente una población de 110.000 habitantes.

Tabla 3.7. Volumen de agua residual y de agua regenerada en el ámbito del Consorci de la Costa Brava en el año 2008 (Sala, 2009).

| Área | Nº de EDAR | Volumen agua EDAR ($hm^3$/año) | Nº de ERA | Volumen agua ERA ($hm^3$/año) | Porcentaje regeneración (%) |
|---|---|---|---|---|---|
| Norte | 9 | 6,6 | 7 | 1,1 | 18 |
| Central I | 4 | 4,2 | 2 | 1,1 | 26 |
| Central II | 2 | 11,1 | 2 | 0,8 | 7 |
| Sur | 3 | 9,1 | 3 | 2,5 | 27 |
| Total | 18 | 31,0 | 14 | 5,5 | 18 |

Un estudio detallado de la evolución de la producción de agua regenerada en la Costa Brava (figura 3.3) muestra como el volumen anual de agua regenerada se ha

multiplicado por 10 durante los últimos 15 años aproximadamente, manteniéndose la tendencia actual de crecimiento sostenible hasta alcanzar en la actualidad unos 5,5 $hm^3$/año de agua regenerada aproximadamente.

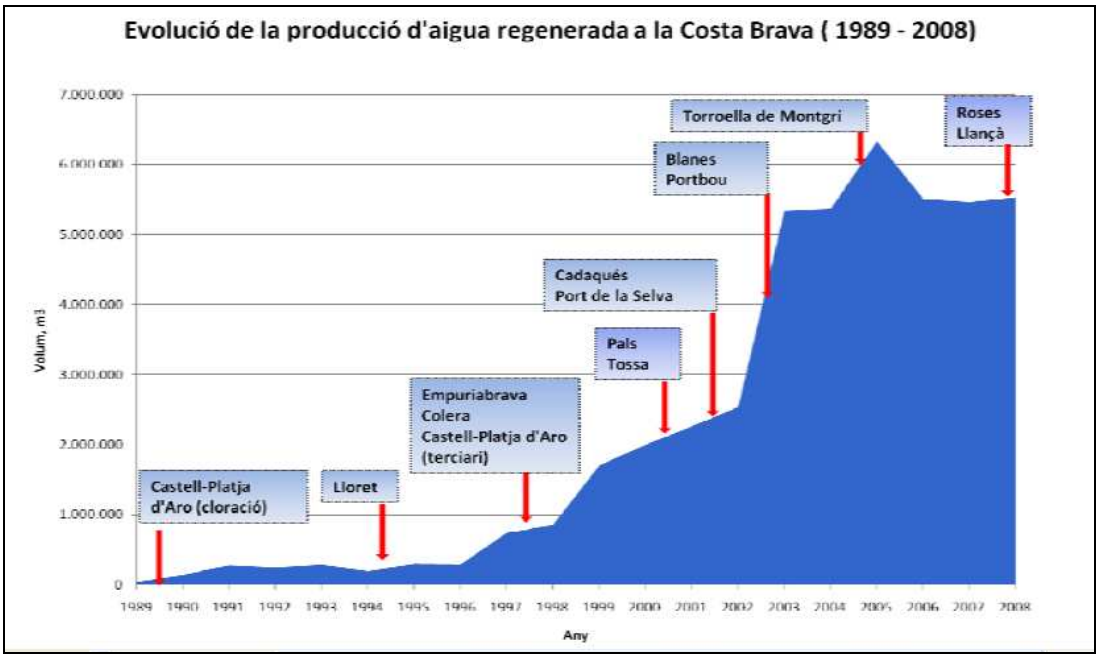



Figura 3.3. Evolución de la producción de agua regenerada en la Costa Brava (Sala, 2009).

La Costa Brava dispone de una amplia variedad de aplicaciones para el agua regenerada. Ordenados de mayor a menor, en cuanto a volumen suministrado, estos usos son los siguientes (figura 3.4): recarga de acuíferos, usos ambientales, riego de campos de golf y jardinería, riego agrícola, y usos internos y urbanos no potables.

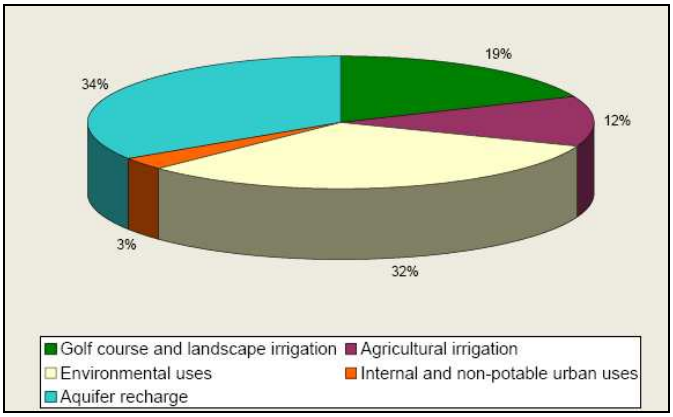



Figura 3.4. Distribución del agua regenerada producida por el CCB en el año 2008 según los usos a los que se destina (Sala, 2009).

En cuanto a volumen anual, el principal proyecto en la Costa Brava es el de la recarga del acuífero del tramo inferior del río Tordera con el agua producida en la estación de regeneración de Blanes, una instalación que aporta anualmente, desde 2003, unos 3 millones de metros cúbicos de agua al acuífero y que hasta aquel momento eran vertidos al mar. La recarga se realiza por percolación superficial y la calidad del agua es muy

elevada, tanto desde el punto de vista microbiológico como físico-químico, con concentraciones de nitrógeno total inferiores a 10 mg N/l y con ausencia de *E. coli* en la gran mayoría de muestras.

Dentro de los usos ambientales destaca el proyecto de reutilización llevado a cabo en el "Parc Natural dels Aiguamolls de l'Empordà", donde a través de un sistema de humedales artificiales se reduce la concentración de nitrógeno y fósforo de forma previa a su utilización para la alimentación de la laguna del Cortalet y para la restauración de los prados húmedos típicos de la zona.

Por lo que respecta a los usos de riego de campos de golf, los principales campos de golf de la Costa Brava (6) que utilizan actualmente agua regenerada para el riego de sus instalaciones, ya sea de forma total o parcial.

El sector con un mayor potencial de crecimiento es el riego agrícola. Con las experiencias positivas de las comunidades de regantes de Castell d'Aro, Solius (término municipal de Santa Cristina d'Aro), Mas Rabassa (término municipal de Blanes) y Mas Duran (Torroella de Montgrí), y del riego de viñedo en Garbet (término municipal de Colera), es de esperar que otros agricultores puedan interesarse por poder disponer de un recurso que haga que su producción sea independiente de la climatología.

El sector con un menor consumo de agua regenerada hasta el momento es el de los usos urbanos no potables, entre los que destacan el riego de jardines municipales, las bocas contra incendios y el baldeo de calles. Los ahorros producidos en estos usos para algunos municipios, donde se registra una evidente limitación en la disponibilidad de recursos hídricos (Portbou, Port de la Selva), se traducen en un aumento de la garantía del abastecimiento potable, al poder atender estas demandas con un agua que no disminuye las reservas disponibles.

En este sentido, no sólo los municipios con limitación de recursos para el abastecimiento potable han apostado por potenciar la reutilización del agua para los usos urbanos no potables. Lloret de Mar y Tossa de Mar ya tienen instalada desde mediados del año 2008 una red específica de suministro de agua regenerada para usos no potables que permitirá cubrir una gran parte de la demanda de agua no potable de uso municipal, con el objetivo de conseguir un ahorro importante de agua potable. En la actualidad se realiza un seguimiento intensivo de muestreo en las redes de ambos municipios para observar los posibles cambios de calidad del agua y anticipar posibles problemas. Otras localidades como Portbou, Colera, Port de la Selva, Cadaquès y Torroella de Montgrí han iniciado recientemente (2009) los pasos para la construcción de una nueva red de agua regenerada en un futuro no muy lejano.

Todas estas actuaciones representarán un elemento clave en la gestión futura de los recursos hídricos, especialmente de los municipios que dependen exclusivamente de fuentes locales de suministro y/o de aquellos en los que el suministro de agua potable actual necesite de un consumo elevado de energía, ya sea por cuestiones de tratamiento (el caso más claro, cuando el agua provenga de plantas desalinizadoras) o bien de transporte (para cubrir la distancia entre la instalación productora del agua potable y el municipio en cuestión). En estos últimos casos, la regeneración y la posterior reutilización para usos no potables de un agua que antes era vertida al mar permitirá un ahorro conjunto de agua y de energía y ofrecerá un verdadero paso adelante hacia una mayor sostenibilidad.

# CAPÍTULO 4

# MATERIALES Y MÉTODOS

## 4.1 INTRODUCCIÓN

El objetivo principal de la tesina es determinar la eficacia y la fiabilidad de los procesos de regeneración de agua. Para la consecución de este objetivo, el primer paso ha consistido en recopilar el mayor número posible de datos de los parámetros físico-químicos y sanitarios más representativos del agua. Los datos utilizados han sido facilitados por el Consorci de la Costa Brava y abarcan un conjunto de años, generalmente desde el año 2004 hasta el 2009, lo que nos ha permitido observar la evolución seguida por los procesos de regeneración. Las tres estaciones de regeneración de agua (ERA) estudiadas son:

1. ERA de Castell-Platja d'Aro. El proceso regenerador está formado por un filtro de arena y un sistema de desinfección mediante luz UV seguido de otro mediante hipoclorito sódico. Este proceso de regeneración data del año 1998 y fue una de las primeras ERA construidas en el ámbito del Consorci de la Costa Brava.

2. ERA de Tossa de Mar. Es una instalación formada por un proceso de coagulación-floculación, una decantación lamelar, un filtro de arena y un sistema de desinfección con luz UV seguido de otro mediante hipoclorito sódico. El tratamiento de regeneración actual entró en funcionamiento en el año 2003, exceptuando la desinfección con luz UV que se incorporó a posteriori en septiembre del año 2008.

3. ERA de Lloret de Mar. Es una instalación formada por un proceso de coagulación-floculación con desinfección con cloro, una decantación lamelar, un filtro de microtamices Hydrotech tipo Dynasand y una desinfección con luz UV. Es una de las instalaciones más recientes construidas en la Costa Brava, que entró en funcionamiento en el mes de junio del año 2008.

El estudio realizado ha consistido en valorar la eficacia y la fiabilidad de los procesos de regeneración de agua llevados a cabo en las tres ERA anteriores. La valoración se realiza a partir de los parámetros físico-químicos y sanitarios más importantes de caracterización del agua. El esquema básico seguido en el estudio de cada una de las ERA ha sido el siguiente:

1. Parámetros físico-químicos:
   - Materia en suspensión (MES).
   - Turbiedad.
   - Transmitancia 254 nm.
   - Potencial Redox.

2. Parámetros sanitarios:
   - Escherichia coli (*E. coli*): año 2007 y posteriores.
   - Coliformes fecales (CF): año 2006 y anteriores.
   - Clostridium sulfito reductores (CSR).

3. Relaciones entre parámetros:
- Materia en suspensión y turbiedad.
- *E. coli* o CF y transmitancia.
- CSR y transmitancia.
- Logaritmo de la reducción absoluta, de *E. coli* o CF y transmitancia.
- Logaritmo de la reducción normalizada, de *E. coli* o CF y transmitancia.

## 4.2 ERA DE CASTELL-PLATJA D'ARO (CPA)

La estación depuradora de aguas residuales (EDAR) de Castell-Platja d'Aro (figura 4.1) se construyó en el año 1983 en el municipio de Castell d'Aro para dar servicio a las poblaciones de Castell d'Aro, Platja d'Aro, Sant Feliu, S'Agaró y Santa Cristina. Es un sistema de depuración biológico de fangos activados convencional que trata aproximadamente unos 6 $hm^3$ anuales. El caudal máximo de diseño es de 35.000 $m^3$/día y la carga contaminante máxima de 175.000 habitantes equivalentes. Al dar servicio a poblaciones turísticas, la planta tiene un componente estacional muy marcado, produciéndose puntas de caudal y carga contaminante durante el verano. El afluente es agua residual doméstica y el caudal tratado varía entre los 8.000 $m^3$/día durante los meses de invierno y los 28.000 $m^3$/día en los de verano. Esta EDAR es una de las de mayor capacidad en la Costa Brava.

El proceso de tratamiento dispone de dos canales de pretratamiento (desbaste de gruesos y eliminación de arenas y grasas), tres decantadores primarios de 22 metros de diámetro, un tratamiento de fangos activados con nueve aireadores de superficie y tres decantadores secundarios de 30 metros de diámetro. Posteriormente, una parte del agua tratada se vierte directamente al río y otra se utiliza en el proceso de regeneración.

Figura 4.1. Vista aérea de la EDAR de Castell-Platja d'Aro.

El proceso de regeneración de agua en la estación de Castell-Platja d'Aro se inicia en el año 1989 mediante un tratamiento que consistía exclusivamente en un proceso de desinfección con hipoclorito sódico del efluente secundario de la EDAR. Posteriormente, en el año 1998, se construyó la ERA actual, dotada de un tratamiento

más completo y adecuado que permite obtener agua regenerada de mayor calidad. El agua regenerada se destina principalmente para el riego de campos de golf (uso 4.1), riego de zonas verdes (uso 1.2) y riego agrícola (uso 2.1). A largo plazo, el proyecto futuro más ambicioso de esta ERA consiste en la ampliación de los usos disponibles al uso 1.1 del RD 1620/2007, es decir, riego de jardines privados y descarga de aparatos sanitarios.

La ERA de Castell-Platja d'Aro (figura 4.2) está diseñada para una capacidad máxima diaria de 15.000 $m^3$ (625 $m^3$/h). El caudal afluente al proceso de regeneración varía actualmente entre 250-280 $m^3$/h en verano y 100-120 $m^3$/h en invierno. El objetivo principal del tratamiento de regeneración es la mejora de la calidad físico-química del agua y la reducción o eliminación de los microorganismos patógenos presentes en el efluente secundario. El proceso de regeneración no está diseñado para reducir el contenido de nutrientes (fósforo y nitrógeno) del efluente secundario, por lo que las concentraciones de estos en la entrada y salida de la ERA son semejantes.

Figura 4.2. Vista general de la ERA de Castell-Platja d'Aro.

La figura 4.3 muestra las etapas del proceso de regeneración en la ERA de Castell-Platja d'Aro y los puntos de muestreo posteriormente utilizados en el apartado 5 para el estudio de la eficacia y la fiabilidad de este proceso de regeneración.

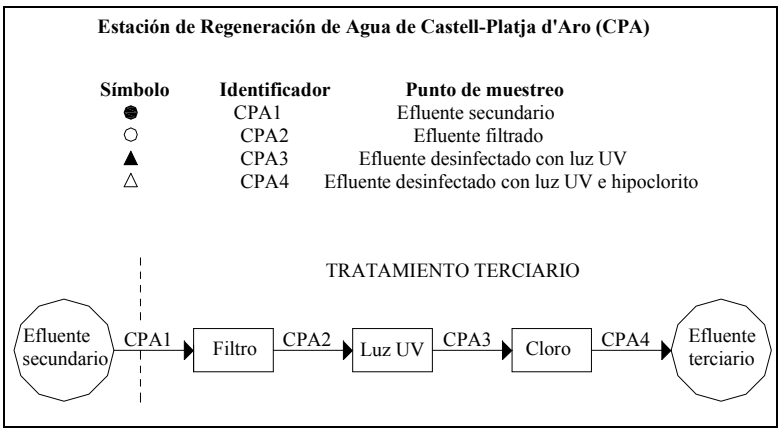



Figura 4.3. Esquema básico y puntos de muestreo del proceso de regeneración en la ERA de Castell-Platja d'Aro.

En la actualidad, el canal afluente al proceso de regeneración dispone de una sonda de turbiedad para garantizar que el agua regenerada obtenida tiene la calidad requerida para los usos considerados o previstos. De este modo, sólo cuando la turbiedad del agua afluente es igual o inferior a 15 UNT se le permite acceder al proceso de regeneración. De esta forma se asegura que el agua afluente que previsiblemente dejará de cumplir la normativa no llegue a salir del proceso de regeneración. A grosso modo, las etapas del proceso de regeneración en la ERA de Castell-Platja d'Aro son las siguientes:

1. Filtración. La filtración (Figura 4.4) consiste en 4 filtros de arena marca Hydroclear por los que el efluente secundario fluye con el objetivo de reducir la turbiedad y la MES y aumentar la transmitancia (a 254 nm) del agua. El sistema está formado por 4 celdas de filtración que contienen una única matriz filtrante de arena de cuarzo de grano fino y de 25 cm de espesor. El caudal de diseño teórico es de 625 $m^3$/hora y la superficie útil filtrante es de 80 $m^2$.

2. Desinfección con luz UV. El agua filtrada es bombeada mediante 4 bombas del modelo D04Q-501 de la marca Hidrostal hasta el conducto de desinfección. La desinfección con luz UV se realiza mediante 2 equipos Berson in Line 500 situados en serie y de forma perpendicular al flujo del agua (Figura 4.5). Cada uno de los equipos está formado por 4 lámparas de presión media modelo B3535 y de un sistema de limpieza automática "ultra Wipe" con dosificación química de ácido nítrico que permite eliminar cualquier depósito sobre los protectores de cuarzo de las vainas (lámparas), sin interrumpir el proceso de desinfección y mejorando de esta forma la eficacia de las lámparas. La dosis media aportada por estos equipos es aproximadamente de 25-30 mJ/$cm^2$, calculada a partir de la luz emitida, el caudal, la transmitancia a 254 nm, la potencia eléctrica y las horas de funcionamiento acumuladas.

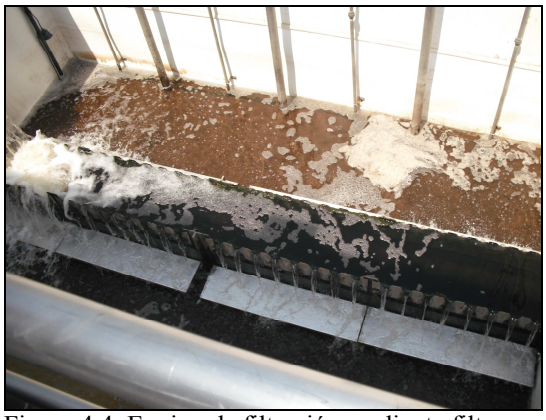


Figura 4.4. Equipo de filtración mediante filtros de arena Hydroclear en la ERA de Castell-Platja d'Aro.

Figura 4.5. Equipos de desinfección con luz UV en la ERA de Castell-Platja d'Aro.

3. Desinfección con hipoclorito sódico. Esta es la última etapa del proceso de regeneración y su objetivo es completar el proceso de desinfección iniciado con la luz UV para mejorar la calidad microbiológica y la regularidad de los resultados. Este proceso consiste en dosificar hipoclorito sódico al 15% a través de 2 bombas dosificadoras de la marca Prominent, gobernadas por una sonda de potencial redox. La dosis utilizada se sitúa alrededor de 5 mg/l de cloro activo.

En el mes de julio del año 2007 se instaló una sonda redox en el inicio del laberinto de desinfección (figura 4.6). La sonda redox tiene una consigna asignada de 350 mV, valor obtenido experimentalmente añadiendo diferentes dosificaciones de cloro al agua afluente hasta obtener una concentración capaz de garantizar la ausencia de *E. coli* en el agua efluente del laberinto de desinfección. La medida del potencial redox se utiliza como un sistema de control indirecto del proceso de cloración.

Este método de cloración retroalimentado por la sonda redox permite aplicar la dosificación óptima del cloro necesario para asegurar la desinfección del agua regenerada. El ahorro conseguido en la cantidad de cloro utilizado ha permitido que la inversión realizada para adquirir la sonda redox se haya recuperado en menos de un año. Otras ventajas de la sonda redox respecto a las sondas de cloro es el escaso mantenimiento necesario y el bajo coste de mantenimiento, que se limita al cambio del electrodo cada 5 meses aproximadamente.

El proceso de regeneración de esta ERA permite obtener un agua regenerada de gran calidad (Figura 4.7).

Figura 4.6. Laberinto de desinfección de la ERA de Castell-Platja d'Aro.

Figura 4.7. Agua regenerada obtenida en la ERA de Castell-Platja d'Aro.

## 4.3 ERA DE TOSSA DE MAR (TDM)

La EDAR de Tossa de Mar (figura 4.8) entró en funcionamiento en el año 1980 para dar servicio a dicha población. Está dotada de un sistema de depuración de fangos activados que trata aproximadamente 1 $hm^3$/anual. El caudal máximo de diseño es de 4.500 $m^3$/día y la carga contaminante máxima es de 43.100 habitantes equivalentes. Al ser una población turística y costera tiene un carácter estacional muy marcado, de forma que los caudales tratados pueden variar desde los 1.000-2.000 $m^3$/día en invierno hasta los 4.000 $m^3$/día que se pueden alcanzar en verano. El agua tratada es agua residual doméstica.

El tratamiento aplicado en la EDAR consiste en un pretratamiento, un tratamiento de fangos activados y una decantación. El pretratamiento consiste en un desbaste mediante rejas para la eliminación de gruesos y un desarenador para la eliminación de arenas y

grasas. El tratamiento biológico es un tratamiento de fangos activados mediante aireación por turbinas. Finalmente, la decantación secundaria consta de tres decantadores cuyo objetivo es la eliminación de la MES y de la materia orgánica del agua. Una parte del agua obtenida del tratamiento secundario es enviada al mar mediante un emisario submarino y otra parte es impulsada mediante unas bombas al proceso de regeneración, siempre y cuando la turbiedad del agua sea inferior a 15 UNT. Este valor se determina mediante una sonda de turbiedad situada en el canal efluente del tratamiento secundario y su objetivo es asegurar la calidad del agua afluente al proceso de regeneración para que, de esta forma, el agua regenerada satisfaga los niveles de calidad requeridos por los usos a los que se destina.

Figura 4.8. Vista aérea de la EDAR de Tossa de Mar.

El proceso de regeneración de agua existente en la actualidad en la ERA de Tossa de Mar entró en funcionamiento en el año 2003. Hasta esa fecha, el proceso de regeneración consistía en una cloración del efluente secundario. El agua regenerada se destina principalmente al riego de zonas verdes urbanas (uso 1.2). A corto plazo, el proyecto más ambicioso del Consorci de la Costa Brava consiste en la ampliación de los usos al uso 1.1 del RD 1620/2007 que incluye el riego de jardines privados y la descarga de aparatos sanitarios. En este sentido, la red de distribución de agua regenerada de Tossa de Mar entró en servicio a mediados del año 2008, y desde entonces se está realizando un seguimiento intensivo del agua distribuida con el fin de observar sus posibles cambios de calidad y anticipar posibles problemas. Este es el paso previo para cubrir el uso más exigente del RD 1620/2007 (uso 1.1) que permitirá cubrir una gran parte de la demande de agua no potable para uso municipal, con el objetivo de conseguir un ahorro importante del agua potable.

La ERA de Tossa de Mar (figura 4.9) está diseñada para una capacidad máxima de 35 $m^3/h$. El proceso de regeneración no funciona en régimen de flujo continuo; un depósito de agua regenerada permite que el proceso de regeneración se ponga automáticamente en funcionamiento según el nivel de agua existente en el depósito. La capacidad del depósito es de 700 $m^3$.

Figura 4.9. Vista general de la ERA de Tossa de Mar.

La figura 4.10 muestra las etapas del proceso de regeneración en la ERA de Tossa de Mar y los puntos de muestreo que posteriormente se utilizan en el apartado 6 para el análisis de la eficacia y fiabilidad del proceso de regeneración.

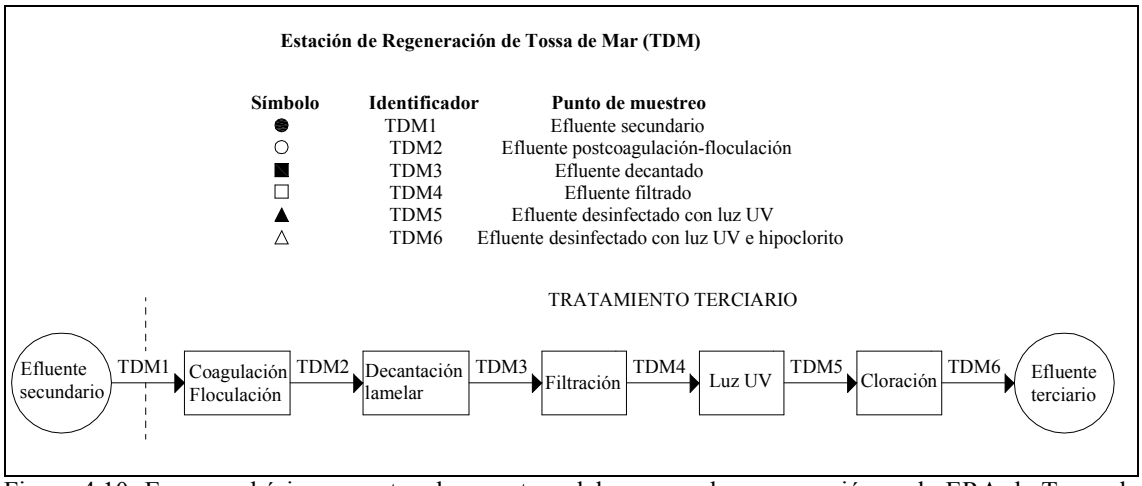



Figura 4.10. Esquema básico y puntos de muestreo del proceso de regeneración en la ERA de Tossa de Mar.

Como se ha comentado anteriormente, cuando el valor indicado por la sonda de turbiedad (figura 4.11) sea inferior a 15 UNT y el valor de consigna del potencial redox del depósito de agua regenerada sea favorable, el agua es impulsada al proceso de regeneración mediante 2 bombas de captación con un caudal máximo de 40 $m^3$/h. Las etapas del proceso de regeneración en la ERA de Tossa de Mar (figura 4.12) son las siguientes:

1. Coagulación-floculación. El coagulante se añade con el objetivo de neutralizar la carga superficial de las partículas, mediante 2 bombas dosificadoras de la marca Prominent con un caudal máximo de 30 litros/hora. El tanque de mezcla inicial tiene un volumen de 2,5 $m^3$ que, con un caudal de 35 $m^3$/h, proporciona un tiempo de residencia de 4 minutos. El coagulante utilizado es el policloruro de aluminio (PAX). La dosificación de polielectrolito aniónico se realiza en el

floculador mediante 2 bombas de la marca Prominent con un caudal máximo de 108 litros/hora. El floculador tiene un volumen de 13 $m^3$ que, con un caudal de diseño de 35 $m^3$/h, proporciona un tiempo de residencia de 22 minutos. Es conveniente indicar que en la actualidad cuando el agua afluente tiene una turbiedad inferior a 3 UNT no se añade PAX ni polielectrolitos. Para asegurar la coagulación y la floculación se dispone de dos agitadores de potencia unitaria 0,75 kW. Al floculador también se añade una dosis de cloro suficiente para producir un efecto desinfectante y evitar la formación de algas en la decantación posterior.

Figura 4.11. Sonda de turbiedad en la ERA de Tossa de Mar.

Figura 4.12. Vista general del proceso de regeneración en la ERA de Tossa de Mar.

2. Decantación lamelar. La instalación de lamelas, paralelas y muy próximas entre sí, permite a estos decantadores aumentar la superficie de decantación y disminuir la carga hidráulica superficial, obteniendo de esta forma una mayor eficacia de retención de partículas. En este proceso se produce la decantación/eliminación de los flóculos procedentes de la coagulación-floculación. El volumen del decantador lamelar es de 18 $m^3$ que, con un caudal de 35 $m^3$/h, proporciona una velocidad ascensional de 3,5 m/h (figura 4.13).

3. Filtración. La filtración (figura 4.14) consta de un filtro de arena tipo Dynasand (Huber) con un sistema de limpieza de arena en continuo. La velocidad de filtración es de 7,5 m/h. En la salida del filtro existe una sonda que mide el potencial redox del agua con un valor de consigna de 260 mV. Este valor se ha establecido a partir de la experiencia. De esta forma, cuando el potencial redox es inferior a 260 mV el agua no entra en el proceso de desinfección y se envía al medio marino mediante un emisario submarino. Por el contrario, cuando el potencial redox es superior a 260 mV se considera que el agua tiene aproximadamente entre 1-1,5 mg/l de cloro total y pasa directamente al proceso de desinfección con luz UV. Esta sonda de potencial redox se incorporó en el mes de enero del año 2009, sustituyendo a una sonda de cloro total utilizada hasta entonces en esta ERA. La sonda redox se utiliza como un sistema de control para asegurar que el agua regenerada contiene siempre una concentración mínima de cloro.

4. Desinfección con luz UV. La desinfección con luz UV (figura 4.15) se realiza mediante 2 módulos de lámparas UV en línea del modelo Inline 400 Special 10 kW de la marca Berson. La dosis máxima teórica aplicada es de 48 mJ/cm$^2$. Esta etapa de desinfección con luz UV se incorporó 10 años después de la inauguración de la ERA, concretamente en el mes de septiembre del año 2008.

5. Desinfección con cloro. La última etapa del proceso de regeneración consiste en una desinfección con cloro mediante una bomba de la marca Prominent. La desinfección inicial con luz UV y la posterior con cloro es una estrategia muy favorable para aprovechar las facetas positivas de ambos desinfectantes. En la salida del depósito de agua regenerada existe una sonda de cloro libre con una consigna establecida de 0,4 mg/l que asegura que la totalidad del agua regenerada que se envía a los usuarios dispone de una concentración mínima de cloro; cuando la concentración registrada es inferior a 0,4 mg/l se activa una dosificación de cloro en el propio depósito. El depósito tiene una capacidad de 700 m$^3$.

El agua regenerada así producida se utiliza, entre otros usos, para el riego de zonas verdes públicas en la población de Tossa de Mar (figura 4.16).

Figura 4.13. Decantación lamelar en la ERA de Tossa de Mar.

Figura 4.14. Filtro de arena en la ERA de Tossa de Mar.

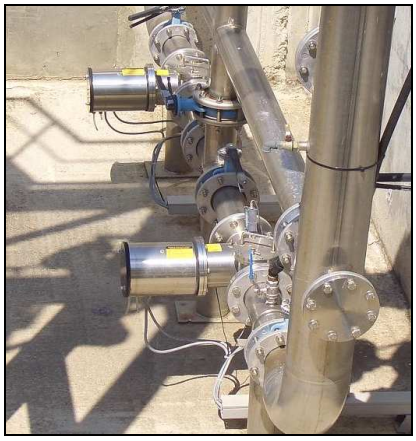


Figura 4.15. Dos módulos de desinfección con luz UV en la ERA de Tossa de Mar.

Figura 4.16. Zona de vegetación arbórea regada con agua regenerada en el parque de Sa Riera de Tossa de Mar.

## 4.4 ERA DE LLORET DE MAR (LDM)

La EDAR de Lloret de Mar (figura 4.17) entró en funcionamiento en el año 1992 para tratar las aguas procedentes de dicha población. El sistema de depuración consiste en un tratamiento de fangos activados seguido de un tratamiento físico-químico. El caudal tratado por esta planta se sitúa entre 4 y 5 $hm^3$ anuales. El caudal máximo de diseño es de 20.000 $m^3$/día y la carga contaminante máxima de 185.000 habitantes equivalentes. Debido a la estacionalidad de la planta, el caudal tratado se sitúa entre 10.000-19.000 $m^3$/día en verano y 5.000-8.000 $m^3$/día en invierno. El agua residual es de carácter doméstico.

El tratamiento seguido en la EDAR consiste en un pretratamiento, una decantación primaria, un tratamiento biológico y un tratamiento físico-químico. El pretratamiento está formado por un desbaste mediante rejas para la eliminación de gruesos, una balsa de homogeneización para la estabilización del caudal y un desarenador para la eliminación de arenas y grasas. El tratamiento primario consiste en una decantación formada por 3 decantadores de sección circular cuyo objetivo es la eliminación de una gran parte de la MES y la $DBO_5$ contenidas en el agua. El tratamiento secundario consiste en un tratamiento biológico de fangos activados y en una decantación secundaria formada por tres decantadores. El objetivo de este tratamiento secundario es la eliminación de la materia orgánica del agua. Hasta el año 2008, el tratamiento biológico tenía una capacidad máxima de 10.000 $m^3$/día, siendo el resto del caudal recibido por la planta enviado directamente al proceso físico-químico. En el año 2008, coincidiendo con la construcción de la ERA, se amplió la EDAR para dotar al proceso biológico de una capacidad máxima de 22.000 $m^3$/día. Una parte del agua efluente de la EDAR se vierte directamente al mar mediante un emisario submarino y otra parte se envía al proceso regeneración.

Figura 4.17. Vista aérea de la EDAR y la ERA de Lloret de Mar.

El proceso de regeneración de agua existente en la actualidad en la ERA de Lloret de Mar entró en funcionamiento en junio del año 2008. Hasta esa fecha, el tratamiento de regeneración consistía simplemente en un proceso de cloración del efluente secundario. El proceso de regeneración instalado en el año 2008 es más completo y adecuado, y

permite obtener un agua regenerada de mayor calidad. El agua regenerada se destina principalmente al riego de campos de golf (uso 4.1) y riego de zonas verde urbanas (uso 1.2). A corto plazo, el proyecto más ambicioso del Consorci de la Costa Brava en esta ERA es la ampliación de los usos autorizados, concretamente el uso 1.1 del RD 1620/2007 para el riego de jardines privados y descarga de aparatos sanitarios. En este sentido, al igual que en la población de Tossa de Mar, en julio del año 2008 entró en servicio la red de agua regenerada de Lloret de Mar. Se está realizando un seguimiento intensivo de esta red para determinar la evolución de la calidad del agua y anticipar así posibles problemas, de modo que en un periodo corto de tiempo se pueda adoptar el uso 1.1 y conseguir un ahorro importante de agua potable de la población de Lloret de Mar. La ERA de Lloret de Mar (figura 4.18) está diseñada para un caudal máximo de 500 $m^3/h$ (12000 $m^3$/día).

Figura 4.18. Vista general de la EDAR y ERA de Lloret de Mar.

La figura 4.19 muestra los diferentes procesos disponibles en la ERA de Lloret de Mar y los puntos de muestreo que posteriormente se utilizan en la descripción del apartado 7.

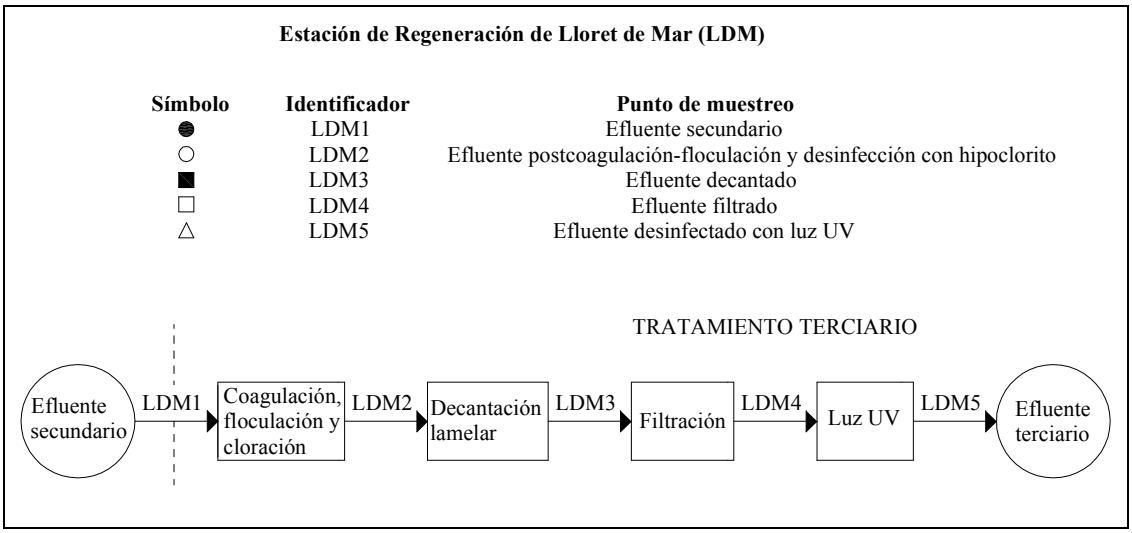



Figura 4.19. Esquema básico y puntos de muestreo del proceso de regeneración en la ERA de Lloret de Mar.

Actualmente, el conducto efluente del tratamiento secundario dispone de una sonda de turbiedad de tal forma que si el agua supera las 15 UNT las bombas no impulsan efluente secundario al proceso de regeneración. La turbiedad del efluente secundario puede variar según el periodo del año de modo que, en invierno, la turbiedad disminuye debido a la mejor calidad del agua afluente. Este método de control es una forma de asegurar que el agua que se utiliza como materia prima para la obtención del agua regenerada tiene la calidad necesaria para los usos a los que se destina. El agua susceptible de no cumplir la calidad requerida después del proceso de regeneración no accede a la ERA. El proceso de regeneración es continuo y por lo tanto, se lleva a cabo durante las 24 horas del día. Las etapas del tratamiento de regeneración de la ERA de Lloret de Mar son las siguientes:

1. Coagulación-floculación y cloración. En el reactor de mezcla inicial se añade el coagulante con el objetivo de neutralizar la carga superficial de las partículas. El coagulante utilizado es el policloruro de aluminio (PAX) (figura 4.20). En el floculador se produce la dosificación de polielectrolito aniónico (figura 4.21) cuya función es promover la unión de los flóculos entre sí. El floculador se dosifica con cloro líquido para producir un efecto desinfectante y para evitar la formación de algas en la decantación posterior. La dosis aproximada es de 17-18 mg/l de cloro activo.

Figura 4.20. Tanques de hipoclorito sódico (izquierda) y de policloruro de aluminio (derecha) en la ERA de Lloret de Mar.

Figura 4.21. Equipo de preparación de polielectrolito en la ERA de Lloret de Mar.

2. Decantación lamelar. La instalación de lamelas, paralelas y muy próximas entre sí permite a estos decantadores aumentar la superficie de decantación y disminuir la carga hidráulica superficial, obteniendo de esta forma una mayor eficacia de retención de partículas. En este proceso se produce la decantación/eliminación de los flóculos procedentes de la coagulación y floculación. La figura 4.22 muestra el decantador lamelar.

3. Filtración. La filtración (figuras 4.23 y 4.24) se produce mediante unos microtamices Hydrotech con luz de paso de 10 µm que permiten la eliminación total de los huevos de helmintos. Hydrotech es un sistema de filtración superficial con microtamices de gran eficacia y versatilidad. Debido al diseño compacto es muy utilizado en lugares donde se requiere un ahorro de espacio, con pequeño tamaño de paso y alta superficie de filtración. A medida que los

sólidos son retenidos por la tela, la pérdida de carga a través del filtro aumenta produciendo un aumento en el nivel de agua del canal de entrada. Cuando se alcanza el nivel de consigna, una sonda de nivel activa automáticamente la rotación de los discos y la bomba de lavado de los microtamices.

4. Desinfección con luz UV. Esta es la última etapa del proceso de regeneración que se lleva a cabo en la ERA de Lloret de Mar. El objetivo principal es la mejora de la calidad microbiológica del agua y complementar el proceso de desinfección iniciado por el hipoclorito sódico. A diferencia de las 2 ERAs estudiadas anteriormente (Castell-Platja d'Aro y Lloret de Mar), en esta ERA no existe un tratamiento posterior de cloración. La figura 4.25 muestra el equipo de desinfección con luz UV.

Figura 4.22. Decantación lamelar en la ERA de Lloret de Mar.

Figura 4.23. Detalle del filtro Hydrotech en la ERA de Lloret de Mar.

Figura 4.24. Detalle del filtro Hydrotech en la ERA de Lloret de Mar.

Figura 4.25. Equipo de desinfección con luz UV en la ERA de Lloret de Mar.

Esta ERA dispone de un bypass que permite, cuando es necesario, evitar el paso del agua por los 3 primeros procesos explicados y enviarla directamente al proceso de desinfección con luz UV.

La ERA de Lloret de Mar entró en funcionamiento en julio del año 2008. En la actualidad, esta ERA está en fase de garantía y consecuentemente está gestionada y explotada por la empresa constructora. No ha sido todavía cedida su explotación a la

empresa dedicada a la gestión de la EDAR y que posteriormente gestionará dicha ERA. Por ello, la información disponible en algunos puntos ha sido limitada. Por otra parte, el personal encargado de la futura gestión de la planta está realizando un seguimiento intensivo del proceso de regeneración, mediante una campaña de muestreo manual e individualizado.

## 4.5 TRATAMIENTO Y REPRESENTACIÓN DE DATOS

Los datos experimentales utilizados en esta tesina han sido facilitados por el Consorci de la Costa Brava. En la ERA de Castell-Platja d'Aro estos datos abarcan desde el año 2004 hasta el año 2009, y en las ERAs de Tossa de Mar y Lloret de Mar desde el año 2005 hasta el 2009. Las muestras corresponden al seguimiento realizado por el personal responsable de la explotación de las plantas. El proceso de toma de muestras es función de la experiencia de cada planta. Por ejemplo, en la ERA de Lloret de Mar donde el proceso de regeneración se ha incorporando recientemente, el proceso de muestreo es prácticamente diario con el fin de observar y controlar minuciosamente el proceso de regeneración. En cambio, en plantas con mucho más experiencia, como por ejemplo la ERA de Castell-Platja d'Aro, donde se dispone de un proceso de regeneración de una cierta fiabilidad, el número de muestras disminuye considerablemente hasta un control prácticamente semanal, a excepción de pequeños periodos de tiempo en los que se pueden incorporar nuevos materiales o modificaciones en los procesos de regeneración, que conllevan inexorablemente un control mucho más detallado.

Los programas informático utilizados para la evaluación de los datos han sido: Microsoft Office Excell (Microsoft Corp., 2003), SigmaPlot 11.0 (SYSTAT Inc., 2009) y SPSS v15.0 (SPSS Inc., 2009). El programa SigmaPlot 11.0 ha permitido representar gráficamente y visualizar los valores tratados y ordenados con Microsoft Excell, antes de realizar las valoraciones correspondientes. El programa estadístico SPSS v15.0 se utilizó para verificar la normalidad estadística de cada uno de los parámetros estudiados.

### 4.5.1 Método de representación y valoración

El método de representación y valoración utilizado corresponde al ajuste gráfico a una distribución de probabilidad normal. Esta técnica de evaluación estadística gráfica (probit) tiene una larga tradición y viene descrita en los tratados clásicos de estadística, por su gran interés en aplicaciones técnicas (Benjamin y Cornell, 1980, Mujeriego, 2005).

La valoración gráfica del método de la distribución normal (probit) es ampliamente utilizada en la evaluación de los procesos de tratamiento de agua. Esta técnica permite determinar de un modo sencillo la fiabilidad o garantía de los procesos de tratamiento de agua, definida como su capacidad para asegurar un cierto nivel de calidad del efluente de forma sistemática a lo largo de un periodo determinado de tiempo. Dicha técnica también proporciona los percentiles de conformidad con un determinado límite de calidad, la desviación típica (variabilidad temporal) y permite valorar el rendimiento medio del tratamiento. Como indicación, conviene notar que la desviación típica de la distribución, medida como la diferencia de los valores de la variable correspondientes a los percentiles 84 y 50 (o alternativamente los percentiles 50 y 16), ofrece una medida

de la variabilidad de los valores experimentales, representativa de su fiabilidad o garantía. En esta tesina se han evaluado los procesos de regeneración de un modo sencillo y completo mediante su valoración gráfica basada en la distribución normal.

Los resultados experimentales obtenidos a través de los programas de seguimiento y control por el personal especializado de las ERAs ofrecen una información muy valiosa para valorar estos procesos. No obstante, para la utilización de este método se requiere una elaboración previa de los datos a representar, consistente en (Mujeriego, 2005): 1) ordenar los valores experimentales de menor a mayor, 2) asignar a cada valor por orden creciente un número "i" cuyo rango es de 1 a "n" (donde n es el número total de valores), 3) asignar a cada uno de los valores un valor del estimador estadístico $F(x_i)= i/(n+1)]\cdot 100$. Posteriormente, se procede a la representación en una gráfica de probabilidad normal de los valores $x_i$ en ordenadas frente a $F(x_i)$ en abcisas.

La representación de los valores mediante el programa utilizado (SigmaPlot) proporciona una interpolación lineal de ellos. Si el ajuste de los datos muestreados a la línea recta interpolada es satisfactorio, puede considerarse que el parámetro estudiado se ajusta a una distribución normal. La recta así obtenida es una estimación de la distribución de probabilidad normal, a partir de la cual se pueden estimar los diversos parámetros estadísticos de la muestra, como pueden ser la media, la distribución típica y los percentiles.

Sin embargo, existen parámetros microbiológicos del agua que por lo general no se ajustan a una distribución normal. En estos casos, como por ejemplo los coliformes fecales (CF), Escherichia coli y CSR, se ha procedido a una transformación logarítmica de la variable. Es frecuente que la nueva variable así obtenida se ajuste a una distribución normal. Esta transformación logarítmica se realiza de una forma muy sencilla con el programa Sigmaplot, mediante la utilización de una escala logarítmica en el eje de ordenadas.

### 4.5.2 Test estadístico de Kolmogorov-Smirnov

Se ha utilizado el test de Kolmogorov-Smirnov (K-S) para verificar que los parámetros de estudio se ajustan a una distribución normal. En su sentido más estadístico, el test de Kolmogorov-Smirnov es una prueba no paramétrica utilizada para verificar que la distribución de probabilidad seguida por una serie de datos observados se ajusta a una distribución teórica con propiedades y características conocidas; en nuestro caso, la distribución normal.

Para la realización del test se plantean 2 hipótesis:

$H_0$ = hipótesis nula: los datos siguen una distribución normal
$H_1$ = hipótesis alternativa: los datos no siguen una distribución normal

Posteriormente, se define un estadístico de contraste $D_n$, cuya distribución es conocida y función del número de observaciones "n". $D_n$ se define como la máxima diferencia en valor absoluto entre la frecuencia acumulada teórica F(x), cuya función de distribución es la normal, y la frecuencia acumulada observada $S_n(x)$, es decir, la función de distribución empírica de los n datos.

$$D_n = \text{máx.} \left| F(x)-S_n(x) \right|$$

Como en cualquier test de hipótesis, la hipótesis nula se rechaza cuando el valor estadístico supera un cierto valor crítico, que se obtiene de una tabla de probabilidad. El criterio de decisión para aceptar o rechazar una hipótesis es el siguiente:

- si $D_n \leq D\alpha$: se acepta $H_0$
- si $D_n > D\alpha$: se rechaza $H_0$

El valor $D\alpha$ es el valor cuya probabilidad de rechazar la hipótesis nula cuando es cierta (error de tipo I) es $\alpha$, denominado nivel de significación del contraste. Cuanto menor sea este valor, menor será la probabilidad de cometer un error tipo I y más fiable será la decisión. En este estudio se utiliza un nivel de significancia del 5% o nivel de confianza del 95%, es decir, la probabilidad de cometer un error tipo I es del 5%. Estos valores son muy habituales y usados en estadística.

No obstante, el programa estadístico utilizado en la tesina para realizar este test (SPSS v15.0) lleva a cabo la toma de decisión del contraste anterior mediante el empleo del p-valor asociado al estadístico observado: p-valor = $P(D>Dobs/H_0)$. En este caso, la regla de decisión para aceptar o rechazar la hipótesis es la siguiente:

- si p-valor $\geq \alpha$: se acepta $H_0$
- si p-valor $< \alpha$: se rechaza $H_0$

El programa SPSS v.15.0 realiza todo este proceso internamente, dando el p-valor para cada conjunto de datos y verificando su pertenencia o no a una distribución normal.

# CAPÍTULO 5

# EFICACIA Y FIABILIDAD DE LA ERA DE CASTELL-PLATJA D'ARO

En este capítulo se procede al estudio de la eficacia y la fiabilidad del proceso de regeneración de agua llevado a cabo en la ERA de Castell-Platja d'Aro. El estudio se realiza a partir de los datos experimentales obtenidos entre los años 2004 y 2009, ordenados de acuerdo con el parámetro de calidad en cuestión. Los datos del año 2009 abarcan únicamente los seis primeros meses de dicho año.

## 5.1 MATERIA EN SUSPENSIÓN (MES)

La figura 5.1 muestra los valores de la MES obtenidos entre los años 2004 y 2009. La aplicación del test de Kolmogorov-Smirnov (ver Anejo 1 A.1) permite afirmar que la MES se ajusta a una distribución normal en todos los años y en todos los puntos de muestreo excepto en el punto CPA1 (efluente secundario) de los años 2006 y 2007. Ambas excepciones pueden observarse gráficamente debido a la mala aproximación de los datos experimentales a la recta de regresión, y en particular en el año 2007, con la lejanía de los valores más elevados de la MES. Es conveniente observar que el nivel de significación "p" en los datos del efluente secundario (CPA1) es muy cercano al límite de 0,05 de normalidad, excepto en los años 2008 y 2009 donde se experimenta una notable mejoría.

La figura 5.1 y la tabla 5.1 permiten observar como a lo largo de todos los años de estudio el proceso de regeneración de agua produce una disminución tanto del percentil 50 (media) como del percentil 90 de la MES. Los valores de la media del efluente secundario y del agua regenerada son muy parecidos, lo que indica que con un buen proceso secundario y un buen proceso de regeneración sin filtro se podría conseguir una calidad aceptable. En cambio, los valores del percentil 90 de ambos efluentes son más diferentes y es en este percentil donde la actuación del filtro es esencial, pues mejora la calidad del efluente. Una observación más detallada muestra la progresiva mejoría experimentada por el efluente secundario respecto a ambos percentiles a lo largo de los años, salvo el aumento de los valores producidos en el año 2008. Esta mejoría del efluente secundario es especialmente destacable en el año 2006 respecto al anterior. En cuanto al agua regenerada, los percentiles 50 y 90 aumentan o disminuyen ligeramente según el año, aunque sus valores no difieren excesivamente de unos a otros.

La disminución de la desviación típica (tabla 5.1) y de la pendiente de la recta de regresión (figura 5.1) cuando se aplica el proceso de regeneración indica una reducción de la variabilidad de la MES o un aumento de su fiabilidad. A excepción del año 2008, este hecho se observa en la totalidad de los años estudiados. A pesar de que en el año 2008 se produce una ligera disminución de la fiabilidad, la fiabilidad del efluente secundario ha mejorado progresivamente a lo largo de los años. Esta misma observación puede realizarse del agua regenerada. Una observación más minuciosa muestra como la

mejoría de la fiabilidad del efluente secundario es especialmente destacable en el año 2006, con respecto a los años anteriores.

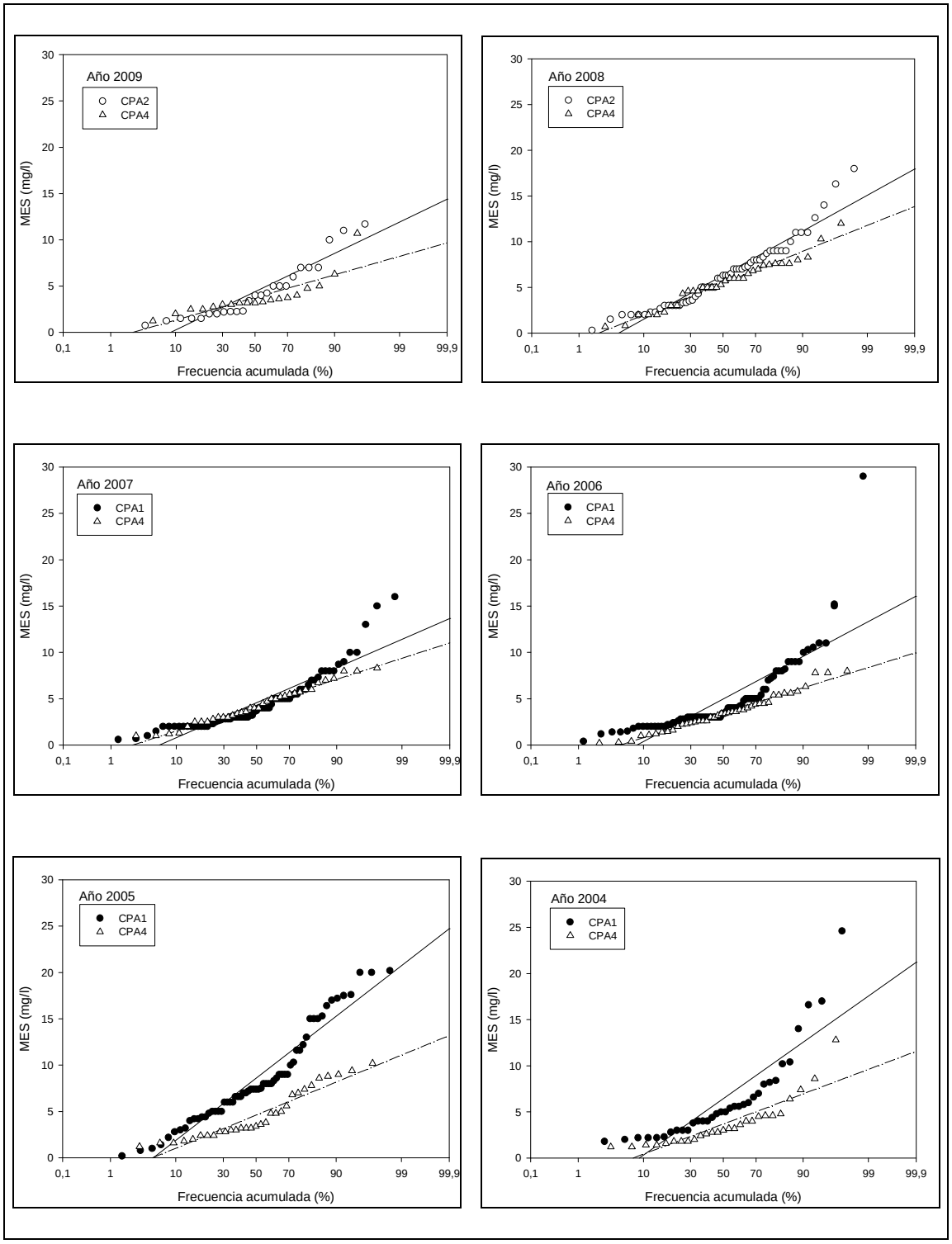



Figura 5.1. Distribución de probabilidad de la MES durante los años comprendidos entre 2004 y 2009 en la ERA de Castell-Platja d'Aro.

Tabla 5.1. Percentiles 50 y 90 y desviación típica de la distribución normal de la MES en la ERA de Castell-Platja d'Aro.

| Año | Punto de control | Percentil 50 (mg/L) | Percentil 90 (mg/L) | s = desviación típica (mg/L) |
|---|---|---|---|---|
| 2009 | CPA2 | 4,39 | 8,53 | 3,23 |
| 2009 | CPA4 | 3,76 | 6,21 | 1,91 |
| 2008 | CPA2 | 6,35 | 11,17 | 3,76 |
| 2008 | CPA4 | 5,46 | 8,95 | 2,72 |
| 2007 | CPA1 | 4,57 | 8,34 | 2,94 |
| 2007 | CPA4 | 4,31 | 7,09 | 2,17 |
| 2006 | CPA1 | 4,97 | 9,56 | 3,58 |
| 2006 | CPA4 | 3,48 | 6,18 | 2,1 |
| 2005 | CPA1 | 8,57 | 15,26 | 5,22 |
| 2005 | CPA4 | 4,6 | 8,17 | 2,78 |
| 2004 | CPA1 | 6,44 | 12,57 | 4,78 |
| 2004 | CPA4 | 3,69 | 6,96 | 2,55 |

En la actualidad, el agua regenerada de la ERA de Castell-Platja d'Aro se destina para riego de campos de golf (uso 4.1 del RD 1620/2007), riego de zonas verdes (uso 1.2) y riego agrícola (uso 2.1). A largo plazo, el objetivo más ambicioso del Consorci de la Costa Brava consiste en ampliar los usos disponibles hasta el uso 1.1 en que el agua regenerada se aplica a usos urbanos con riego de jardines privados. El uso 1.1 es el uso con la calidad más restrictiva de la normativa actual y su cumplimiento engloba al resto de usos. El RD fija para el uso 1.1 un límite máximo del percentil 90 de la MES igual a 10 mg/L y para los usos 1.2, 2.1 y 4.1 un límite máximo de 20 mg/L. La figura 5.1 y la tabla 5.1 permiten afirmar que los valores impuestos por la normativa se cumplen para todos los usos y los años estudiados (tabla 5.2).

De este modo, la MES del agua es apta para el uso 1.1 y por extensión al resto de usos autorizados. Nótese que la calidad del agua respecto a la MES es tan elevada que incluso el efluente secundario cumple en todos los años estudiados con el valor límite de 20 mg/L (usos 1.2, 2.1 y 4.1) e, incluso en tres años (2006, 2007 y 2009) con el valor más restrictivo de 10 mg/L (uso 1.1). Es decir, el agua cumple con las normas de calidad del uso 1.1 antes del proceso de regeneración. Este hecho indica que el proceso de depuración llevado a cabo en la EDAR de Castell-Platja d'Aro es enormemente eficiente en cuanto a la eliminación de la MES.

Tabla 5.2. Cumplimiento del RD 1620/2007 en términos de la MES en la ERA de Castell-Platja d'Aro.

| **Año** | 2009 | 2008 | 2007 | 2006 | 2005 | 2004 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **Cumple uso 1.1** | Sí | Sí | Sí | Sí | Sí | Sí |
| **Cumple uso 1.2** | Sí | Sí | Sí | Sí | Sí | Sí |
| **Cumple uso 2.1** | Sí | Sí | Sí | Sí | Sí | Sí |
| **Cumple uso 4.1** | Sí | Sí | Sí | Sí | Sí | Sí |

En resumen, el proceso de regeneración produce una reducción de la media y del percentil 90 de la MES, y un aumento de la fiabilidad del proceso. La calidad del agua regenerada, en cuanto a su contenido de MES, es elevada y consecuentemente cumple

con los valores límites establecidos por la normativa para el uso más restrictivo (uso 1.1).

## 5.2 TURBIEDAD

La figura 5.2 muestra los valores de turbiedad obtenidos entre los años 2004 y 2009.

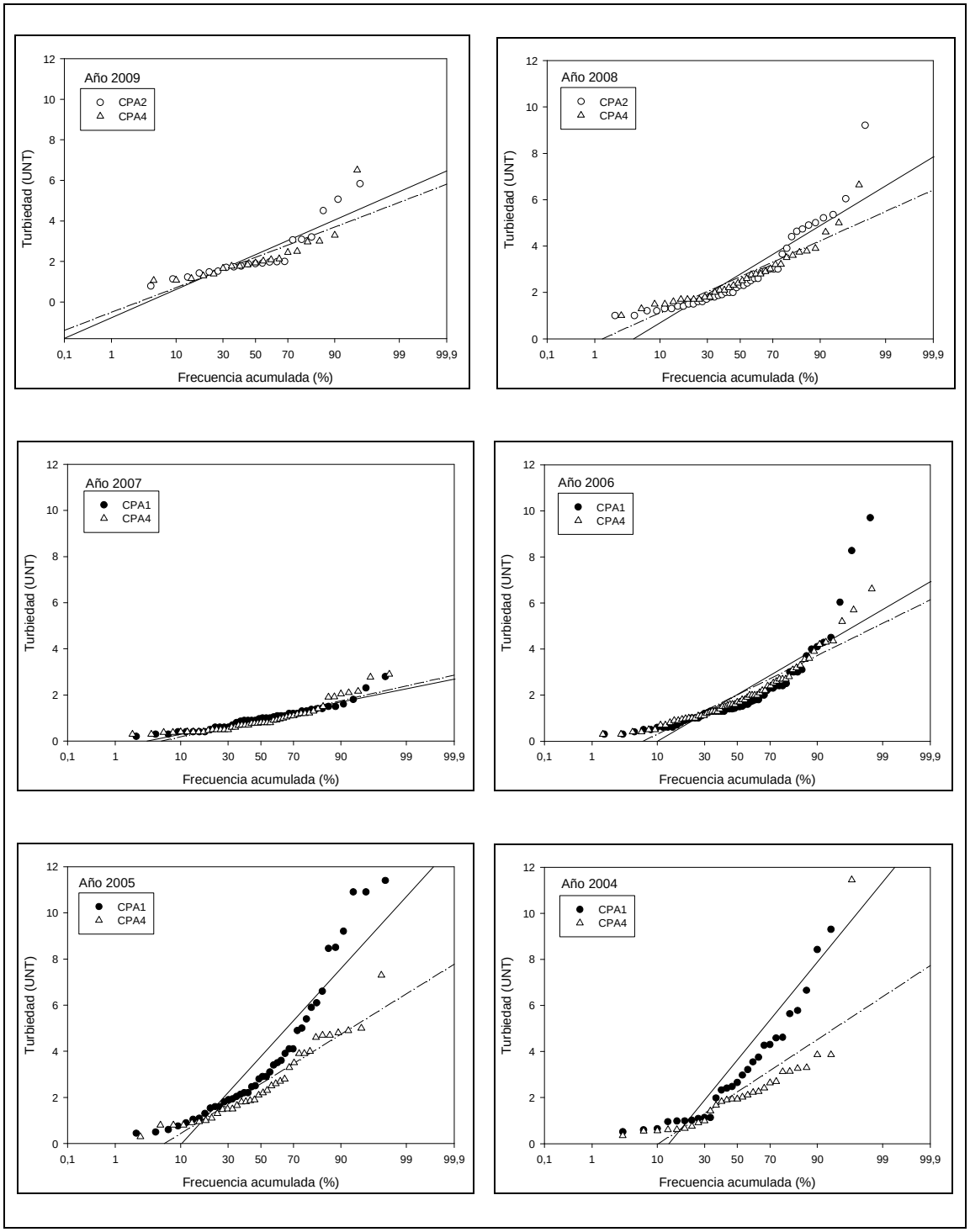



Figura 5.2. Distribución de probabilidad de la turbiedad en los años comprendidos entre 2004 y 2009 en la ERA de Castell-Platja d'Aro.

La aplicación del test de Kolmogorov-Smirnov (ver Anejo 1 A.2) permite afirmar que la turbiedad se ajusta a una distribución normal en todos los años estudiados excepto en los puntos CPA1 y CPA2 de los años 2006 y 2009 respectivamente. La representación gráfica muestra que ambas excepciones son debidas al difícil ajuste de la recta de regresión a los datos experimentales, principalmente de los valores más elevados de turbiedad.

La figura 5.2 y la tabla 5.3 muestran una disminución de la media y del percentil 90 tras el proceso de regeneración. En términos de los percentiles 50 y 90, el efluente secundario aumenta o disminuye ligeramente según el año, a excepción del año 2007 donde se registran unos resultados espectaculares. La misma observación puede realizarse del agua regenerada pues, a excepción del año 2007, los percentiles 50 y 90 se sitúan en todos los años en un mismo rango de valores. La obtención de valores tan bajos durante el año 2007 fue consecuencia de la utilización de un nuevo turbidímetro que a posteriori se constató que no estaba bien calibrado. Por este motivo estos valores no pueden ser comparados con los del resto de años. Esta experiencia revela la conveniencia de asegurar siempre una buena calibración de los equipos y sobre todo en aquellos periodos en los que se incorpora un nuevo equipo, pues un pequeño error puede tener graves consecuencias. También puede observarse como la disminución de la media y del percentil 90 es muy superior en los años 2004 y 2005 que en los siguientes, principalmente debido a que la turbiedad del agua efluente del secundario es mucho mayor que en los años posteriores. Es decir, cuando el agua de entrada es deficiente el efecto del proceso de regeneración es mucho mayor que en el resto de casos. Un hecho destacable es la disminución registrada en los años 2005 y 2006 por los valores más elevados de la turbiedad durante el proceso de regeneración, pues son estos valores los que se deben mejorar. La presencia del filtro permite rebajar ligeramente la turbiedad, pues la disminución del percentil 90 es escasa. En resumen, el proceso de regeneración aporta una ligera mejora de la turbiedad.

Tabla 5.3. Percentiles 50 y 90 y desviación típica de la distribución normal de la turbiedad en la ERA de Castell-Platja d'Aro.

| Año | Punto de control | Percentil 50 (UNT) | Percentil 90 (UNT) | s = desviación típica (UNT) |
|---|---|---|---|---|
| 2009 | CPA2 | 2,34 | 4,05 | 1,33 |
| 2009 | CPA4 | 2,20 | 3,7 | 1,16 |
| 2008 | CPA2 | 2,79 | 4,89 | 1,64 |
| 2008 | CPA4 | 2,67 | 4,22 | 1,21 |
| 2007 | CPA1 | 0,99 | 1,7 | 0,55 |
| 2007 | CPA4 | 0,97 | 1,76 | 0,62 |
| 2006 | CPA1 | 2,03 | 4,06 | 1,58 |
| 2006 | CPA4 | 2,02 | 3,72 | 1,33 |
| 2005 | CPA1 | 3,77 | 7,59 | 2,98 |
| 2005 | CPA4 | 2,59 | 4,74 | 1,68 |
| 2004 | CPA1 | 3,63 | 7,89 | 3,32 |
| 2004 | CPA4 | 2,24 | 4,52 | 1,78 |

El proceso de regeneración produce una disminución de la desviación típica y de la posición de la recta de regresión de la turbiedad en todos los años estudiados excepto en

el año 2007. Dejando de lado los datos del año 2007, se puede concluir que el proceso de regeneración mejora la fiabilidad del proceso.

El RD 1620/2007 fija, para los usos 1.2, 2.1 y 4.1, un mismo límite del percentil 90 de turbiedad de 10 UNT y para el uso 1.1 un valor de 2 UNT. La tabla 5.3 muestra que el proceso de regeneración cumple claramente con el valor fijado para los usos actuales. Además, estos valores máximos admisibles se cumplen también en el efluente secundario. Esto indica que, al igual que ocurría con la MES, el proceso de depuración del agua residual llevado a cabo en la EDAR de Castell-Platja d'Aro presenta una gran eficacia en cuanto a disminución de este parámetro físico-químico. Por el contrario, el uso 1.1 sólo se cumple en el año 2007, debido a la falta de calibración del turbidímetro. Por ello, aunque el proceso de regeneración produce una disminución de la turbiedad, esta disminución no es suficiente como para los límites aplicables al uso 1.1. Para cumplir con este uso y reducir los valores de turbiedad, se recomienda dotar al proceso de regeneración de un proceso de coagulación-floculación previo al filtro y/o un decantador lamelar.

La tabla 5.4 muestra el cumplimiento de los valores límite establecidos por la normativa entre los años 2004 y 2009. Se observa que el parámetro limitante es la turbiedad, pues la MES cumple con los límites fijados durante todos los años. Consecuentemente, la prioridad en el proceso de regeneración deberá ser el asegurar la fiabilidad de la eliminación de la turbiedad.

Tabla 5.4. Cumplimiento del RD 1620/2007 en términos de la turbiedad y la MES en la ERA de Castell-Platja d'Aro.

| Año | Cumple MES | | Cumple turbiedad | | Cumple MES y turbiedad | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Uso 1.1 | Usos 1.2, 2.1 y 4.1 | Uso 1.1 | Usos 1.2, 2.1 y 4.1 | Uso 1.1 | Usos 1.2, 2.1 y 4.1 |
| 2009 | Sí | Sí | No | Sí | No | Sí |
| 2008 | Sí | Sí | No | Sí | No | Sí |
| 2007 | Sí | Sí | Sí | Sí | Sí | Sí |
| 2006 | Sí | Sí | No | Sí | No | Sí |
| 2005 | Sí | Sí | No | Sí | No | Sí |
| 2004 | Sí | Sí | No | Sí | No | Sí |

En conclusión, el proceso de regeneración reduce la media y el percentil 90 de la turbiedad afluente y produce un aumento de la fiabilidad del proceso. No obstante, esta reducción del percentil 90 no es suficiente como para cumplir los límites correspondientes al uso 1.1, por lo que se recomienda incorporar un proceso de coagulación-floculación que reduzca los niveles de turbiedad. No obstante, el agua regenerada cumple claramente con los valores límite fijados para los usos actuales.

## 5.3 TRANSMITANCIA 254 NM

La figura 5.3 muestra los valores de la transmitancia a 254 nm obtenidos entre los años 2004 y 2009. La figura 5.3 muestra que el ajuste de los datos experimentales a una línea recta es muy adecuado, lo que permite concluir que las muestras pueden considerarse

como pertenecientes a una distribución normal. La aplicación del test estadístico de Kolmogorov-Smirnov permite afirmar que la transmitancia a 254 nm se ajusta a una distribución normal (ver Anejo 1 A.3).

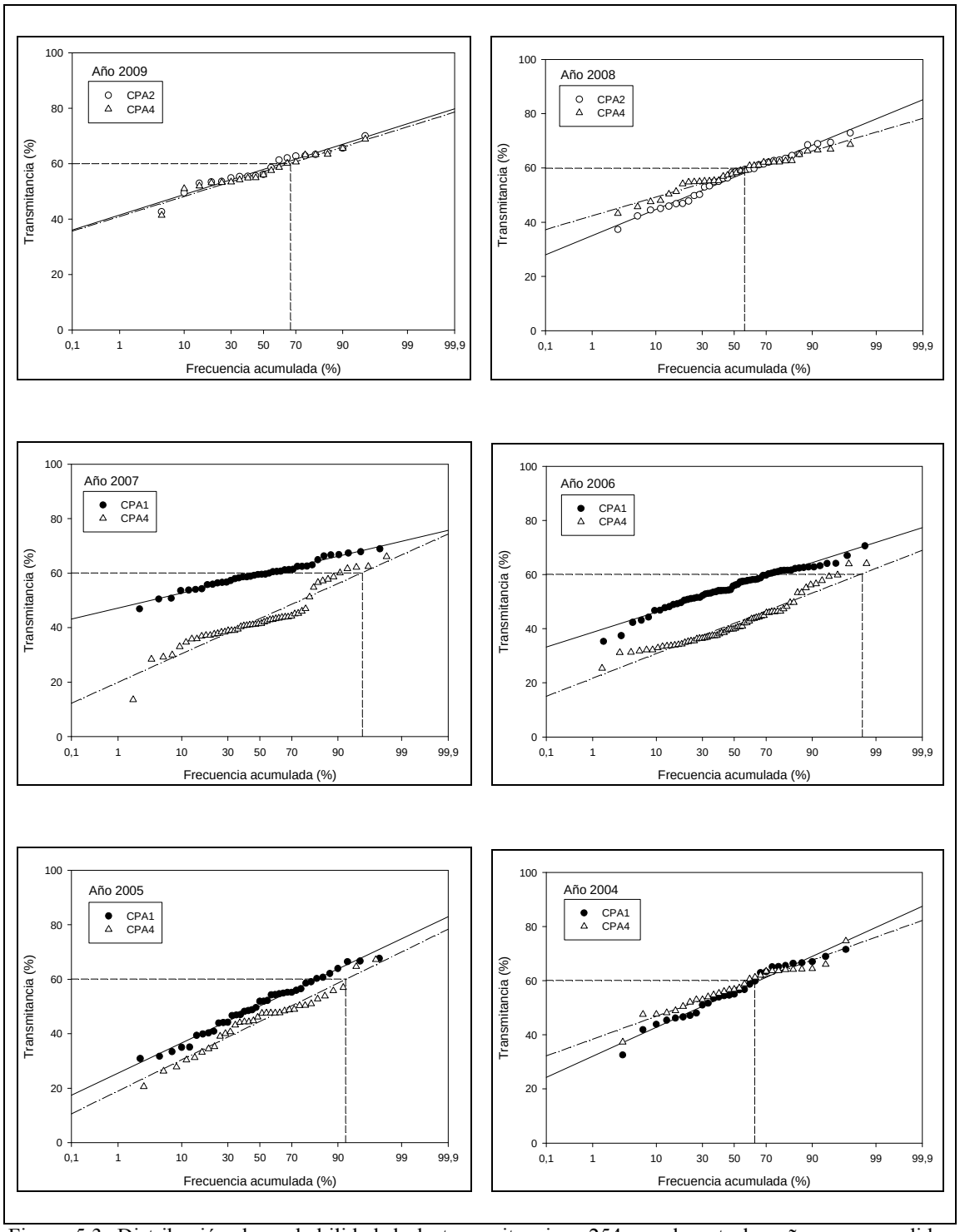



Figura 5.3. Distribución de probabilidad de la transmitancia a 254 nm durante los años comprendidos entre 2004 y 2009 en la ERA de Castell-Platja d'Aro.

La figura 5.3 y la tabla 5.5 muestran que el proceso de regeneración durante los años 2005, 2006, 2007 y 2009 produce una disminución de los percentiles 50 y 90 del agua

afluente. Este hecho no es lo realmente esperado, puesto que cabría esperar un aumento de la transmitancia a 254 nm con el proceso de regeneración. En cambio, en los años 2004 y 2008 se produce una disminución del percentil 50 y un aumento del percentil 90. Respecto a la fiabilidad del proceso, los años 2005, 2006 y 2007 registran una disminución de ésta, y los años 2004, 2008 y 2009 un aumento.

Tabla 5.5. Percentiles 50 y 90 y desviación típica de la distribución normal de la transmitancia a 254 nm en la ERA de Castell-Platja d'Aro.

| Año | Punto de control | Percentil 50 (%) | Percentil 90 (%) | s = desviación típica (%) |
|---|---|---|---|---|
| 2009 | CPA2 | 57,87 | 66,95 | 7,08 |
| 2009 | CPA4 | 57,10 | 65,68 | 6,96 |
| 2008 | CPA2 | 56,57 | 68,44 | 9,26 |
| 2008 | CPA4 | 57,77 | 66,27 | 6,63 |
| 2007 | CPA1 | 59,45 | 66,2 | 5,26 |
| 2007 | CPA4 | 43,35 | 56,24 | 10,05 |
| 2006 | CPA1 | 55,3 | 64,44 | 7,13 |
| 2006 | CPA4 | 42,01 | 53,2 | 8,73 |
| 2005 | CPA1 | 50,18 | 63,77 | 10,6 |
| 2005 | CPA4 | 44,52 | 58,58 | 10,97 |
| 2004 | CPA1 | 55,83 | 68,93 | 10,22 |
| 2004 | CPA4 | 57,23 | 67,61 | 8,1 |

Las observaciones realizadas anteriormente deben tener en consideración dos aspectos muy importantes. El primero de ellos, referente al análisis de la transmitancia a 254 nm en los años 2005, 2006 y 2007, es que este parámetro se determinaba en la misma muestra de agua que la de los ensayos microbiológicos. La muestra de agua para análisis microbiológico recibe tiosulfato para destruir el cloro que puede contener la muestra, evitando así que el desinfectante siga actuando sobre los microorganismos que pueda haber en la muestra durante el tiempo transcurrido desde el muestreo hasta el análisis. Por lo tanto, el aumento de la transmitancia registrada durante el proceso de regeneración se debe a la interferencia producida por el tiosulfato. Este protocolo analítico se normalizó a principios del año 2008 y a partir de esta fecha la determinación de la transmitancia se realiza en una muestra independiente. El segundo aspecto a considerar es que en ese mismo año 2008 la transmitancia del afluente pasa a medirse después del filtro y no como se venía realizando hasta entonces (antes del filtro). Este hecho se debe a que una toma circunstancial de muestras después del filtro pasó a convertirse en un procedimiento habitual. En la actualidad, el punto de muestreo vuelve a ser el punto anterior al filtro. Por lo tanto, al ser la filtración el único proceso disponible en la ERA con capacidad para disminuir la transmitancia a 254 nm, es de suponer que en los años 2008 y 2009 la transmitancia medida al final del proceso de regeneración fuera menor que la medida después del filtro, debido a la formación de precipitados durante el proceso de cloración del agua. En este sentido, Gómez (2008) recomendó controlar la naturaleza y la composición del hipoclorito sódico que se añade al agua, debido a la significativa disminución de transmitancia que experimentaba el agua durante el proceso de cloración. Se recomienda que la toma de muestras de la transmitancia se efectúe no sólo en los dos puntos actuales (CPA1 y CPA4), sino

también en el punto posterior al filtro, pues es este valor de la transmitancia el que afectará a la eficiencia del sistema de luz UV.

Por lo tanto, los resultados experimentales del año 2004 son los únicos que no están influenciados por ninguno de los dos aspectos anteriores. Su comportamiento (figura 5.3) es aceptable en cuanto a que la transmitancia se reduce en algunas muestras y en otras aumenta, debido principalmente a la generación de subproductos durante el proceso de cloración o incluso a la medición de la muestra con tiosulfato durante los últimos meses del año.

Las directrices internacionales para que un proceso de desinfección con luz UV sea eficiente recomiendan que la transmitancia sea superior al 60%. La línea discontinua de la figura 5.3 indica el valor del 60% de transmitancia y la obtención de su correspondiente percentil. La tabla 5.6 muestra el percentil de muestras con una transmitancia inferior o igual al 60%. En ella puede observarse como la incorrecta medición de la transmitancia durante los años 2005, 2006 y 2007 hace que los resultados obtenidos en cuanto a este porcentaje sea muy elevado (superior al 90%), y por lo tanto no recomendable para desinfectar con luz ultravioleta. Los años 2008 y 2009 registran una mejora de la transmitancia hasta valores semejantes a los del año 2004.

Tabla 5.6. Percentil de muestras con una transmitancia a 254 nm inferior o igual al 60% en la ERA de Castell-Platja d'Aro.

| **Año** | 2009 | 2008 | 2007 | 2006 | 2005 | 2004 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **Percentil con transmitancia menor o igual al 60%** | 68 | 55 | 93 | 97 | 91 | 64 |

Los resultados anteriores ponen de manifiesto la enorme importancia que tiene el conocer el criterio y el procedimiento de análisis de un parámetro y aplicarlo conforme dicta la normativa. Otro aspecto importante es conocer los puntos óptimos de control del parámetro en cuestión.

## 5.4 POTENCIAL REDOX

La figura 5.4 muestra los valores de potencial redox obtenidos en los años 2008 y 2009 en la ERA de Castell-Platja d'Aro. La figura 5.4 muestra que el ajuste de los datos experimentales a una recta es altamente satisfactorio, por lo que el potencial redox se ajusta a una distribución normal. La aplicación del test estadístico de Kolmogorov-Smirnov (ver Anejo 1 A.4) confirma la hipótesis de normalidad.

La figura 5.4 y la tabla 5.7 muestran el aumento del potencial redox que se registra tras el proceso de regeneración. También se registra un aumento de la desviación típica y de la pendiente de la recta de regresión, es decir, aumenta la variabilidad. El aumento del potencial redox se debe a la aportación de una disolución básica de hipoclorito sódico durante la desinfección del agua regenerada.

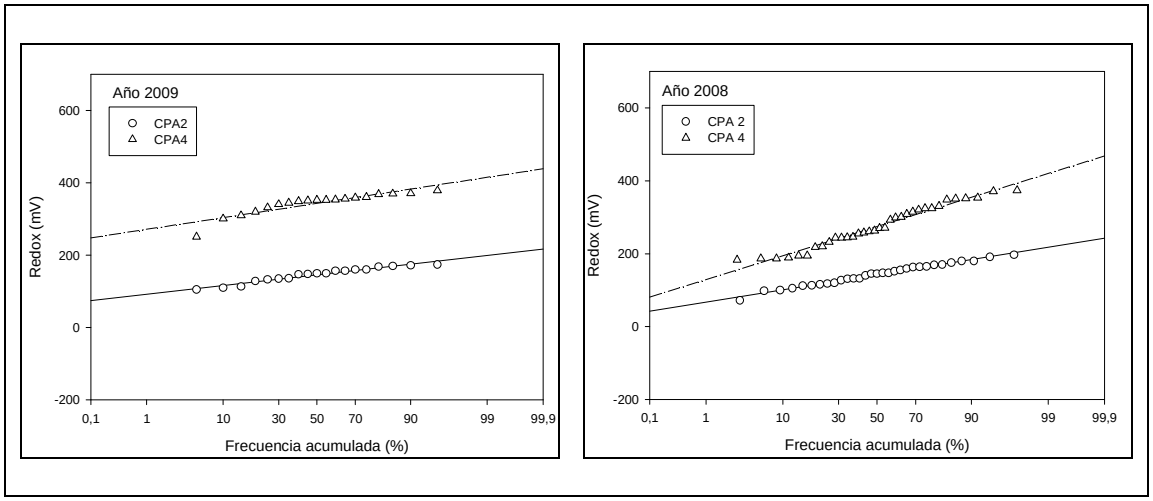



Figura 5.4. Distribución de probabilidad del potencial redox durante los años 2008 y 2009 en la ERA de Castell-Platja d'Aro.

Tabla 5.7. Percentiles 50 y 90 y desviación típica de la distribución normal del potencial redox en la ERA de Castell-Platja d'Aro.

| Año | Punto de control | Percentil 50 (mV) | Percentil 90 (mV) | s = desviación típica (mV) |
|---|---|---|---|---|
| 2009 | CPA2 | 146 | 176 | 23 |
| 2009 | CPA4 | 343 | 383 | 31 |
| 2008 | CPA2 | 143 | 184 | 32 |
| 2008 | CPA4 | 274 | 355 | 63 |

La medida del potencial redox se utiliza como un sistema de control del proceso de cloración llevado a cabo en el proceso de regeneración. La sonda redox situada al inicio del laberinto de desinfección tiene una consigna asignada aproximada de 350 mV. Este valor se ha obtenido experimentalmente tras añadir diferentes dosificaciones de cloro al agua afluente hasta obtener un valor que garantiza la ausencia de *E. coli* en el agua efluente del laberinto de desinfección. El inicio del laberinto dispone también de una bomba dosificadora de cloro que, en función del potencial redox del agua, añade cloro hasta aumentar el potencial redox hasta 350 mV. La sonda redox está situada inmediatamente aguas abajo de la bomba dosificadora de cloro, existiendo un mecanismo automático de relación entre ambos (mecanismo feedback).

El potencial redox del efluente secundario (CPA2) puede variar desde 100-150 mV en invierno hasta 0-100 mV en verano. En cuanto a los valores del agua regenerada, la mayor variación de los datos en el año 2008 se debe a que la medida se realizó indistintamente en el inicio del laberinto (aproximadamente 350 mV) y en su extremo final, donde el valor de potencial redox disminuye notablemente (200-250 mV). Este hecho ocurre incluso en algunas muestras del año 2009. En la actualidad, el punto de medida se ha establecido permanentemente en la entrada del laberinto de desinfección. Este hecho explica (figura 5.4 y tabla 5.7) la gran mejoría experimentada en la fiabilidad de los datos del agua regenerada durante los seis primeros meses del año 2009 con respecto al año anterior.

El proceso de cloración con sonda redox permite aplicar la dosificación óptima de cloro necesaria para desinfectar el agua. El ahorro producido en la cantidad de cloro utilizado cuando se disponía de esta sonda ha permitido que la inversión realizada para adquirir la sonda redox se recupere en un periodo de tiempo inferior al año. Otras ventajas de la sonda redox respecto a las sonda de cloro es el escaso mantenimiento necesario y el bajo coste de este mantenimiento, que se limita al cambio de un electrodo cada 5 meses aproximadamente.

## 5.5 ESCHERICHI COLI (*E. COLI*) Y COLIFORMES FECALES (CF)

La figura 5.5 muestra los valores de *E. coli* y CF obtenidos entre los años 2004 y 2009. La entrada en vigor del RD 1620/2007 en el año 2007 supuso un cambio en el indicador de medida. El estudio realizado considera ambos parámetros como equivalentes.

El alto grado de ajuste de los datos experimentales a una línea recta (figura 5.5) indica el comportamiento normal del parámetro en cuestión. Estadísticamente, el test de Kolmogorov-Smirnov confirma la hipótesis de normalidad (Ver Anejo 1 A.5). Conviene subrayar que la aplicación del test de K-S y la posterior determinación de la recta de regresión se ha realizado con aquellos datos que son distintos de cero. No obstante, los valores nulos (ausencia de crecimiento) tienen una enorme importancia, pues indican ausencia de *E. coli* o de CF.

La figura 5.5 y la tabla 5.8 muestran la disminución de los valores de *E. coli* y CF durante el proceso de regeneración. En primer lugar, el proceso de desinfección con luz UV produce una disminución de aproximadamente 2 órdenes de magnitud del percentil 50 en todos los años de estudio, excepto en los 6 primeros meses del año 2009 donde sólo se produce una ligera disminución de este percentil debido posiblemente al agotamiento de las lámparas de luz UV. El cambio de estas lámparas se efectuó a finales del mes de junio. La disminución del percentil 90 varía entre 1 y 2 órdenes de magnitud en función del año estudiado, a excepción del año 2009 por el mismo motivo anterior. En segundo lugar, el proceso de desinfección con cloro subsiguiente produce una disminución de los percentiles 50 y 90 mucho mayor que la producida por la luz UV. La cloración provoca también un gran porcentaje de muestras con ausencia de *E. coli* y de CF. No obstante, la aplicación de la luz UV es de enorme importancia para la desinfección debido a su gran eficiencia en la inactivación de virus, que el cloro es menos eficiente para eliminar, y de protozoos como el Cryptosporidium.

En cuanto a la fiabilidad, el proceso de desinfección con luz UV produce un aumento de la pendiente de la recta de regresión y de la desviación estándar y, por lo tanto, disminuye la fiabilidad. Convendría ajustar la dosificación de luz UV a la concentración de materia orgánica afluente. De la misma forma, la posterior desinfección con cloro aumenta la fiabilidad (se recupera fiabilidad) del proceso.

La incorporación de la sonda redox, a mediados del año 2007, como forma de controlar la desinfección con cloro ha permitido conseguir una mayor fiabilidad (CPA4) en los años 2007, 2008 y 2009 (mayor horizontalidad de la recta de regresión) respecto a los anteriores. La sonda redox también ha permitido aumentar el porcentaje de muestras con ausencia de *E. coli* en los años 2008 y 2009 (Tabla 5.9). El deterioro de estos niveles de eficacia durante el año 2009 respecto a los años anteriores se debe a la

finalización de la vida útil de las lámparas de luz UV. Sería aconsejable aumentar este porcentaje hasta alcanzar el 100% de muestras con ausencia de *E. coli*.

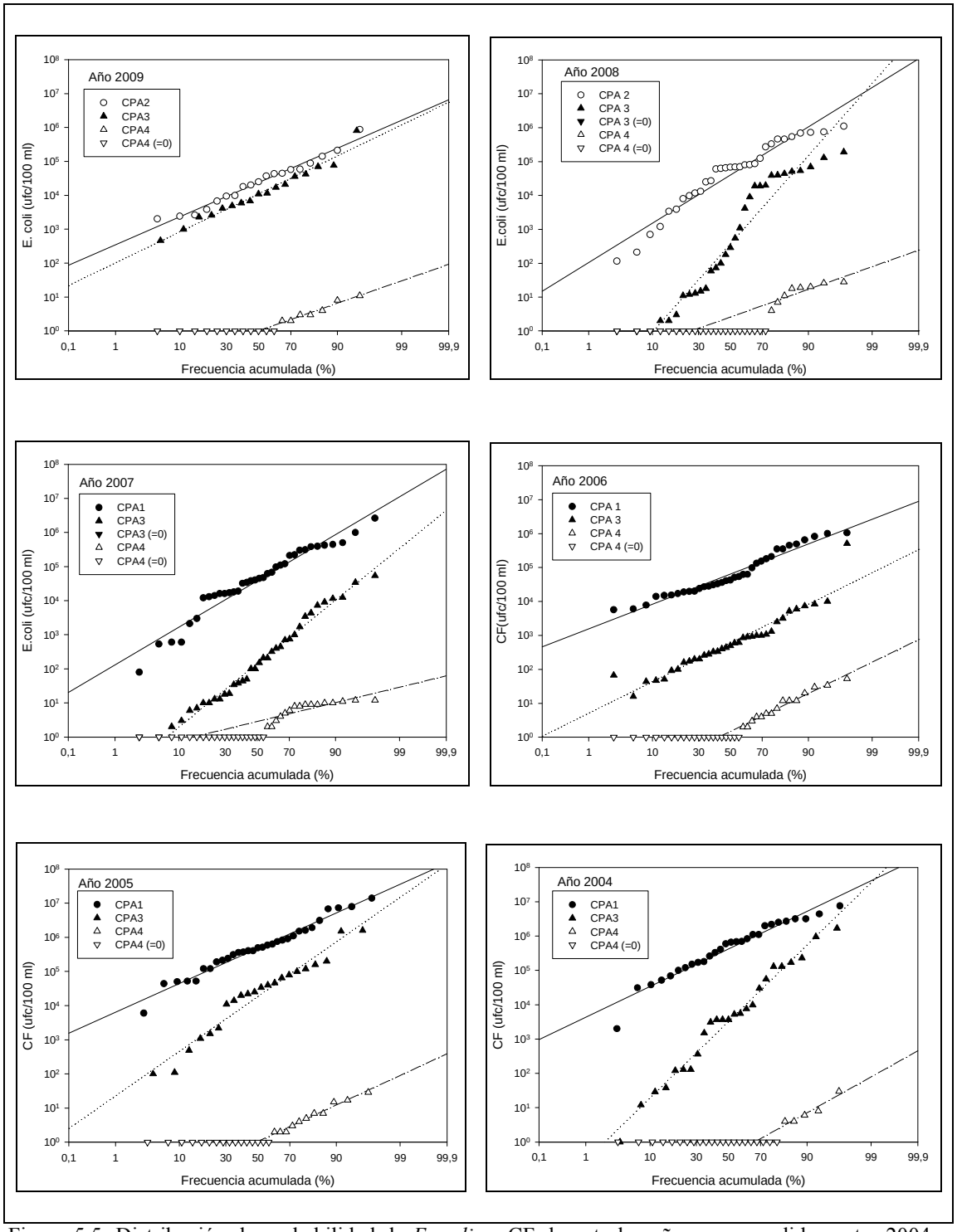



Figura 5.5. Distribución de probabilidad de *E. coli* y CF durante los años comprendidos entre 2004 y 2009 en la ERA de Castell-Platja d'Aro.

Tabla 5.8. Percentiles 50 y 90 y desviación típica de la distribución normal de *E. coli* y CF en la ERA de Castell-Platja d'Aro.

| Año | Punto de control | Percentil 50 (ulog/100mL) | Percentil 90 (ulog/100mL) | s = desv. típica (ulog/100mL) |
|---|---|---|---|---|
| 2009 | CPA2 | 4,37 | 5,39 | 0,79 |
| 2009 | CPA3 | 4,05 | 5,16 | 0,87 |
| 2009 | CPA4 | ND | 0,81 | 0,63 |
| 2008 | CPA2 | 4,60 | 6,02 | 1,11 |
| 2008 | CPA3 | 2,58 | 5,18 | 2,03 |
| 2008 | CPA4 | 0,41 | 1,23 | 0,64 |
| 2007 | CPA1 | 4,58 | 5,94 | 1,06 |
| 2007 | CPA3 | 2,16 | 4,02 | 1,45 |
| 2007 | CPA4 | 0,45 | 1,00 | 0,43 |
| 2006 | CPA1 | 4,81 | 5,69 | 0,69 |
| 2006 | CPA3 | 2,78 | 3,93 | 0,9 |
| 2006 | CPA4 | 0,17 | 1,30 | 0,88 |
| 2005 | CPA1 | 5,68 | 6,71 | 0,8 |
| 2005 | CPA3 | 4,27 | 5,87 | 1,25 |
| 2005 | CPA4 | 0,02 | 1,08 | 0,83 |
| 2004 | CPA1 | 5,63 | 6,73 | 0,86 |
| 2004 | CPA3 | 3,52 | 5,75 | 1,74 |
| 2004 | CPA4 | ND | 0,85 | 0,99 |

ND: no detectable

Tabla 5.9. Porcentaje de muestras con ausencia de *E. coli* y CF en la ERA de Castell-Platja d'Aro.

| Año | 2009 | 2008 | 2007 | 2006 | 2005 | 2004 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| % de muestras con ausencia de *E. coli* y CF | 64 | 75 | 56 | 57 | 59 | 81 |

El RD 1620/2007 fija un valor límite máximo del percentil 90 para los usos actuales 1.2 y 4.1 de 200 ufc/100 ml, y para el uso 2.1 de 100 ufc/100mL. La tabla 5.8 muestra que estos límites se cumplen con claridad. En cuanto al posible uso futuro 1.1, el valor máximo admisible para el percentil 90 es 0 ufc/100 mL. Este valor límite no se cumple en ninguno de los años estudiados (Tabla 5.10).

Tabla 5.10. Cumplimiento del Real Decreto 1620/2007 en términos de *E. coli* en la ERA de Castell-Platja d'Aro.

| Año | 2009 | 2008 | 2007 | 2006 | 2005 | 2004 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Cumple Uso 1.1 | No | No | No | No | No | No |
| Cumple Uso 1.2 | Sí | Sí | Sí | Sí | Sí | Sí |
| Cumple Uso 2.1 | Sí | Sí | Sí | Sí | Sí | Sí |
| Cumple Uso 4.1 | Sí | Sí | Sí | Sí | Sí | Sí |

Finalmente, la consecución del uso 1.1 (ausencia de *E. coli* en el 90% de las muestras) en esta ERA se considera un objetivo factible. Para ello se recomienda: 1) mejorar la transmitancia del agua, 2) aumentar la intensidad de luz UV aplicada, y 3) aumentar la dosis de cloro.

## 5.6 CLOSTRIDIUM SULFITO-REDUCTORES (CSR)

La figura 5.6 muestra los valores de CSR obtenidos entre los años 2005 y 2009. El buen ajuste de los datos muestreados a una línea recta (figura 5.6) indica el comportamiento normal del parámetro CSR. La posterior aplicación del test estadístico de Kolmogorov-Smirnov (ver Anejo 1 A.6) confirma la hipótesis de normalidad.

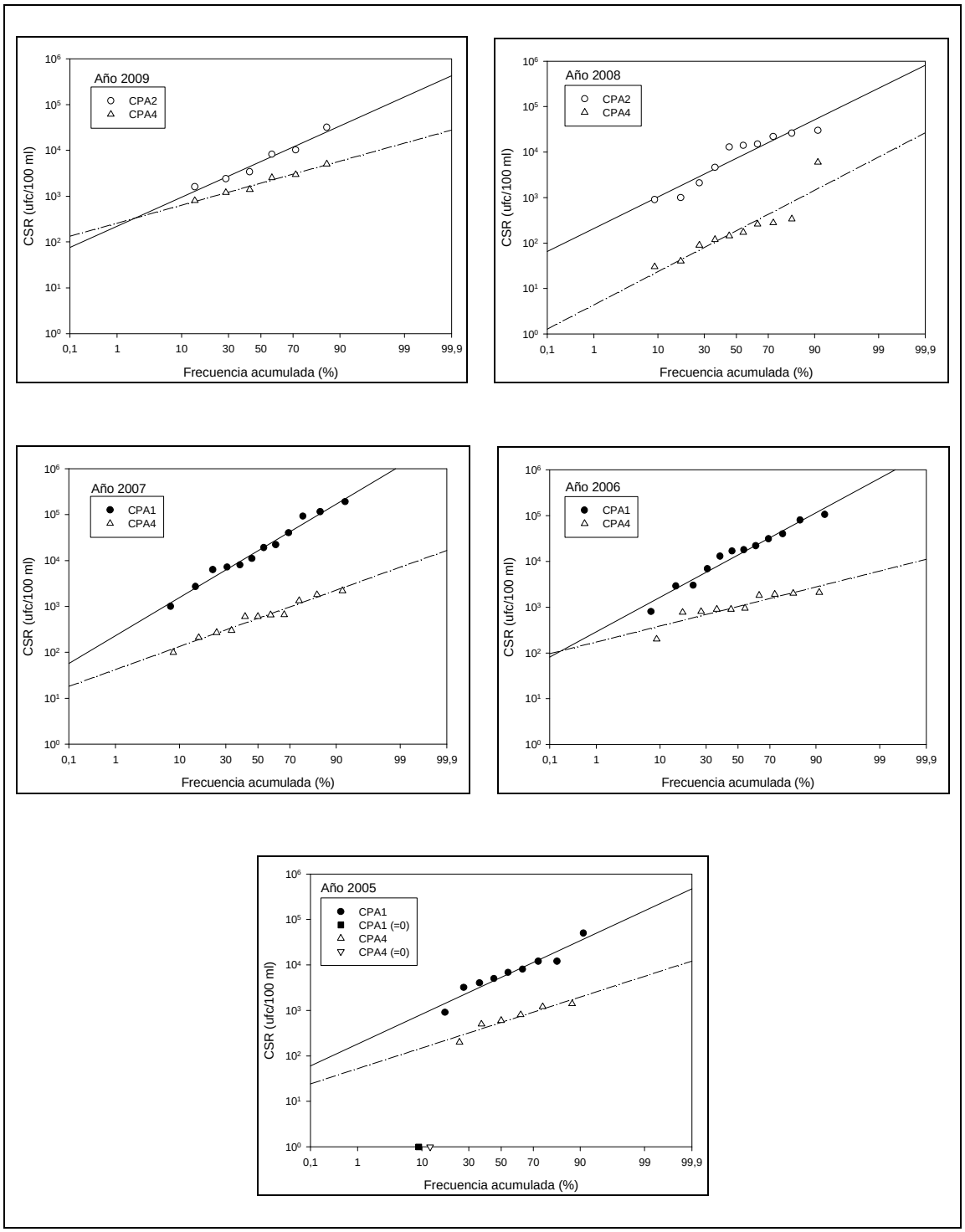



Figura 5.6. Distribución de probabilidad de CSR durante los años comprendidos entre 2005 y 2009 en la ERA de Castell-Platja d'Aro.

La figura 5.6 y la tabla 5.11 muestran que el proceso de regeneración produce una disminución del percentil 50 y 90 de CSR. Si se compara en términos de la media, se observa una disminución de aproximadamente una unidad logarítmica (un factor 10) en los años 2005 y 2006, una reducción de 2 unidades logarítmicas (un factor 100) en el año 2007 y una reducción continua en todos los datos de aproximadamente 2 unidades logarítmicas (un factor 100) en 2008. Esta excelente progresión en la calidad del agua se ve truncada durante el año 2009 debido a la finalización de la vida útil de las lámparas de luz UV. La observación del percentil 90 indica que, según el año, se alcanza una disminución de CSR que oscila entre 1 y 2 órdenes de magnitud (excepto en los 6 primeros meses del año 2009).

El proceso de regeneración produce una disminución de la pendiente de la recta de regresión y de la desviación típica en todos los años estudiados, excepto en el año 2008. En este año la pendiente se mantiene prácticamente constante. Todo ello permite concluir que el proceso de regeneración aumenta la fiabilidad, o cuando menos, la mantiene.

Tabla 5.11. Percentiles 50 y 90 y desviación típica de la distribución normal de CSR en la ERA de Castell-Platja d'Aro.

| Año | Punto de control | Percentil 50 (ulog/100mL) | Percentil 90 (ulog/100mL) | s = desv. típica (ulog/100mL) |
|---|---|---|---|---|
| 2009 | CPA2 | 3,75 | 4,53 | 0,61 |
| 2009 | CPA4 | 3,28 | 3,77 | 0,38 |
| 2008 | CPA2 | 3,86 | 4,71 | 0,66 |
| 2008 | CPA4 | 2,27 | 3,17 | 0,7 |
| 2007 | CPA1 | 4,21 | 5,24 | 0,8 |
| 2007 | CPA4 | 2,74 | 3,36 | 0,48 |
| 2006 | CPA1 | 4,14 | 5,06 | 0,72 |
| 2006 | CPA4 | 3,01 | 3,43 | 0,33 |
| 2005 | CPA1 | 3,72 | 4,53 | 0,63 |
| 2005 | CPA4 | 2,73 | 3,29 | 0,44 |

El parámetro CSR se utiliza como un indicador vírico y también como indicador del rendimiento de la desinfección con luz UV. Este parámetro es mucho más efectivo para observar el rendimiento de luz UV que el contenido de *E. coli*. Sabiendo que las lámparas de luz UV se cambiaron en el mes de mayo de 2005, el 15 de mayo de 2007 y el 16 de junio de 2009 se ha realizado un estudio de las parejas de valores de CSR registradas entre los años 2005 y 2009. Dicha representación aparece en la figura 5.7, donde el eje de abcisas indica el mes de medida de CSR, empezando por el mes de enero del año 2005 y finalizando en el mes de junio de 2009 (mes 54). Conviene indicar que el muestreo de CSR se realiza por lo general mensualmente. Las líneas discontinuas indica el cambio de lámparas de luz UV.

La figura 5.7 muestra que, en los 2-3 meses anteriores al cambio de lámparas de luz UV durante los años 2005 y 2007, la tendencia del proceso de desinfección es inactivar aproximadamente una unidad logarítmica de CSR. El cambio de lámparas hace que los valores afluentes (CPA1) elevados se inactiven en 2 o incluso más órdenes de magnitud; las concentraciones afluentes que no son tan elevadas disminuyen aproximadamente una

unidad logarítmica. Por lo tanto, para valores de entrada de CSR elevados, un equipo de luz UV con lámparas nuevas es más eficiente y permite inactivar un mayor número de CSR que otro con lámparas al final de su vida útil. En cambio, para valores de entrada de CSR no tan elevados, donde el grado de inactivación es menor, la disminución de CSR se puede realizar eficientemente con ambos equipos. No obstante, sería de gran interés disponer de un mayor número de muestras para justificar una conclusión mucho más estricta y precisa.

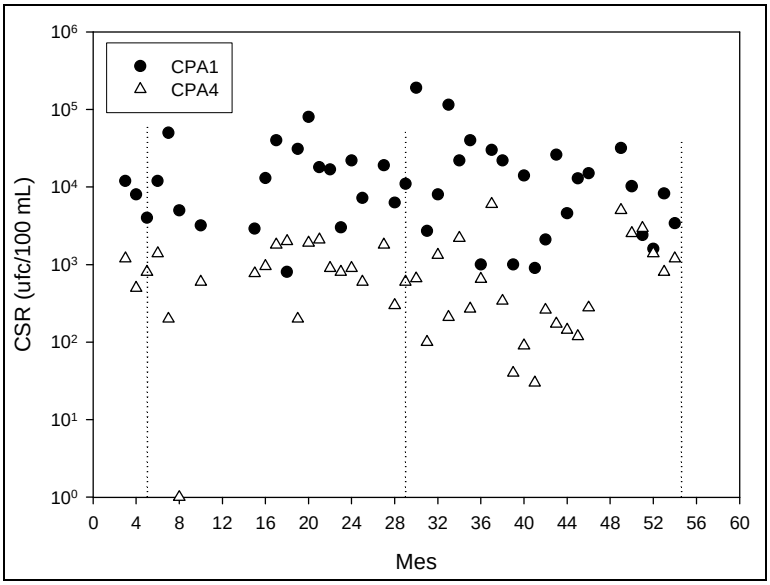



Figura 5.7. Representación de las parejas de valores de CSR en la ERA de Castell-Platja d'Aro.

Las lámparas de esta ERA se cambian aproximadamente cada dos años. No obstante, los datos del año 2009 muestran una inactivación de CSR muy baja e inferior a una unidad logarítmica. Es decir, es un hecho inequívoco que las lámparas de luz UV se han agotado antes de los dos años previstos y por lo tanto, la inactivación de CSR se ve claramente disminuida. La experiencia indica que la desinfección con cloro permite reducir hasta una unidad logarítmica de CSR y el uso combinado de luz UV en buen estado y de cloro reduce del orden de dos o más órdenes de magnitud. Se recomienda un mayor control del estado de las lámparas de luz UV, a fin de detectar el final de su vida útil y reemplazarlas en el momento adecuado.

Este análisis indica que la escasa reducción de CSR (figura 5.6) registrada durante los 6 primeros meses del año 2009 se debe muy posiblemente al agotamiento de las lámparas de luz UV.

## 5.7 RELACIÓN ENTRE TURBIEDAD Y MATERIA EN SUSPENSIÓN

La figura 5.8 muestra el análisis gráfico comparativo de las parejas de resultados experimentales de turbiedad y MES entre los años 2004 y 2009.

La figura 5.8 muestra una gran dispersión de los datos, de tal forma, que un mismo valor de MES puede corresponderse con diferentes valores de turbiedad en cualquier

punto de control (CPA1, CPA2 y CPA4). De la misma forma, un mismo valor de la turbiedad se corresponde con grandes variaciones del nivel de MES. Por lo tanto, no existe una relación clara entre ambos parámetros. Esto es coherente con el hecho de que la relación entre la turbiedad y la MES viene determinada por otro parámetro adicional, como es el tamaño de las partículas. Así, una muestra con gran número de partículas pequeñas puede tener la misma cantidad de materia que una con menos partículas pero de mayor tamaño, pero tendrá siempre mayor turbiedad.

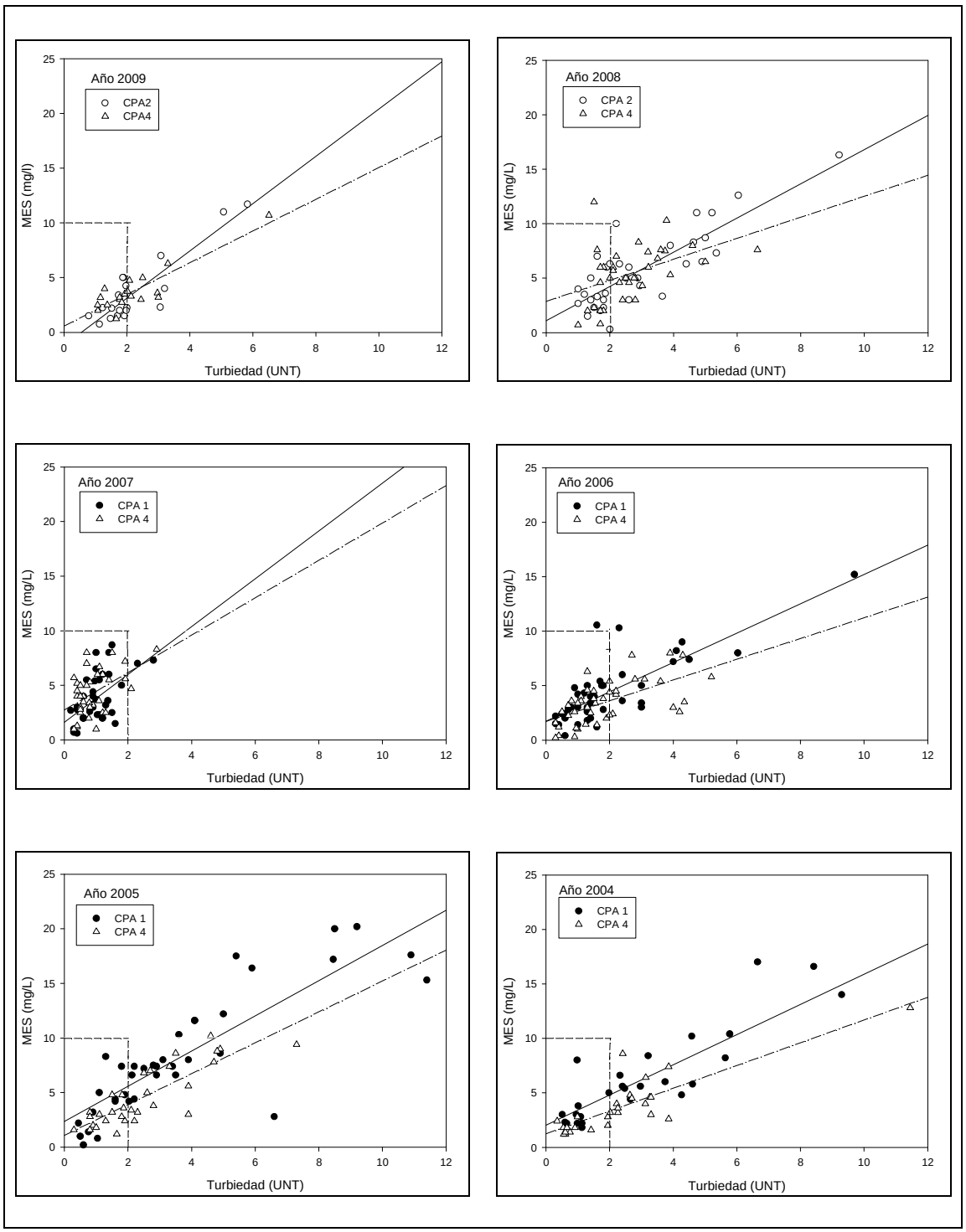



Figura 5.8. Relación entre turbiedad y MES durante los años comprendidos entre 2004 y 2009 en la ERA de Castell-Platja d'Aro.

El RD 1620/2007 fija unos límites máximos para el uso 1.1 de 2 UNT de turbiedad y 10 mg/L de MES. Esta limitación se representa en la figura 5.8 con una línea discontinua. Se recuerda que el uso 1.1 es el más restrictivo del RD y por ello, el cumplimiento de este uso implica automáticamente el cumplimiento de los límites aplicables al resto de usos. La figura 5.8 muestra como todos aquellos datos que no cumplen los límites establecidos por el RD pertenecen a los valores de la turbiedad, exceptuando 1, 2 ó incluso ningún valor debidos a la MES. Este hecho, que ya se observó cuando se estudió cada uno de estos parámetros individualmente, indica que la turbiedad es el factor limitante del cumplimiento de los límites de este uso. Por ello, se puede afirmar que una prioridad del proceso de regeneración debe ser asegurar la fiabilidad de la turbiedad efluente. Los valores límites establecidos para los usos actuales 1.2, 2.1 y 4.1 son de 10 UNT de turbiedad y 20 mg/L de MES. Estos valores son mucho menos restrictivos que los anteriores y se cumplen holgadamente en el efluente de la ERA de Castell-Platja d'Aro.

La tabla 5.12 muestra el porcentaje de muestras que no cumplen los límites del uso 1.1 fijados por la normativa. Se recuerda que los espectaculares resultados obtenidos en el año 2007 se debieron a la incorrecta calibración del turbidímetro utilizado, y por lo tanto, no son comparables con los datos del resto de los años. Conviene destacar la tendencia positiva seguida durante los seis primeros meses del año 2009 que ha permitido reducir notablemente el porcentaje de muestras que incumplen los límites del uso 1.1.

Tabla 5.12. Porcentaje de muestras que no cumplen los límites de MES y de turbiedad para el uso 1.1 del RD 1620/2007 en la ERA de Castell-Platja d'Aro.

| **Año** | 2009 | 2008 | 2007 | 2006 | 2005 | 2004 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **% de muestras que no cumplen el uso 1.1** | 42 | 65 | 6 | 31 | 50 | 50 |

La tabla 5.13 muestra la concentración límite de MES que deja por encima de él las muestras con turbiedad superior a 2 UNT. Es decir, es el valor de la MES con igual capacidad restrictiva que 2 UNT de turbiedad. Considerando que el límite del año 2007 no se debe tener en consideración, el valor discriminatorio de la MES se sitúa entre 3 y 4,6 mg/L. Por otra parte, el límite de detección del método convencional de medida de la MES se sitúa entre 3-4 mg/L. Por lo tanto, en esta ERA se podría plantear una disminución de la frecuencia de control de la MES, e incluso la no medición de la MES. De este modo bastaría sólo con medir la turbiedad. Este hecho comportaría un gran ahorro técnico-económico, pues la determinación del contenido de MES es costoso (en tiempo y en dinero) en comparación con la medición de turbiedad, que puede realizarse fácilmente con un turbidímetro de forma continua y automática. Sin embargo, el proceso de determinación de la turbiedad es mucho más sensible que el de la MES y deberá tenerse un especial control de la calibración del turbidímetro, como ya se observó en el año 2007.

Tabla 5.13. Valor límite de MES con la misma restrictividad que 2 UNT en ERA de Castell-Platja d'Aro.

| **Año** | 2009 | 2008 | 2007 | 2006 | 2005 | 2004 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **Límite restrictivo de MES (mg/L)** | 3,5 | 4,6 | 8 | 4,2 | 3,2 | 3 |

## 5.8 RELACIÓN ENTRE *E. COLI* – CF Y TRANSMITANCIA 254 NM

La figura 5.9 muestra la relación entre *E. coli* o CF y la transmitancia a 254 nm. La representación gráfica marca mediante una cruz aquellos valores de *E. coli* o CF cuya transmitancia es inferior al 60%, valor mínimo recomendado por las directrices internacionales para asegurar la eficiencia de un proceso de desinfección con luz UV.

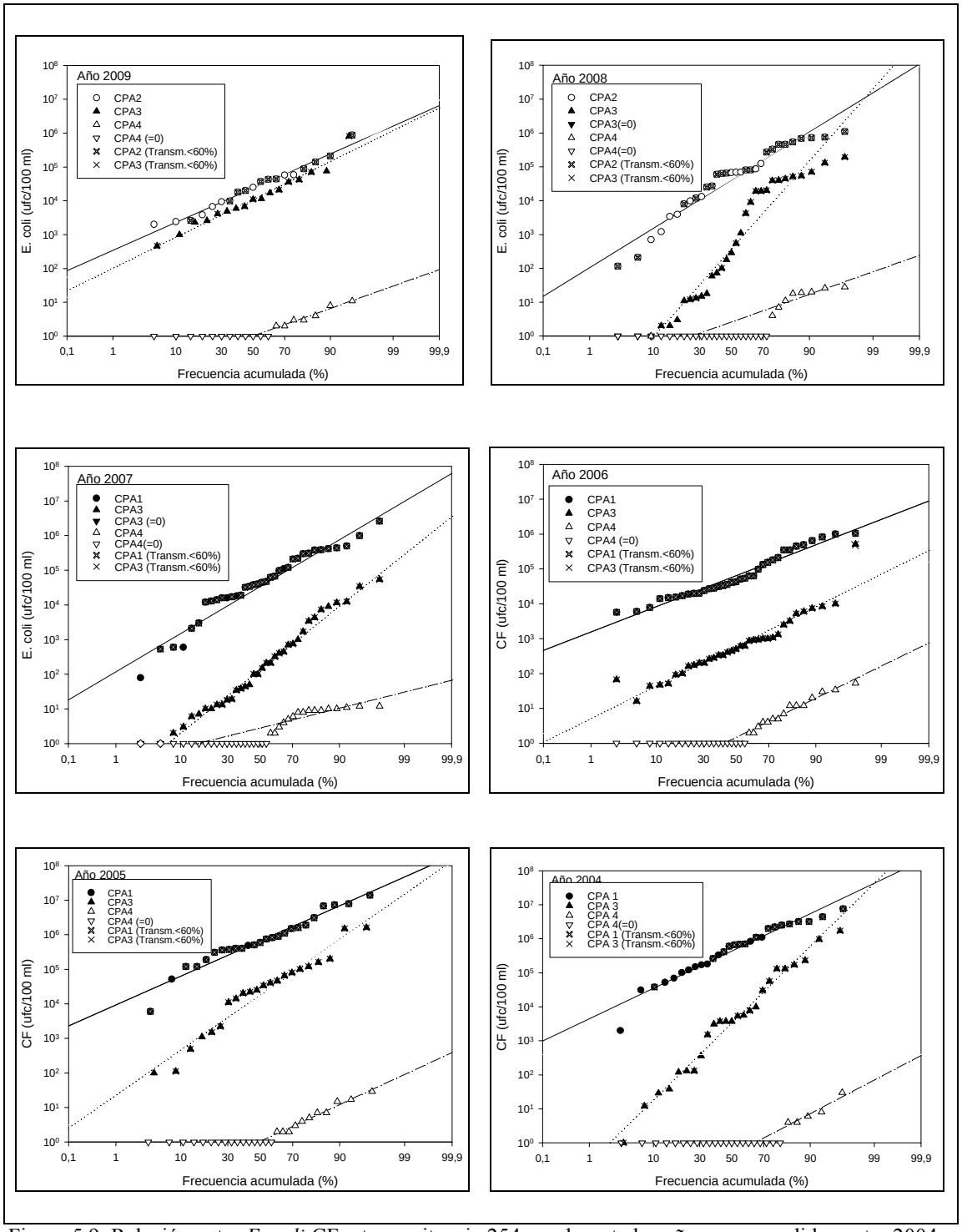



Figura 5.9. Relación entre *E. coli*-CF y transmitancia 254 nm durante los años comprendidos entre 2004 y 2009 en la ERA de Castell-Platja d'Aro.

Conviene indicar que en la figura 5.9 los valores de la transmitancia corresponden al punto de control CPA4, y los valores marcados de *E. coli* y CF pertenecen a los puntos de control CPA1 y CPA3, que corresponden a los datos pareja de aquellos valores de transmitancia menores del 60% medida en CPA4. La decisión de realizar la medida de transmitancia en el punto CPA4, y no en CPA1, se debe a que la calidad del agua en valor es el más parecido al que posee el agua en su paso por el sistema de luz UV. En los años 2008 y 2009 sí se dispone del valor CPA2, aunque por homogeneidad con los años anteriores y por no presentar grandes variaciones la transmitancia en ambos puntos de control en cuanto al límite del 60%, se utiliza el valor medido en CPA4.

La figura 5.9 muestra que la gran mayoría de las muestras tienen una transmitancia inferior al 60%, sobre todo durante los años 2005, 2006 y 2007 donde casi la totalidad de las muestras son satisfactorias. Este hecho se debe a la incorrecta medición de la transmitancia, utilizando para ello la misma muestra de agua que la utilizada para la microbiología. Por el contrario, los años 2004, 2008 y 2009 registran un porcentaje de muestras con transmitancia mayor al 60% de 32%, 45% y 36% respectivamente (Tabla 5.6). Los valores más altos de *E. coli* y CF observados durante estos años tienen todos transmitancias inferiores al 60%. En cambio, los valores de *E. coli* y CF bajos (en la cola inferior de la recta de regresión) presentan valores de la transmitancia tanto superiores como inferiores al 60%, aunque predominan los valores con transmitancia superior al 60%. Este comportamiento se repite en los tres puntos de control estudiados (CPA1, CPA2 y CPA3). Por lo tanto, puede afirmarse que los valores elevados de *E. coli* o CF presentan una transmitancia inferior al 60%, mientras que aquellos valores más bajos de *E. coli* o CF presentan generalmente un porcentaje mayor de muestras con transmitancia superior al 60%, aunque incluyen también algunas muestras con transmitancia inferior al 60%.

Para determinar una relación más precisa entre *E. coli* ó CF y la transmitancia a 254 nm es conveniente estudiar por separado los valores con transmitancia superior e inferior al 60%. Este estudio se ha realizado en los años donde la medida de la transmitancia es fiable, es decir, en los años 2004, 2008 y 2009. La figura 5.10 muestra la representación gráfica de los valores superiores al 60% (parte izquierda) e inferiores al 60% (parte derecha).

Los datos de los años 2004 y 2008 muestran que los valores superiores al 60% de transmitancia aumentan ligeramente la variabilidad del proceso de regeneración, mientras que los inferiores al 60% aumentan enormemente la variabilidad. Es decir, la irregularidad de los valores observados en CPA3 (figura 5.9) durante dichos años se debe a los resultados con transmitancia inferior al 60%. Además, los valores con transmitancia superior al 60% (parte izquierda) muestran un mayor grado de inactivación por la luz UV que los inferiores al 60% (parte derecha). Además, una desinfección adicional con cloro consigue prácticamente asegurar la ausencia de *E. coli* en la totalidad de las muestras con valores de transmitancia superiores al 60%, mientras que la proporción de muestras con ausencia de *E. coli* es inferior cuando su transmitancia es inferior al 60%.

Por otra parte, las observaciones del año 2009 muestran que tanto las muestras con transmitancia inferior como superior al 60% apenas son inactivadas por la luz UV y su inactivación se debe únicamente a la acción del cloro. Todo parece indicar que las lámparas de luz UV han finalizado su vida útil. Por lo tanto, se recomienda realizar un control más estricto de las lámparas UV en cuanto a sus horas de funcionamiento

acumulado, potencia y limpieza, y reemplazarlas en el momento en que se detecte una disminución de su rendimiento, y no guiarse por establecer un periodo fijo de tiempo para proceder al cambio de lámparas.

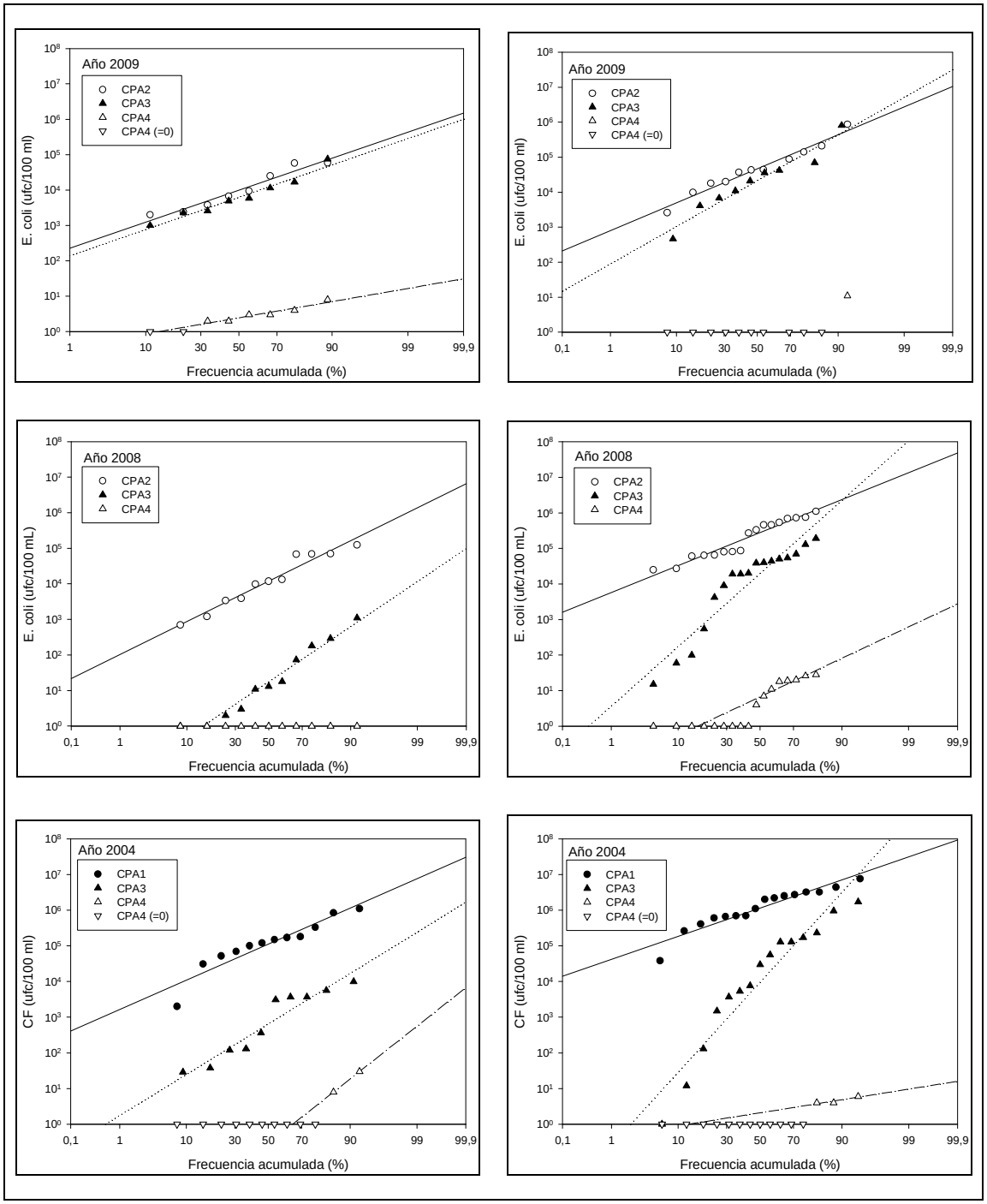



Figura 5.10. Representación gráfica de *E. coli* y CF con valores con transmitancia superior al 60% (parte izqda) e inferiores (parte derecha) durante los años 2004, 2008 y 2009 en la ERA de Castell-Platja d'Aro.

En resumen, la disminución de los valores de *E. coli* hasta proceder a su inactivación total (0 ufc/100 mL) en el 100% de las muestras puede realizarse de dos formas: 1) aumentando la transmitancia del agua, pues la eficiencia de la luz UV aumenta enormemente, y 2) aumentando la dosis de cloro. En el primer caso debe especialmente tenerse un control estricto del sistema de aplicación de la luz UV, que permita proceder

al cambio de lámparas en el momento en que se produzca una disminución de su rendimiento y no descartar así la adopción de un periodo fijo para su sustitución, que en la actualidad es de dos años aproximadamente.

## 5.9 RELACIÓN ENTRE CSR Y TRANSMITANCIA 254 NM

La figura 5.11 muestra la relación existente entre el contenido de CSR y la transmitancia a 254 nm. El proceso seguido para su representación e interpretación es el mismo que el utilizado en el apartado 5.8.

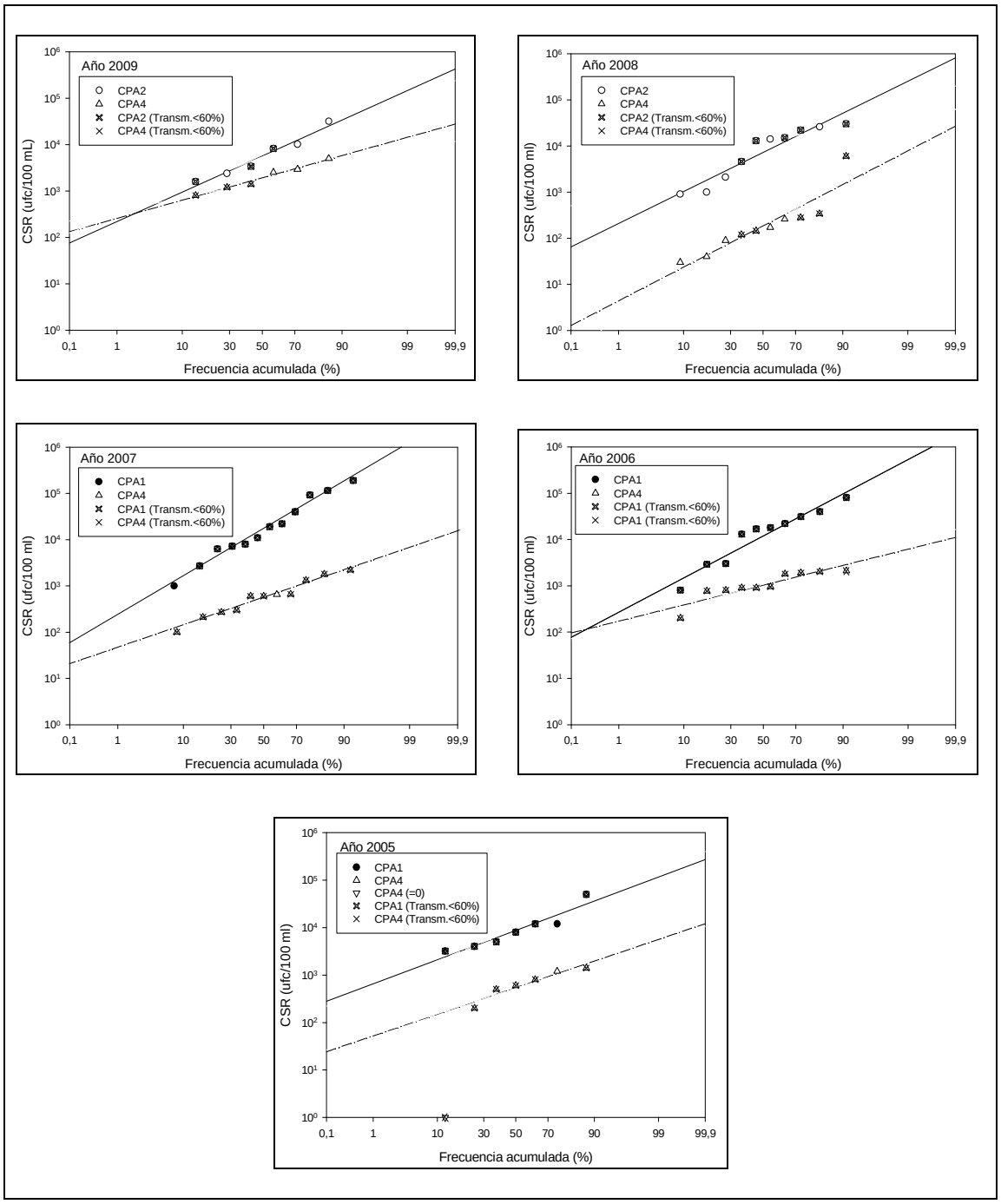



Figura 5.11. Relación entre CSR y transmitancia a 254 nm durante los años comprendidos entre 2004 y 2009 en la ERA de Castell-Platja d'Aro.

En primer lugar, se constata que la casi totalidad de las muestras de los años 2005, 2006 y 2007 tienen una transmitancia inferior al 60% debido a la medida incorrecta de la transmitancia, al utilizar la misma muestra que la microbiología. Por lo tanto, estos años se han excluido de un estudio fiable y preciso. Los años 2008 y 2009 registran un mayor número de datos con transmitancia superior al 60%. El año 2008 indica que las muestras con transmitancia superior al 60% se corresponden con los valores de CSR más bajos. En cambio, el análisis del año 2009 conlleva una conclusión totalmente opuesta a la anterior: los datos con transmitancia superior al 60% se corresponden con los valores más elevados de CSR. Cabe concluir que, a falta de un mayor número de muestras para realizar un análisis más exhaustivo y preciso, se puede considerar que ambos parámetros no mantienen relación alguna entre ellos.

## 5.10 RELACIÓN ENTRE LA INACTIVACIÓN DE *E. COLI* O CF Y TRANSMITANCIA 254 NM

La figura 5.12 muestra la relación existente entre la inactivación absoluta de *E. coli* y CF (en unidades logarítmicas) producida por la luz UV, y la transmitancia a 254 nm. La transmitancia a 254 nm del agua se ha medido en el punto CPA4.

En primer lugar se debe indicar que los valores de la transmitancia medidos durante los años 2005, 2006 y 2007 no se han considerado representativos y precisos debido a su medida incorrecta en la misma muestra de agua que la microbiología. No obstante, los datos de los años 2005 y 2006 muestran una relación lógica, pues a mayor transmitancia le corresponde una mayor eficiencia de desinfección.

La figura 5.12 muestra la gran dispersión de los datos de los años 2004, 2005 y 2007. En estos años es fácil encontrar valores muy diferentes de inactivación para una misma transmitancia y, viceversa, grandes variaciones de la transmitancia se corresponden con un mismo valor de inactivación.

Los datos considerados más representativos de la realidad son los de los años 2004, 2008 y 2009. La relación registrada en el año 2004 es lógica aunque la dispersión de los datos es elevada. La relación registrada en el año 2008 también es lógica, aumentando el grado de inactivación cuando lo hace la transmitancia del agua. Además, la dispersión de los datos no es tan marcada. Por último, el año 2009 muestra un grado de inactivación constante y pequeño con independencia de la transmitancia del agua de entrada. Este hecho es claramente una indicación indiscutible de que las lámparas de luz UV habrían de ser reemplazadas.

La figura 5.13 muestra la relación existente entre la inactivación de *E. coli* y CF normalizada (relativa) producida por la luz UV y la transmitancia a 254 nm. Como en el caso anterior, la medida de la transmitancia durante los años 2005, 2006 y 2007 en el punto de control CPA4 es incorrecta. No obstante, la relación observada durante los años 2005 y 2006 se considera lógica pues a mayor transmitancia del agua se observa un mayor grado de inactivación producido por la luz UV. Por el contrario, el año 2007 presenta una relación totalmente ilógica.

Si se observan los datos de los años realmente representativos, el año 2004 presenta una relación lógica aunque con un grado de dispersión de datos elevado. El año 2008

presenta una tendencia lógica en cuanto a que una mayor transmitancia del agua se corresponde con una mayor inactivación. Además, la dispersión de los datos es menor que en el año 2004. Por el contrario, el año 2009 presenta un grado de inactivación constante y muy bajo, con independencia de la transmitancia del agua. Esta última observación parece indicar que las lámparas de luz UV han finalizado su vida útil y necesitan ser reemplazadas.

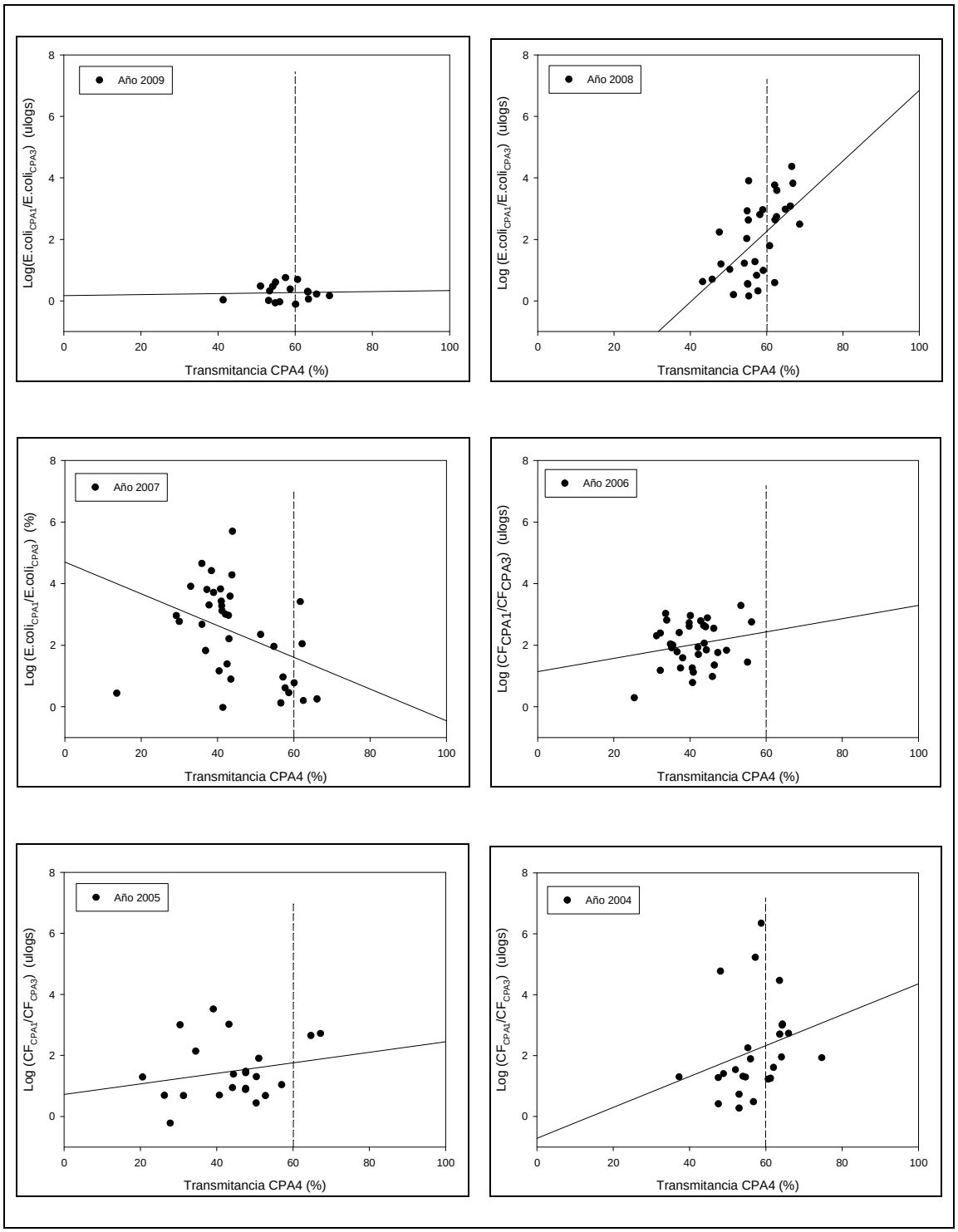



Figura 5.12. Relación entre la inactivación absoluta de *E. coli* y CF producida por la luz UV y la transmitancia a 254 nm durante los años comprendidos entre 2004 y 2009 en la ERA de Castell-Platja d'Aro.

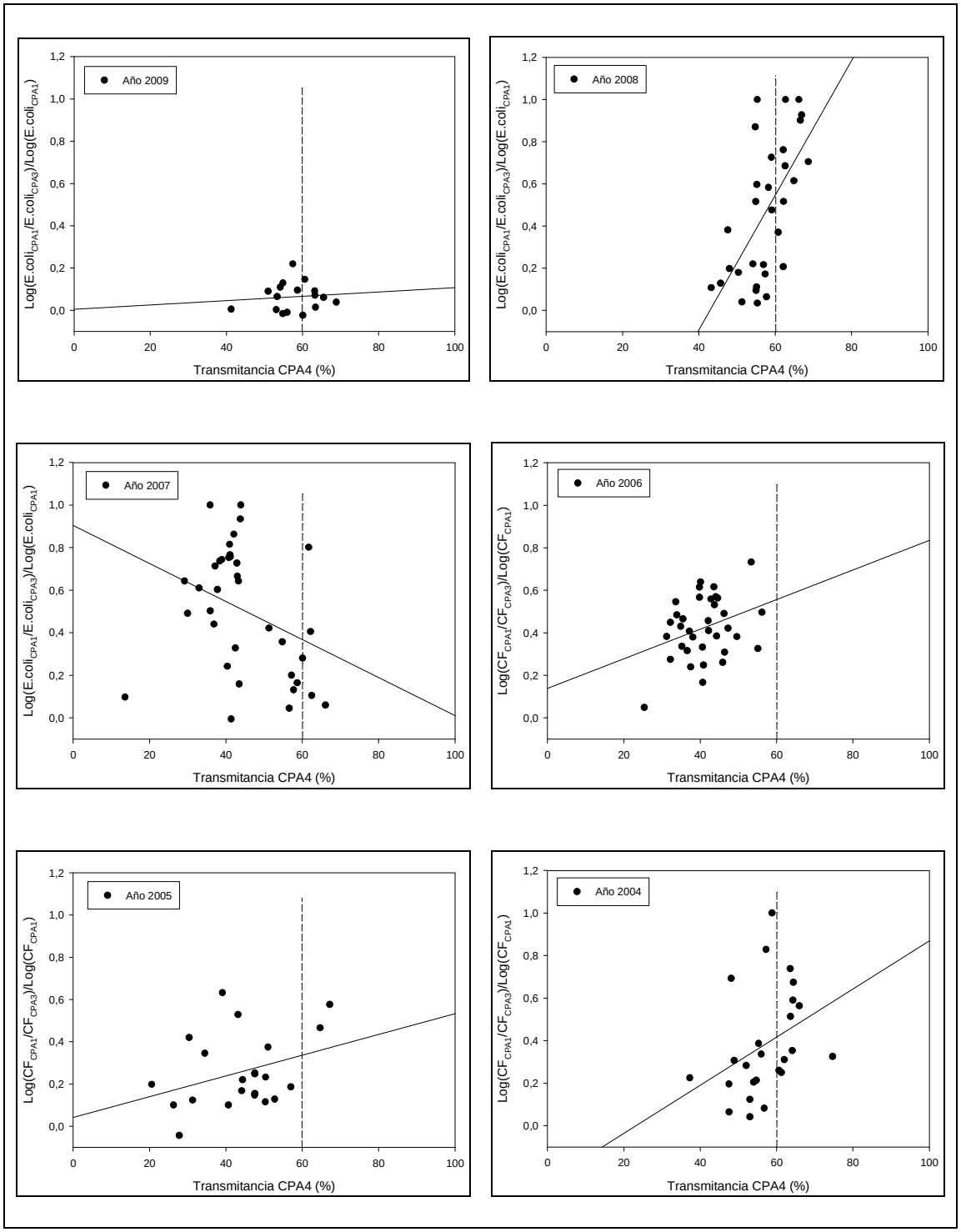



Figura 5.13. Relación entre la inactivación de *E. coli* y CF normalizada (relativa) producida por la luz UV y la transmitancia a 254 nm durante los años comprendidos entre 2004 y 2009 en la ERA de Castell-Platja d'Aro.

## 5.11 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Las conclusiones y recomendaciones obtenidas en este capítulo son:

1. El proceso de regeneración de agua aumenta la fiabilidad (disminuye la variabilidad) de la MES, la turbiedad, y el contenido de *E. coli* y CSR. Los cambios

de localización del punto de muestreo del potencial redox disminuyen la fiabilidad; el establecimiento de un punto de muestreo fijo permitirá aumentar la fiabilidad. La falta de sistemática en la toma y análisis de muestras no han permitido establecer una conclusión definitiva en cuanto a la transmitancia a 254 nm.

2. Los equipos de medición se deben mantener calibrados de forma sistemática con el fin de asegurar la exactitud y precisión de las medidas y controlar los posibles errores que su uso pueda acarrear, pues un pequeño error puede tener graves consecuencias. Este control debe extremarse en aquellos periodos en los que se incorpora o cambia un nuevo equipo.

3. Los diversos errores de medida registrados durante el muestreo y análisis de la turbiedad, la transmitancia y el potencial redox plantean una serie de recomendaciones para poder realizar un análisis exhaustivo, objetivo y realista de los datos obtenidos:

    a. Los puntos óptimos de muestreo deben establecerse e identificarse de forma sistemática y rigurosa.
    b. El muestreo debe realizarse siempre en los mismos puntos; los cambios de localización introducen dificultades añadidas a la interpretación de los datos y puede conllevar un análisis erróneo de los resultados.
    c. La toma y el posterior análisis de una muestra debe realizarse conforme dicta la normativa correspondiente, con un procedimiento preciso y fiable.

4. Los dos puntos de control de la transmitancia actuales deberían complementarse con un nuevo punto de muestreo anterior a la aplicación de la luz UV, debido a la enorme importancia que tiene este parámetro en la eficacia de la desinfección con luz UV.

5. El proceso de desinfección con luz UV disminuye siempre la fiabilidad del indicador *E. coli*. Esto se debe principalmente a la dependencia del proceso en la transmitancia del agua, especialmente cuando ésta es inferior al 60 %. La mejor estrategia para aumentar su fiabilidad es mejorar la transmitancia del agua afluente.

6. La desinfección con cloro produce siempre un aumento significativo de la fiabilidad en términos de *E. coli* y asegura una gran inactivación de estos indicadores. Además de producir una desinfección enormemente eficiente, cuando se aplica junto con la luz UV, la cloración actúa como sistema de control de la desinfección. Cuando la luz UV no es eficiente, el cloro también permite disminuir enormemente la concentración de *E. coli* e inactivar también, aunque en menor medida que la *E. coli*, los CSR.

7. La incorporación de una sonda de potencial redox permite aumentar la fiabilidad del proceso de cloración, aumentar el número y el porcentaje de muestras con ausencia de *E. coli*, y mantener una dosificación óptima del cloro. La utilización de sondas redox permite un ahorro importante en la adición de cloro y presenta un coste de mantenimiento muy inferior frente a las sondas de cloro tradicionales.

8. Los CSR son un excelente indicador de la eficiencia de la desinfección con luz UV. Los resultados obtenidos durante el año 2009 indican que las lámparas de luz UV

deberían haberse reemplazado con anterioridad. Un control más estricto de las lámparas de luz UV, en cuanto a su funcionamiento acumulado, permitirán detectar el final de su vida útil y reemplazarlas en el momento adecuado, evitando así la adopción de un periodo fijo de cambio de lámparas. Cuando las lámparas de luz UV finalizan su vida útil, la eficiencia de eliminación conjunta (luz UV y cloro) de *E. coli* y CSR experimenta una disminución importante, siendo la disminución de la eficacia de inactivación de CSR de una unidad logarítmica aproximadamente.

9. El análisis conjunto de la MES y la turbiedad muestra que el parámetro limitante para la evaluación de la calidad del agua en el proceso de regeneración es la turbiedad y por lo tanto, la prioridad principal del proceso de regeneración debe ser asegurar la fiabilidad de la turbiedad. El límite reglamentario correspondiente a la MES coincide con el límite de detección del método convencional de medida de la MES. Por lo tanto, en esta ERA se podría plantear una disminución de la frecuencia de control de la MES, e incluso bastaría sólo con medir la turbiedad. Esto supondría un considerable ahorro técnico-económico, al ser el ensayo de la turbiedad mucho más sencillo y económico de realizar.

10. El agua regenerada satisface los valores límite fijados para los usos actuales 1.2, 2.1 y 4.1 del RD 1620/2007 durante todos los años estudiados.

11. La MES y la turbiedad efluentes cumplen los límites de los usos actuales sin necesidad del proceso de regeneración. El proceso de regeneración asegura el cumplimiento de los valores límite de *E. coli*. Es decir, el proceso de regeneración necesario para los usos actuales es básicamente un proceso de desinfección. No obstante, la disminución de la MES, la turbiedad y la transmitancia a 254 nm mejora la eficiencia de la desinfección con luz UV.

12. El proceso de regeneración asegura el cumplimiento de los límites correspondientes a la MES para el uso más restrictivo del RD 1620/2007 (uso 1.1), pero no en cuanto a la turbiedad y al contenido de *E. coli*.

13. El cumplimiento de los límites de turbiedad correspondientes al uso 1.1 requerirá realizar diversas inversiones en la ERA: incorporar un proceso previo de coagulación-floculación y/o un decantador lamelar.

14. El cumplimiento de los límites del contenido de *E. coli* correspondientes al uso 1.1 requerirá la adopción de dos posibles alternativas: 1) aumentar la transmitancia 254 nm del agua, pues la eficiencia de la luz UV aumenta significativamente, y 2) aumentar la dosis de cloro.

# CAPÍTULO 6

# EFICACIA Y FIABILIDAD DE LA ERA DE TOSSA DE MAR

En este capítulo se procede al estudio de la eficacia y la fiabilidad del proceso de regeneración de agua llevado a cabo en la ERA de Tossa de Mar. El estudio se realiza a partir de los datos experimentales obtenidos entre los años 2005 y 2009, ordenados de acuerdo con el parámetro de calidad en cuestión. Los datos del año 2009 abarcan únicamente los seis primeros meses de dicho año.

## 6.1 MATERIA EN SUSPENSIÓN (MES)

La figura 6.1 muestra los valores de la MES obtenidos entre los años 2005 y 2009. Los años 2006 y 2007 no muestran 1 y 2 valores del efluente secundario respectivamente por ser superiores al límite de 30 mg/L del eje de ordenadas.

La observación de la figura 6.1 indica la existencia de diferentes comportamientos según el año representado. El año 2009 muestra claramente como el ajuste de los datos representados a una línea recta es altamente satisfactorio tanto en el efluente secundario como en el agua regenerada. Por el contrario, el año 2008 presenta un ajuste irregular de los datos del efluente secundario y del agua regenerada a una línea recta. En general, se observa como las partes extremas de las distribuciones (los valores más altos y más bajos) sufren un desajuste elevado entre los valores y la recta de regresión. En cambio, el ajuste de las partes centrales de la distribución es altamente adecuado.

El número de muestras representadas de la MES es muy elevado. Los años 2005, 2006, 2007 y 2008 presentan un número de muestras aproximado de 150, y el año 2009, de 60 muestras. La aplicación del test de Kolmogorov-Smirnov (ver anejo 1 B.1) permite afirmar las observaciones realizadas anteriormente: según el año estudiado y el efluente o afluente los datos se ajustan o no a una distribución normal. Únicamente el efluente secundario del año 2005 y 2009, y el agua regenerada del año 2007 y 2009 se ajustan a una distribución normal. Todas las observaciones anteriores sugieren que la distribución normal no es estrictamente aplicable cuando se analiza una larga serie de datos experimentales, debido a su capacidad para detectar cambios bruscos o episódicos de la calidad del agua, que se manifiesta principalmente en los desajustes de las 'colas de la distribución'. No obstante, esta reflexión no supone un gran problema pues se considera que la distribución normal es adecuada para estimar los valores centrales. Además, el desajuste en la parte alta de la distribución permite utilizarla para determinar correctamente el percentil 90%, pero no para aquellos percentiles superiores al 95%. No obstante, el proceso de regeneración mejora el ajuste de los datos representados a la recta de regresión. Este hecho se observa en los datos situados en la cola de la distribución (figura 6.1).

La figura 6.1 y la tabla 6.1 muestran una disminución de los percentiles 50 y 90 de la MES tras el proceso de regeneración. La evolución del efluente secundario es

enormemente satisfactoria respecto a ambos percentiles y sobre todo, en los años 2008 y 2009 respecto a los años anteriores. La progresión del agua regenerada también es altamente satisfactoria, obteniendo en el año 2009 los valores más bajos de los percentiles 50 y 90 de todos los años estudiados.

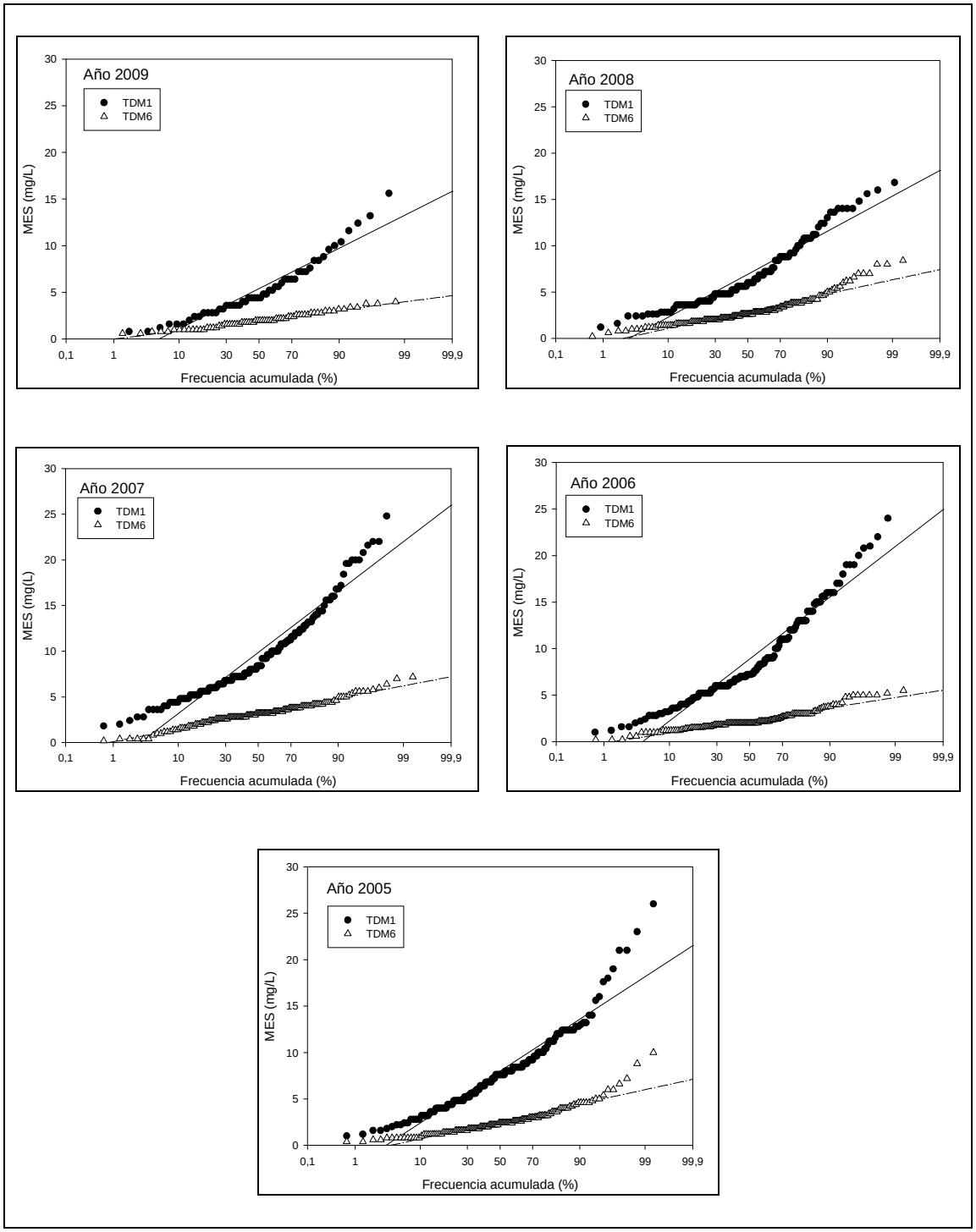



Figura 6.1. Distribución de probabilidad de la MES durante los años comprendidos entre 2005 y 2009 en la ERA de Tossa de Mar.

El proceso de regeneración produce una disminución de la desviación típica y de la posición de la recta de regresión en todos los años estudiados, es decir, el proceso de

regeneración aumenta la fiabilidad del proceso. La observación del efluente secundario muestra una mejora progresiva de la fiabilidad a lo largo de los años. En cuanto al agua regenerada, ésta aumenta o disminuye la fiabilidad según el año representado, aunque oscila siempre en un mismo rango de valores. Conviene destacar la gran mejoría de la fiabilidad del agua regenerada en el año 2009 respecto al anterior.

Tabla 6.1. Percentiles 50 y 90 y desviación típica de la distribución normal de la MES en la ERA de Tossa de Mar.

| Año | Punto de control | Percentil 50 (mg/L) | Percentil 90 (mg/L) | s = desviación típica (mg/L) |
|---|---|---|---|---|
| 2009 | TDM1 | 5,39 | 9,71 | 3,37 |
| 2009 | TDM6 | 1,99 | 3,09 | 0,86 |
| 2008 | TDM1 | 6,9 | 11,55 | 3,63 |
| 2008 | TDM6 | 2,92 | 4,79 | 1,46 |
| 2007 | TDM1 | 9,86 | 16,54 | 5,21 |
| 2007 | TDM6 | 3,16 | 4,84 | 1,31 |
| 2006 | TDM1 | 8,89 | 15,56 | 5,2 |
| 2006 | TDM6 | 2,29 | 3,64 | 1,05 |
| 2005 | TDM1 | 8 | 13,60 | 4,37 |
| 2005 | TDM6 | 2,58 | 4,46 | 1,47 |

En la actualidad, el agua regenerada de la ERA de Tossa de Mar se destina para riego de usos urbanos de servicios (riego de zonas verdes urbanas) correspondientes al uso 1.2 del RD 1620/2007. El RD fija para el uso 1.2 un límite máximo del percentil 90 de MES de 20 mg/l. La figura 6.1 y la tabla 6.2 permiten afirmar que los valores impuestos por la normativa se cumplen en todos los años estudiados. Este hecho indica que el agua cumple con las normas de calidad del uso 1.2 antes del proceso de regeneración.

A corto plazo, el objetivo más ambicioso del Consorci de la Costa Brava en esta ERA es la ampliación de los usos disponible del agua regenerada hasta el uso 1.1 en que el agua regenerada se aplica a usos urbanos residenciales (uso 1.1 del RD). El RD fija para este uso un límite del percentil 90 de la MES de 10 mg/L. Los valores límites impuestos se cumplen para todos los años estudiados (tabla 6.2). El proceso de regeneración es el responsable de que el agua regenerada cumpla estos valores límites y sea declarada apta para dicho uso. No obstante, la positiva progresión experimentada por el efluente secundario en esta ERA y los esfuerzos realizados por el personal de explotación de la EDAR ha permitido el cumplimiento en los 6 primeros meses del año 2009 del valor fijado de 10 mg/l.

Tabla 6.2. Cumplimiento del RD 1620/2007 en términos de la MES en la ERA de Tossa de Mar.

| **Año** | 2009 | 2008 | 2007 | 2006 | 2005 |
|---|---|---|---|---|---|
| **Cumple Uso 1.1** | Sí | Sí | Sí | Sí | Sí |
| **Cumple Uso 1.2** | Sí | Sí | Sí | Sí | Sí |

## 6.2 TURBIEDAD

La figura 6.2 muestra los valores de la turbiedad obtenidos entre los años 2005 y 2009. La escala del eje de ordenadas se ha aumentado hasta el valor límite de 25 UNT debido al gran número de valores que superan el límite de 12 UNT (figura 5.2).

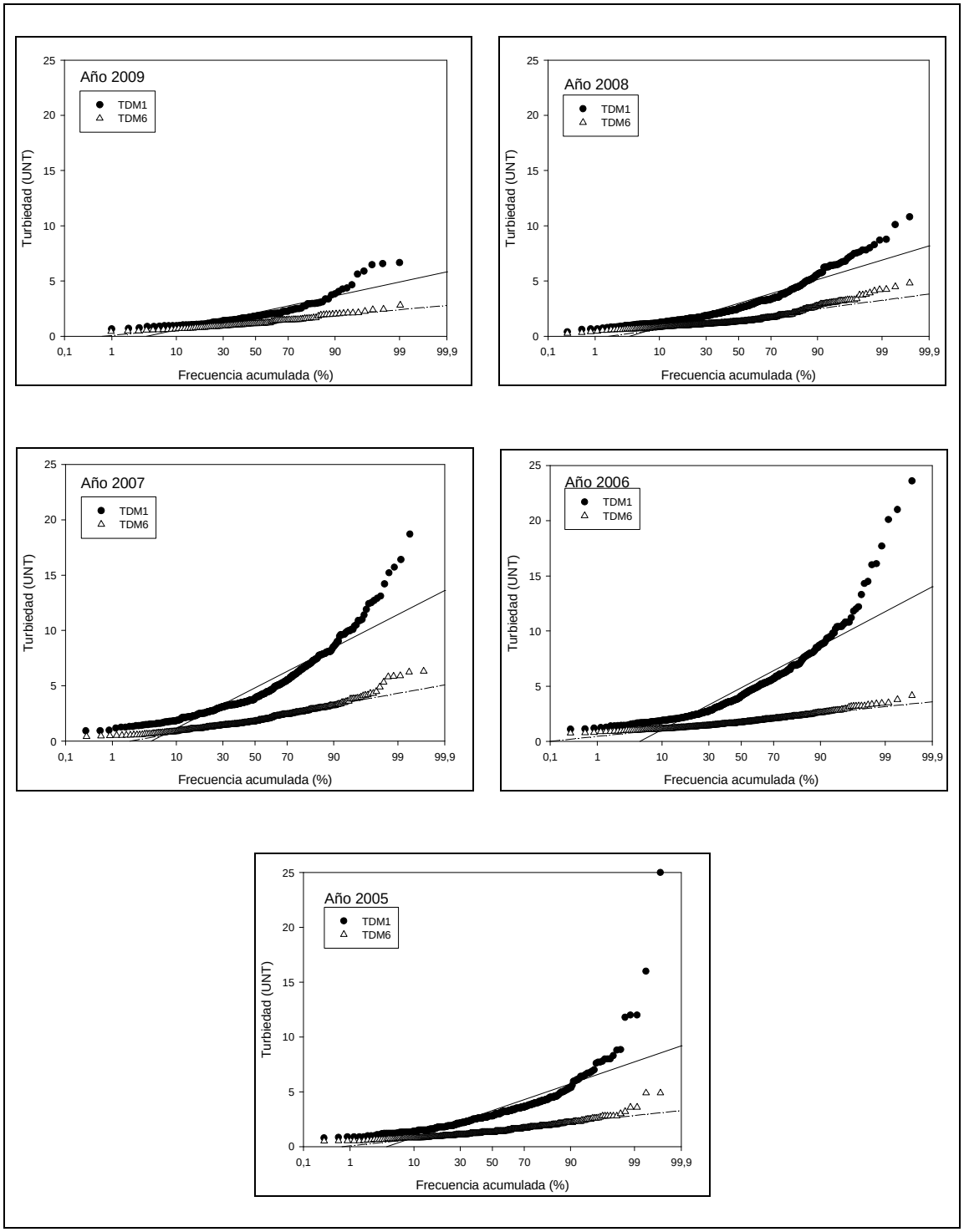



Figura 6.2. Distribución de probabilidad de la turbiedad durante los años comprendidos entre 2005 y 2009 en la ERA de Tossa de Mar.

La figura 6.2 muestra un ajuste de los datos experimentales a un línea recta no muy adecuado debido principalmente al desajuste producido en las 'colas' de la distribución. El test de Kolmogorov-Smirnov (ver Anejo 1 B.2) refuerza esta observación, pues sólo el agua regenerada del año 2009 se ajusta a una distribución normal. El número de datos experimentales representados se sitúa entre los años 2005 y 2008 entre 330 y 360 valores, mientras que en el año 2009 es de aproximadamente 100. Considerando juntamente el estudio de la MES con la turbiedad se puede concluir que la distribución normal no es estrictamente aplicable cuando se analiza una larga serie de datos experimentales, debido a su capacidad para detectar cambios bruscos o episódicos de la calidad del agua, que se manifiestan principalmente en los desajustes de las 'colas' de la distribución. No obstante, el desajuste pronunciado se produce por encima del percentil 90 y por ello, la distribución es apropiada para determinar con suficiente precisión los percentiles centrales y el percentil 90. Conviene destacar la mejoría producida por el proceso de regeneración en el ajuste de los datos representados a la recta de regresión. Este hecho es fácilmente visible en los datos situados en la cola de la distribución (figura 6.2).

La figura 6.2 y la tabla 6.3 permiten observar como el proceso de regeneración produce una disminución de los percentil 50 y 90 de la turbiedad. El estudio del efluente secundario muestra como su calidad (percentiles 50 y 90) aumenta progresivamente a lo largo de los años. Este hecho indica que la EDAR de Tossa de Mar ha mejorado a lo largo de los años el proceso de depuración permitiendo disminuir los valores de la turbiedad afluente. Del mismo modo, el agua regenerada presenta también una evolución positiva, obteniendo en el año 2009 los valores mínimos de los percentiles 50 y 90. Evidentemente, la reducción de ambos percentiles en el año 2009 es inferior al del resto de años debido a la excelente calidad que presenta el efluente secundario.

Tabla 6.3. Percentiles 50 y 90 y desviación típica de la distribución normal de la turbiedad en la ERA de Tossa de Mar.

| Año | Punto de control | Percentil 50 (UNT) | Percentil 90 (UNT) | s = desviación típica (UNT) |
|---|---|---|---|---|
| 2009 | TDM1 | 2,12 | 3,66 | 1,2 |
| 2009 | TDM6 | 1,24 | 1,88 | 0,5 |
| 2008 | TDM1 | 2,97 | 5,12 | 1,68 |
| 2008 | TDM6 | 1,55 | 2,50 | 0,74 |
| 2007 | TDM1 | 4,82 | 8,47 | 2,85 |
| 2007 | TDM6 | 2,02 | 3,29 | 0,99 |
| 2006 | TDM1 | 4,86 | 8,67 | 2,97 |
| 2006 | TDM6 | 1,8 | 2,54 | 0,58 |
| 2005 | TDM1 | 3,3 | 5,75 | 1,91 |
| 2005 | TDM6 | 1,46 | 2,22 | 0,59 |

En cuanto a la fiabilidad, el proceso de regeneración produce una disminución de la pendiente de la recta de regresión (figura 6.2) y de la desviación típica (tabla 6.3) y, por lo tanto, aumenta la fiabilidad. Una observación más detallada e individual del efluente secundario y del agua regenerada permite afirmar que la fiabilidad mejora progresivamente a lo largo de los años estudiados.

El RD 1620/2007 fija, para el uso actual 1.2 y para el futuro uso 1.1, un valor máximo admisible del percentil 90 de la turbiedad de 10 UNT y 2 UNT respectivamente. La tabla 6.3 muestra que el proceso de regeneración cumple claramente con el valor fijado para el uso actual 1.2, pero únicamente cumple el uso 1.1 en el año 2009 (tabla 6.4). Conviene recordar que a mediados del año 2008 entró en servicio la red de agua regenerada de Tossa de Mar, y desde entonces se está realizando un seguimiento intensivo del agua distribuída con el fin de observar sus posibles cambios de calidad y anticipar posibles problemas. Esta red permitirá aumentar los usos disponibles hasta el uso 1.1 con el objetivo de cubrir una gran parte de la demande de agua no potable para uso municipal y conseguir un ahorro importante del agua potable. El cumplimiento del uso 1.1 en los 6 primeros meses del año 2009 se debe al gran esfuerzo realizado por el personal de explotación para cumplir con la normativa y demostrar a las Autoridades Competentes que el uso 1.1 se alcanza fiablemente. De este modo, se podrá recibir cuanto antes la correspondiente autorización para la entrada en servicio del uso 1.1. Además del cumplimiento del percentil 90, el año 2009 muestra como los valores superiores a dicho percentil se sitúan prácticamente en la misma recta de regresión, a diferencia de los años anteriores.

Tabla 6.4. Cumplimiento del RD 1620/2007 en términos de turbiedad y MES en la ERA de Tossa de Mar.

| Año | Cumple MES | | Cumple turbiedad | | Cumple MES y turbiedad | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Uso 1.1 | Uso 1.2 | Uso 1.1 | Uso 1.2 | Uso 1.1 | Uso 1.2 |
| 2009 | Sí | Sí | Sí | Sí | Sí | Sí |
| 2008 | Sí | Sí | No | Sí | No | Sí |
| 2007 | Sí | Sí | No | Sí | No | Sí |
| 2006 | Sí | Sí | No | Sí | No | Sí |
| 2005 | Sí | Sí | No | Sí | No | Sí |

## 6.3 TRANSMITANCIA 254 NM

La figura 6.3 muestra los valores de la transmitancia a 254 nm obtenidos entre los años 2005 y 2009. La figura 6.3 muestra un ajuste deficiente de los datos experimentales a una línea recta debido principalmente al desajuste producido en las partes extremas de la distribución. La aplicación del test estadístico de Kolmogorov-Smirnov confirma la observación realizada, pues sólo el efluente secundario del año 2007 se ajusta a una distribución normal (ver Anejo 1 B.3). El número de datos experimentales varía entre los años 2005 y 2008 entre 320 y 360 por efluente, mientras que en el año 2009 se dispone de aproximadamente 100 datos por efluente. El análisis de este parámetro induce la misma conclusión que los parámetros anteriores, es decir, la distribución normal no es estrictamente aplicable cuando se analiza una larga serie de datos experimentales, debido a su capacidad para detectar cambios bruscos de la calidad del agua, que se manifiesta principalmente en los desajustes de las 'colas' de la distribución. No obstante, el desajuste pronunciado se produce por encima del percentil 90 y por ello, la distribución es apropiada para estimar los percentiles centrales y el percentil 90 con suficiente precisión.

La figura 6.3 y la tabla 6.5 muestran que el proceso de regeneración produce un aumento de los percentiles 50 y 90 del agua afluente. Esto es lo realmente esperado,

pues cabe esperar un aumento de la transmitancia con el proceso de regeneración. Este hecho lógico no se registraba en la ERA de Castell-Platja d'Aro debido a las incidencias producidas en el muestreo y en el punto de muestreo considerado. La tabla 6.5 muestra que los años 2008 y 2009 registran una mejora destacable del efluente secundario y del agua regenerada, consecuencia ambas del esfuerzo realizado, tanto en la EDAR (efluente secundario) como en la ERA (agua regenerada), para obtener un agua regenerada de gran calidad que cumpla los valores establecidos para el uso 1.1 del RD.

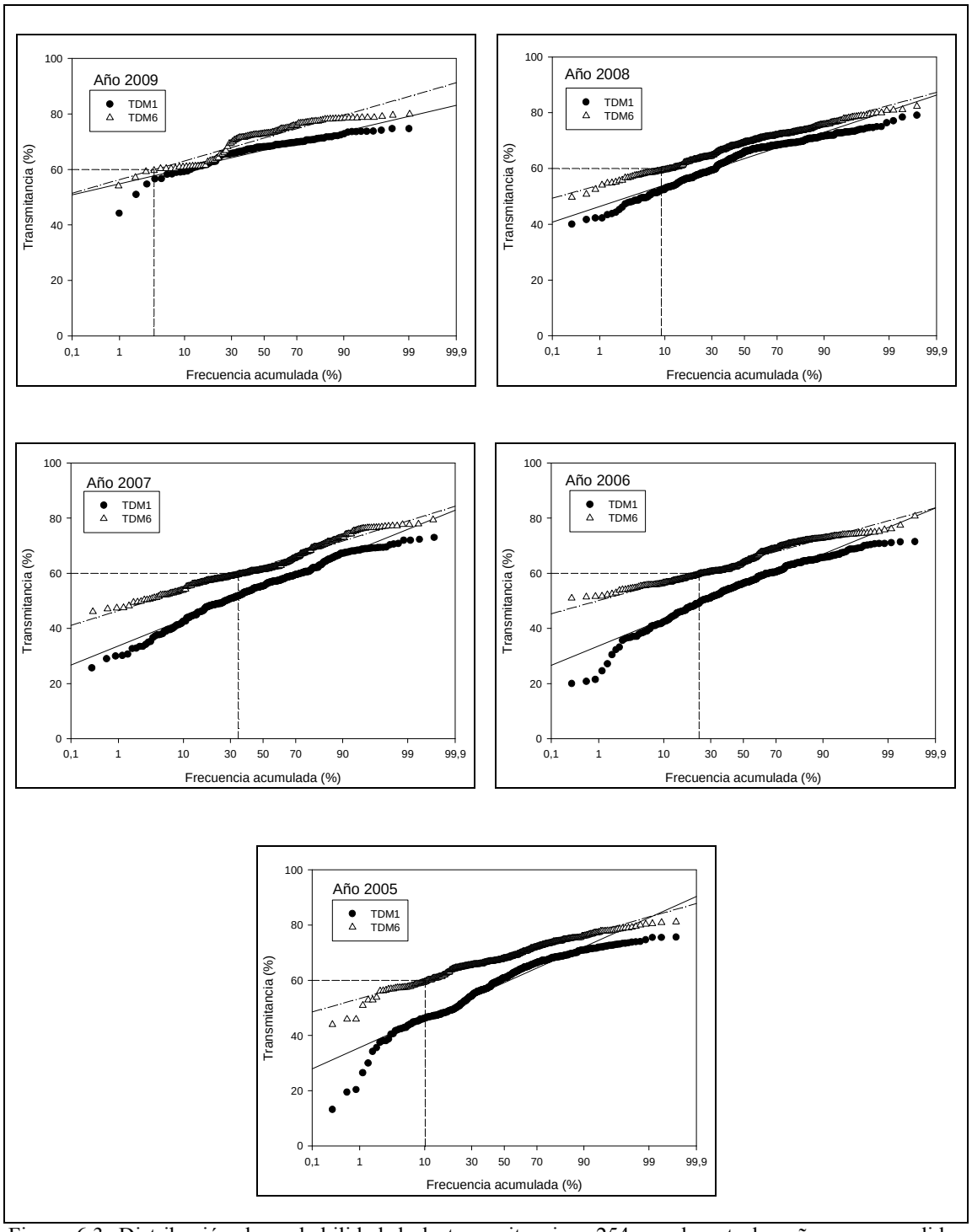



Figura 6.3. Distribución de probabilidad de la transmitancia a 254 nm durante los años comprendidos entre 2005 y 2009 en la ERA de Tossa de Mar.

El proceso de regeneración produce una disminución de la desviación típica y de la pendiente de la recta de regresión de la turbiedad en todos los años estudiados, excepto en el año 2009 (figura 6.3 y tabla 6.5). Esta excepción se debe al reducido valor de la desviación típica y de la pendiente del efluente secundario, pues a pesar del ligero aumento que se experimenta con el proceso de regeneración, el valor obtenido se sitúa en el mismo rango de valores que los del resto de años.

Tabla 6.5. Percentiles 50 y 90 y desviación típica de la distribución normal de la transmitancia a 254 nm en la ERA de Tossa de Mar.

| Año | Punto de control | Percentil 50 (%) | Percentil 90 (%) | s = desviación típica (%) |
|---|---|---|---|---|
| 2009 | TDM1 | 66,95 | 73,63 | 5,21 |
| 2009 | TDM6 | 71,31 | 79,57 | 6,44 |
| 2008 | TDM1 | 63,53 | 72,99 | 7,38 |
| 2008 | TDM6 | 68,33 | 76,20 | 6,14 |
| 2007 | TDM1 | 54,81 | 66,46 | 9,09 |
| 2007 | TDM6 | 62,71 | 71,68 | 7 |
| 2006 | TDM1 | 55,15 | 66,97 | 9,22 |
| 2006 | TDM6 | 64,56 | 72,52 | 6,21 |
| 2005 | TDM1 | 59,14 | 72,08 | 10,09 |
| 2005 | TDM6 | 68,17 | 76,31 | 6,35 |

Las directrices internacionales para que un proceso de desinfección con luz UV sea eficiente recomiendan que la transmitancia a 254 nm sea superior al 60%. La línea discontinua de la figura 6.3 indica el valor del 60% de transmitancia y la obtención de su correspondiente percentil. La tabla 6.6 muestra el percentil de muestras con una transmitancia inferior o igual al 60%. Los resultados obtenidos son relativamente buenos, pues los valores logrados en la ERA de Castell-Platja d'Aro eran superiores al 55%. La observación de dicha tabla permite destacar la gran mejoría producida en los años 2008 y 2009 respecto a los anteriores, en consonancia con la mejoría producida en los dos parámetros físico-químicos estudiados anteriormente (MES y turbiedad). El año 2009 es el que presenta el mínimo valor de todos los años representados, concretamente un porcentaje del 6% de muestras con transmitancia inferior al 60% y por ello, no apropiables para desinfección con luz UV únicamente.

Tabla 6.6. Percentil de muestras con una transmitancia a 254 nm inferior o igual al 60% en la ERA de Tossa de Mar.

| Año | 2009 | 2008 | 2007 | 2006 | 2005 |
|---|---|---|---|---|---|
| Percentil con transmitancia menor o igual al 60% | 6 | 9 | 34 | 27 | 10 |

## 6.4 POTENCIAL REDOX

La figura 6.4 muestra los valores de potencial redox obtenidos en el año 2009. La figura 6.4 muestra que el ajuste de los datos experimentales a una recta es satisfactorio, por lo que el potencial redox se ajusta a una distribución normal. La aplicación del test estadístico de Kolmogorov-Smirnov (Anejo 1 B.4) confirma la hipótesis de normalidad.

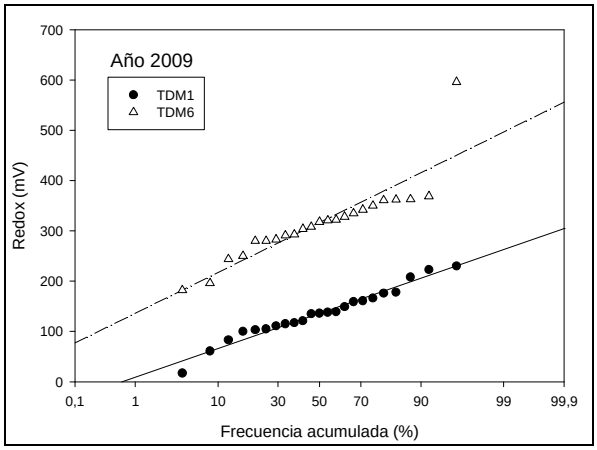



Figura 6.4. Distribución de probabilidad del potencial redox durante el año 2009 en la ERA de Tossa de Mar.

La figura 6.4 y la tabla 6.7 muestran el aumento del potencial redox que se registra tras el proceso de regeneración. También se registra un aumento de la desviación típica y de la pendiente de la recta de regresión, es decir, aumenta la variabilidad y disminuye la fiabilidad. El aumento del potencial redox se debe a la aportación de hipoclorito sódico durante la desinfección del agua.

Tabla 6.7. Percentiles 50 y 90 y desviación típica de la distribución normal del potencial redox en la ERA de Tossa de Mar.

| Año | Punto de control | Percentil 50 (mV) | Percentil 90 (mV) | s = desviación típica (mV) |
|---|---|---|---|---|
| 2009 | TDM1 | 136 | 206 | 54 |
| 2009 | TDM6 | 316 | 416 | 77 |

La ERA de Tossa de Mar dispone de una sonda de potencial redox incorporada en el mes de enero del año 2009. La sonda redox, situada en la salida del proceso de filtración, sustituyó a una sonda de cloro total utilizada hasta entonces. La sonda redox tiene un valor de consigna establecido de 260 mV. Este valor se ha establecido a partir de la experiencia. Cuando el potencial redox es superior a 260 mV se considera que el agua tiene aproximadamente 1-1,5 mg/l de cloro total y pasa directamente al proceso de desinfección con luz UV. Por el contrario, cuando el potencial redox es inferior a 260 mV el agua no entra en el proceso de desinfección con luz UV y se envía al medio marino mediante un emisario submarino. La sonda redox se utiliza como un sistema de control para asegurar que el agua regenerada contiene siempre una concentración mínima de cloro. Posteriormente, tras la desinfección con luz UV el agua pasa directamente a un depósito de agua regenerada de 700 $m^3$, en cuya salida se sitúa una sonda de cloro libre con una consigna establecida de 0,4 mg/l. El objetivo de esta sonda de cloro libre es asegurar que la totalidad del agua regenerada que se envía a los usuarios dispone de una concentración mínima de cloro; cuando la concentración registrada es menor a 0,4 mg/l se activa una dosificación de cloro en el propio depósito.

La medida del potencial redox se efectúa en la salida del depósito. Las observaciones anteriores explican que la mayor variabilidad del agua regenerada es consecuencia de que como mínimo ésta debe contener 0,4 mg/l de cloro libre, pues en caso contrario se

produce una cloración del agua que hace aumentar rápidamente su potencial redox. Se recuerda que el proceso de regeneración en esta ERA no es continuo, pues funciona en función del nivel de agua presente en el depósito y de la demanda de agua regenerada.

## 6.5 ESCHERICHIA COLI (*E. COLI*) Y COLIFORMES FECALES (CF)

La figura 6.5 muestra los valores de *E. coli* y CF obtenidos entre los años 2005 y 2009. La entrada en vigor del RD 1620/2007 en el año 2007 supuso un cambio en el indicador de medida. El estudio realizado considera ambos parámetros como equivalentes.

La figura 6.5 muestra el alto grado de ajuste de los datos experimentales a una línea recta e indica el comportamiento normal del parámetro en cuestión. La aplicación del test de Kolmogorov-Smirnov (K-S) (ver Anejo 1 B.5) confirma la observación visual realizada y permite afirmar que los CF y la *E. coli* se ajustan en todos los años y en todos los puntos de control a una distribución logarítmica-normal. Conviene recordar que la aplicación del test de K-S y la posterior determinación de la recta de regresión se realiza con aquellos datos que son distintos de cero. Los valores nulos indican ausencia de *E. coli* o de CF.

La figura 6.5 y la tabla 6.8 muestran el progreso experimentado por el proceso de regeneración. La evolución del proceso de regeneración ha sido progresivamente positiva, aumentando a lo largo de los años el porcentaje de muestras con ausencia de *E. coli* y CF. El proceso de regeneración consigue que el 100% de las muestras presenten ausencia de *E. coli* en los años 2008 y 2009. Conviene indicar que el proceso de regeneración incorporó un sistema de desinfección con luz UV en septiembre del año 2008 y una sonda de potencial redox en enero del año 2009. No obstante, la progresión experimentada anteriormente a la incorporación de ambos equipos era también espectacular. La tabla 6.5 también muestra el efluente secundario de los años 2008 y 2009 experimenta una destacable mejoría (disminuye el percentil 50 y 90), en consonancia con los parámetros físico-químicos estudiados en los apartados anteriores.

Tabla 6.8. Percentiles 50 y 90 y desviación típica de la distribución normal de la *E.coli* y CF en la ERA de Tossa de Mar.

| Año | Punto de control | Percentil 50 (ulog/100mL) | Percentil 90 (ulog/100mL) | s = desv. típica (ulog/100mL) |
|---|---|---|---|---|
| 2009 | TDM1 | 4,1 | 5,16 | 0,83 |
| 2009 | TDM6 | ND | ND | 0 |
| 2008 | TDM1 | 4,33 | 5,69 | 1,06 |
| 2008 | TDM6 | ND | ND | 0 |
| 2007 | TDM1 | 4,89 | 5,99 | 0,86 |
| 2007 | TDM6 | ND | ND | 0 |
| 2006 | TDM1 | 4,34 | 5,94 | 1,25 |
| 2006 | TDM6 | ND | ND | 2,69 |
| 2005 | TDM1 | 4,96 | 5,93 | 0,76 |
| 2005 | TDM6 | ND | 0,51 | 2,54 |

ND: no detectable

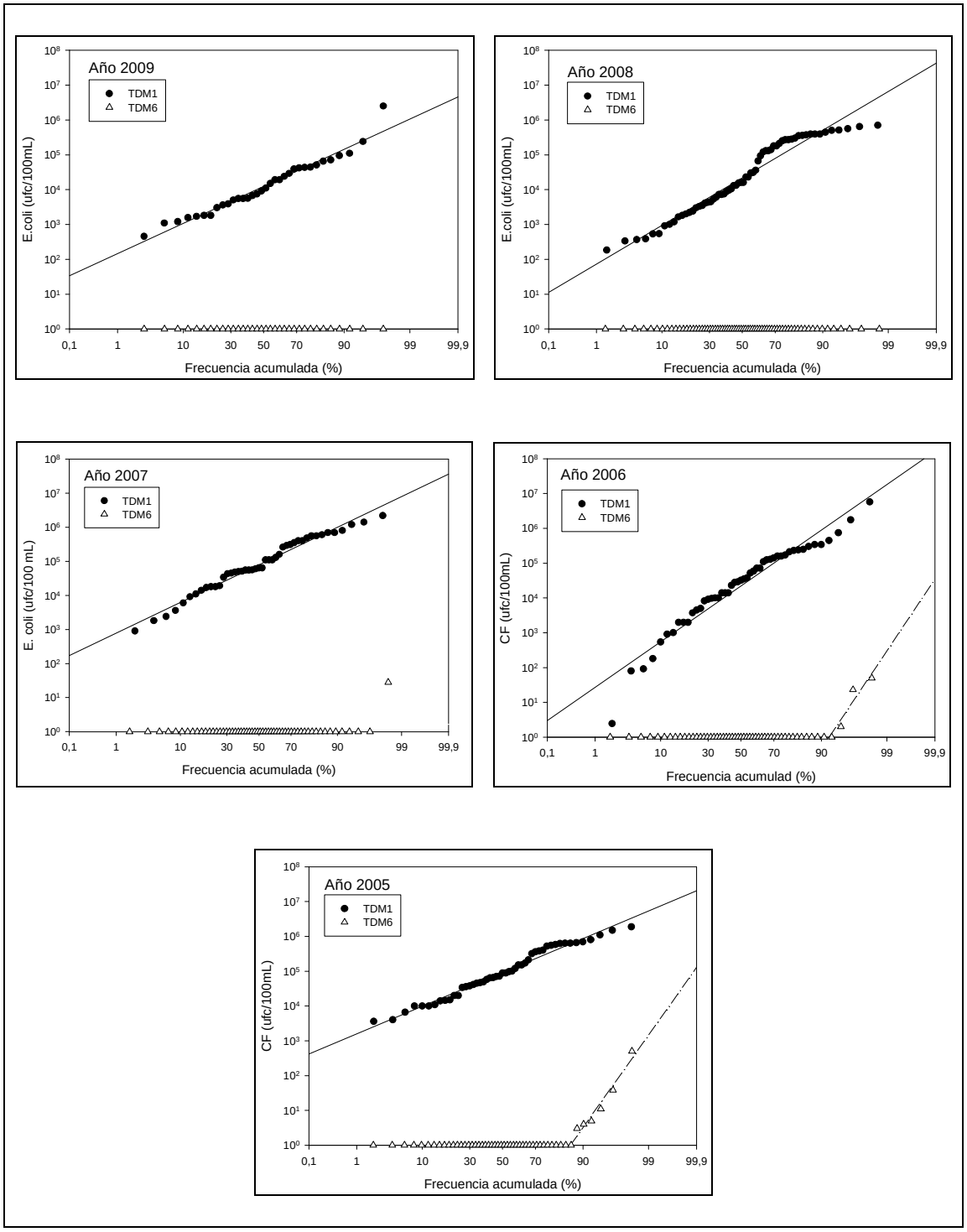



Figura 6.5. Distribución de probabilidad de CF y *E. coli* durante los años comprendidos entre 2005 y 2009 en la ERA de Tossa de Mar.

La figura 6.5 y la tabla 6.8 muestran que aquellos años que presentan valores de presencia de *E. coli* en el agua regenerada sufren un aumento de la variabilidad con el proceso de regeneración (descenso de la fiabilidad).

El RD 1620/2007 fija un valor límite máximo del percentil 90 para el uso actual 1.2 de 200 ufc/100 ml y para el futuro uso 1.1 de 0 ufc/100ml. La tabla 6.9 muestra que los límites del uso 1.2 se cumplen claramente y los límites del uso 1.1 se cumplen en todos

los años estudiados excepto en el año 2005. En conclusión, el agua regenerada presenta una calidad extraordinaria en cuanto a *E. coli* y cumple claramente el uso 1.1 desde el año 2006. Por lo tanto, la ampliación de los usos frente a la *E. coli* podría realizarse inmediatamente de una forma enormemente fiable.

Tabla 6.9. Cumplimiento del RD 1620/2007 en términos de *E. coli* en la ERA de Tossa de Mar.

| **Año** | 2009 | 2008 | 2007 | 2006 | 2005 |
|---|---|---|---|---|---|
| **Cumple Uso 1.1** | Sí | Sí | Sí | Sí | No |
| **Cumple Uso 1.2** | Sí | Sí | Sí | Sí | Sí |

## 6.6 CLOSTRIDIUM SULFITO-REDUCTORES (CSR)

La figura 6.6 muestra los valores de CSR obtenidos entre los años 2005 y 2009. El buen ajuste de los datos muestreados a una línea recta (figura 6.6) indica el comportamiento normal del parámetro CSR. La posterior aplicación del test estadístico de Kolmogorov-Smirnov (ver Anejo 1 B.6) asegura dicha hipótesis de normalidad.

La figura 6.6 y la tabla 6.10 muestran que el proceso de regeneración produce una disminución del percentil 50 y 90 de CSR. Si se compara en términos de la media, se observa una disminución de aproximadamente dos o incluso más unidades logarítmicas (un factor 100) durante todos los años estudiados. El percentil 90 alcanza una reducción de aproximadamente 2 unidades logarítmicas (un factor 100) en todos los años estudiados excepto en el 2007. La progresión experimentada en la calidad del agua es excelente, consiguiendo la inactivación total del percentil 90 de los CSR en el año 2009. La observación únicamente del efluente secundario pone de manifiesto que no existen grandes diferencias entre los años representados, pues ambos percentiles varían en el mismo rango de valores. Por contra, el agua regenerada sí experimenta una mejoría a lo largo de los años, principalmente en términos del percentil 90, permitiendo que en el año 2009 se alcance el valor de 'no detectable'.

Tabla 6.10. Percentiles 50 y 90 y desviación típica de la distribución normal de CSR en la ERA de Tossa de Mar.

| **Año** | **Punto de control** | **Percentil 50 (ulog/100mL)** | **Percentil 90 (ulog/100mL)** | **s = desv. típica (ulog/100mL)** |
|---|---|---|---|---|
| 2009 | TDM1 | 2,93 | 3,62 | 0,54 |
| 2009 | TDM6 | ND | ND | 0 |
| 2008 | TDM1 | 2,89 | 3,71 | 0,64 |
| 2008 | TDM6 | 0,37 | 1,74 | 1,07 |
| 2007 | TDM1 | 3,14 | 3,69 | 0,43 |
| 2007 | TDM6 | 0,84 | 3,10 | 1,76 |
| 2006 | TDM1 | 2,96 | 4,45 | 1,16 |
| 2006 | TDM6 | 0,42 | 2,00 | 1,23 |
| 2005 | TDM1 | 3,55 | 4,31 | 0,59 |
| 2005 | TDM6 | 1,79 | 2,73 | 0,73 |

ND: no detectable

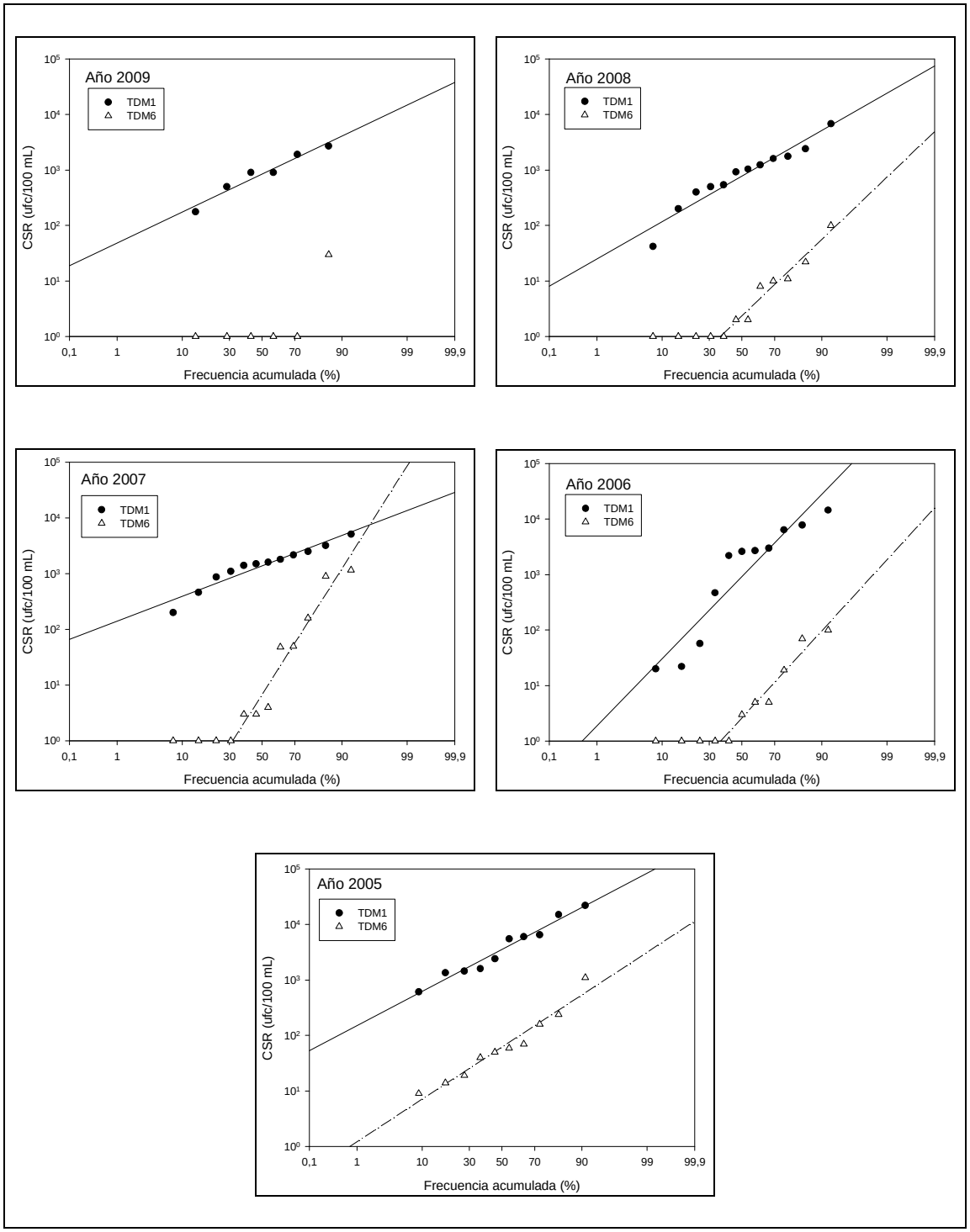



Figura 6.6. Distribución de probabilidad de CSR durante los años comprendidos entre 2005 y 2009 en la ERA de Tossa de Mar.

El proceso de regeneración produce un aumento de la pendiente de la recta de regresión y de la desviación típica en todos los años estudiados. Por lo tanto, produce un aumento de variabilidad y un descenso de fiabilidad. El aumento de variabilidad es muy reducido durante los años 2005 y 2006, y mucho más pronunciado durante los años 2007 y 2008.

Un aspecto claramente visible en la figura 6.6 es la mejora producida a lo largo de los años en cuanto al número y porcentaje de muestras con ausencia de CSR. La tabla 6.11

muestra dichos porcentajes. La mejora más destacable se produce en los 6 primeros meses del año 2009. Los CSR son un excelente indicador de la eficiencia de la luz UV. La experiencia indica que el poder de inactivación de los CSR mediante una desinfección con cloro es inferior a la producida mediante la desinfección con luz UV, y que una desinfección con cloro únicamente permite inactivar, en el mejor de los casos, 2 órdenes de magnitud aproximadamente. Todo ello permite concluir que la obtención del 84% de muestras con ausencia de CSR se debe a la incorporación del proceso de desinfección con luz UV, y a la desinfección combinada de la luz UV y el cloro.

Tabla 6.11. Porcentaje de muestras con ausencia de CSR en la ERA de Tossa de Mar.

| **Año** | 2009 | 2008 | 2007 | 2006 | 2005 |
|---|---|---|---|---|---|
| **% de muestras con ausencia de CSR** | 84 | 42 | 34 | 45 | 0 |

## 6.7 RELACIÓN ENTRE TURBIEDAD Y MATERIA EN SUSPENSIÓN

La figura 6.7 muestra el análisis gráfico comparativo de las parejas de resultados experimentales de turbiedad y MES entre los años 2005 y 2009. El eje de abcisas varía entre 0 y 12 UNT para observar una representación más clara. Por ello, en algunos años existen dos o tres valores del efluente secundario superiores a ese valor que no aparecen en la representación pero que no influyen en ninguna observación o conclusión realizada.

La figura 6.7 muestra que a pesar de la dispersión de los datos, existe una proporción más clara entre la MES y la turbiedad del efluente secundario y del agua regenerada que en la ERA de Castell-Platja d'Aro, en la cual la dispersión de datos era muy elevada. La figura 6.7 permite observar un cierto ajuste de los datos del efluente secundario y del agua regenerada a las rectas de regresión trazadas, aunque con cierta dispersión. La figura 6.7 muestra la tendencia cada vez más marcada de ajuste de los datos a ambas rectas a lo largo de los años, principalmente del efluente secundario.

La figura 6.7 muestra que los valores del agua regenerada se concentran en un rango de valores aproximado de 0-6 mg/l de MES y 0-4 UNT de turbiedad. Esta observación indica la gran mejoría producida respecto al efluente secundario, pues sus valores aparecen mucho más dispersos en la gráfica y alcanzando valores muy superiores a los anteriores.

El RD 1620/2007 fija unos límites máximos para el uso 1.1 de 2 UNT de turbiedad y 10 mg/L de MES. Esta limitación se representa en la figura 6.7 con una línea discontinua. Se recuerda que el uso 1.1 es el más restrictivo del RD y por ello, el cumplimiento de este uso implica automáticamente el cumplimiento de los límites aplicables al resto de usos. La figura 6.7 muestra como todos aquellos datos que no cumplen los límites establecidos por el RD pertenecen a los valores de la turbiedad. Este hecho, que ya se observó cuando se estudió cada uno de ambos parámetros individualmente, indica que la turbiedad es el factor limitante del cumplimiento de los límites de este uso. Por ello, se puede afirmar que una prioridad del proceso de regeneración debe ser asegurar la fiabilidad de la turbiedad efluente. Los valores límites establecidos para el uso actual 1.2 son de 10 UNT de turbiedad y 20 mg/L de MES. Estos valores son mucho menos

restrictivos que los anteriores y se cumplen holgadamente en el efluente de la ERA de Tossa de Mar.

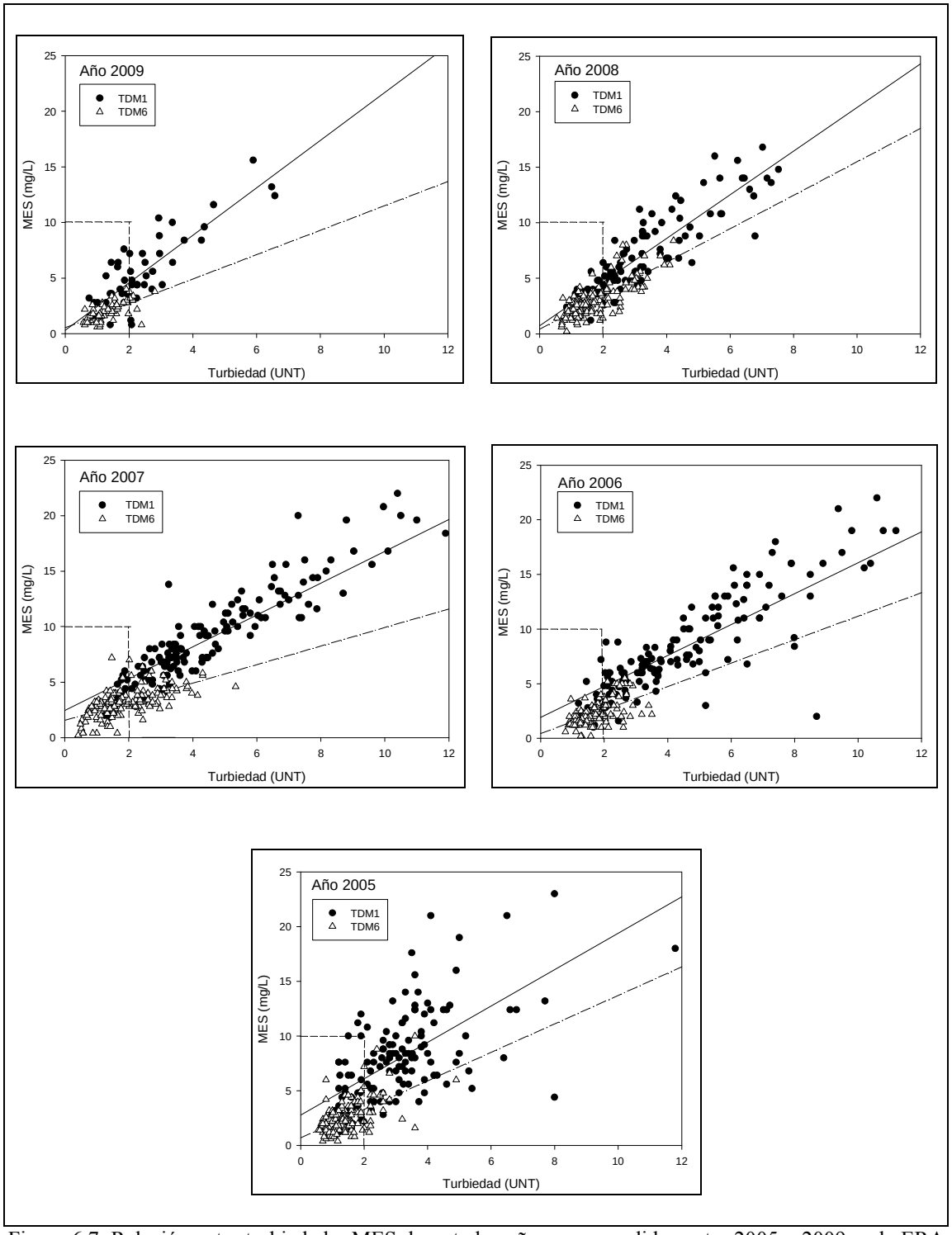



Figura 6.7. Relación entre turbiedad y MES durante los años comprendidos entre 2005 y 2009 en la ERA de Tossa de Mar.

La tabla 6.12 muestra el porcentaje de muestras que no cumplen los límites del uso 1.1 fijados por la normativa. Conviene destacar la gran mejoría producida durante los años

2008 y 2009 debido a la entrada en fase de prueba de la nueva red de agua regenerada y al afán del personal de explotación de la ERA por conseguir el cumplimiento del uso 1.1 del RD.

Tabla 6.12. Porcentaje de muestras que no cumplen los límites de MES y de turbiedad para el uso 1.1 del RD 1620/2007 en la ERA de Tossa de Mar.

| **Año** | 2009 | 2008 | 2007 | 2006 | 2005 |
|---|---|---|---|---|---|
| **% de muestras que no cumplen el uso 1.1** | 8 | 20 | 40 | 30 | 16 |

La tabla 6.13 muestra la concentración límite de MES que deja por encima de él las muestras con turbiedad superior a 2 UNT. Es decir, es el valor de la MES con igual capacidad restrictiva que 2 UNT de turbiedad. La tabla 6.13 muestra que el valor discriminatorio de la MES se sitúa entre 2,8 y 4,0 mg/L. Por otra parte, el límite de detección del método convencional de medida de la MES se sitúa entre 3-4 mg/L. Por lo tanto, en esta ERA se podría plantear una disminución de la frecuencia de control de la MES, e incluso la no medición de la MES. De este modo bastaría sólo con medir la turbiedad. Este hecho comportaría un gran ahorro técnico-económico, pues la determinación del contenido de MES es costoso (en tiempo y en dinero) en comparación con la medición de turbiedad, que puede realizarse fácilmente con un turbidímetro de forma continua y automática. Sin embargo, el proceso de determinación de la turbiedad es mucho más sensible que el de la MES y deberá tenerse un especial control de la calibración del turbidímetro.

Tabla 6.13. Valor límite de MES con la misma restrictividad que 2 UNT en la ERA de Tossa de Mar.

| **Año** | 2009 | 2008 | 2007 | 2006 | 2005 |
|---|---|---|---|---|---|
| **Límite restrictivo de MES (mg/L)** | 2,8 | 3,6 | 3,2 | 3,0 | 4,0 |

## 6.8 RELACIÓN ENTRE *E. COLI* – CF Y TRANSMITANCIA 254 NM

La figura 6.8 muestra la relación existente entre *E. coli* o CF y la transmitancia a 254 nm. La representación gráfica marca mediante una cruz aquellos valores de *E. coli* o CF cuya transmitancia es inferior al 60%, valor mínimo recomendado por las directrices internacionales para asegurar la eficiencia de un proceso de desinfección con luz UV. Conviene indicar que los valores de la transmitancia a 254 nm corresponden al punto de control TDM6.

La figura 5.8 muestra que la gran mayoría de datos experimentales tienen valores de transmitancia superiores al 60%. El año 2009 registra un 4% de muestras con transmitancia inferior al 60%, tanto en el efluente secundario como en el agua regenerada. Los años 2005, 2006, 2007 y 2008 registran unos porcentajes en el efluente secundario del 17%, 23%, 48% y 17% respectivamente, y en el agua regenerada de 17%, 25%, 42% y 19% respectivamente.

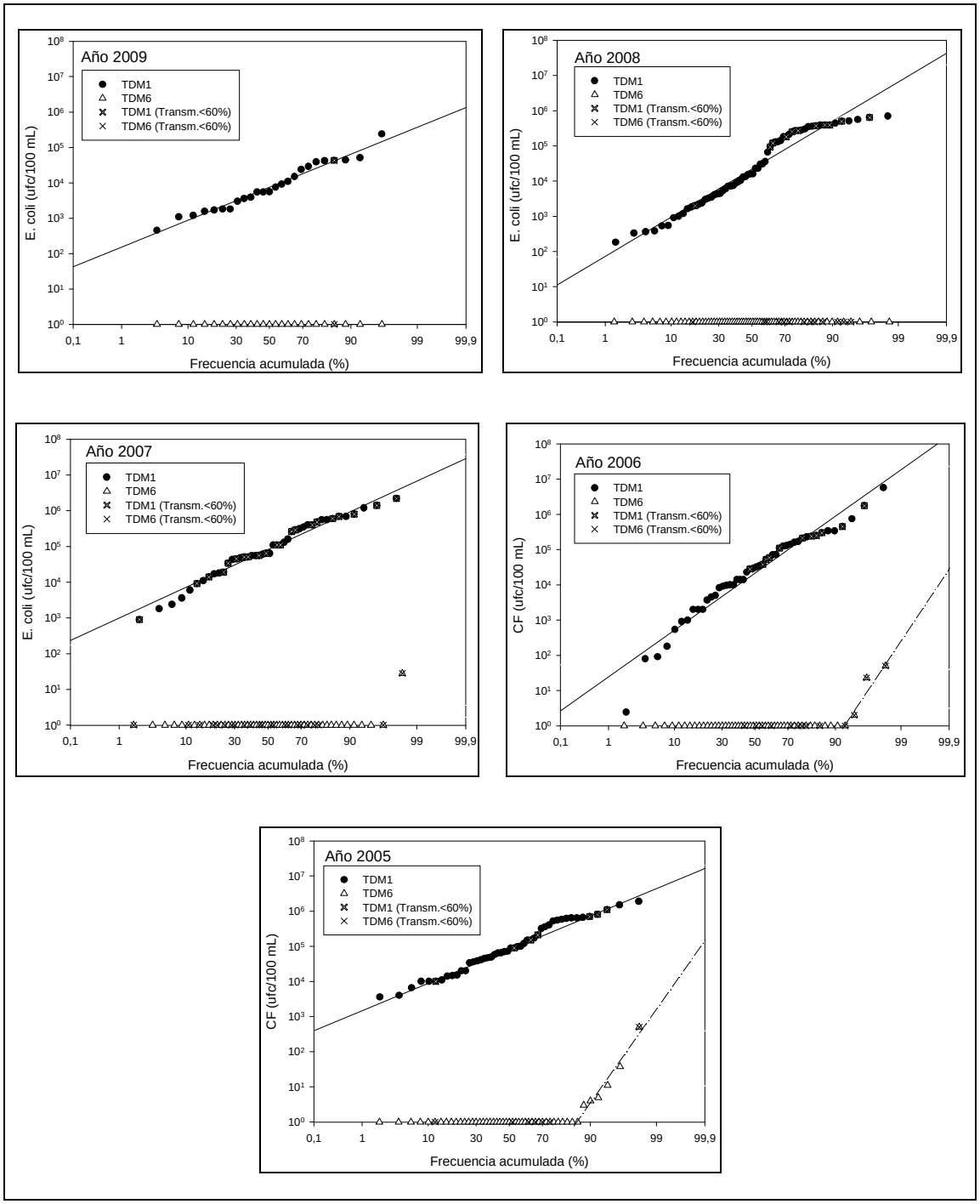



Figura 6.8. Relación entre *E. coli*-CF y transmitancia a 254 nm durante los años comprendidos entre 2005 y 2009 en la ERA de Tossa de Mar.

La observación del efluente secundario (figura 6.8) muestra como en los años 2006 y 2008 la mayoría de los valores de transmitancia 254 nm inferior al 60% se corresponden con valores altos de *E. coli* o CF, aunque también aparecen algunos valores con transmitancia superior al 60%. Por otra parte, el análisis del año 2007 muestra como los valores con transmitancia inferior al 60% se corresponden indistintamente con valores elevados de *E .coli* y con valores reducidos, incluso el valor más bajo de concentración de *E. coli* presenta transmitancia inferior al 60%. De esta forma, la relación obtenida anteriormente en el análisis de los años 2006 y 2008 se rechaza. En el año 2005, a pesar del bajo número de datos con transmitancia inferior a 60%, estos se distribuyen

principalmente en la parte superior y central de la recta de regresión. En el año 2009 la obtención de un solo dato con transmitancia inferior al 60% impide un correcto análisis de este apartado.

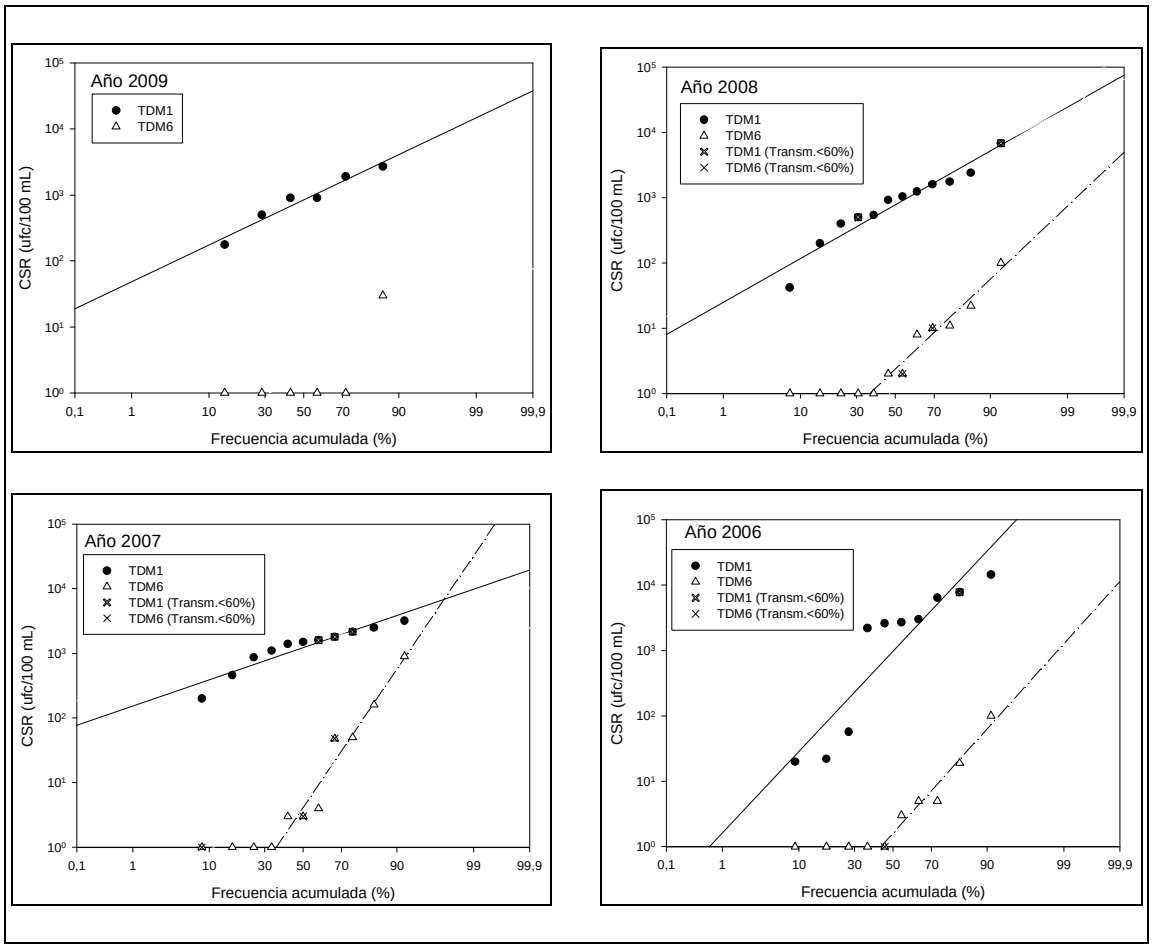
El análisis del agua regenerada no muestra relación alguna entre ambos parámetros porque a pesar del reducido número de muestras que indican presencia de *E. coli*, estas tienen un comportamiento opuesto en los años 2005 y 2006.

Los análisis anteriores permiten afirmar que no existe relación alguna entre los valores de *E. coli* o CF y los de transmitancia a 254 nm.

## 6.9 RELACIÓN ENTRE CSR Y TRANSMITANCIA 254 NM

La figura 6.9 muestra la relación existente entre el contenido de CSR y la transmitancia a 254 nm. El proceso seguido para su representación e interpretación es el mismo que el utilizado en el apartado 6.8.

La figura 6.9 muestra que en aquellos años en los que existen muestras con transmitancia inferior al 60% en el efluente secundario, éstas se corresponden generalmente con valores de CSR elevados. En cambio, el análisis del agua regenerada muestra que los valores con transmitancia inferior al 60% corresponden indistintamente tanto con valores bajos como con valores elevados de CSR.



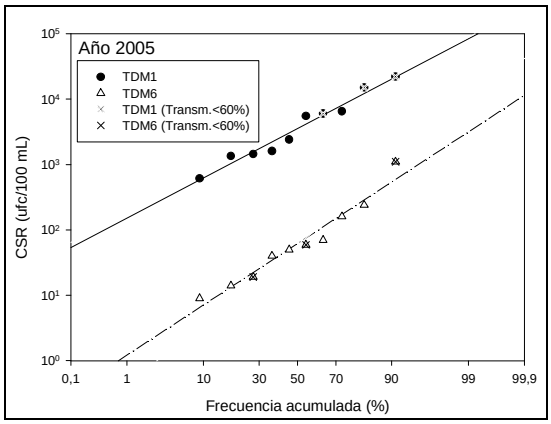



Figura 6.9. Relación entre CSR y transmitancia a 254 nm durante los años comprendidos entre 2005 y 2009 en la ERA de Tossa de Mar.

El estudio de este parámetro permite concluir que, a falta de un mayor número de muestras para realizar un análisis más exhaustivo y preciso, se puede considerar que ambos parámetros no mantienen relación alguna entre ellos.

## 6.10 RELACIÓN ENTRE LA INACTIVACIÓN DE *E.COLI* O CF Y TRANSMITANCIA 254 NM

La figura 6.10 muestra la relación existente entre la inactivación absoluta de *E. coli* y CF producida por el proceso de regeneración, y la transmitancia a 254 nm. La transmitancia a 254 nm del agua se ha medido el punto TDM6.

La figura 6.10 muestra una relación entre la inactivación de *E. coli* o CF y la transmitancia a 254 nm totalmente ilógica en todos los años representados, pues cabe esperar que a mayor transmitancia del agua la eficiencia de la desinfección sea mayor. La figura 6.10 muestra también una alta dispersión de los datos en los diferentes años representados, disminuyendo notablemente la dispersión en los años 2008 y 2009; el ajuste de los datos representados a la recta de regresión es claro, ordenado y satisfactorio en los años 2008 y 2009.

La figura 6.11 muestra la relación existente entre la inactivación de *E. coli* y CF normalizada (relativa) producida por el proceso de regeneración y la transmitancia a 254 nm. La figura 6.11 muestra que el proceso de regeneración inactiva casi la totalidad de la *E. coli* y CF con independencia de la transmitancia del agua. La inactivación de *E. coli* es total en los años 2008 y 2009. El resultado obtenido es consecuencia de la adición de dosis suficientes de cloro para inactivar la totalidad de los indicadores. No obstante, la entrada en funcionamiento de la sonda de potencial redox en septiembre del año 2008 y del sistema de desinfección con luz UV en enero del año 2009 ha facilitado la consecución de la inactivación total de los indicadores.

El estudio de la figura 6.11 permite entender la relación mostrada por la figura 6.10. El aumento de la inactivación a medida que disminuye la transmitancia se debe a que el proceso de regeneración asegura la inactivación de todos los indicadores con

independencia de la transmitancia del agua. Por lo tanto, es evidente que al producirse prácticamente la inactivación total de los indicadores, la inactivación será mayor cuanto mayor sea la concentración de *E. coli* o CF del agua afluente que, como se ha estudiado anteriormente, corresponden generalmente con valores de transmitancia inferiores al 60%.

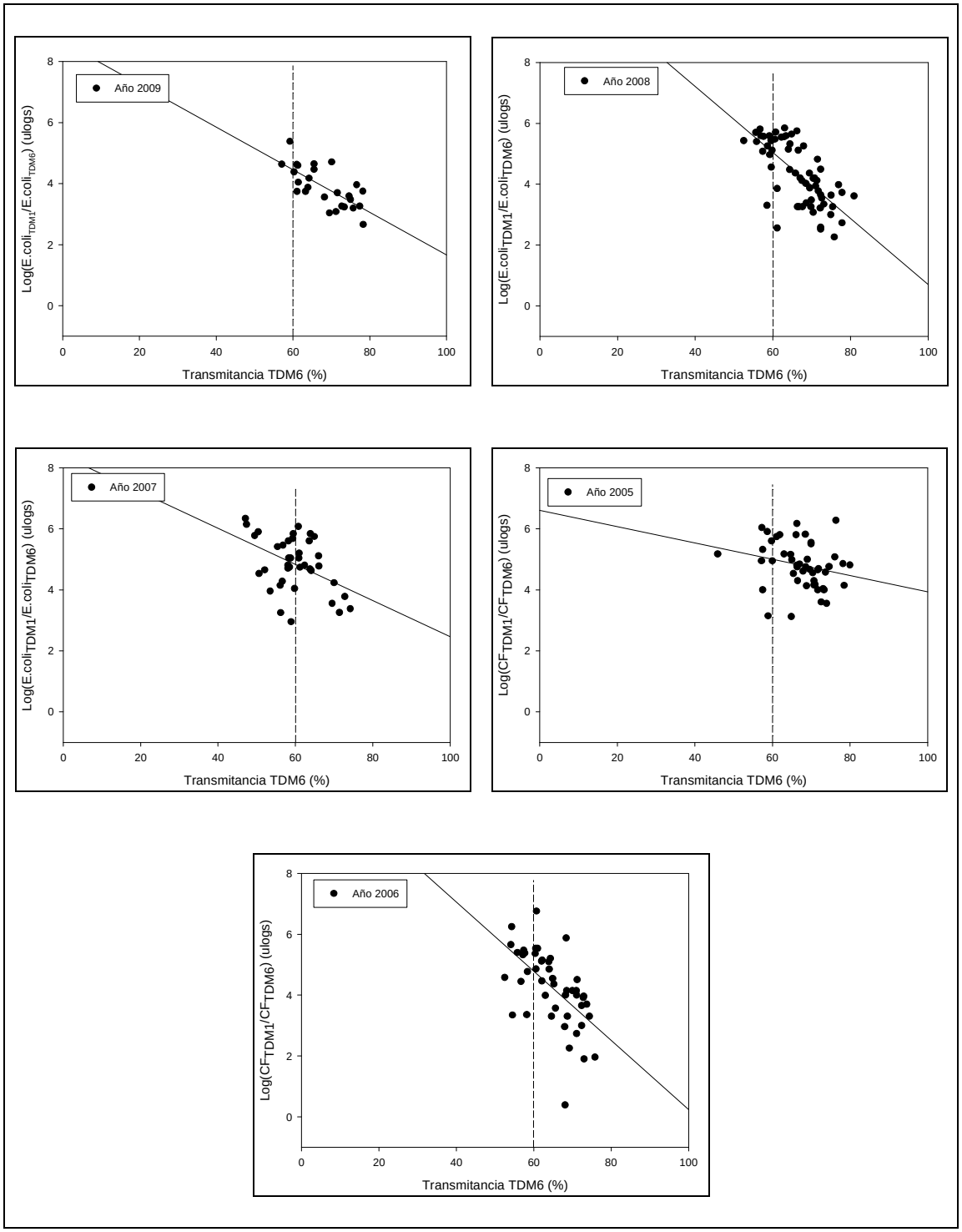



Figura 6.10. Relación entre la inactivación absoluta de *E. coli* y CF producida por el proceso de regeneración y la transmitancia a 254 nm durante los años comprendidos entre 2005 y 2009 en la ERA de Tossa de Mar.

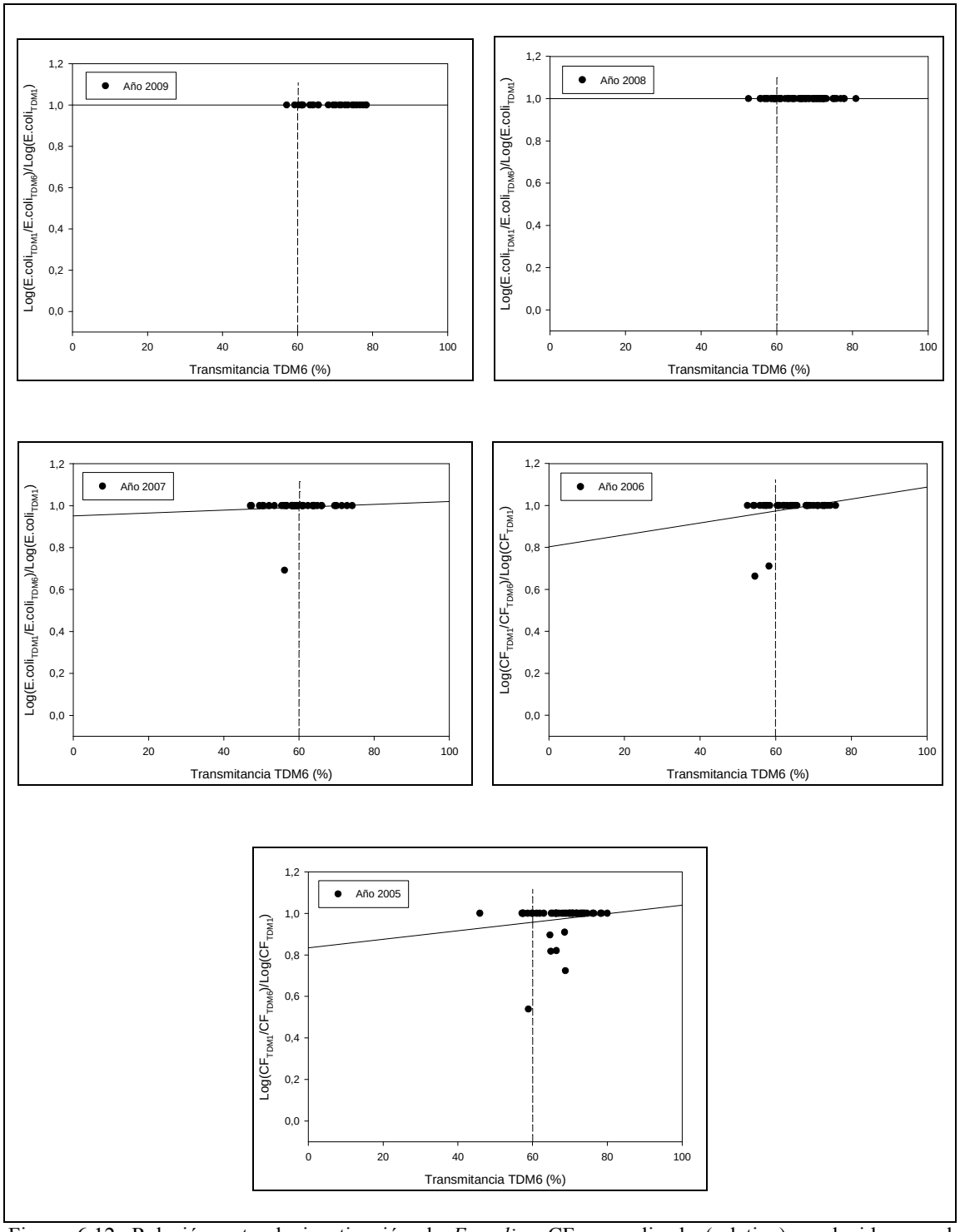



Figura 6.12. Relación entre la inactivación de *E. coli* y CF normalizada (relativa) producida por el proceso de regeneración y la transmitancia a 254 nm durante los años comprendidos entre 2005 y 2009 en la ERA de Tossa de Mar.

## 6.11 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Las conclusiones y recomendaciones obtenidas en este capítulo son:

1. El proceso de regeneración de agua aumenta la fiabilidad (disminuye la variabilidad) de la MES, la turbiedad y la transmitancia a 254 nm. El potencial

redox sufre una disminución de fiabilidad. El contenido de *E. coli* alcanza una fiabilidad máxima en los años 2007, 2008 y 2009, pues todos sus valores indican ausencia de *E. coli* (excepto un valor en el 2007). El contenido no nulo de CSR sufre una disminución de fiabilidad en todos los años estudiados, excepto en el año 2009.

2. La distribución normal no es estrictamente aplicable para la evaluación de los parámetros físico-químicos del agua, cuando se analiza una larga serie de datos experimentales (superior a 200), debido a su capacidad para detectar cambios bruscos o episódicos de la calidad del agua, que se manifiestan principalmente en los desajustes de las 'colas' de la distribución. El desajuste pronunciado se produce en percentiles superiores al percentil 90, siendo la distribución normal apropiada para determinar con suficiente precisión los percentiles centrales y el percentil 90. El proceso de regeneración mejora el ajuste de los datos representados a la recta de regresión.

3. La entrada en servicio (fase de prueba) de la nueva red de agua regenerada de Tossa de Mar en julio del año 2008 supuso una enorme motivación para la mejora de la calidad del agua depurada y del agua regenerada. Las mejoras en cuanto a MES, turbiedad, transmitancia, *E. coli* y CSR son significativas durante los años 2008 y principalmente durante el 2009, tanto en el efluente secundario como en el agua regenerada.

4. La incorporación de un sistema de desinfección con luz UV en septiembre del año 2008 ha permitido aumentar la inactivación del contenido de CSR. La desinfección conjunta de luz UV y cloro permiten disminuir notablemente los percentiles 50 y 90 del agua afluente (no detectable en el año 2009) y el porcentaje de muestras con ausencia de CSR (84% en el año 2009 frente al 42% en el año 2008). La inactivación máxima del contenido de CSR mediante desinfección con cloro únicamente consigue, como máximo, una reducción de 2 órdenes de magnitud (factor 100), mientras la desinfección conjunta de luz UV y cloro permite inactivar más de 3 órdenes de magnitud (factor 1000).

5. El análisis conjunto de la MES y la turbiedad muestra que el parámetro limitante para la evaluación de la calidad del agua en el proceso de regeneración es la turbiedad y por lo tanto, la prioridad principal del proceso de regeneración debe ser asegurar la fiabilidad de la turbiedad. La incorporación de esta prioridad en el año 2009 permite cumplir durante los seis primeros meses de dicho año los límites correspondientes a la turbiedad para el uso 1.1.

6. El análisis conjunto de la MES y la turbiedad muestra que el límite reglamentario correspondiente a la MES coincide con el límite de detección del método convencional de medida de la MES. Por lo tanto, en esta ERA se podría plantear una disminución de la frecuencia de control de la MES, e incluso bastaría sólo con medir la turbiedad. Esto supondría un considerable ahorro técnico-económico, al ser el ensayo de la turbiedad mucho más sencillo y económico de realizar. En este último caso, deberá tenerse un especial control de la calibración del turbidímetro.

7. La incorporación de una sonda de potencial redox situada en el punto de salida del proceso de filtración actúa eficazmente como un sistema de control para asegurar

que el agua regenerada contiene siempre una concentración mínima de cloro. La utilización de sondas redox permite un ahorro importante en la adición de cloro y presenta un coste de mantenimiento muy inferior frente a las sondas de cloro tradicionales.

8. Es recomendable aumentar la dosis de cloro utilizada en el punto de control CPA1 con el objetivo de disminuir la cantidad de agua que ha sido tratada por el proceso de coagulación-floculación, decantación y filtración y que posteriormente se envía al mar si no cumple los valores consigna de potencial redox. Para ello, es recomendable incorporar una mecanismo de retroalimentación automática entre la dosificación de cloro y la sonda de potencial redox ("feedback"), como el utilizado en la ERA de Castell-Platja d'Aro.

9. El agua regenerada satisface los valores límite fijados para el uso actual 1.2 del RD 1620/2007 durante todos los años estudiados.

10. El agua regenerada satisface los valores límite fijados para el uso 1.1 del RD 1620/2007 durante los seis primeros meses del año 2009. Los límites fijados por el uso 1.1 del RD correspondientes a la MES se cumplen en todos los años estudiados, los límites correspondientes al contenido de *E. coli* se cumplen desde el año 2006 (incluido) y los límites en cuanto a turbiedad se cumplen únicamente en el año 2009.

11. Los resultados de la ERA de Tossa de Mar permiten afirmar que el proceso de regeneración es suficientemente fiable y eficiente como para satisfacer la calidad exigida al uso 1.1 del RD 1620/2007. Los niveles de fiabilidad alcanzados deben permitir que las Autoridades Competentes concedan la autorización necesaria para poder utilizar el agua regenerada en el uso 1.1.

# CAPÍTULO 7

# EFICACIA Y FIABILIDAD DE LA ERA DE LLORET DE MAR

En este capítulo se procede al estudio de la eficacia y la fiabilidad del proceso de regeneración de agua llevado a cabo en la ERA de Lloret de Mar. El estudio se realiza a partir de los datos experimentales obtenidos entre los años 2005 y 2009, ordenados de acuerdo con el parámetro de calidad en cuestión. Los datos del año 2009 abarcan únicamente los seis primeros meses de dicho año. Conviene recordar que el proceso de regeneración actual (coagulación-floculación-cloración, decantación lamelar, filtración y desinfección con luz UV) entró en funcionamiento en el mes de junio del año 2008. Hasta esa fecha, el proceso de regeneración consistía simplemente en un proceso de cloración del efluente secundario.

Los datos del muestreo facilitados por el Consorci de la Costa Brava permiten observar que las muestras tomadas del efluente secundario de la MES, la transmitancia y la turbiedad no coinciden con los días de la toma de muestras del agua regenerada. La planificación del muestreo deberá ser más uniforme con una simultaneidad mucho más armónica, semejante a la utilizada en las ERA de Castell-Platja d'Aro y de Tossa de Mar, con la finalidad de obtener una buena base de datos para proceder a su correcto análisis.

## 7.1 MATERIA EN SUSPENSIÓN (MES)

La figura 7.1 muestra los valores de la MES obtenidos entre los años 2005 y 2009. Los años 2007 y 2008 no muestran dos y cuatro valores respectivamente del efluente secundario por ser superiores a los límites establecidos en los ejes de ordenadas representados. Los datos no visibles son utilizados para la obtención de la recta de regresión, con el fin de caracterizar el proceso de regeneración de un modo mucho más realista.

La figura 7.1 muestra un ajuste inadecuado de los datos experimentales a la recta de regresión debido principalmente al desajuste producido en las 'colas' de la distribución. La parte central de la distribución muestra elevados desajustes en el efluente secundario del año 2008 como consecuencia de la existencia de 4 valores muy elevados de la MES (superiores a 30 mg/L) que distorsiona la recta de regresión trazada. Estos 4 valores son anormalmente superiores al resto y probablemente se deban a la situación más crítica provocada por el periodo de obras de ampliación de la ERA. El test de Kolmogorov-Smirnov (ver Anejo 1 C.1) confirma las observaciones realizadas, pues únicamente el agua regenerada del año 2009 se ajusta a una distribución normal. El alto grado de desajuste observado en determinados efluentes y años no impide que la representación gráfica pueda utilizarse para estimar los percentiles 50 y 90 de la distribución.

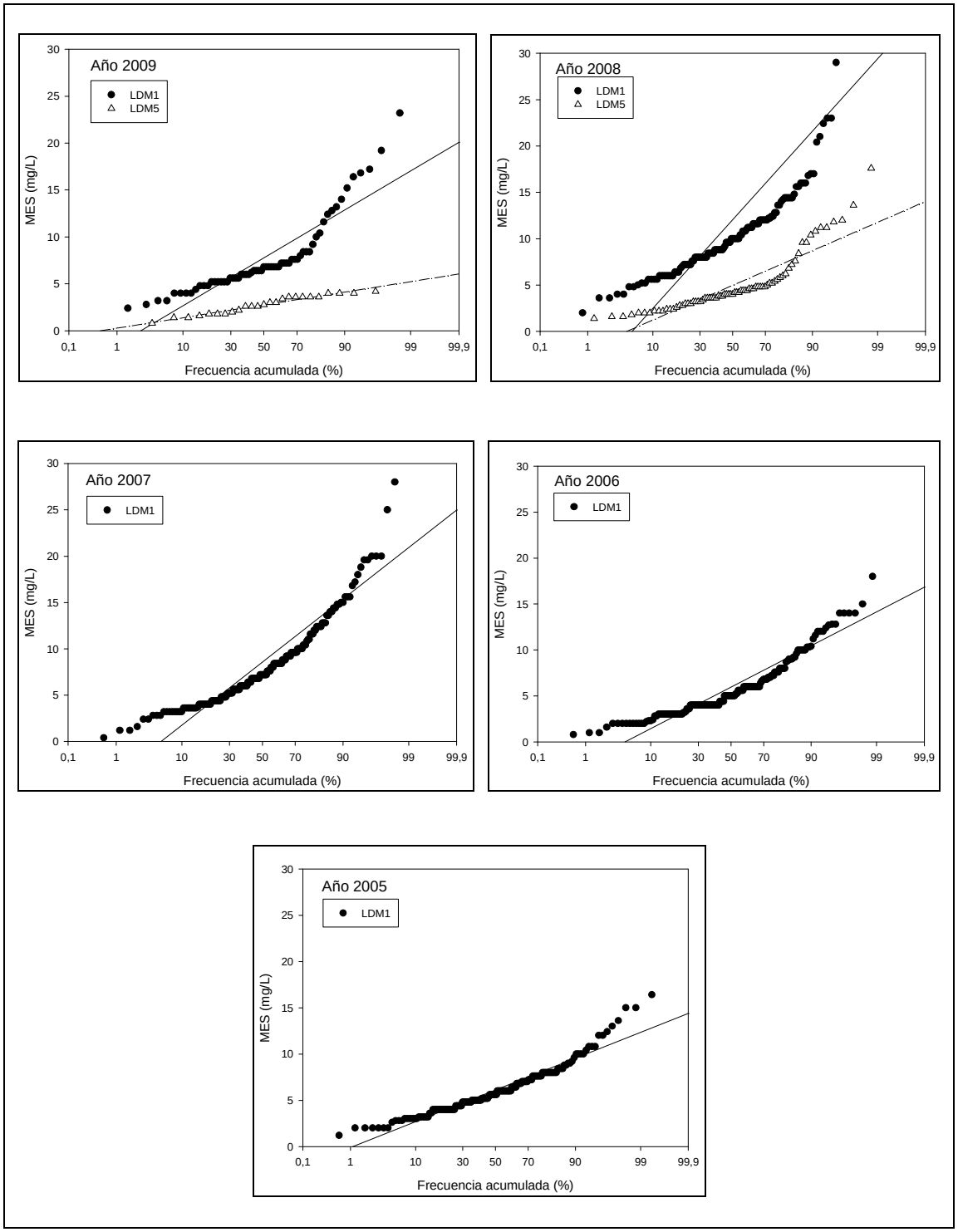



Figura 7.1. Distribución de probabilidad de la MES durante los años comprendidos entre 2005 y 2009 en la ERA de Lloret de Mar.

El número de datos experimentales es de 160 valores aproximadamente durante los años 2005, 2006 y 2007. El número de valores del efluente secundario y del agua regenerada es de 120 y 75 respectivamente en el año 2008, mientras que en el año 2009 es de 60 y 25 respectivamente. Estas consideraciones permiten afirmar que la distribución normal no es estrictamente aplicable cuando se analiza una larga serie de datos experimentales, debido a su capacidad para detectar cambios bruscos o episódicos de la calidad del agua, que se manifiestan principalmente en los desajustes de las 'colas' de la

distribución. Además, las obras de ampliación de la EDAR y la aplicación de un nuevo proceso de regeneración en el año 2008 produce un elevado desajuste y una alta dispersión de los datos debido a la irregularidad de los resultados: coexisten valores muy elevados de la MES procedentes de los meses de obras de ampliación de la planta con valores mucho menores de la debido al funcionamiento del nuevo proceso de regeneración.

La figura 7.1 muestra que el nuevo proceso de regeneración mejora el ajuste de los datos representados a la recta de regresión, especialmente en el año 2009. La normalización del funcionamiento del proceso de regeneración en el año 2009 produce un ajuste de los datos muestreados a la recta de regresión muy adecuado.

Las muestras del efluente secundario (figura 7.1) con valores de MES muy superiores al resto (incluso aquellos que no aparecen en la representación) se deben al proceso conocido como "bulking". El proceso de bulking o abultamiento de fango consiste en una proliferación excesiva de bacterias filamentosas que impide que el fango pueda separarse adecuadamente del agua depurada en el decantador secundario. Este es uno de los mayores problemas a los que tienen que hacer frente las plantas de tratamiento biológico. Las principales causas de aparición del bulking filamentoso es la baja relación entre las concentraciones de sustrato y microorganismos, bajo nivel de oxígeno, presencia de sulfuros, deficiencia de nutrientes y bajo pH. Los principales efectos producidos por el "bulking" son una menor compactación del fango y la aparición de espumas. La disminución de la densidad del fango hace que éste pueda aparecer en el agua efluente de la planta si la altura del manto de lodos en el decantador aumenta excesivamente. Para evitarlo, es necesario disminuir la concentración de sólidos suspendidos en el reactor biológico, reducir la carga hidráulica o utilizar un mayor volumen para la decantación.

La figura 7.1 y la tabla 7.1 permiten observar que el proceso de regeneración de agua produce una disminución de los percentiles 50 y 90 de la MES durante los años 2008 y 2009. El proceso de regeneración produce también una disminución de la pendiente y de la desviación típica de la recta de regresión, es decir, aumenta la fiabilidad. El aumento de fiabilidad es especialmente bueno en el año 2009. Este hecho indica que tras los 6 primeros meses de adaptación y control del funcionamiento del nuevo proceso de regeneración, en la actualidad se alcanza un nivel de calidad del agua regenerada estable y progresivo.

Tabla 7.1. Percentiles 50 y 90 y desviación típica de la distribución normal de la MES en la ERA de Lloret de Mar.

| Año | Punto de control | Percentil 50 (mg/L) | Percentil 90 (mg/L) | s = desviación típica (mg/L) |
|---|---|---|---|---|
| 2009 | LDM1 | 7,77 | 12,87 | 3,98 |
| 2009 | LDM5 | 2,76 | 4,12 | 1,06 |
| 2008 | LDM1 | 12,05 | 21,63 | 7,47 |
| 2008 | LDM5 | 4,97 | 8,73 | 2,93 |
| 2007 | LDM1 | 8,55 | 15,13 | 5,13 |
| 2006 | LDM1 | 5,96 | 10,46 | 3,51 |
| 2005 | LDM1 | 6,13 | 9,57 | 2,68 |

La figura 7.1 y la tabla 7.2 permiten observar el enorme empeoramiento experimentado por el efluente secundario en los percentiles 50 y 90, fiabilidad e irregularidad de los datos en el año 2008. Este hecho es consecuencia de los problemas experimentados debido a las obras de ampliación de la ERA. No obstante, los seis primeros meses del año 2009 muestran una mejora significativa del efluente secundario recuperando los valores correspondientes a los efluentes secundarios anteriores al año 2008.

En la actualidad, el agua regenerada de la ERA de Lloret de Mar se destina para riego de campos de golf (uso 4.1 del RD 1620/2007) y riego de zonas verdes urbanas (uso 1.2). El RD establece para ambos usos un mismo valor máximo admisible del percentil 90 de la MES igual a 20 mg/l. La tabla 7.2 muestra el cumplimiento del valor límite establecido en los años 2008 y 2009. La tabla 7.1 muestra que este valor límite se cumple en la totalidad de los años estudiados por el efluente secundario, exceptuando el año 2008 debido a la realización de las obras de ampliación.

A corto plazo, el objetivo más ambicioso del Consorci de la Costa Brava en esta ERA consiste en ampliar los usos disponibles del agua regenerada hasta el uso 1.1 en que el agua regenerada se aplica a usos urbanos residenciales. El RD fija para el uso 1.1 un límite del percentil 90 de la MES de 10 mg/L, que se cumple en los años 2008 y 2009 (tabla 7.2). La progresión experimentada por el efluente secundario y las nuevas incorporaciones realizadas en la EDAR permiten suponer que dicho valor límite se cumplirá en el efluente secundario próximamente. Actualmente, el proceso de regeneración asegura el cumplimiento de los valores límite del agua regenerada.

Tabla 7.2. Cumplimiento del RD 1620/2007 en términos de la MES en la ERA de Lloret de Mar.

| Año | Cumple Uso 1.1 | Cumple Uso 1.2 | Cumple Uso 4.1 |
|---|---|---|---|
| 2009 | Sí | Sí | Sí |
| 2008 | Sí | Sí | Sí |

## 7.2 TURBIEDAD

La figura 7.2 muestra los valores de turbiedad obtenidos entre los años 2005 y 2009. La escala del eje de ordenadas se ha aumentado hasta el valor límite de 20 UNT debido al gran número de valores que superan el límite de 12 UNT (figura 5.2). Conviene indicar que en la figura 7.2 no se observan 1 y 4 valores del efluente secundario en los años 2007 y 2008 respectivamente, por ser superiores al límite de 20 UNT. No obstante, estos datos son utilizados en la obtención de la recta de regresión, describiendo el comportamiento real del proceso de regeneración aplicado en la ERA de Lloret de Mar.

La figura 7.2 muestra un ajuste altamente inadecuado de los datos experimentales a la recta de regresión, tanto en la parte central como en las 'colas' de la distribución. Los desajustes observados en la parte central se deben a la existencia de valores muy superiores al resto que distorsionan el trazado de la recta de regresión. Además, los valores centrales tampoco se ajustan a una relación lineal entre ellos tal y como sucedía en la ERA de Tossa de Mar, sino que es una relación mucho más irregular. El test de Kolmogorov-Smirnov (ver Anejo 1 C.2) confirma estas observaciones, pues sólo el agua regenerada del año 2009 se ajusta a una distribución normal. El grado de ajuste de los datos experimentales a una recta es muy adecuado en este último caso. El número de

datos experimentales es de 160 valores aproximadamente en los años 2005, 2006 y 2007. El número de muestras del efluente secundario es de 120 y del agua regenerada 75 en el año 2008, y de 60 y 25 en el año 2009 respectivamente. Este hecho permite sugerir que si se dispone de un alto número de datos experimentales y una serie de éstos son superiores al resto, la distribución normal no es estrictamente aplicable por los desajustes producidos en las partes extremas y en la parte central de la distribución.

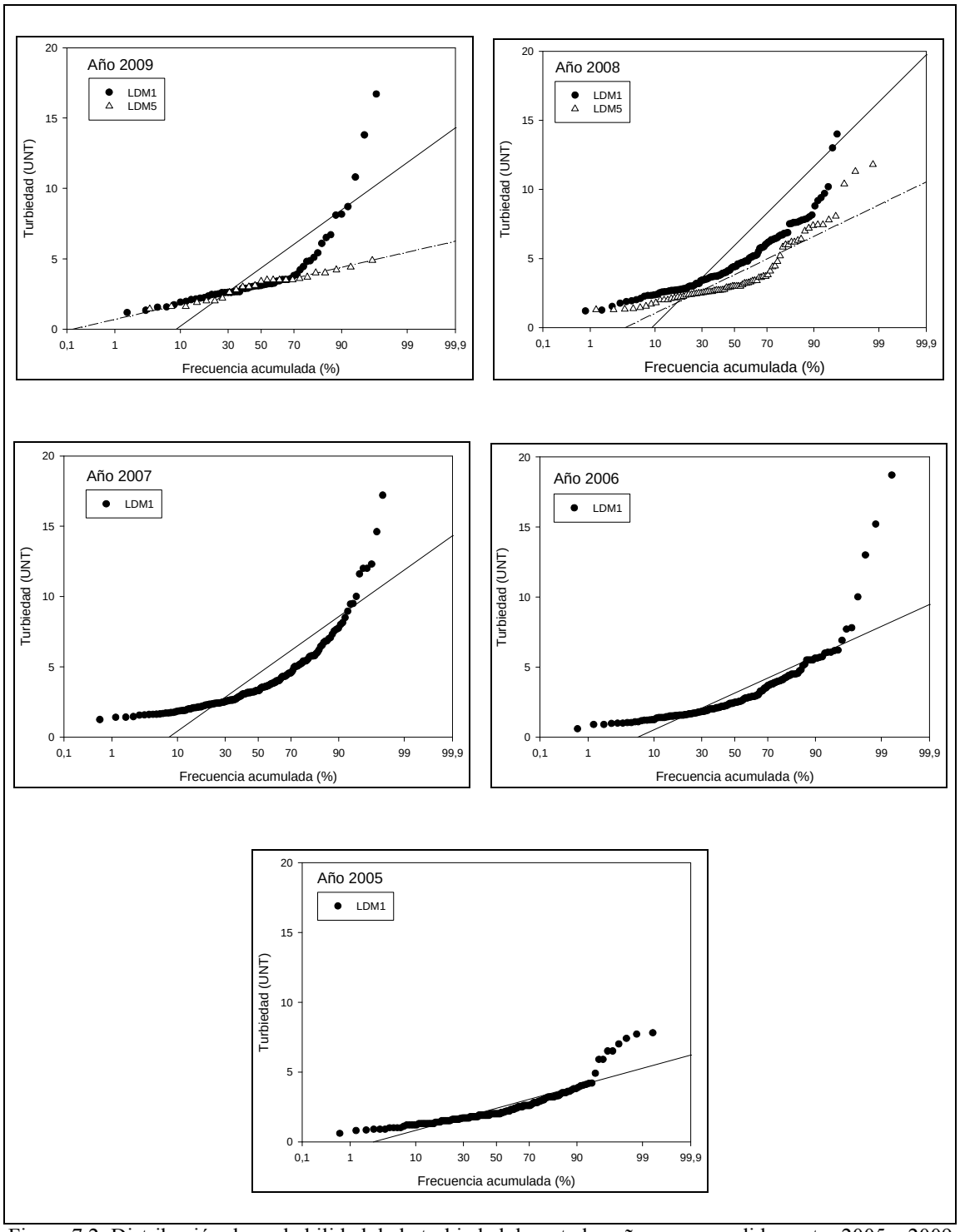



Figura 7.2. Distribución de probabilidad de la turbiedad durante los años comprendidos entre 2005 y 2009 en la ERA de Lloret de Mar.

La figura 7.2 permite observar que el nuevo tratamiento de regeneración mejora el ajuste de los datos representados a la recta de regresión. La mejora es especialmente buena en el año 2009, pues la normalización del funcionamiento del proceso de regeneración produce un ajuste de los datos muestreados a la recta muy adecuado.

El proceso de regeneración produce una disminución de los percentiles 50 y 90 de la turbiedad y una reducción de la pendiente y desviación típica de la recta de regresión (figura 7.2 y la tabla 7.3). Por lo tanto, el proceso de regeneración mejora notablemente la calidad del agua y produce un aumento de la fiabilidad, excepcionalmente bueno en el año 2009. Este hecho indica que tras unos primeros meses de adaptación y control del proceso de regeneración, en la actualidad se alcanzan unos buenos niveles de calidad y fiabilidad, y una progresión en cuanto a ambos aspectos excepcional.

La observación del efluente secundario muestra un empeoramiento notable en los percentiles 50 y 90 durante el año 2008. La fiabilidad y la irregularidad de los datos también disminuyen considerablemente. Este hecho es consecuencia de problemas en el proceso de depuración debido a la obras de ampliación de la EDAR. No obstante, en el año 2009 se produce una mejora significativa y se recuperan los valores del efluente secundario en los años anteriores al 2008.

Tabla 7.3. Percentiles 50 y 90 y desviación típica de la distribución normal de la turbiedad en la ERA de Lloret de Mar.

| Año | Punto de control | Percentil 50 (UNT) | Percentil 90 (UNT) | s = desviación típica (UNT) |
|---|---|---|---|---|
| 2009 | LDM1 | 4,36 | 8,49 | 3,22 |
| 2009 | LDM5 | 3,01 | 4,33 | 1,03 |
| 2008 | LDM1 | 5,95 | 11,67 | 4,46 |
| 2008 | LDM5 | 3,83 | 7,89 | 3,17 |
| 2007 | LDM1 | 4,5 | 8,56 | 3,17 |
| 2006 | LDM1 | 3,14 | 5,77 | 2,05 |
| 2005 | LDM1 | 2,41 | 3,99 | 1,23 |

El RD 1620/2007 fija, para los usos actuales 1.2 y 4.1, un mismo límite del percentil 90 de turbiedad de 10 UNT y para el uso 1.1 un valor de 2 UNT. La tabla 7.3 muestra que el proceso de regeneración cumple claramente con el valor fijado para los usos actuales. Además, estos valores máximos admisibles se cumplen también en el efluente secundario en los años 2005, 2006, 2007 y 2009. Esto indica que, el proceso de depuración del agua residual llevado a cabo en la EDAR de Lloret de Mar presenta una gran eficacia en cuanto a disminución de este parámetro físico-químico. Por el contrario, el uso 1.1 del RD no se cumple en ninguno de los años estudiados. El proceso de regeneración no logra reducir suficientemente la turbiedad del agua.

La tabla 7.4 permite afirmar que el parámetro limitante del proceso de regeneración es la turbiedad. Consecuentemente, la prioridad en el proceso de regeneración deberá ser el asegurar la fiabilidad de la eliminación de la turbiedad. Debe indicarse que el nuevo proceso de regeneración está inmerso en una buena progresión en cuanto a calidad y fiabilidad, con lo que es probable que en un periodo de tiempo relativamente corto se alcancen valores excelentes de calidad y se cumplan los límites del uso 1.1. Además, la

ampliación de la EDAR y la construcción de la nueva ERA están diseñadas para cumplir con el uso 1.1, pues en julio del año 2008 entró en servicio la nueva red de agua regenerada que permitirá, como en Tossa de Mar, reutilizar el agua para usos urbanos residenciales. Otro hecho destacable es que actualmente la gestión y la explotación de la EDAR y de la ERA corresponde todavía a la empresa constructora.

Tabla 7.4. Cumplimiento del RD 1620/2007 en términos de la turbiedad y de la MES en la ERA de Lloret de Mar.

| Año | Cumple MES | | Cumple turbiedad | | Cumple MES y turbiedad | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Uso 1.1 | Uso 1.2 y 4.2 | Uso 1.1 | Uso 1.2 y 4.1 | Uso 1.1 | Uso 1.2 y 4.1 |
| 2009 | Sí | Sí | No | Sí | No | Sí |
| 2008 | Sí | Sí | No | Sí | No | Sí |

## 7.3 TRANSMITANCIA 254 NM

La figura 7.3 muestra los valores de la transmitancia a 254 nm obtenidos entre los años 2005 y 2009. La figura 7.3 muestra dos tipos de comportamientos claramente diferenciados. Los efluentes del año 2009, el agua regenerada del año 2008 y el efluente secundario del año 2005 presentan un ajuste de los datos a una línea recta altamente satisfactorio. Por el contrario, el resto de efluentes y de años presentan un ajuste irregular a la recta de regresión, principalmente por los desajustes en la "colas" de la distribución. La aplicación del test de Kolmogorov-Smirnov (ver Anejo 1 C.3) verifica las observaciones realizadas. La distribución normal puede aplicarse en todos los casos representados para la obtención de los percentiles 50 y 90, pues los desajustes corresponden a percentiles superiores al 90. La transmitancia, a diferencia de los parámetros anteriores, presenta normalidad en algunos efluentes, es mucho menos variable y su ajuste a una línea recta es mucho más regular.

La figura 7.3 y la tabla 7.5 muestran un aumento del percentil 50 y 90 de la transmitancia tras el proceso de regeneración. El año 2008 experimenta un aumento de la fiabilidad (disminuye la desviación estándar) y el año 2009 un descenso (aumenta la desviación estándar).

Tabla 7.5. Percentiles 50 y 90 y desviación típica de la distribución normal de la transmitancia a 254 nm en la ERA de Lloret de Mar.

| Año | Punto de control | Percentil 50 (%) | Percentil 90 (%) | s = desviación típica (%) |
|---|---|---|---|---|
| 2009 | LDM1 | 60,7 | 66,71 | 4,69 |
| 2009 | LDM5 | 60,77 | 68,13 | 5,74 |
| 2008 | LDM1 | 54,35 | 65,48 | 8,68 |
| 2008 | LDM5 | 57,48 | 66,99 | 7,42 |
| 2007 | LDM1 | 55,31 | 65,04 | 7,59 |
| 2006 | LDM1 | 58,72 | 67,18 | 6,6 |
| 2005 | LDM1 | 61,78 | 67,41 | 4,39 |

La observación de los valores del efluente secundario muestra un empeoramiento de la calidad en el año 2008 debido al proceso de obras en la EDAR, y una recuperación o mejora en el año 2009. Las observaciones constatadas se observan en los percentiles 50 y 90, y en la fiabilidad.

Las observaciones realizadas anteriormente permiten afirmar que la transmitancia a 254 nm experimenta una evolución en consonancia con la MES y la turbiedad, pues su calidad disminuye en el año 2008 y mejora espectacularmente en el año 2009.

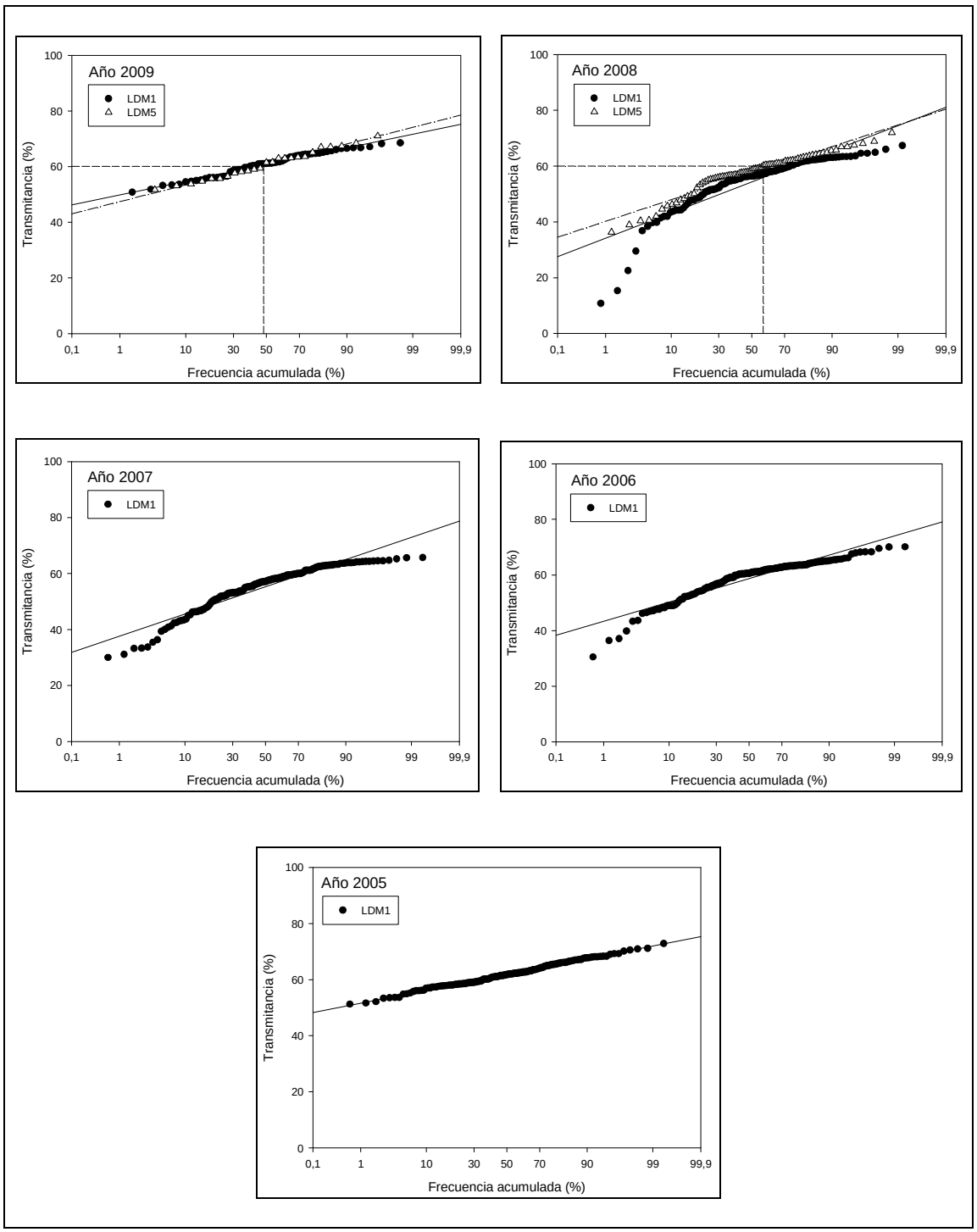



Figura 7.3. Distribución de probabilidad de la transmitancia a 254 nm durante los años comprendidos entre 2005 y 2009 en la ERA de Lloret de Mar.

Las directrices internacionales para que un proceso de desinfección con luz UV sea eficiente recomiendan que la transmitancia sea superior al 60%. La línea discontinua de la figura 7.3 indica el valor del 60% de transmitancia y la obtención de su correspondiente percentil. La tabla 7.6 muestra el percentil de muestras con una transmitancia inferior o igual al 60%. Los porcentajes obtenidos son elevados: el año 2009 indica que el 49% de las muestras no son recomendables para desinfectar con luz UV únicamente. Debe recordarse que el sistema de desinfección con luz UV es el último tratamiento de regeneración en la ERA de Lloret de Mar, pues no existe una cloración posterior. Por ello, debe aumentarse la transmitancia del agua para que la desinfección con luz UV alcance una mayor eficiencia. Además, se recomienda establecer un punto de muestreo anterior a la desinfección con luz UV debido a la importancia de ésta en la desinfección del agua.

Tabla 7.6. Percentil de muestras con una transmitancia a 254 nm inferior o igual al 60% en la ERA de Lloret de Mar.

| Año | Percentil con transmitancia menor o igual al 60% |
|---|---|
| 2009 | 49 |
| 2008 | 55 |

## 7.4 POTENCIAL REDOX

La figura 7.4 muestra los valores del potencial redox obtenidos durante los años 2008 y 2009 en la ERA de Lloret de Mar. El test de Kolmogorov-Smirnov (Anejo 1 C.4) permite afirmar que los datos del efluente secundario y del agua regenerada del año 2009 se ajustan a una distribución normal, pero no los del año 2008. La figura 7.4 permite verificar las conclusiones obtenidas mediante el test de Kolmogorov-Smirnov.

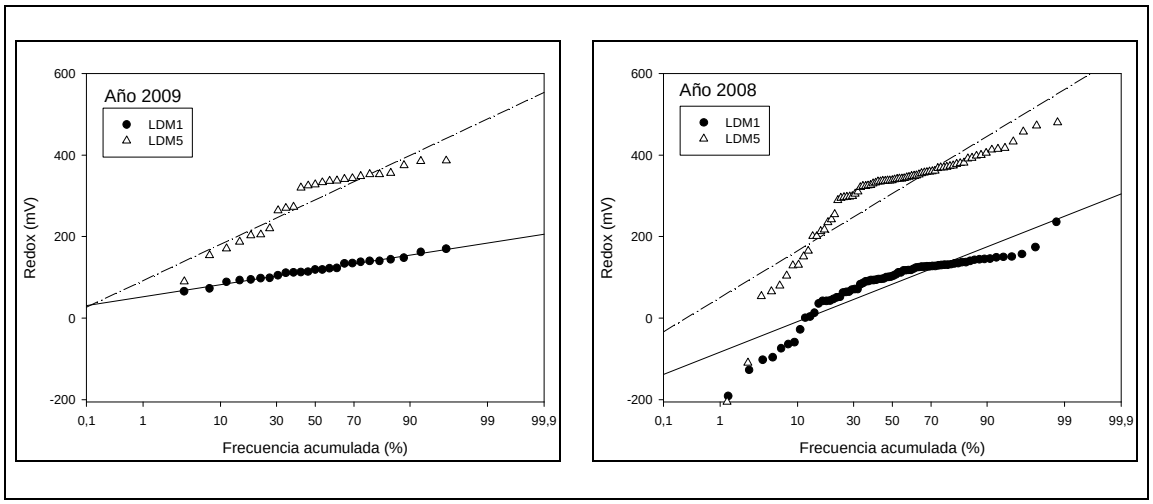



Figura 7.4. Distribución de probabilidad del potencial redox durante los años 2008 y 2009 en la ERA de Lloret de Mar.

La figura 7.4 y la tabla 7.7 muestran el aumento del potencial redox que se registra tras el proceso de regeneración. También se registra un aumento de la desviación típica y de la pendiente de la recta de regresión, es decir, aumenta la variabilidad y disminuye la

fiabilidad. El aumento del potencial redox se debe a la aportación de hipoclorito sódico durante la desinfección inicial.

Tabla 7.7. Percentiles 50 y 90 y desviación típica de la distribución normal del potencial redox en la ERA de Lloret de Mar.

| Año | Punto de control | Percentil 50 (mV) | Percentil 90 (mV) | s = desviación típica (mV) |
|---|---|---|---|---|
| 2009 | LDM1 | 118 | 155 | 28 |
| 2009 | LDM5 | 290 | 399 | 85 |
| 2008 | LDM1 | 84 | 175 | 72 |
| 2008 | LDM5 | 306 | 446 | 110 |

Actualmente no existe en la ERA de Lloret de Mar ninguna sonda de potencial redox. Es recomendable que, al no poder disponer de una cloración posterior al sistema de desinfección con luz UV, se incorpore al igual que en la ERA de Tossa de Mar una sonda de potencial redox después del proceso de filtración. La sonda redox actuaría como un sistema de control para asegurar que el agua regenerada contiene siempre una concentración mínima de cloro. La sondas redox presentan una serie de ventajas sobre las tradicionales sondas de cloro, tales como el escaso mantenimiento necesario y el bajo coste de mantenimiento. Además, las sondas de cloro presentan excesivos problemas en aquellas ERA con concentraciones de nitrógeno muy inestables, tales como la ERA de Lloret de Mar.

## 7.5 ESCHERICHI COLI (*E. COLI*) Y COLIFORMES FECALES (CF)

La figura 7.5 muestra los valores de *E. coli* y CF obtenidos entre los años 2005 y 2009. La entrada en vigor del RD 1620/2007 en el año 2007 supuso un cambio en el indicador de medida. El estudio realizado considera ambos parámetros como equivalentes.

La figura 7.5 muestra que el ajuste de los datos experimentales a una línea recta es muy adecuado. La aplicación del test de Kolmogorov-Smirnov (K-S) (ver Anejo 1 C.5) verifica la observación visual realizada y confirma que todos los valores de CF y *E. coli* se ajustan en todos los años y puntos de control a una distribución logarítmica-normal. Conviene recordar que la aplicación del test de K-S y la posterior determinación de la recta de regresión se ha realizado con aquellos datos que son distintos de cero. Los valores nulos indican ausencia de crecimiento de *E. coli* y CF.

La figura 7.5 y la tabla 7.8 muestran una disminución elevada de la concentración de *E. coli* y CF durante el proceso de regeneración. El percentil 50 del agua regenerada presenta ausencia de *E. coli* en todos los años estudiados, excepto en el año 2005. El percentil 90 del agua regenerada mejora progresivamente a lo largo de los años hasta obtener un contenido muy reducido en el año 2009 (0,04 ulog/100 ml). Por otra parte, los valores de concentración de *E. coli* y CF del efluente secundario aumentan o disminuyen levemente de un año a otro, variando siempre en el mismo rango de valores. Por lo tanto, este indicador es menos sensible al periodo de obras de ampliación de la EDAR y de la ERA, pues las calidades del efluente secundario y del agua regenerada no registran un empeoramiento respecto a los años anteriores.

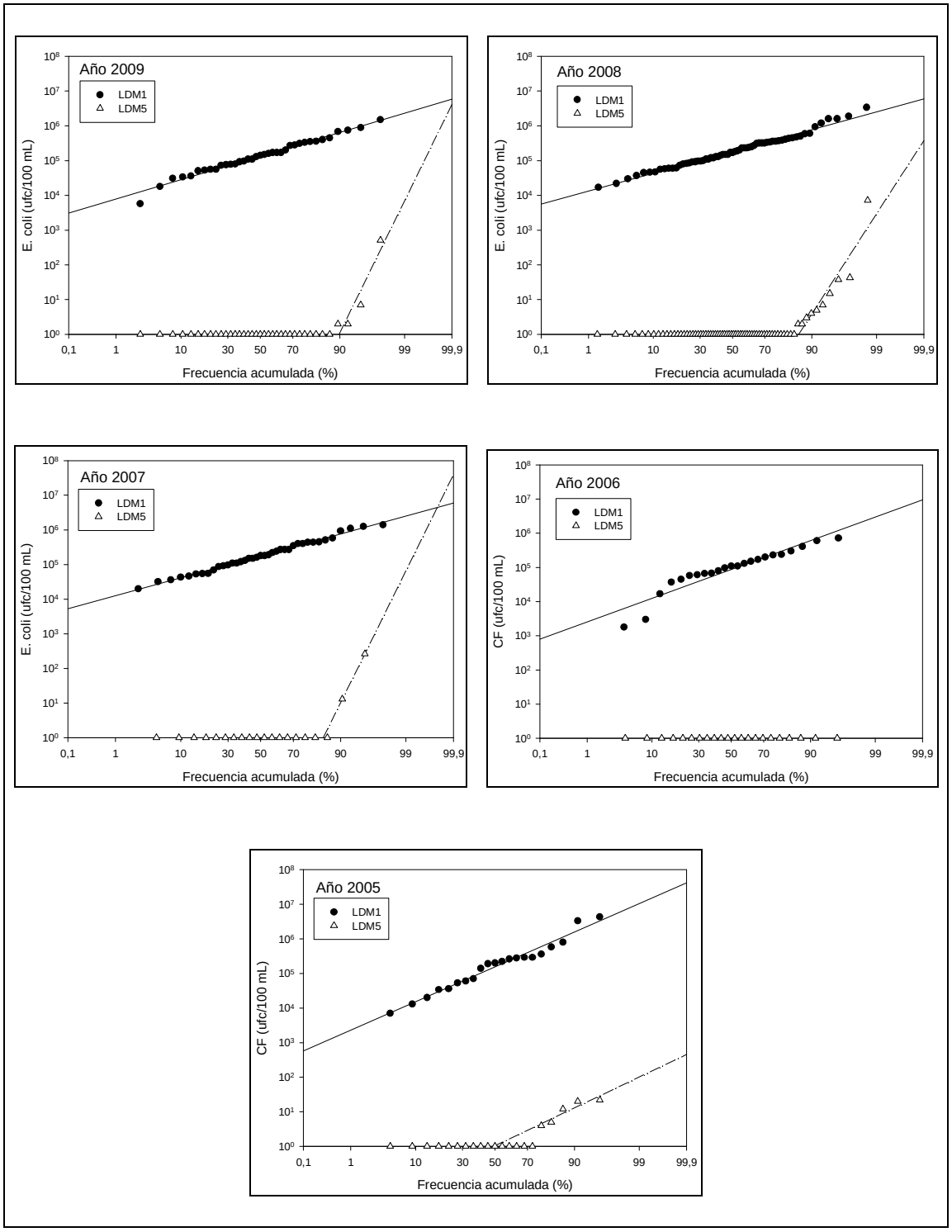



Figura 7.5. Distribución de probabilidad de Coliformes Fecales y *E. coli* durante los años comprendidos entre 2005 y 2009 en la ERA de Lloret de Mar.

La obtención de un gran número de muestras con ausencia de *E. coli* tras el proceso de regeneración produce un aumento de la variabilidad de aquellas muestras con concentraciones no nulas, pues se produce un aumento de la desviación típica y de la pendiente de la recta de regresión.

Tabla 7.8. Percentiles 50 y 90 y desviación típica de la distribución normal de *E.coli* y CF en la ERA de Lloret de Mar.

| Año | Punto de control | Percentil 50 (ulog/100mL) | Percentil 90 (ulog/100mL) | s = desv. típica (ulog/100mL) |
|---|---|---|---|---|
| 2009 | LDM1 | 5,13 | 5,81 | 0,53 |
| 2009 | LDM5 | ND | 0,04 | 3,63 |
| 2008 | LDM1 | 5,26 | 5,89 | 0,49 |
| 2008 | LDM5 | ND | 0,60 | 2,76 |
| 2007 | LDM1 | 5,25 | 5,88 | 0,49 |
| 2007 | LDM5 | ND | 1,02 | 3,64 |
| 2006 | LDM1 | 4,94 | 5,79 | 0,66 |
| 2006 | LDM5 | ND | ND | 0 |
| 2005 | LDM1 | 5,19 | 6,20 | 0,79 |
| 2005 | LDM5 | 0,02 | 1,11 | 0,85 |

ND: no detectable

La tabla 7.9 muestra el porcentaje de muestras del agua regenerada con concentraciones nulas de *E. coli* y/o CF. El año 2008 registra una ligera disminución de este porcentaje, que se recupera en el año 2009 hasta valores semejante a los existentes en el periodo anterior a la ampliación de la ERA.

Tabla 7.9. Porcentaje de muestras con ausencia de *E. coli* y CF en la ERA de Lloret de Mar.

| Año | 2009 | 2008 | 2007 | 2006 | 2005 |
|---|---|---|---|---|---|
| **% de muestras con ausencia de *E. coli* y CF** | 89 | 85 | 90 | 100 | 76 |

En resumen, aunque el número de muestras que presentan contenidos de *E. coli* no nulos en el año 2008 es ligeramente superior al resto de años, debido principalmente a las interferencias producidas por las obras de ampliación, la calidad y el mismo porcentaje anterior apenas empeoran en el periodo de obras, a diferencia de los parámetros físico-químicos donde la calidad de ambos efluentes disminuía enormemente. Estas observaciones confirman que el tratamiento primario y secundario de la depuración no son procesos efectivos de la desinfección del agua. La inactivación de los microorganismos es la prioridad principal del proceso de regeneración de agua, realizada mediante la desinfección combinada de cloro y luz UV.

El RD 1620/2007 fija un valor límite máximo del percentil 90 para los usos actuales 1.2 y 4.1 de 200 ufc/100 ml, y para el futuro uso 1.1 de 0 ufc/100ml. La tabla 7.10 muestra que el agua regenerada cumple los límites establecidos para los usos actuales, mientras que el futuro uso 1.1 únicamente se cumple en el año 2006. La obtención de ausencia del percentil 90 de *E. coli* en el año 2006 se debe a la cloración con dosis elevadas de cloro. Los excelentes resultados obtenidos en el año 2009 y la progresiva mejora experimentada permiten afirmar que la consecución de los objetivos del uso 1.1 (ausencia de *E. coli* en el 90% de las muestras) se considera un objetivo factible. Para ello, se recomienda: 1) aumentar la dosis de cloro, 2) mejorar la transmitancia del agua para que la luz UV mejore su eficiencia, y 3) aumentar la intensidad de la luz UV (aunque se deberá también aumentar la transmitancia a 254 nm del agua).

Tabla 7.10. Cumplimiento del RD 1620/2007 en términos de *E. coli* en la ERA de Lloret de Mar.

| **Año** | 2009 | 2008 | 2007 | 2006 | 2005 |
|---|---|---|---|---|---|
| **Cumple Uso 1.1** | No | No | No | Sí | No |
| **Cumple Uso 1.2** | Sí | Sí | Sí | Sí | Sí |
| **Cumple Uso 4.1** | Sí | Sí | Sí | Sí | Sí |

## 7.6 CLOSTRIDIUM SULFITO-REDUCTORES (CSR)

La figura 7.6 muestra los valores de CSR obtenidos entre los años 2005 y 2009. El buen ajuste de los datos muestreados a una línea recta (figura 6.6) indica el comportamiento normal del parámetro CSR. La posterior aplicación del test estadístico de Kolmogorov-Smirnov (ver Anejo 1 C.6) confirma la hipótesis de normalidad.

La figura 7.6 y la tabla 7.11 muestran que el proceso de regeneración produce una disminución del percentil 50 y 90 de CSR. Si se compara en términos de la media, se observa una disminución de una, dos o incluso más unidades logarítmicas según el año estudiado. La observación del percentil 90 muestra una reducción generalmente de 1 unidad logarítmica aproximadamente (un factor 10). La observación únicamente del efluente secundario pone de manifiesto que no existen grandes diferencias entre los años representados, pues ambos percentiles varían en el mismo rango de valores.

La existencia de sólo 6 muestras para la representación gráfica y la presencia de sólo 2 de ellas con concentraciones detectables de CSR generan en el año 2009 un percentil 90 superior incluso al del efluente secundario. Este percentil obtenido es irreal y conlleva una mala lectura. Por lo tanto, en el año 2009 se observa una mejora excelente debido a la no presencia de CSR en un gran número de muestras (figura 7.6). Esto se debe a la utilización de un sistema de desinfección con luz UV que produce una disminución de estos indicadores más elevada que el cloro. Para disminuir la concentración de las muestras con presencia de CSR se recomienda aumentar principalmente la transmitancia del agua anteriormente estudiada y aumentar la intensidad de la luz UV.

Tabla 7.11. Percentiles 50 y 90 y desviación típica de la distribución normal de CSR en la ERA de Lloret de Mar.

| **Año** | **Punto de control** | **Percentil 50 (ulog/100mL)** | **Percentil 90 (ulog/100mL)** | **s = desv. típica (ulog/100mL)** |
|---|---|---|---|---|
| 2009 | LDM1 | 3,07 | 3,20 | 0,1 |
| 2009 | LDM5 | ND | 3,45 | 3,98 |
| 2008 | LDM1 | 2,95 | 4,01 | 0,83 |
| 2008 | LDM5 | 0,43 | 2,85 | 1,89 |
| 2007 | LDM1 | 3,12 | 4,04 | 0,72 |
| 2007 | LDM5 | 1,34 | 2,48 | 0,89 |
| 2006 | LDM1 | 3,31 | 3,85 | 0,42 |
| 2006 | LDM5 | 0,36 | 3,42 | 2,39 |
| 2005 | LDM1 | 3,35 | 3,84 | 0,38 |
| 2005 | LDM5 | 2,03 | 3,38 | 1,05 |

ND: no detectable

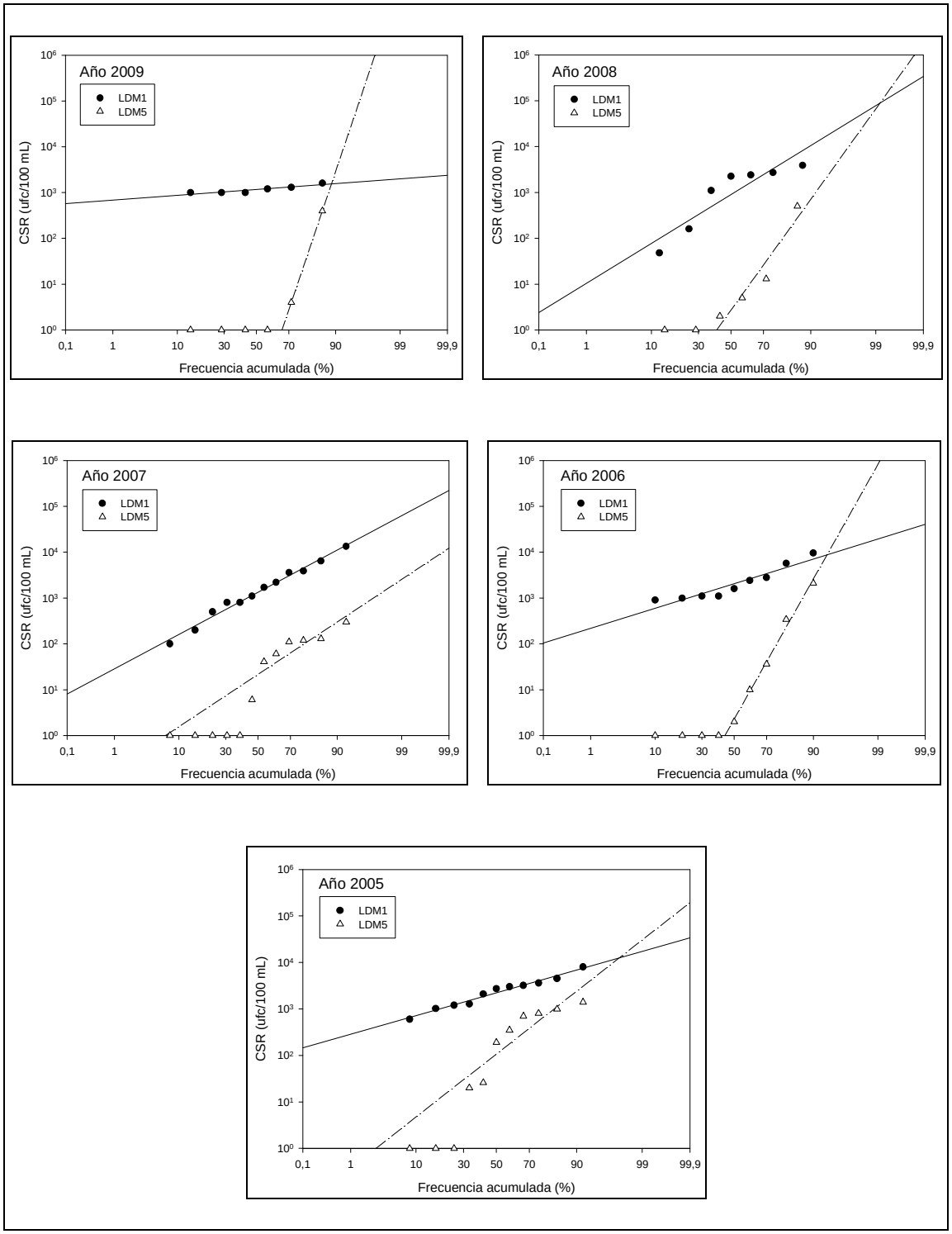



Figura 7.6. Distribución de probabilidad de CSR durante los años comprendidos entre 2005 y 2009 en la ERA de Lloret de Mar.

Finalmente, el proceso de regeneración aumenta la desviación típica y la pendiente de la recta de regresión en todos los años estudiados. Por lo tanto, produce un aumento de la variabilidad y un descenso de la fiabilidad.

## 7.7 RELACIÓN ENTRE TURBIEDAD Y MATERIA EN SUSPENSIÓN

La figura 7.7 muestra el análisis gráfico comparativo de las parejas de resultados experimentales de turbiedad y MES entre los años 2005 y 2009. El eje de abcisas varía entre 0 y 12 UNT, y el eje de ordenadas entre 0 y 25 mg/l para observar una representación más clara. Por ello, en algunos años existen tres o cuatro valores del efluente secundario superiores a ese valor y que no aparecen en la representación, pero que no influyen en ninguna observación o conclusión realizada.

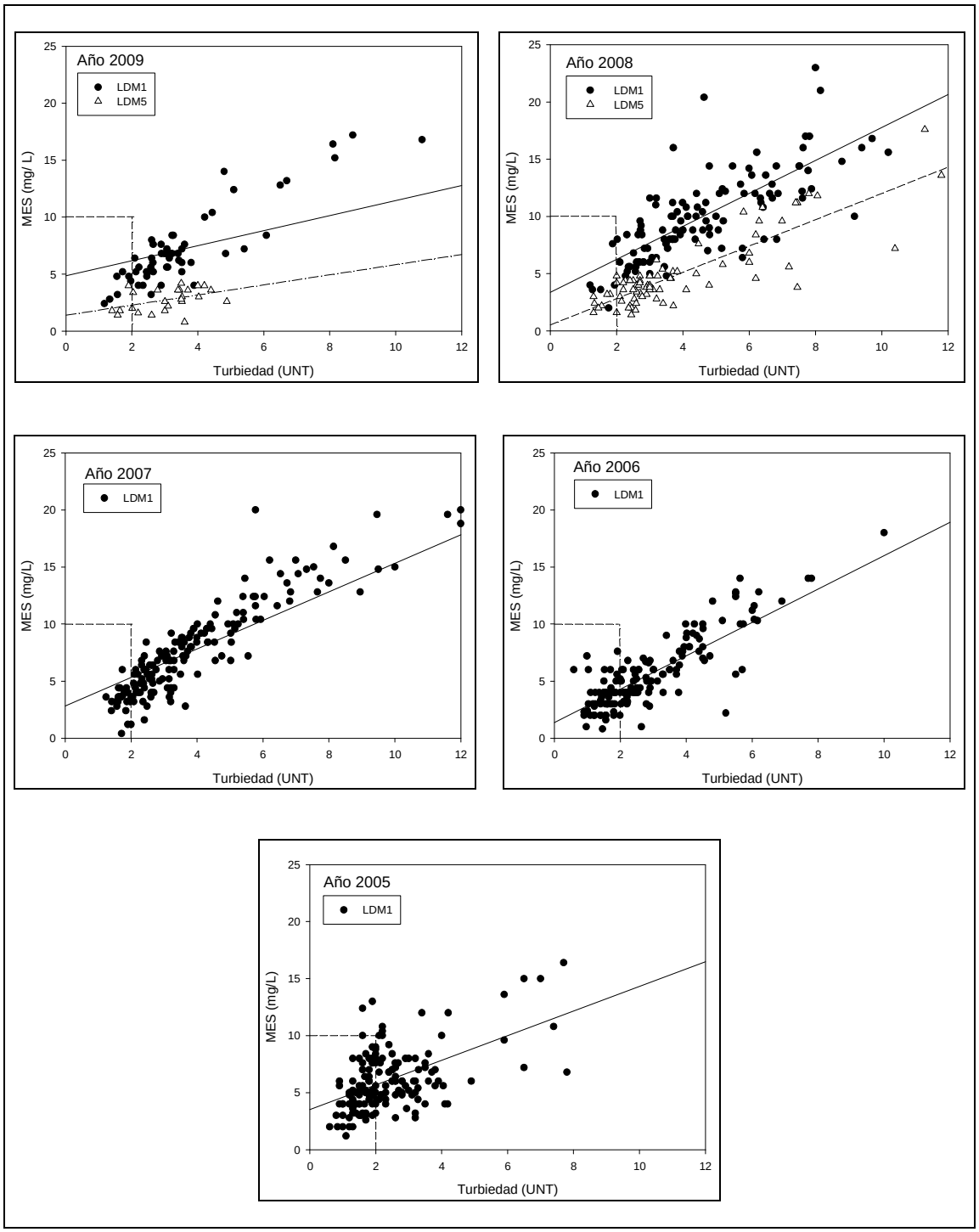



Figura 7.7. Relación entre turbiedad y MES durante los años comprendidos entre 2005 y 2009 en la ERA de Lloret de Mar.

La figura 7.7 muestra una débil tendencia de alineación de los puntos representados a la recta de regresión, aunque existe una cierta dispersión de datos. Esta tendencia es menos marcada que la observada en la ERA de Tossa de Mar y más clara que la de la ERA de Castell-Platja d'Aro.

El RD 1620/2007 fija unos límites máximos para el uso 1.1 de 2 UNT de turbiedad y 10 mg/L de MES. Esta limitación se representa en la figura 7.7 con una línea discontinua. Conviene recordar que el uso 1.1 es el más restrictivo del RD y por ello, el cumplimiento de este uso implica automáticamente el cumplimiento de los límites aplicables al resto de usos. La figura 7.7 muestra que la gran mayoría de muestras que no cumplen los citados límites en el año 2008 se deben a la turbiedad. Los datos que superan el límite de MES también superan el límite de turbiedad y son consecuencia de las interferencias producidas por el periodo de obras. La totalidad de los valores que incumplen la normativa durante el año 2009 se deben a la turbiedad. Estas observaciones indican que la turbiedad es el factor limitante del cumplimiento de los límites del uso 1.1. Por ello, se puede afirmar que una prioridad del proceso de regeneración debe ser asegurar la fiabilidad de la turbiedad efluente. Los valores límites establecidos para los usos actuales 1.2 y 4.1 son de 10 UNT de turbiedad y 20 mg/L de MES. Estos valores son mucho menos restrictivos que los anteriores y se cumplen claramente en el efluente de la ERA de Lloret de Mar.

La tabla 7.12 muestra el porcentaje de muestras que no cumplen los límites del uso 1.1 fijados por la normativa. Conviene indicar que la normativa hace referencia al percentil 90 de la turbiedad y de la MES. A pesar de la mejoría experimentada en el año 2009 los porcentajes son muy elevados y es necesario disminuirlos. Para ello, se recomienda mejorar el tratamiento de depuración para obtener una mejor calidad del efluente secundario, y mejorar el proceso de coagulación-floculación, la posterior decantación y la filtración. Es recomendable establecer puntos de muestreo en LDM2, LDM3 y LDM4 con el objetivo de observar y mejorar los rendimientos que se alcanzan en cada uno de estos procesos. Este hecho se magnifica en aquellos momentos, como sucede en la actualidad en la ERA de Lloret de Mar, en los que se incorporan nuevos tratamientos, pues es necesario un estricto y permanente control de los mismos hasta alcanzar un funcionamiento estable y eficiente del proceso de regeneración.

Tabla 7.12. Porcentaje de muestras que no cumplen los límites de MES y de turbiedad para el uso 1.1 del RD 1620/2007 en la ERA de Lloret de Mar.

| Año | % de muestras que no cumplen el uso 1.1 |
|---|---|
| 2009 | 76 |
| 2008 | 85 |

La tabla 7.13 muestra la concentración límite de MES que deja por encima de él las muestras con turbiedad superior a 2 UNT. Es decir, es el valor de la MES con igual capacidad restrictiva que 2 UNT de turbiedad. La tabla 7.13 permite afirmar que el valor discriminatorio de la MES se sitúa entre 1,8 y 2,2 mg/L. El límite de detección del método convencional de medida de la MES se sitúa entre 3- 4 mg/L. Por lo tanto, podría plantearse una disminución de la frecuencia de control de la MES, e incluso bastaría únicamente con medir la turbiedad. Este hecho comportaría un gran ahorro técnico-económico, pues la determinación del contenido de MES es costoso (en tiempo y en

dinero) en comparación con la medición de la turbiedad, que puede realizarse fácilmente con un turbidímetro de forma continua y automática. Sin embargo, el proceso de determinación de la turbiedad es mucho más sensible que el de la MES y deberá tenerse un especial control de la calibración del turbidímetro. En este sentido, se recomienda la instalación de un turbidímetro continuo.

Tabla 7.13. Valor límite de MES con la misma restrictividad que 2 UNT en la ERA de Lloret de Mar.

| Año | Límite restrictivo de MES (mg/L) |
|---|---|
| 2009 | 1,8 |
| 2008 | 2,2 |

## 7.8 RELACIÓN ENTRE *E. COLI* Y TRANSMITANCIA 254 NM

La figura 7.8 muestra la relación existente entre la *E. coli* y la transmitancia a 254 nm. La representación gráfica marca mediante una cruz aquellos valores de *E. coli* cuya transmitancia es inferior al 60%, valor mínimo recomendado por las directrices internacionales para asegurar la eficiencia de un proceso de desinfección con luz UV. Los valores de la transmitancia corresponden al punto de control LDM5. La figura 7.9 muestra únicamente la representación de los años 2008 y 2009, pues en el resto de años no existen medidas en el agua regenerada.

La valoración de la relación entre la inactivación de la *E. coli* mediante la desinfección con luz UV y la transmitancia a 254 nm (parámetro utilizado para valorar la idoneidad de la desinfección mediante luz UV) viene condicionada por la cloración inicial, pues el agua experimenta una inactivación de *E. coli* mediante la desinfección con cloro. La medida de la *E. coli* y la transmitancia a 254 nm antes y después de la desinfección mediante luz UV permitiría observar la inactivación producida por la desinfección con luz UV y controlar el estado de funcionamiento de las lámparas.

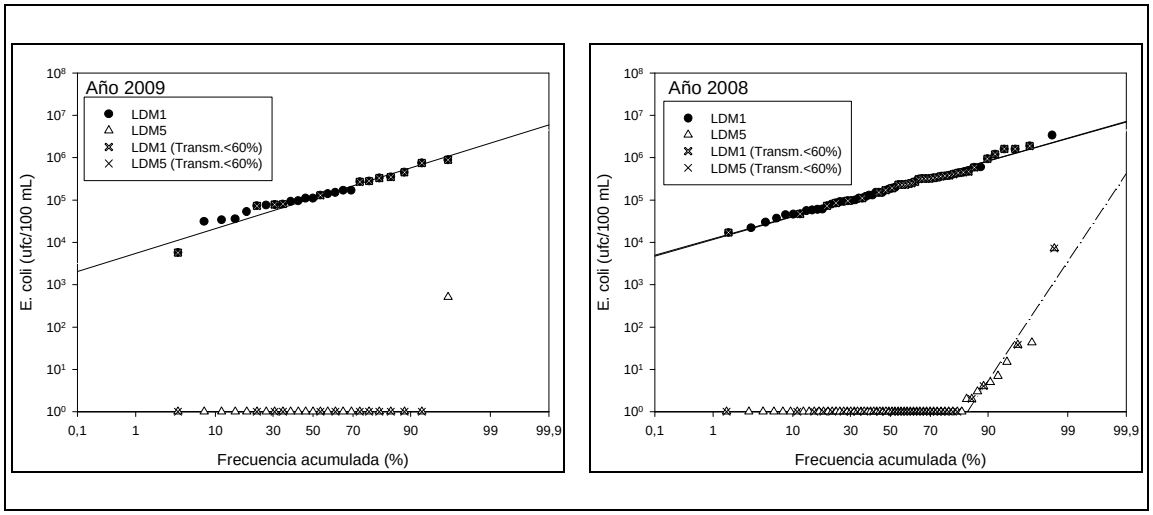



Figura 7.8. Relación entre *E. coli* y transmitancia a 254 nm durante los años 2008 y 2009 en la ERA de Lloret de Mar.

La observación de la figura 7.8 permite constatar que las muestras del efluente secundario con concentraciones de *E. coli* elevadas presentan casi en su totalidad valores con transmitancia inferior al 60%. Las muestras con concentraciones medias de *E. coli* se corresponden con valores con transmitancia inferior y superior a 60%. Por último, las concentraciones más bajas de *E. coli* corresponden con valores con transmitancia superior al 60%. Por lo tanto, el comportamiento descrito es normal.

La observación del agua regenerada muestra que las muestras con presencia de *E. coli* se corresponden indistintamente con valores de transmitancia inferior y superior al 60%. En principio, cabría esperar que todas aquellas muestras que presentan transmitancia superior al 60% se inactivasen con el tratamiento de desinfección. Este hecho indica que aunque el agua presente transmitancia superior al 60%, la luz UV no inactiva totalmente la *E. coli*. Por lo tanto, es recomendable aumentar la intensidad de la luz UV y establecer un punto de control anterior a la luz UV con el fin de detectar con mayor precisión la eficacia de la desinfección con luz UV. No obstante, si el año 2008 presenta variaciones de calidad debido a la ampliación de la estación, el año 2009 inactiva, excepto un valor, todo el contenido de *E. coli*. La observación de las muestras tomadas a lo largo del año 2008 muestra que, a partir del mes de julio, todas las muestras presentan ausencia de *E. coli*. En cambio, el mes de julio presenta una gran irregularidad en los resultados debido a la puesta en marcha del nuevo proceso de regeneración. Por lo tanto, el nuevo proceso de regeneración registra una eliminación de *E. coli* muy elevado, correspondiendo los valores con presencia de *E. coli* del año 2008 a aquellos meses anteriores al funcionamiento del nuevo proceso de regeneración.

## 7.9 RELACIÓN ENTRE CSR Y TRANSMITANCIA 254 NM

La figura 7.9 muestra la relación existente entre el contenido de CSR y la transmitancia a 254 nm. El proceso seguido para su representación e interpretación es el mismo que el utilizado en el apartado 7.8. La figura 7.9 muestra únicamente la representación de los años 2008 y 2009, pues en el resto de años no existen medidas en el agua regenerada.

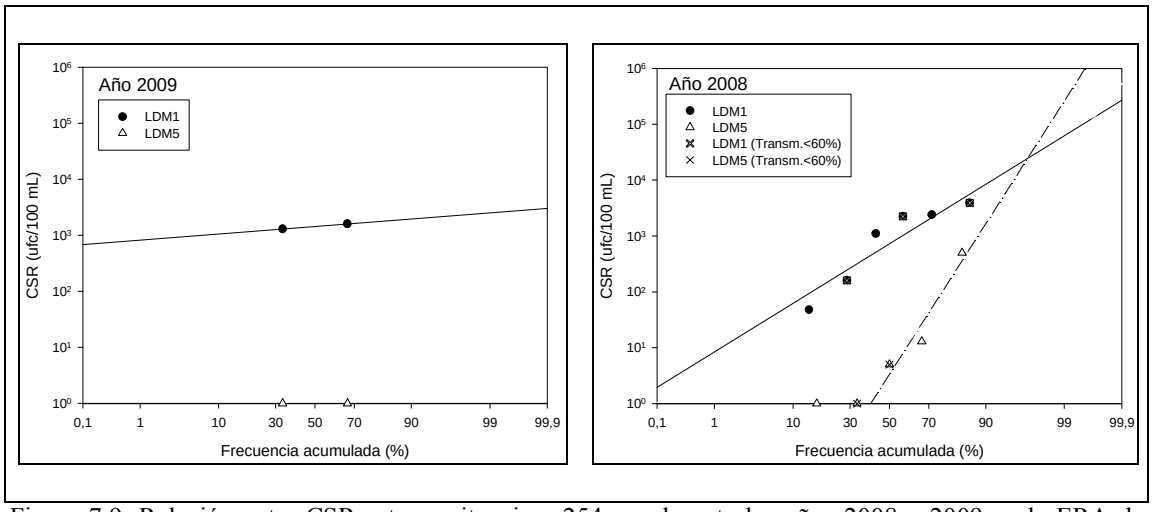



Figura 7.9. Relación entre CSR y transmitancia a 254 nm durante los años 2008 y 2009 en la ERA de Lloret de Mar.

El muestreo del contenido de CSR es generalmente mensual. No obstante, el muestreo no coincide con el de la transmitancia a 254 nm, permitiendo que únicamente se disponga de 2 y 6 muestras durante el año 2009 y 2008 respectivamente para proceder a su estudio. La planificación del muestreo deberá ser más uniforme con una simultaneidad mucho más armónica, semejante a la utilizada en las ERA de Castell-Platja d'Aro y de Tossa de Mar, con la finalidad de obtener una buena base de datos para proceder a un correcto análisis e interpretación de datos.

La figura 7.9 permite observar como los valores de transmitancia inferior a 60% se corresponden indistintamente con valores de CSR altos y bajos. Además, los valores de CSR con transmitancia superior al 60% no se inactivan totalmente. La desinfección con luz UV es el último tratamiento de desinfección, lo que indica que la intensidad o dosis de la luz UV deberá aumentarse si se desea inactivar un mayor contenido de CSR.

## 7.10 RELACIÓN ENTRE LA INACTIVACIÓN DE *E. COLI* Y TRANSMITANCIA 254 NM

La figura 7.10 muestra la relación existente entre la inactivación absoluta de *E. coli* y CF (en unidades logarítmicas) producida por el proceso de regeneración, y la transmitancia a 254 nm. La transmitancia a 254 nm del agua se ha medido en el punto LDM5.

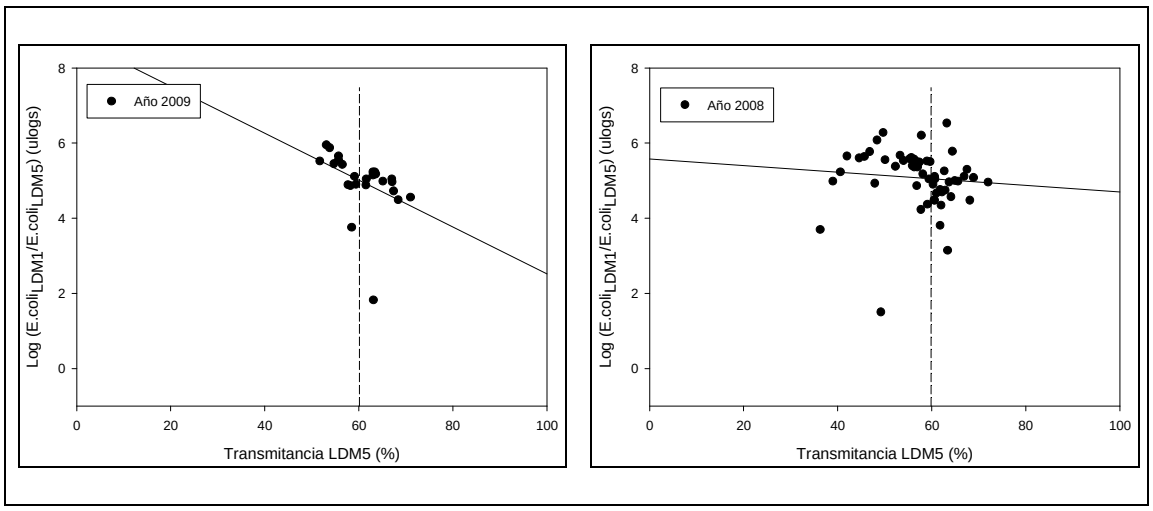



Figura 7.10. Relación entre la inactivación absoluta de *E. coli* producida por el proceso de regeneración y la transmitancia a 254 nm durante los años 2008 y 2009 en la ERA de Lloret de Mar.

Las relaciones observadas en la figura 7.10 muestran que a menor transmitancia 254 nm del agua la inactivación producida por el proceso de regeneración aumenta. Esta relación no es la realmente esperada, pues cabría esperar un aumento de la inactivación cuanto mayor fuese la transmitancia del agua afluente. No obstante, el apartado 7.8 mostraba que los valores elevados de concentración de *E. coli* en el efluente secundario corresponden predominantemente con valores de transmitancia inferiores al 60%. Es decir, los valores con transmitancia inferior al 60% registran un mayor grado de inactivación porque disponen de mayor concentración de *E. coli*.

La figura 7.10 muestra que el proceso de regeneración de la ERA de Lloret de Mar durante el año 2009 produce una relación de inactivación más clara que el año 2008 y una menor dispersión de datos, con un ajuste de los datos a la recta de regresión mucho más ajustada y regular.

La figura 7.11 muestra la relación existente entre la inactivación de *E. coli* normalizada (relativa) producida por el proceso de regeneración, y la transmitancia a 254 nm. La figura 7.11 muestra que con independencia de la transmitancia a 254 nm del agua el proceso de regeneración produce una inactivación de un gran número de muestras en el año 2008 y de prácticamente la totalidad de las muestras durante el año 2009. Este hecho indica que el proceso de desinfección iniciado con el cloro y finalizado con la luz UV es muy eficiente en cuanto a inactivación de *E. coli*. La figura 7.11 permite entender mejor la figura 7.10, pues con independencia de la transmitancia se consigue la inactivación total de los microorganismos. Por lo tanto, es evidente que al producirse prácticamente la inactivación total de los indicadores, la inactivación será mayor cuanto mayor sea la concentración de *E. coli*, que como se ha estudiado anteriormente corresponde generalmente con valores de transmitancia inferiores al 60%.

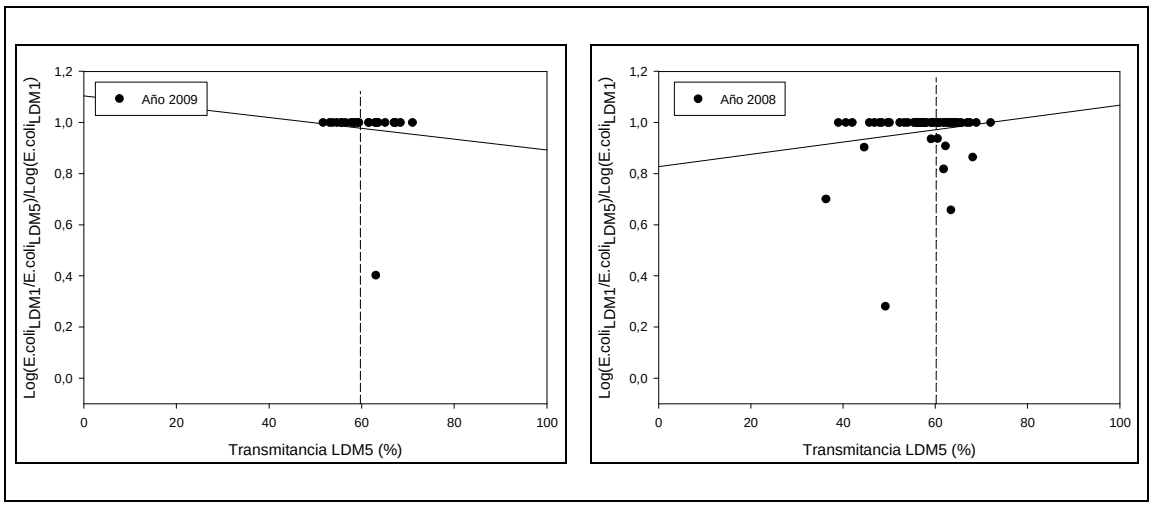



Figura 7.11. Relación entre la inactivación de *E. coli* normalizada (relativa) producida por el proceso de regeneración y la transmitancia a 254 nm durante los años 2008 y 2009 en la ERA de Lloret de Mar.

## 7.11 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Las conclusiones y recomendaciones obtenidas en este capítulo son:

1. El proceso de regeneración de agua aumenta la fiabilidad (disminuye la variabilidad) de la MES y de la turbiedad. La fiabilidad del potencial redox y del contenido de *E. coli* y CSR disminuye tras el proceso de regeneración. La fiabilidad de la transmitancia a 254 nm aumenta en el año 2008 y disminuye en el año 2009.

2. La distribución normal no es estrictamente aplicable en parámetros físico-químicos del agua (sí en parámetros sanitarios) cuando se analiza una larga sesión de datos experimentales (superior a 100) debido a su capacidad para detectar cambios bruscos o episódicos de la calidad que se manifiesta principalmente en los

desajustes de las 'colas' de la distribución. El proceso de regeneración mejora el ajuste de los datos representados a la recta de regresión.

3. La planificación del muestreo debe ser más uniforme con una simultaneidad mucho más armónica, semejante a la utilizada en las ERA de Castell-Platja d'Aro y de Tossa de Mar, con la finalidad de obtener una buena base de datos para proceder a su correcto análisis.

4. La evolución experimentada por el nuevo proceso de regeneración permite obtener en el año 2009 un aumento notable de calidad de la MES, turbiedad, transmitancia, *E. coli* y CSR. La MES y la turbiedad sufren también una mejora significativa de la fiabilidad. El proceso de regeneración también produce una calidad más regular y homogénea en cuanto a MES, turbiedad y transmitancia a 254 nm pues el ajuste de los datos a la recta de regresión es mucho más ajustado.

5. La transmitancia a 254 nm del agua se debe mejorar para que la desinfección con luz UV alcance una mayor eficiencia. Es recomendable establecer un punto de muestreo justo antes de la desinfección con luz UV debido a la importancia de este último tratamiento de desinfección.

6. La inexistencia de un proceso de desinfección con cloro tras el tratamiento de desinfección con luz UV permite recomendar la incorporación de una sonda de potencial redox como sistema de control para asegurar que el agua regenerada contenga siempre una concentración mínima de cloro. Se recomienda que la sonda de potencial redox se comunique automáticamente con la bomba dosificadora de cloro (sistema de retroalimentación).

7. La incorporación de un sistema de desinfección con luz UV permite aumentar la inactivación del contenido de CSR. La desinfección conjunta de luz UV y cloro permiten disminuir notablemente el percentil 50 del agua afluente (no detectable en el año 2009) y el porcentaje de muestras con ausencia de CSR (67% en el año 2009 frente al 33% en el año 2008). Las alternativas consideradas para disminuir la concentración de CSR son: 1) aumentar la intensidad de la luz UV, y 2) aumentar la transmitancia a 254 nm del agua.

8. El periodo de obras generado en la EDAR y en la ERA afecta significativamente la calidad de los parámetros físico-químicos, pero no la de los parámetros sanitarios. Esto resalta que el proceso de depuración no tiene como objeto prioritario la desinfección y que el principal objetivo del proceso de regeneración es la inactivación de los microorganismos.

9. El análisis conjunto de la MES y la turbiedad muestra que el parámetro limitante en el proceso de regeneración es la turbiedad y por lo tanto, la prioridad principal del proceso de regeneración debe ser asegurar la fiabilidad de la turbiedad. El valor reglamentario correspondiente a la MES es inferior al límite de detección del método convencional de medida de la MES. En esta ERA podría plantearse una disminución de la frecuencia de control de la MES, e incluso bastaría sólo con medir la turbiedad. Esto supondría un ahorro técnico-económico, al ser el ensayo de la turbiedad más sencillo y económico de realizar. En este último caso, deberá tenerse un especial control de la calibración del turbidímetro.

10. El agua regenerada satisface los valores límite fijados para los usos actuales 1.2 y 4.1 del RD1620/2007 durante todos los años estudiados.

11. El proceso de regeneración asegura el cumplimiento de los límites correspondientes a la MES para el uso más restrictivo del RD 1620/2007 (uso 1.1), pero no en cuanto a la turbiedad y *E. coli*.

12. Los valores de la turbiedad en el agua regenerada en la ERA de Lloret de Mar se encuentran lejos de los límites correspondientes al uso 1.1 (percentil 90 de 4,33 UNT en el año 2009). El cumplimiento de estos límites requerirá un mayor control del proceso de depuración y especialmente del proceso de regeneración de agua. El establecimiento de puntos de muestreo en LDM2, LDM3 y LDM4 permitirá observar la eficacia de cada proceso por separado y actuar en estos procesos hasta alcanzar un funcionamiento estable y eficiente.

13. El cumplimiento de los límites del contenido de *E. coli* (presencia de 0,04 ulog/100 mL en el año 2009) correspondientes al uso 1.1 requerirá la adopción de dos posibles alternativas: 1) aumentar la transmitancia del agua a 254 nm, pues la eficiencia de la luz UV aumenta significativamente, y 2) aumentar la dosis de cloro.

# CAPÍTULO 8

# CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

## CONCLUSIONES

Las conclusiones obtenidas en la presente tesina son:

1. Eficacia del proceso de regeneración:

    a. El proceso de regeneración de las tres ERA estudiadas es efectivo, como ilustra la disminución de los percentiles 50 y 90 de la MES, la turbiedad y el contenido de *E. coli* y CSR, y el aumento de los del potencial redox durante todos los años estudiados.
    b. El proceso de regeneración de las ERA de Tossa de Mar y Lloret de Mar aumenta los percentiles 50 y 90 de la transmitancia a 254 nm durante todos los años estudiados. La falta de sistemática en la toma y análisis de muestras no han permitido establecer una conclusión definitiva en cuanto a la transmitancia a 254 nm en la ERA de Castell-Platja d'Aro.

2. Fiabilidad del proceso de regeneración:

    a. El proceso de regeneración de la ERA de Castell-Platja d'Aro aumenta la fiabilidad (disminuye la variabilidad) de la MES, la turbiedad y el contenido de *E. coli* y CSR. Los cambios de localización del punto de muestreo del potencial redox disminuyen la fiabilidad; el establecimiento de un punto de muestreo fijo permitirá aumentar la fiabilidad. La falta de sistemática en la toma y análisis de muestras no han permitido establecer una conclusión definitiva en cuanto a la transmitancia a 254 nm.
    b. El proceso de regeneración de la ERA de Tossa de Mar aumenta la fiabilidad de la MES, la turbiedad y la transmitancia a 254 nm, mientras que disminuye la fiabilidad del potencial redox. El contenido de *E. coli* alcanza una fiabilidad máxima durante los años 2007, 2008 y 2009, pues todos sus valores indican ausencia de *E. coli*. El contenido no nulo de CSR sufre una disminución de fiabilidad durante todos los años estudiados, excepto en el año 2009.
    c. El proceso de regeneración de la ERA de Lloret de Mar aumenta la fiabilidad de la MES y de la turbiedad. La fiabilidad del potencial redox y de los valores no nulos del contenido de *E. coli* y CSR disminuyen tras el proceso de regeneración. La fiabilidad de la transmitancia a 254 nm aumenta durante el año 2008 y disminuye durante el 2009.

3. La distribución normal no es estrictamente aplicable para la evaluación de los parámetros físico-químicos del agua, cuando se analiza una larga serie de datos experimentales (superior a 100), debido a su capacidad para detectar cambios bruscos o episódicos de la calidad del agua, que se manifiestan principalmente en los desajustes de las 'colas' de la distribución.

4. La incorporación de sondas de potencial redox en los procesos de regeneración de agua proporciona notables ventajas sobre las tradicionales sondas de cloro.

a. La incorporación de una sonda redox en la ERA de Castell-Platja d'Aro aumenta la fiabilidad del proceso de cloración, aumenta el número y el porcentaje de muestras con ausencia de *E. coli*, y mantiene una dosificación óptima del cloro.
b. La sonda de potencial redox situada tras el proceso de filtración en la ERA de Tossa de Mar actúa eficazmente como un sistema de control para asegurar que el agua regenerada contiene siempre una concentración mínima de cloro.
c. La utilización de sondas redox permite un ahorro importante en la adición de cloro y presenta un coste de mantenimiento muy inferior frente a las sondas de cloro tradicionales.

5. El análisis conjunto de la MES y la turbiedad tiene un comportamiento similar en las tres ERA estudiadas:

   a. La turbiedad es el parámetro determinante de la evaluación de la calidad del agua durante el proceso de regeneración y, por lo tanto, la prioridad del proceso de regeneración debe ser asegurar la fiabilidad de la turbiedad.
   b. El límite reglamentario correspondiente a la MES coincide o es inferior al límite de detección del método convencional de medida de la MES. Los resultados de las tres ERA estudiadas sugieren una disminución de la frecuencia de control de la MES, en las que incluso bastaría con medir sólo la turbiedad. Esto supondría un considerable ahorro técnico-económico, al ser el ensayo de la turbiedad mucho más sencillo y económico de realizar.

6. El estudio del proceso de desinfección con luz UV en la ERA de Castell-Platja d'Aro muestra una disminución de la fiabilidad del indicador *E. coli*. Esto muestra la dependencia del proceso en la transmitancia a 254 nm del agua, especialmente cuando ésta es inferior al 60% (valor mínimo recomendado por las directrices internacionales para asegurar la eficiencia de un proceso de desinfección con luz UV). La mejor estrategia para aumentar su fiabilidad es mejorar la transmitancia del agua afluente.

7. La desinfección conjunta de luz UV y cloro permite una inactivación enormemente eficiente. La posterior desinfección con cloro en la ERA de Castell-Platja d'Aro actúa como sistema de control; cuando la luz UV no es eficiente, el cloro permite disminuir notablemente las concentraciones de *E. coli* e inactivar, aunque en menor medida, los CSR.

8. La incorporación de un sistema de desinfección con luz UV en las ERA de Tossa de Mar y Lloret de Mar ha aumentado la inactivación del contenido de CSR, en comparación con la desinfección producida únicamente con hipoclorito sódico: en la ERA de Tossa de Mar la desinfección exclusiva con cloro inactiva 2 órdenes de magnitud (factor 100) como máximo y la desinfección conjunta de luz UV y cloro inactiva 3 órdenes de magnitud (factor 1000). La desinfección conjunta de luz UV y cloro permite disminuir notablemente los percentiles 50 y 90 del agua afluente, y el porcentaje de muestras con ausencia de CSR:

   a. El percentil 50 es "no detectable" en el año 2009 en ambas ERA frente a 0,37 ulog/100mL en la ERA de Tossa de Mar y 0,43 ulog/100 mL en la ERA de Lloret de Mar.

b. El porcentaje de muestras con ausencia de CSR es de un 84% en el año 2009 frente al 42% en el año 2008 en la ERA de Tossa de Mar, y 67% frente a 33% respectivamente en la ERA de Lloret de Mar.

9. Los CSR son un excelente indicador de la eficiencia de la desinfección con luz UV y ponen de manifiesto la necesidad de establecer un control estricto de las lámparas de luz UV, especialmente en cuanto a su funcionamiento acumulado, pues permitirán detectar el final de su vida útil y reemplazarlas en el momento adecuado, evitando así la adopción de un periodo fijo de cambio de lámparas. Cuando las lámparas de luz UV finalizan su vida útil, la eficiencia de eliminación conjunta (luz UV y cloro) de *E. coli* y CSR experimenta una disminución importante, haciendo que la eficacia de inactivación de CSR disminuya una unidad logarítmica aproximadamente.

10. El agua regenerada en las tres ERA satisface los valores límite fijados para los usos actuales durante todos los años estudiados: usos 1.2, 2.1 y 4.1 del RD 1620/2007 en la ERA de Castell-Platja d'Aro, uso 1.2 en la ERA de Tossa de Mar, y usos 1.2 y 4.1 en la ERA de Lloret de Mar.

11. Los límites de calidad fijados para el uso más restrictivo del RD 1620/2007 (uso 1.1) presenta diferente cumplimiento según la ERA estudiada:

    a. El proceso de regeneración de la ERA de Castell-Platja d'Aro y de Lloret de Mar asegura el cumplimiento de los límites correspondientes a la MES, pero no en cuanto a la turbiedad y el contenido de *E. coli* durante todos los años estudiados.
    b. El proceso de regeneración de la ERA de Tossa de Mar asegura el cumplimiento de los límites correspondientes a la MES (todos los años estudiados), turbiedad (únicamente en el año 2009) y contenido de *E. coli* (desde el año 2006 incluido).

12. Los resultados de la ERA de Tossa de Mar permiten afirmar que el proceso de regeneración es suficientemente fiable y eficiente como para satisfacer la calidad exigida al uso 1.1 del RD 1620/2007. Los niveles de fiabilidad alcanzados deben permitir que las Autoridades Competentes concedan la autorización necesaria para poder utilizar el agua regenerada en el uso 1.1.

13. El cumplimiento de los límites de turbiedad correspondientes al uso 1.1 requerirá realizar diversas inversiones en la ERA de Castell-Platja d'Aro, tales como incorporar un proceso previo de coagulación-floculación y/o un decantador lamelar.

14. Los valores de la turbiedad en el agua regenerada en la ERA de Lloret de Mar se encuentran lejos de los límites correspondientes al uso 1.1 (percentil 90 de 4,33 UNT en el año 2009). El cumplimiento de estos límites requerirá un mayor control del proceso de depuración y especialmente del proceso de regeneración de agua. El establecimiento de puntos de muestreo en LDM2, LDM3 y LDM4 permitirá observar la eficacia de cada proceso por separado y actuar en estos procesos hasta alcanzar un funcionamiento estable y eficiente.

## RECOMENDACIONES

Los resultados obtenidos en el estudio de la tesina permiten formular las siguientes recomendaciones:

1. Para realizar un análisis exhaustivo y objetivo de los procesos de regeneración de agua convendrá que:

    a. Los puntos óptimos de muestreo se establezcan e identifiquen de forma sistemática y rigurosa.
    b. El muestreo deba realizarse siempre en los mismos puntos; los cambios de localización introducen dificultades añadidas a la interpretación de los datos y puede conllevar un análisis erróneo de los resultados.
    c. La toma y el posterior análisis de una muestra deba realizarse conforme dicta la normativa correspondiente, con un procedimiento preciso y fiable.
    d. La planificación del muestreo deba ser uniforme, con simultaneidad armónica.
    e. Los equipos de medición deban mantenerse calibrados de forma sistemática con el fin de asegurar la exactitud y precisión de las medidas y controlar los posibles errores que su uso pueda acarrear. Este control deberá extremarse en aquellos periodos en los que se incorpora o cambia un nuevo equipo.

2. La evaluación de los valores experimentales de la calidad del agua regenerada convendría realizarla mediante gráficas de distribución logarítmico-normal pues esta técnica ofrece ventajas superiores a los métodos numéricos convencionales, permite visualizar claramente la evolución absoluta y relativa de los parámetros de calidad y ofrece una estimación cualitativa y cuantitativamente de la eficacia y la fiabilidad de los procesos de depuración y de regeneración de agua.

3. Las ventajas generadas mediante la dosificación de cloro con retroalimentación por sonda redox en la ERA de Castell-Platja d'Aro sugiere incorporar este mecanismo en las ERA de Tossa de Mar y de Lloret de Mar. Este mecanismo permitirá que la ERA de Tossa de Mar disminuya la cantidad de agua tratada por los tres primeros tratamientos del proceso de regeneración que posteriormente se envía al mar por no cumplir los valores consigna del potencial redox.

4. Los dos puntos actuales de control de la transmitancia en la ERA de Castell-Platja d'Aro deberían complementarse con un nuevo punto de muestreo anterior a la aplicación de la luz UV, debido a la enorme importancia que tiene este parámetro en la eficacia de la desinfección con luz UV.

5. Las alternativas recomendadas para disminuir el contenido de CSR en la ERA de Lloret de Mar son: 1) aumentar la intensidad de la luz UV y 2) mejorar la transmitancia a 254 nm del agua. La enorme importancia de la desinfección con luz UV durante el proceso de regeneración lleva a recomendar el establecimiento de un punto de muestreo previo a la desinfección con luz UV.

6. El cumplimiento de los límites del contenido de *E. coli* correspondientes al uso 1.1 requerirá la adopción de dos posibles alternativas en las ERA de Castell-Platja d'Aro y de Lloret de Mar: 1) aumentar la transmitancia 254 nm del agua, pues la eficiencia de la luz UV aumenta significativamente y 2) aumentar la dosis de cloro.

# CAPÍTULO 9

# REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

American Water Works Association: http://www.awwa.org.

Asano, T., Sheikh, B., Cort, P., Kirkpatrick, W., Jacques, R. (1990). Monterey wastewater reclamation study for agriculture. J. Wat. Poll. Control Fed.

Botero, L., Montiel, M., Estrada, P., Villalobos, M., Herrera, L. (1997). Microorganism renoval in wastewater stabilization ponds in Maracaibo, Venezuela. Wat. Sci. Tech.

Bueso, I. (2004). Inactivación bacteriana y vírica durante la regeneración de agua. Tesina ETSECCPB-UPC.

Consorci de la Costa Brava: http://www.ccbgi.org.

Diario Oficial de las Comunidades Europeas (1991), Directiva 91/271/CEE del Consejo sobre el tratamiento de las aguas residuales urbanas.

Gómez, M. (2008). Parámetros de control de los procesos de regeneración del agua. Tesina ETSECCPB-UPC.

Marín, M., Dalmau, E., Martínez, L., Con, A., Catalán, C., Sala, Ll., Sala, J., Lucena,. F. (2009). Evolució de la qualitat de l'aigua regenerada en les xarxes de distribución de Tossa de Mar i de Lloret de Mar. Consorci de la Costa Brava.

Microsoft Corp. (2003). http://www.microsoft.com/excel.

Ministerio de Medio Ambiente (2007). Real Decreto 1620/2007 por el que se establece el régimen jurídico de la reutilización de las aguas depuradas.

Mujeriego, R., García, J., Aguirre, P. (2004). Desinfección con cloro y luz UV en un proceso convencional de regeneración de agua. Artículo publicado en la revista especializada "Ingeniería del Agua", Vol. 11, nº 1, marzo 2004.

Mujeriego, R. (2005). La fiabilidad de los procesos de regeneración de agua. Universitat Politècnica de Catalunya, Ingeniería Sanitaria y Ambiental.

Mujeriego, R. (2007). La sequía en España. La reutilización, la regulación y la desalación en la gestión integrada del agua. La sequía en España, capítulo 7. Ministerio de Medio Ambiente.

Mujeriego, R. (2007a). Conceptos de Ingeniería Ambiental. Asignatura de Ingeniería Ambiental. ETS de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. 3ª edición, septiembre de 2007.

Mujeriego, R. (2008). Reutilización planificada y gestión integrada del agua. Presentación realizada en el XXVI curso sobre "Tratamiento de Aguas Residuales y Explotación de Estaciones Depuradoras". CEDEX, Madrid, noviembre de 2008.

Mujeriego, R., Peters, K. (2008a). Process reliability and significance of reclaimed water quality parameters. Water Science and Technology, 57 (5), 667-674.

Quintana, S., Borrego, C. (2009). Persistència de diferents indicadors bacterians de contaminación fecal en basses d'emmagatzematge d'aigua regenerada del Golg d'Aro. Consorci de la Costa Brava.

Sala, Ll. (2009). Wastewater reclamation and reuse in Costa Brava. Consorci de la Costa Brava.

Serra, M., Sala, Ll. (2007). Regeneración y reutilización de aguas en la Costa Brava: criterios prácticos de organización y gestión. Consorci de la Costa Brava.

SPSS Inc. (2007). http://www.spss.com.

SYSTAT Inc. (2009). http://www.systat.com/products/sigmaplot.

Tchobanoglous, G. y Schroeder, E.D. (1985). Chemical Treatment Methods. Water Quality Management Libraty, capítulo 13.2, pág. 560- 567.

Water Environment Association: http://www.wef.org.

# ANEJO 1

# Análisis estadístico de normalidad de los resultados experimentales

# A. ERA CASTELL-PLATJA D'ARO

## A.1. Materia en suspensión (MES)

Para determinar si los datos experimentales se ajustan a una distribución normal cabe realizar el test de Kolmogorov-Smirnov:

| Año | Punto de control | Número de muestras | Valor de Z de K-S | Nivel de significación (p) | Normalidad |
|---|---|---|---|---|---|
| 2009 | CPA2 | 25 | 0,956 | 0,320 | Sí |
| 2009 | CPA4 | 19 | 1,067 | 0,205 | Sí |
| 2008 | CPA2 | 57 | 0,743 | 0,640 | Sí |
| 2008 | CPA4 | 34 | 0,607 | 0,854 | Sí |
| 2007 | CPA1 | 73 | 1,386 | 0,043 | No |
| 2007 | CPA4 | 36 | 0,531 | 0,94 | Sí |
| 2006 | CPA1 | 79 | 1,745 | 0,005 | No |
| 2006 | CPA4 | 42 | 0,512 | 0,955 | Sí |
| 2005 | CPA1 | 61 | 1,337 | 0,056 | Sí |
| 2005 | CPA4 | 31 | 1,101 | 0,177 | Sí |
| 2004 | CPA1 | 34 | 1,231 | 0,097 | Sí |
| 2004 | CPA4 | 27 | 0,971 | 0,302 | Sí |

valor de p>0,05 indica normalidad
valor de p<0,05 indica no normalidad

## A.2. Turbiedad

Para determinar si los datos experimentales se ajustan a una distribución normal cabe realizar el test de Kolmogorov-Smirnov:

| Año | Punto de control | Número de muestras | Valor de Z de K-S | Nivel de significación (p) | Normalidad |
|---|---|---|---|---|---|
| 2009 | CPA2 | 21 | 1,443 | 0,031 | No |
| 2009 | CPA4 | 19 | 0,967 | 0,307 | Sí |
| 2008 | CPA2 | 43 | 1,269 | 0,08 | Sí |
| 2008 | CPA4 | 34 | 0,609 | 0,852 | Sí |
| 2007 | CPA1 | 42 | 0,606 | 0,857 | Sí |
| 2007 | CPA4 | 49 | 1,274 | 0,078 | Sí |
| 2006 | CPA1 | 59 | 1,504 | 0,022 | No |
| 2006 | CPA4 | 63 | 1,116 | 0,166 | Sí |
| 2005 | CPA1 | 42 | 1,099 | 0,179 | Sí |
| 2005 | CPA4 | 36 | 0,820 | 0,512 | Sí |
| 2004 | CPA1 | 29 | 1,016 | 0,253 | Sí |
| 2004 | CPA4 | 29 | 1,083 | 0,191 | Sí |

valor de p>0,05 indica normalidad
valor de p<0,05 indica no normalidad

## A.3. Transmitancia 254 nm

Para determinar si los datos experimentales se ajustan a una distribución normal cabe realizar el test de Kolmogorov-Smirnov:

| Año | Punto de control | Número de muestras | Valor de Z de K-S | Nivel de significación (p) | Normalidad |
|---|---|---|---|---|---|
| 2009 | CPA2 | 19 | 0,615 | 0,844 | Sí |
| 2009 | CPA4 | 19 | 0,525 | 0,946 | Sí |
| 2008 | CPA2 | 34 | 0,663 | 0,771 | Sí |
| 2008 | CPA4 | 34 | 0,644 | 0,802 | Sí |
| 2007 | CPA1 | 40 | 0,704 | 0,704 | Sí |
| 2007 | CPA4 | 52 | 1,342 | 0,055 | Sí |
| 2006 | CPA1 | 62 | 0,785 | 0,568 | Sí |
| 2006 | CPA4 | 66 | 0,882 | 0,418 | Sí |
| 2005 | CPA1 | 39 | 0,526 | 0,945 | Sí |
| 2005 | CPA4 | 34 | 0,766 | 0,601 | Sí |
| 2004 | CPA1 | 29 | 0,640 | 0,808 | Sí |
| 2004 | CPA4 | 29 | 0,640 | 0,808 | Sí |

valor de $p>0,05$ indica normalidad
valor de $p<0,05$ indica no normalidad

## A.4. Potencial Redox

Para determinar si los datos experimentales se ajustan a una distribución normal cabe realizar el test de Kolmogorov-Smirnov:

| Año | Punto de control | Número de muestras | Valor de Z de K-S | Nivel de significación (p) | Normalidad |
|---|---|---|---|---|---|
| 2009 | CPA2 | 19 | 0,660 | 0,776 | Sí |
| 2009 | CPA4 | 19 | 0,894 | 0,401 | Sí |
| 2008 | CPA2 | 31 | 0,448 | 0,988 | Sí |
| 2008 | CPA4 | 34 | 0,516 | 0,953 | Sí |

valor de $p>0,05$ indica normalidad
valor de $p<0,05$ indica no normalidad

## A.5. *E. COLI* y CF

Para determinar si los datos experimentales se ajustan a una distribución normal cabe realizar el test de Kolmogorov-Smirnov:

| Año | Punto de control | Número de muestras | Valor de Z de K-S | Nivel de significación (p) | Normalidad |
|---|---|---|---|---|---|
| 2009 | CPA2 | 19 | 0,352 | 1,000 | Sí |
| 2009 | CPA3 | 17 | 0,350 | 1,000 | Sí |
| 2009 | CPA4 | 7 | 0,580 | 0,889 | Sí |
| 2008 | CPA2 | 31 | 1,054 | 0,216 | Sí |
| 2008 | CPA3 | 28 | 0,993 | 0,278 | Sí |
| 2008 | CPA4 | 8 | 0,925 | 0,359 | Sí |
| 2007 | CPA1 | 36 | 0,898 | 0,396 | Sí |
| 2007 | CPA3 | 34 | 0,587 | 0,881 | Sí |
| 2007 | CPA4 | 16 | 1,018 | 0,252 | Sí |
| 2006 | CPA1 | 35 | 0,808 | 0,531 | Sí |
| 2006 | CPA3 | 35 | 0,839 | 0,483 | Sí |
| 2006 | CPA4 | 15 | 0,609 | 0,853 | Sí |
| 2005 | CPA1 | 31 | 0,551 | 0,922 | Sí |
| 2005 | CPA3 | 22 | 0,698 | 0,714 | Sí |
| 2005 | CPA4 | 11 | 0,455 | 0,986 | Sí |
| 2004 | CPA1 | 28 | 0,676 | 0,750 | Sí |
| 2004 | CPA3 | 24 | 0,585 | 0,884 | Sí |
| 2004 | CPA4 | 5 | 0,613 | 0,846 | Sí |

valor de $p>0,05$ indica normalidad
valor de $p<0,05$ indica no normalidad

## A.6. CSR

Para determinar si los datos experimentales se ajustan a una distribución normal cabe realizar el test de Kolmogorov-Smirnov:

| Año | Punto de control | Número de muestras | Valor de Z de K-S | Nivel de significación (p) | Normalidad |
|---|---|---|---|---|---|
| 2009 | CPA2 | 6 | 0,444 | 0,989 | Sí |
| 2009 | CPA4 | 6 | 0,444 | 0,989 | Sí |
| 2008 | CPA2 | 10 | 0,830 | 0,495 | Sí |
| 2008 | CPA4 | 10 | 0,815 | 0,520 | Sí |
| 2007 | CPA1 | 12 | 0,425 | 0,994 | Sí |
| 2007 | CPA4 | 11 | 0,657 | 0,782 | Sí |
| 2006 | CPA1 | 12 | 0,503 | 0,962 | Sí |
| 2006 | CPA4 | 10 | 0,750 | 0,627 | Sí |
| 2005 | CPA1 | 9 | 0,5 | 0,964 | Sí |
| 2005 | CPA4 | 6 | 0,445 | 0,989 | Sí |

valor de $p>0,05$ indica normalidad
valor de $p<0,05$ indica no normalidad

## B. ERA TOSSA DE MAR

### B.1. Materia en suspensión (MES)

Para determinar si los datos experimentales se ajustan a una distribución normal cabe realizar el test de Kolmogorov-Smirnov:

| Año | Punto de control | Número de muestras | Valor de Z de K-S | Nivel de significación (p) | Normalidad |
|---|---|---|---|---|---|
| 2009 | TDM1 | 52 | 0,987 | 0,284 | Sí |
| 2009 | TDM6 | 68 | 0,814 | 0,522 | Sí |
| 2008 | TDM1 | 109 | 1,460 | 0,028 | No |
| 2008 | TDM6 | 159 | 1,955 | 0,001 | No |
| 2007 | TDM1 | 151 | 1,589 | 0,013 | No |
| 2007 | TDM6 | 151 | 1,085 | 0,189 | Sí |
| 2006 | TDM1 | 146 | 1,734 | 0,005 | No |
| 2006 | TDM6 | 142 | 1,987 | 0,001 | No |
| 2005 | TDM1 | 143 | 1,284 | 0,074 | Sí |
| 2005 | TDM6 | 143 | 1,578 | 0,014 | No |

valor de p>0,05 indica normalidad
valor de p<0,05 indica no normalidad

### B.2. Turbiedad

Para determinar si los datos experimentales se ajustan a una distribución normal cabe realizar el test de Kolmogorov-Smirnov:

| Año | Punto de control | Número de muestras | Valor de Z de K-S | Nivel de significación (p) | Normalidad |
|---|---|---|---|---|---|
| 2009 | TDM1 | 99 | 1,736 | 0,005 | No |
| 2009 | TDM6 | 102 | 1,358 | 0,050 | Sí |
| 2008 | TDM1 | 360 | 2,430 | 0,000 | No |
| 2008 | TDM6 | 361 | 3,225 | 0,000 | No |
| 2007 | TDM1 | 343 | 2,571 | 0,000 | No |
| 2007 | TDM6 | 331 | 2,009 | 0,001 | No |
| 2006 | TDM1 | 345 | 2,350 | 0,000 | No |
| 2006 | TDM6 | 345 | 1,931 | 0,001 | No |
| 2005 | TDM1 | 335 | 2,823 | 0,000 | No |
| 2005 | TDM6 | 335 | 2,388 | 0,000 | No |

valor de p>0,05 indica normalidad
valor de p<0,05 indica no normalidad

### B.3. Transmitancia 254 nm

Para determinar si los datos experimentales se ajustan a una distribución normal cabe realizar el test de Kolmogorov-Smirnov:

| Año | Punto de control | Número de muestras | Valor de Z de K-S | Nivel de significación (p) | Normalidad |
|---|---|---|---|---|---|
| 2009 | TDM1 | 100 | 1,367 | 0,048 | No |
| 2009 | TDM6 | 103 | 1,745 | 0,005 | No |
| 2008 | TDM1 | 361 | 2,692 | 0,000 | No |
| 2008 | TDM6 | 361 | 1,896 | 0,002 | No |
| 2007 | TDM1 | 336 | 1,259 | 0,084 | Sí |
| 2007 | TDM6 | 320 | 2,126 | 0,000 | No |
| 2006 | TDM1 | 344 | 1,507 | 0,021 | No |
| 2006 | TDM6 | 344 | 2,221 | 0,000 | No |
| 2005 | TDM1 | 348 | 1,738 | 0,005 | No |
| 2005 | TDM6 | 348 | 1,695 | 0,006 | No |

valor de p>0,05 indica normalidad
valor de p<0,05 indica no normalidad

### B.4. Potencial Redox

Para determinar si los datos experimentales se ajustan a una distribución normal cabe realizar el test de Kolmogorov-Smirnov:

| Año | Punto de control | Número de muestras | Valor de Z de K-S | Nivel de significación (p) | Normalidad |
|---|---|---|---|---|---|
| 2009 | TDM1 | 23 | 0,499 | 0,964 | Sí |
| 2009 | TDM6 | 23 | 1,003 | 0,267 | Sí |

valor de p>0,05 indica normalidad
valor de p<0,05 indica no normalidad

## B.5. *E. COLI* y CF

Para determinar si los datos experimentales se ajustan a una distribución normal cabe realizar el test de Kolmogorov-Smirnov:

| Año | Punto de control | Número de muestras | Valor de Z de K-S | Nivel de significación (p) | Normalidad |
|---|---|---|---|---|---|
| 2009 | TDM1 | 34 | 0,481 | 0,975 | Sí |
| 2009 | TDM6 | 0 | - | - | - |
| 2008 | TDM1 | 64 | 1,098 | 0,179 | Sí |
| 2008 | TDM6 | 0 | - | - | - |
| 2007 | TDM1 | 45 | 0,626 | 0,828 | Sí |
| 2007 | TDM6 | 1 | - | - | - |
| 2006 | TDM1 | 49 | 0,669 | 0,762 | Sí |
| 2006 | TDM6 | 3 | 0,513 | 0,955 | Sí |
| 2005 | TDM1 | 49 | 0,698 | 0,714 | Sí |
| 2005 | TDM6 | 6 | 0,572 | 0,899 | Sí |

valor de p>0,05 indica normalidad
valor de p<0,05 indica no normalidad

## B.6. CSR

Para determinar si los datos experimentales se ajustan a una distribución normal cabe realizar el test de Kolmogorov-Smirnov:

| Año | Punto de control | Número de muestras | Valor de Z de K-S | Nivel de significación (p) | Normalidad |
|---|---|---|---|---|---|
| 2009 | TDM1 | 6 | 0,471 | 0,980 | Sí |
| 2009 | TDM6 | 1 | - | - | - |
| 2008 | TDM1 | 12 | 0,477 | 0,977 | Sí |
| 2008 | TDM6 | 7 | 0,465 | 0,982 | Sí |
| 2007 | TDM1 | 12 | 0,602 | 0,861 | Sí |
| 2007 | TDM6 | 8 | 0,601 | 0,863 | Sí |
| 2006 | TDM1 | 11 | 0,925 | 0,359 | Sí |
| 2006 | TDM6 | 6 | 0,651 | 0,791 | Sí |
| 2005 | TDM1 | 10 | 0,495 | 0,967 | Sí |
| 2005 | TDM6 | 10 | 0,526 | 0,945 | Sí |

valor de p>0,05 indica normalidad
valor de p<0,05 indica no normalidad

## C. ERA LLORET DE MAR

### C.1. Materia en suspensión (MES)

Para determinar si los datos experimentales se ajustan a una distribución normal cabe realizar el test de Kolmogorov-Smirnov:

| Año | Punto de control | Número de muestras | Valor de Z de K-S | Nivel de significación (p) | Normalidad |
|---|---|---|---|---|---|
| 2009 | LDM1 | 63 | 1,833 | 0,002 | No |
| 2009 | LDM6 | 25 | 0,814 | 0,522 | Sí |
| 2008 | LDM1 | 122 | 2,679 | 0,000 | No |
| 2008 | LDM6 | 75 | 1,978 | 0,001 | No |
| 2007 | LDM1 | 170 | 1,862 | 0,002 | No |
| 2006 | LDM1 | 169 | 2,384 | 0,000 | No |
| 2005 | LDM1 | 163 | 1,937 | 0,001 | No |

valor de p>0,05 indica normalidad
valor de p<0,05 indica no normalidad

### C.2. Turbiedad

Para determinar si los datos experimentales se ajustan a una distribución normal cabe realizar el test de Kolmogorov-Smirnov:

| Año | Punto de control | Número de muestras | Valor de Z de K-S | Nivel de significación (p) | Normalidad |
|---|---|---|---|---|---|
| 2009 | LDM1 | 59 | 2,104 | 0,000 | No |
| 2009 | LDM6 | 25 | 0,767 | 0,598 | Sí |
| 2008 | LDM1 | 121 | 2,973 | 0,000 | No |
| 2008 | LDM6 | 77 | 1,973 | 0,001 | No |
| 2007 | LDM1 | 168 | 2,795 | 0,000 | No |
| 2006 | LDM1 | 157 | 2,229 | 0,000 | No |
| 2005 | LDM1 | 155 | 1,922 | 0,001 | No |

valor de p>0,05 indica normalidad
valor de p<0,05 indica no normalidad

## C.3. Transmitancia 254 nm

Para determinar si los datos experimentales se ajustan a una distribución normal cabe realizar el test de Kolmogorov-Smirnov:

| Año | Punto de control | Número de muestras | Valor de Z de K-S | Nivel de significación (p) | Normalidad |
|---|---|---|---|---|---|
| 2009 | LDM1 | 59 | 0,739 | 0,646 | Sí |
| 2009 | LDM6 | 25 | 0,524 | 0,947 | Sí |
| 2008 | LDM1 | 121 | 1,755 | 0,004 | No |
| 2008 | LDM6 | 77 | 1,196 | 0,114 | Sí |
| 2007 | LDM1 | 163 | 1,463 | 0,028 | No |
| 2006 | LDM1 | 158 | 2,114 | 0,000 | No |
| 2005 | LDM1 | 160 | 1,017 | 0,252 | Sí |

valor de p>0,05 indica normalidad
valor de p<0,05 indica no normalidad

## C.4. Potencial Redox

Para determinar si los datos experimentales se ajustan a una distribución normal cabe realizar el test de Kolmogorov-Smirnov:

| Año | Punto de control | Número de muestras | Valor de Z de K-S | Nivel de significación (p) | Normalidad |
|---|---|---|---|---|---|
| 2009 | LDM1 | 25 | 0,432 | 0,992 | Sí |
| 2009 | LDM6 | 25 | 1,210 | 0,107 | Sí |
| 2008 | LDM1 | 74 | 1,572 | 0,014 | No |
| 2008 | LDM6 | 77 | 2,019 | 0,001 | No |

valor de p>0,05 indica normalidad
valor de p<0,05 indica no normalidad

## C.5. *E. COLI* y CF

Para determinar si los datos experimentales se ajustan a una distribución normal cabe realizar el test de Kolmogorov-Smirnov:

| Año | Punto de control | Número de muestras | Valor de Z de K-S | Nivel de significación (p) | Normalidad |
|---|---|---|---|---|---|
| 2009 | LDM1 | 37 | 0,416 | 0,995 | Sí |
| 2009 | LDM6 | 4 | 0,635 | 0,815 | Sí |
| 2008 | LDM1 | 65 | 0,592 | 0,874 | Sí |
| 2008 | LDM6 | 10 | 0,709 | 0,696 | Sí |
| 2007 | LDM1 | 38 | 0,448 | 0,988 | Sí |
| 2007 | LDM6 | 2 | 0,368 | 0,999 | Sí |
| 2006 | LDM1 | 23 | 0,824 | 0,505 | Sí |
| 2006 | LDM6 | 0 | - | - | - |
| 2005 | LDM1 | 21 | 0,561 | 0,911 | Sí |
| 2005 | LDM6 | 5 | 0,482 | 0,974 | Sí |

valor de p>0,05 indica normalidad
valor de p<0,05 indica no normalidad

## C.6. CSR

Para determinar si los datos experimentales se ajustan a una distribución normal cabe realizar el test de Kolmogorov-Smirnov:

| Año | Punto de control | Número de muestras | Valor de Z de K-S | Nivel de significación (p) | Normalidad |
|---|---|---|---|---|---|
| 2009 | LDM1 | 6 | 0,703 | 0,707 | Sí |
| 2009 | LDM6 | 2 | 0,368 | 0,999 | Sí |
| 2008 | LDM1 | 7 | 0,737 | 0,648 | Sí |
| 2008 | LDM6 | 4 | 0,568 | 0,904 | Sí |
| 2007 | LDM1 | 12 | 0,378 | 0,999 | Sí |
| 2007 | LDM6 | 7 | 0,570 | 0,901 | Sí |
| 2006 | LDM1 | 9 | 0,647 | 0,796 | Sí |
| 2006 | LDM1 | 5 | 0,361 | 0,999 | Sí |
| 2005 | LDM1 | 11 | 0,499 | 0,965 | Sí |
| 2005 | LDM6 | 8 | 0,623 | 0,833 | Sí |

valor de p>0,05 indica normalidad
valor de p<0,05 indica no normalidad

# ANEJO 2

# REAL DECRETO 1620/2007
# por el que se establece el régimen jurídico de la reutilización de las aguas depuradas

## ANEXO II

### Métodos de análisis

Grado Brix: EN 12143 (1996). IFU n.º 8.
Acidez total: EN 12147 (1996). IFU n.º 3.
Fructosa: EN 1140 (1994). IFU n.º 55. EN 12630 (1999). IFU n.º 67.
Glucosa: EN 1140 (1994). IFU n.º 55. EN 12630 (1999). IFU n.º 67.
Sacarosa: EN 12146 (1994). IFU n.º 56. EN 12630 (1999). IFU n.º 67.
Acido cítrico: EN 1137 (1994). IFU n.º 22.
Ácido D-isocítrico: EN 1139 (1994). IFU n.º 54.
Densidad relativa 20/20.º: EN 1131 (1994). IFU n.º 1. IFU n.º 1A
Índice de formol: EN 1133 (1994). IFU 30.
Cenizas: EN 1135 (1994). IFU n.º 9.
Fósforo: EN 1136 (1994). IFU n.º 50.
Potasio: EN 1134 (1994). IFU n.º 33.
Sorbitol: EN 12630 (1998) IFU n.º 67. IFU n.º 62.
Ácido D-málico: EN 12138 (1997). IFU n.º 64.
Ácido L-málico: EN 1138. IFU n.º 21.
Ácido ascórbico: EN 14130. Vitamina C (ácido ascórbico + Ácido dehidroascórbico). IFU 17-A.

Parámetros isotópicos:

$\delta^{18}$ O agua: EN V 12141 (1997).
(D/H)1 Etanol 2H-NMR: AOAC 995.17 (1999).
$\delta^{13}$ C azúcar: EN V 12140 (1997).
$\delta^{13}$ C etanol: J. AOAC Vol 79, n.º 1 (1996).
$\delta^{13}$ C pulpa: EN V 13070 (2001).
$\delta^{13}$ C ácidos: Anal. Chim. Acta 299 (1994).

# MINISTERIO DE LA PRESIDENCIA

**21092** *REAL DECRETO 1620/2007, de 7 de diciembre, por el que se establece el régimen jurídico de la reutilización de las aguas depuradas.*

La Ley 11/2005, de 22 de junio, por la que se modifica la Ley 10/2001, de 5 de julio, del Plan Hidrológico Nacional, contiene una modificación del texto refundido de la Ley de Aguas, aprobado por el Real Decreto Legislativo 1/2001, de 20 de julio, en la que se ha dado nueva redacción del artículo 109.1 «el Gobierno establecerá las condiciones básicas para la reutilización de las aguas, precisando la calidad exigible a las aguas depuradas según los usos previstos. El titular de la concesión o autorización deberá sufragar los costes necesarios para adecuar la reutilización de las aguas a las exigencias de calidad vigentes en cada momento».

Se mantiene, sin modificación, el apartado 2 del artículo 109, en el que se recoge la obligación de obtener concesión administrativa que quedará sustituida por una autorización cuando quien solicite el aprovechamiento de las aguas depuradas sea el titular de la autorización de vertido que dio lugar a la depuración de dichas aguas.

Se completa la modificación del artículo 109 con la supresión de los apartados 3, 4 y 5 del precepto.

Este profundo cambio legislativo exige adaptar los artículos del Reglamento del Dominio Público Hidráulico, aprobado por el Real Decreto 849/1986, de 11 de abril, dedicados a la reutilización.

Este real decreto se inscribe, además, en el mandato que el articulo 19.2 de la Ley 14/1986, de 25 de abril, General de Sanidad, impone a las autoridades sanitarias de participar en la elaboración y ejecución de la legislación sobre aguas, por lo que en su articulado prevé su intervención en aquellos aspectos de la reutilización de aguas no contemplados en las especificaciones técnicas y que podrían suponer un riesgo para la salud de los ciudadanos. Con el real decreto, se cumple también con el objetivo general previsto en la mencionada Ley General de Sanidad, sobre la necesaria participación de las Administraciones competentes en este ámbito mediante la vigilancia sanitaria, la promoción y la mejora de los sistemas que permiten alcanzar parámetros de calidad de aguas compatibles con la salud de la población.

Se hace preciso establecer una regulación reglamentaria más completa y detallada que posibilite las soluciones necesarias respecto de la reutilización. De este modo, se define el concepto de reutilización y se introduce la denominación de aguas regeneradas, más acorde con las posibilidades de reutilización que la norma establece y ampliamente admitida en la doctrina técnica y jurídica. Se determinan los requisitos necesarios para llevar a cabo la actividad de utilización de aguas regeneradas, los procedimientos para obtener la concesión exigida en la ley así como disposiciones relativas a los usos admitidos y exigencias de calidad precisas en cada caso.

Finalmente, debe destacarse la incorporación de dos anexos; el anexo I recoge los criterios de calidad para la utilización de las aguas regeneradas según los usos. Estos criterios tendrán la consideración de mínimos obligatorios exigibles. Por su parte el anexo II contiene el modelo normalizado de solicitud que deben presentar quienes deseen obtener la concesión o autorización de reutilización de aguas depuradas.

Este real decreto deroga, con carácter general, cuantas disposiciones de igual o inferior rango se opongan a lo en él dispuesto y, en particular, los artículos 272 y 273 del Reglamento del Dominio Público Hidráulico.

En el procedimiento de elaboración de esta norma se ha consultado a las comunidades autónomas, a las entidades locales y al Consejo Nacional del Agua.

Debe significarse que aunque el Tribunal Constitucional ha exceptuado de regulación mediante normas reglamentarias las condiciones básicas en una determinada materia, también ha señalado que esta excepción no es absoluta, pudiendo regularse reglamentariamente aquellas materias que por su carácter técnico o coyuntural, como es el caso, hacen imposible una determinación ex lege de sus requisitos básicos.

En su virtud, a propuesta de los Ministros de Medio Ambiente, de Agricultura, Pesca y Alimentación y de Sanidad y Consumo, con la aprobación previa de la Ministra de Administraciones Públicas, de acuerdo con el Consejo de Estado y previa deliberación del Consejo de Ministros en su reunión del día 7 de diciembre de 2007,

D I S P O N G O :

## CAPÍTULO I

### Disposiciones generales

Artículo 1. *Objeto.*

Este real decreto tiene por objeto establecer el régimen jurídico para la reutilización de las aguas depuradas, de acuerdo con el artículo 109.1 del texto refundido de la Ley de Aguas, aprobado por el Real Decreto Legislativo 1/2001, de 20 de julio.

Artículo 2. *Definiciones.*

A los efectos de este real decreto se entiende por:

a) Reutilización de las aguas: 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.

b) Aguas depuradas: aguas residuales que han sido sometidas a un proceso de tratamiento que permita adecuar su calidad a la normativa de vertidos aplicable.

c) Aguas regeneradas: aguas residuales depuradas que, en su caso, han sido sometidas a un proceso de tratamiento adicional o complementario que permite adecuar su calidad al uso al que se destinan.

d) Estación regeneradora de aguas: conjunto de instalaciones donde las aguas residuales depuradas se someten a procesos de tratamiento adicional que puedan ser necesarios para adecuar su calidad al uso previsto.

e) Infraestructuras de almacenamiento y distribución: conjunto de instalaciones destinadas a almacenar y distribuir el agua regenerada hasta el lugar de uso por medio de una red o bien depósitos móviles públicos y privados.

f) Sistema de reutilización de las aguas: conjunto de instalaciones que incluye la estación regeneradora de aguas, en su caso, y las infraestructuras de almacenamiento y distribución de las aguas regeneradas hasta el punto de entrega a los usuarios, con la dotación y calidad definidas según los usos previstos.

g) Primer usuario: persona física o jurídica que ostenta la concesión para la primera utilización de las aguas derivadas.

h) Usuario del agua regenerada: persona física o jurídica o entidad pública o privada que utiliza el agua regenerada para el uso previsto.

i) Punto de entrega de las aguas depuradas: lugar donde el titular de la autorización de vertido de aguas residuales entrega las aguas depuradas en las condiciones de calidad exigidas en la autorización de vertido, para su regeneración.

j) Punto de entrega de las aguas regeneradas: lugar donde el titular de la concesión o autorización de reutilización de aguas entrega a un usuario las aguas regeneradas, en las condiciones de calidad según su uso previstas en esta disposición.

k) Lugar de uso del agua regenerada: zona o instalación donde se utiliza el agua regenerada suministrada.

l) Autocontrol: programa de control analítico sobre el correcto funcionamiento del sistema de reutilización realizado por el titular de la concesión o autorización de reutilización de aguas.

Artículo 3. *Régimen jurídico de la reutilización.*

1. La reutilización de las aguas procedentes de un aprovechamiento requerirá concesión administrativa tal como establecen los artículos 59.1 y 109 del texto refundido Ley de Aguas. Será aplicable a la reutilización el régimen jurídico establecido en las secciones 1.ª «La concesión de aguas en general» y 2.ª «Cesión de derechos al uso privativo de las aguas» del capítulo III del título IV del texto refundido de la Ley de Aguas.

2. No obstante lo establecido en el apartado anterior, en el caso de que la reutilización fuese solicitada por el titular de una autorización de vertido de aguas residuales, se requerirá solamente una autorización administrativa.

3. En el caso de que no coincidan en una misma persona, física o jurídica, la condición de primer usuario de las aguas y de titular de la autorización de vertido se entenderá preferente la solicitud de reutilización que hubiese presentado el titular de la autorización de vertido.

4. La misma preferencia a favor del titular de la autorización de vertido se entenderá reconocida respecto de las solicitudes de concesión de reutilización que presenten terceros que no coincidan con el primer usuario de las aguas.

## CAPÍTULO II

### Condiciones básicas para la reutilización de las aguas depuradas

Artículo 4. *Usos admitidos para las aguas regeneradas.*

1. Las aguas regeneradas podrán utilizarse para los usos indicados en el anexo I.A.

2. En los supuestos de reutilización del agua para usos no contemplados en el anexo I.A, el organismo de cuenca exigirá las condiciones de calidad que se adapten al uso más semejante de los descritos en el mencionado anexo. Será necesario, en todo caso, motivar la reutilización del agua para un uso no descrito en el mismo.

3. En todos los supuestos de reutilización de aguas, el organismo de cuenca solicitará de las autoridades sanitarias un informe previo que tendrá carácter vinculante.

4. Se prohíbe la reutilización de aguas para los siguientes usos:

a) Para el consumo humano, salvo situaciones de declaración de catástrofe en las que la autoridad sanitaria especificará los niveles de calidad exigidos a dichas aguas y los usos.

b) Para los usos propios de la industria alimentaria, tal y como se determina en el articulo 2.1 b) del Real Decreto 140/2003, de 7 de febrero por el que se establecen los criterios sanitarios de la calidad del agua de consumo humano, salvo lo dispuesto en el anexo I.A.3.calidad 3.1c) para el uso de aguas de proceso y limpieza en la industria alimentaria.

c) Para uso en instalaciones hospitalarias y otros usos similares.

d) Para el cultivo de moluscos filtradores en acuicultura.

e) Para el uso recreativo como agua de baño.

f) Para el uso en torres de refrigeración y condensadores evaporativos, excepto lo previsto para uso industrial en el anexo I.A.3.calidad 3.2.

g) Para el uso en fuentes y láminas ornamentales en espacios públicos o interiores de edificios públicos.

h) Para cualquier otro uso que la autoridad sanitaria o ambiental considere un riesgo para la salud de las personas o un perjuicio para el medio ambiente, cualquiera que sea el momento en el que se aprecie dicho riesgo o perjuicio.

Artículo 5. *Criterios de calidad.*

1. Las aguas regeneradas deben cumplir en el punto de entrega los criterios de calidad según usos establecidos en el anexo I.A. Si un agua regenerada está destinada a varios usos serán de aplicación los valores más exigentes de los usos previstos.

2. Los organismos de cuenca, en las resoluciones por las que otorguen las concesiones o autorizaciones de reutilización, podrán fijar valores para otros parámetros o contaminantes que puedan estar presentes en el agua regenerada o lo prevea la normativa sectorial de aplicación al uso previsto para la reutilización. Asimismo,

podrán fijar niveles de calidad más estrictos de forma motivada.

3. La calidad de las aguas regeneradas se considerará adecuada a las exigencias de este real decreto si el resultado del control analítico realizado de acuerdo con lo previsto en el anexo I.B cumple con los requisitos establecidos con el anexo I.C

4. El titular de la concesión o autorización de reutilización de aguas es responsable de la calidad del agua regenerada y de su control desde el momento en que las aguas depuradas entran en el sistema de reutilización hasta el punto de entrega de las aguas regeneradas.

5. El usuario del agua regenerada es responsable de evitar el deterioro de su calidad desde el punto de entrega del agua regenerada hasta los lugares de uso.

6. Las responsabilidades previstas en los apartados 4 y 5 se entenderán sin perjuicio de la potestad de supervisión y control de las autoridades ambientales y sanitarias.

7. La concesión de reutilización podrá ser modificada como consecuencia de las variaciones o modificaciones que se aprueben respecto de la concesión otorgada para el uso privativo del agua al primer usuario de la misma.

## CAPÍTULO III

## Contratos de cesión de derechos sobre aguas regeneradas

Artículo 6. *Características de los contratos de cesión de derechos sobre aguas regeneradas.*

1. Los titulares de la concesión de reutilización y los titulares de la autorización complementaria para reutilización de las aguas podrán suscribir contratos de cesión de derechos de uso de agua de acuerdo con lo establecido en los artículos 67 y 68 de la texto refundido de la Ley de Aguas con las siguientes particularidades:

a) El volumen anual susceptible de cesión no será superior al que figure en la concesión o autorización otorgada.

b) La Administración pública al autorizar el contrato suscrito, además de velar por el cumplimiento de los criterios previstos en el artículo 68.3 texto refundido de la Ley de Aguas., observará que se cumplen los criterios de calidad en relación a los usos a que se vayan a destinar los caudales cedidos.

2. Quienes obtienen la concesión o la autorización de reutilización podrán ceder, en los términos que establece el artículo 343 del Reglamento del Dominio Público Hidráulico, aprobado por el Real Decreto 849/1986, de 11 de abril, con carácter temporal a otro concesionario o titular de derechos de igual rango, la totalidad o parte de los derechos de uso que le correspondan, percibiendo a cambio la compensación económica que establece el artículo 345.2 del Reglamento del Dominio Público Hidráulico. De igual modo podrán participar en las operaciones de los Centros de Intercambio de Derechos.

## CAPÍTULO IV

## Procedimiento para la reutilización de aguas depuradas

Artículo 7. *La reutilización de aguas a través de iniciativas o planes de las Administraciones Públicas.*

1. Con la finalidad de fomentar la reutilización del agua y el uso más eficiente de los recursos hidráulicos, las Administraciones Públicas estatal, autonómica o local, en el ámbito de sus respectivas competencias, podrán llevar a cabo planes y programas de reutilización de aguas. En estos planes se establecerán las infraestructuras que permitan llevar a cabo la reutilización de los recursos hidráulicos obtenidos para su aplicación a los usos admitidos. En dichos planes se especificará el análisis económico-financiero realizado y el sistema tarifario que corresponda aplicar en cada caso. Asimismo, estos planes y programas serán objeto del procedimiento de evaluación ambiental estratégica conforme a lo establecido en la Ley 9/2006, de 28 de abril, sobre evaluación de los efectos de determinados planes y programas en el medio ambiente.

2. En la ejecución de los citados planes y programas, se cumplirán las exigencias establecidas en el artículo 109 del texto refundido de la Ley de Aguas, y en este real decreto respecto de la necesidad de obtener la concesión o autorización de reutilización de aguas por quien vaya a realizar la actividad.

3. Si la explotación se realiza de forma temporal o permanente por alguna de las administraciones publicas, estatal, autonómica o local, la concesión o autorización de reutilización se otorgará a nombre de la misma, o de la entidad o sociedad pública a quien se haya encomendado la ejecución de las infraestructuras o su explotación, que será la responsable del cumplimiento de todas las condiciones impuestas durante los periodos de prueba y explotación.

4. Cuando la explotación de una infraestructura correspondiese a determinados usuarios, será preciso que la Administración pública correspondiente lleve a cabo la entrega de dicha infraestructura formalizando el oportuno documento en el que deberán constar todas las circunstancias en las que se produce la entrega. En particular se mencionará el hecho de que se transfiere a los usuarios, desde ese momento, la concesión o autorización de reutilización del agua y en consecuencia la responsabilidad en el cumplimiento de las condiciones impuestas. En el ámbito de la Administración General del Estado, las Sociedades Estatales de Aguas solicitarán la necesaria concesión o autorización respecto de las instalaciones de reutilización que se le hubieran encomendado en el correspondiente Convenio de Gestión Directa.

5. Cuando la explotación del sistema de reutilización del agua se realice a través de contratos de concesión de obra pública, el concesionario estará obligado a solicitar la correspondiente concesión o autorización de reutilización.

Artículo 8. *Procedimiento para obtener la concesión de reutilización.*

1. Cuando la solicitud de concesión para reutilizar aguas sea formulada por quien ya es concesionario para la primera utilización de las aguas, el procedimiento se tramitará, sin competencia de proyectos, de acuerdo con lo establecido en este artículo.

2. El expediente se iniciará por el concesionario de las aguas para la primera utilización, que a tal efecto deberá presentar su solicitud dirigida al organismo de cuenca territorialmente competente en cualquiera de los lugares designados en el artículo 38.4 de la Ley 30/1992, de 26 de noviembre, de Régimen Jurídico de las Administraciones Públicas y del Procedimiento Administrativo Común, y en el modelo normalizado que figura en el anexo II, manifestando en ella su propósito de reutilizar las aguas, con indicación del uso para el que las solicita. Dicho modelo estará disponible en la página Web del Ministerio de Medio Ambiente.

3. El peticionario deberá presentar un proyecto de reutilización de aguas que incluya la documentación necesaria para identificar el origen y la localización geográfica de los puntos de entrega del agua depurada y regenerada; la caracterización del agua depurada; el volumen anual solicitado; el uso al que se va a destinar; el lugar de uso del agua regenerada especificando las carac-

terísticas de las infraestructuras previstas desde la salida del sistema de reutilización de las aguas hasta los lugares de uso; las características de calidad del agua regenerada correspondientes al uso previsto así como el autocontrol analítico propuesto como establece el anexo I; el sistema de reutilización de las aguas; los elementos de control y señalización del sistema de reutilización; las medidas para el uso eficiente del agua y las medidas de gestión del riesgo en caso de que la calidad del agua regenerada no sea conforme con los criterios establecidos en el anexo I correspondientes al uso permitido.

4. Cuando el destino de las aguas regeneradas fuese el uso agrícola se acreditará la titularidad de las tierras que se pretenden regar a favor del peticionario o, en el caso de concesiones solicitadas por comunidades de usuarios, el documento que acredite que la solicitud de concesión ha sido aprobada por la Junta General. Se presentará en todo caso una copia actualizada del plano parcelario del catastro, donde se señalará la zona a regar. Cuando las características del agua regenerada superen los valores de los parámetros e indicadores definidos en el «anexo I.A. Uso Agrícola», el organismo de cuenca recabará, de acuerdo con las instrucciones técnicas vigentes, información adicional referida a los parámetros y las características de los cultivos.

5. El organismo de cuenca examinará la documentación presentada e informará sobre la compatibilidad o incompatibilidad de la solicitud con el Plan Hidrológico de cuenca atendiendo, entre otros, a los caudales ecológicos. En el primer caso continuará la tramitación del expediente; en el segundo denegará la solicitud presentada.

Simultáneamente solicitará el informe al que se refiere el artículo 25.3 del texto refundido de la Ley de Aguas, para el que se concede el plazo de un mes, transcurrido el cual, sin que se haya emitido, continuará la tramitación del expediente en los términos previstos en la Ley 30/1992, de 26 de noviembre.

6. A continuación, el organismo de cuenca elaborará una propuesta en la que se establecerán las condiciones en las que podría otorgarse la concesión para reutilizar las aguas. Este condicionado contendrá, entre otros extremos:

a) El origen y la localización geográfica del punto de entrega del agua depurada;

b) El volumen máximo anual en metros cúbicos y modulación establecida, caudal máximo instantáneo expresado en litros por segundo.

c) El uso admitido.

d) El punto de entrega y el lugar de uso del agua regenerada.

e) Las características de calidad del agua regenerada que deben cumplir los criterios de calidad exigidos para cada uso que se establecen en el anexo I.A de este real decreto, hasta su punto de entrega a los usuarios.

f) El sistema de reutilización de las aguas.

g) Los elementos de control y señalización del sistema de reutilización.

h) El programa de autocontrol de la calidad del agua regenerada que incluya los informes sobre el cumplimiento de la calidad exigida que se determinará conforme establece el anexo I.B y I.C.

i) El plazo de vigencia de la concesión.

j) Las medidas de gestión del riesgo en caso de calidad inadmisible de las aguas para el uso autorizado.

k) Cualquier otra condición que el organismo de cuenca considere oportuna en razón de las características específicas del caso y del cumplimiento de la finalidad del sistema de reutilización del agua.

7. Elaborada la propuesta de condiciones, se solicitará la conformidad expresa del peticionario que tendrá lugar en el plazo de diez días hábiles. Transcurrido este plazo, el organismo de cuenca notificará la resolución expresa en el plazo máximo de un mes, contado desde que ha tenido constancia de la conformidad.

8. Si el solicitante no estuviera de acuerdo con las condiciones propuestas, presentará motivación justificada que podrá ser o no admitida, dando lugar a resolución expresa de la administración en el plazo de un mes.

9. De no haber respuesta, se denegará la concesión solicitada en el plazo de un mes, contado desde la notificación de la propuesta de condiciones.

Artículo 9. *Procedimiento para obtener la autorización de reutilización.*

1. Cuando el titular de la autorización de vertido presente una solicitud para reutilizar las aguas se le otorgará una autorización administrativa, que tendrá el carácter de complementaria a la de vertido, en la que se establecerán los requisitos y condiciones en los que podrá llevarse a cabo la reutilización del agua.

2. Si se solicita la obtención de una autorización de vertido manifestando el propósito de reutilizar las aguas residuales, la autorización de reutilización quedará supeditada al otorgamiento de la autorización de vertido.

3. Para obtener la autorización complementaria a la de vertido será preciso presentar la solicitud prevista en el anexo II con la información exigida en el artículo 8.3 y, en su caso, 8.4. Dicha solicitud se dirigirá al organismo de cuenca territorialmente competente en cualquiera de los lugares designados en el artículo 38.4 de la Ley 30/1992, de 26 de noviembre.

4. Los sucesivos trámites serán los establecidos en los párrafos 5, 6, 7, 8 y 9 del artículo 8.

Artículo 10. *Procedimiento para quien no es concesionario de la primera utilización ni titular de la autorización de vertido.*

Si quien formula la solicitud de concesión para reutilización es un tercero que no ostenta la condición de concesionario para la primera utilización, ni la de titular de la autorización de vertido de las aguas residuales, se seguirá el procedimiento que establece el Reglamento del Dominio Público Hidráulico para las concesiones en general, previa presentación de la solicitud para obtener la concesión de reutilización de aguas según el modelo del anexo II. La propuesta de condiciones en la que podría otorgarse la concesión para reutilizar las aguas determinará los extremos establecidos en el artículo 8.6 de este real decreto.

Artículo 11. *Disposiciones comunes a la concesión y autorización de reutilización de aguas.*

1. Tanto las concesiones de reutilización como las autorizaciones de reutilización serán inscritas en la Sección A) del Registro de Aguas en la forma que establece el artículo 192 del Reglamento del Dominio Público Hidráulico.

2. El incumplimiento de las obligaciones derivadas del condicionado de la concesión o autorización de reutilización será sancionado con arreglo a lo dispuesto en el título VII del texto refundido de la Ley de Aguas.

3. El titular de la concesión o autorización de reutilización deberá sufragar los costes necesarios para adecuar la reutilización de las aguas a las exigencias de calidad vigentes en cada momento y responderá permanentemente de dicha adecuación.

Cuando proceda a juicio de la administración concedente, la sustitución de caudales concesionales por otros procedentes de la reutilización, la administración responderá de los gastos inherentes a la obra en los términos del

artículo 61.3 segundo párrafo del texto refundido de la Ley de Aguas.

Disposición transitoria primera. *Régimen transitorio de las reutilizaciones directas de aguas depuradas con concesión o autorización administrativa vigente.*

Las reutilizaciones directas de aguas depuradas que, a la entrada en vigor de este real decreto, cuenten con concesión o autorización administrativa deberán realizar las adaptaciones que resulten necesarias para poder cumplir las condiciones básicas de la reutilización y las obligaciones impuestas en este real decreto en el plazo de dos años contados desde su entrada en vigor.

Disposición transitoria segunda. *Régimen transitorio de los expedientes de reutilización directa de aguas depuradas, iniciados y no resueltos a la entrada en vigor de este real decreto.*

Los expedientes de reutilización directa, iniciados y no resueltos a la entrada en vigor de este real decreto, se resolverán conforme a la legislación vigente al tiempo de su solicitud, sin perjuicio de que una vez otorgada la correspondiente concesión o autorización, el titular de la misma deba realizar, en el plazo de dos años contados desde el otorgamiento de la autorización, las adaptaciones que resulten necesarias para poder cumplir las condiciones básicas de la reutilización y las obligaciones impuestas en este real decreto.

Disposición derogatoria única. *Derogación normativa.*

Quedan derogados los artículos 272 y 273 del Reglamento del Dominio Público Hidráulico, así como cuantas disposiciones de igual o inferior rango se opongan a lo dispuesto en este real decreto.

Disposición final primera. *Carácter básico.*

Este real decreto tiene el carácter de legislación básica sobre sanidad y medio ambiente y sobre contratos y concesiones administrativas, de conformidad con lo dispuesto en el artículo 149.1.13.ª, 16.ª, 23.ª y 18.ª de la Constitución, excepto los artículos 3.3, 8 –salvo el primer párrafo de su apartado 5 que también tiene carácter de legislación básica ambiental de conformidad con lo establecido en el artículo 149.1.23.ª–, 9, 10 y 11.1, que serán exclusivamente de aplicación en las cuencas hidrográficas intercomunitarias, cuya gestión corresponde a la Administración General del Estado conforme al artículo 149.1.22.ª de la Constitución.

Disposición final segunda. *Desarrollo, aplicación y adaptación del real decreto.*

Por los Ministros de Medio Ambiente, de Agricultura, Pesca y Alimentación y de Sanidad y Consumo se dictarán conjunta o separadamente, según las materias de que se trate, y en el ámbito de sus respectivas competencias, las disposiciones que exija el desarrollo y aplicación de este real decreto.

Disposición final tercera. *Entrada en vigor.*

El presente real decreto entrará en vigor el día siguiente al de su publicación en el «Boletín Oficial del Estado».

Dado en Madrid, el 7 de diciembre de 2007.

JUAN CARLOS R.

La Vicepresidenta Primera del Gobierno
y Ministra de la Presidencia,
MARÍA TERESA FERNÁNDEZ DE LA VEGA SANZ

## ANEXO I.A: CRITERIOS DE CALIDAD PARA LA REUTILIZACIÓN DE LAS AGUAS SEGÚN SUS USOS

### CALIDAD REQUERIDA

| USO DEL AGUA PREVISTO | VALOR MÁXIMO ADMISIBLE (VMA) | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | NEMATODOS INTESTINALES[1] | *ESCHERICHIA COLI* | SÓLIDOS EN SUSPENSIÓN | TURBIDEZ | OTROS CRITERIOS |
| **1.- USOS URBANOS** | | | | | |
| CALIDAD 1.1: RESIDENCIAL[2]<br>a) Riego de jardines privados.[3]<br>b) Descarga de aparatos sanitarios.[3] | 1 huevo/10 L | 0 (UFC[4] /100 mL) | 10 mg/L | 2 UNT[5] | OTROS CONTAMINANTES[6] contenidos en la autorización de vertido aguas residuales: se deberá limitar la entrada de estos contaminantes al medio ambiente. En el caso de que se trate de sustancias peligrosas[7] deberá asegurarse el respeto de las NCAs.[8]<br>*Legionella spp*. 100 UFC/L<br>(si existe riesgo de aerosolización) |
| CALIDAD 1.2: SERVICIOS<br>a) Riego de zonas verdes urbanas (parques, campos deportivos y similares).[9]<br>b) Baldeo de calles.[9]<br>c) Sistemas contra incendios.[9]<br>d) Lavado industrial de vehículos.[9] | 1 huevo/10 L | 200 UFC/100 mL | 20 mg/L | 10 UNT | |

[1] Considerar en todos los grupos de calidad al menos los géneros: *Ancylostoma, Trichuris y Ascaris*.

[2] Deben someterse a controles que aseguren el correcto mantenimiento de las instalaciones.

[3] Su autorización estará condicionada a la obligatoriedad de la presencia doble circuito señalizado en todos sus tramos hasta el punto de uso

[4] Unidades Formadoras de Colonias.

[5] Unidades Nefelométricas de Turbiedad.

[6] ver el Anexo II del RD 849/1986, de 11 de abril.

[7] ver Anexo IV del RD 907/2007, de 6 de julio.

[8] Norma de calidad ambiental ver el artículo 245.5.a del RD 849/1986, de 11 de abril, modificado por el RD 606/2003 de 23 de mayo.

[9] Cuando exista un uso con posibilidad de aerosolización del agua, es imprescindible seguir las condiciones de uso que señale, para cada caso, la autoridad sanitaria, sin las cuales, esos usos no serán autorizados

| USO DEL AGUA PREVISTO | VALOR MÁXIMO ADMISIBLE (VMA) | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | NEMATODOS INTESTINALES | *ESCHERICHIA COLI* | SÓLIDOS EN SUSPENSIÓN | TURBIDEZ | OTROS CRITERIOS |
| **2.- USOS AGRÍCOLAS[1]** | | | | | |
| CALIDAD 2.1[2]<br><br>a) Riego de cultivos con sistema de aplicación del agua que permita el contacto directo del agua regenerada con las partes comestibles para alimentación humana en fresco. | 1 huevo/10 L | 100 UFC/100 mL<br><br>Teniendo en cuenta un plan de muestreo a 3 clases[3] con los siguientes valores:<br>n = 10<br>m = 100 UFC/100 mL<br>M = 1.000 UFC/100 mL<br>c = 3 | 20 mg/L | 10 UNT | OTROS CONTAMINANTES contenidos en la autorización de vertido de aguas residuales: se deberá limitar la entrada de estos contaminantes al medio ambiente. En el caso de que se trate de sustancias peligrosas deberá asegurarse el respeto de las NCAs.<br>*Legionella spp*. 1.000 UFC/L<br>(si existe riesgo de aerosolización)<br>Es obligatorio llevar a cabo la detección de patógenos Presencia/Ausencia (Salmonella, etc.) cuando se repita habitualmente que c=3 para M=1.000 |

[1] Características del agua regenerada que requieren información adicional: Conductividad 3,0 dS/m ; Relación de Adsorción de Sodio (RAS): 6 meq/L; Boro: 0,5 mg/L; Arsénico: 0,1 mg/L; Berilio: 0,1 mg/L; Cadmio: 0,01 mg/L; Cobalto: 0,05 mg/L; Cromo: 0,1 mg/L; Cobre: 0,2 mg/L; Manganeso: 0,2 mg/L; Molibdeno: 0,01 mg/L; Níquel: 0,2 mg/L; Selenio : 0,02 mg/L; Vanadio: 0,1 mg/L..
Para el cálculo de RAS se utilizará la fórmula:

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

[2] Cuando exista un uso con posibilidad de aerosolización del agua, es imprescindible seguir las condiciones de uso que señale, para cada caso, la autoridad sanitaria, sin las cuales, esos usos no serán autorizados

[3] Siendo n: nº de unidades de la muestra; m: valor límite admisible para el recuento de bacterias; M: valor máximo permitido para el recuento de bacterias; c: número máximo de unidades de muestra cuyo número de bacterias se sitúa entre m y M.

| USO DEL AGUA PREVISTO | VALOR MÁXIMO ADMISIBLE (VMA) | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | NEMATODOS INTESTINALES | *ESCHERICHIA COLI* | SÓLIDOS EN SUSPENSIÓN | TURBIDEZ | OTROS CRITERIOS |
| CALIDAD 2.2<br><br>a) 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.<br>b) Riego de pastos para consumo de animales productores de leche o carne.<br>c) Acuicultura. | 1<br>huevo/10 L | 1.000<br>UFC/100 mL<br><br>Teniendo en cuenta un plan de muestreo a 3 clases[1] con los siguientes valores:<br>n = 10<br>m = 1.000 UFC/100 mL<br>M = 10.000 UFC/100 mL<br>c = 3 | 35 mg/L | No se fija límite | OTROS CONTAMINANTES contenidos en la autorización de vertido aguas residuales: se deberá limitar la entrada de estos contaminantes al medio ambiente. En el caso de que se trate de sustancias peligrosas deberá asegurarse el respeto de las NCAs.<br>*Taenia saginata y Taenia solium:* 1 huevo/L<br>(si se riegan pastos para consumo de animales productores de carne)<br>Es obligatorio llevar a cabo detección de patógenos Presencia/Ausencia (*Salmonella*, etc.) cuando se repita habitualmente que c=3 para M=10.000 |
| CALIDAD 2.3<br><br>a) Riego localizado de cultivos leñosos que impida el contacto del agua regenerada con los frutos consumidos en la alimentación humana.<br>b) Riego de cultivos de flores ornamentales, viveros, invernaderos sin contacto directo del agua regenerada con las producciones.<br>c) Riego de cultivos industriales no alimentarios, viveros, forrajes ensilados, cereales y semillas oleaginosas. | 1<br>huevo/10 L | 10.000<br>UFC/100 mL | 35 mg/L | No se fija límite | OTROS CONTAMINANTES contenidos en la autorización de vertido aguas residuales: se deberá limitar la entrada de estos contaminantes al medio ambiente. En el caso de que se trate de sustancias peligrosas deberá asegurarse el respeto de las NCAs.<br>*Legionella spp*. 100 UFC/L |

[1] Siendo n: nº de unidades de la muestra; m: valor límite admisible para el recuento de bacterias; M: valor máximo permitido para el recuento de bacterias; c: número máximo de unidades de muestra cuyo número de bacterias se sitúa entre m y M.

| USO DEL AGUA PREVISTO | VALOR MÁXIMO ADMISIBLE (VMA) | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | NEMATODOS INTESTINALES | *ESCHERICHIA COLI* | SÓLIDOS EN SUSPENSIÓN | TURBIDEZ | OTROS CRITERIOS |
| **3.- USOS INDUSTRIALES** | | | | | |
| CALIDAD 3.1[1]<br>a) Aguas de proceso y limpieza excepto en la industria alimentaria.<br>b) Otros usos industriales. | No se fija límite | 10.000 UFC/100 mL | 35 mg/L | 15 UNT | OTROS CONTAMINANTES contenidos en la autorización de vertido aguas residuales: se deberá limitar la entrada de estos contaminantes al medio ambiente. En el caso de que se trate de sustancias peligrosas deberá asegurarse el respeto de las NCAs<br>*Legionella spp.:* 100 UFC/L |
| c) Aguas de proceso y limpieza para uso en la industria alimentaria | 1 huevo/10 L | 1.000 UFC/100 mL<br>Teniendo en cuenta un plan de muestreo a 3 clases[2] con los siguientes valores:<br>n = 10<br>m = 1.000 UFC/100 mL<br>M = 10.000 UFC/100 mL<br>c = 3 | 35 mg/L | No se fija límite | OTROS CONTAMINANTES contenidos en la autorización de vertido aguas residuales: se deberá limitar la entrada de estos contaminantes al medio ambiente. En el caso de que se trate de sustancias peligrosas deberá asegurarse el respeto de las NCAs.<br>*Legionella spp.*: 100 UFC/L<br>Es obligatorio llevar a cabo detección de patógenos Presencia/Ausencia (*Salmonella*, etc.) cuando se repita habitualmente que c=3 para M=10.000 |
| CALIDAD 3.2<br>a) Torres de refrigeración y condensadores evaporativos. | **1 huevo/10 L** | Ausencia UFC/100 mL | 5 mg/L | 1 UNT | *Legionella spp*: Ausencia UFC/L<br>Para su autorización se requerirá:<br>- La aprobación, por la autoridad sanitaria, del Programa especifico de control de las instalaciones contemplado en el Real Decreto 865/2003, de 4 de julio, por el que se establecen los criterios higiénico-sanitarios para la prevención y control de la legionelosis.<br>- Uso exclusivamente industrial y en localizaciones que no estén ubicadas en zonas urbanas ni cerca de lugares con actividad pública o comercial. |

[1] Cuando exista un uso con posibilidad de aerosolización del agua, es imprescindible seguir las condiciones de uso que señale, para cada caso, la autoridad sanitaria, sin las cuales, esos usos no serán autorizados

[2] Siendo n: nº de unidades de la muestra; m: valor límite admisible para el recuento de bacterias; M: valor máximo permitido para el recuento de bacterias; c: número máximo de unidades de muestra cuyo número de bacterias se sitúa entre m y M.

| USO DEL AGUA PREVISTO | VALOR MÁXIMO ADMISIBLE (VMA) | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | NEMATODOS INTESTINALES | *ESCHERICHIA COLI* | SÓLIDOS EN SUSPENSIÓN | TURBIDEZ | OTROS CRITERIOS |
| **4.- USOS RECREATIVOS** | | | | | |
| CALIDAD 4.1[1]<br>a) Riego de campos de golf. | 1 huevo/10 L | 200 UFC/100 mL | 20 mg/L | 10 UNT | OTROS CONTAMINANTES contenidos en la autorización de vertido aguas residuales: se deberá limitar la entrada de estos contaminantes al medio ambiente. En el caso de que se trate de sustancias peligrosas deberá asegurarse el respeto de las NCAs.<br>Si el riego se aplica directamente a la zona del suelo (goteo, microaspersión) se fijan los criterios del grupo de Calidad 2.3<br>*Legionella spp*. 100 UFC/L<br>(si existe riesgo de aerosolización) |
| CALIDAD 4.2<br>a) Estanques, masas de agua y caudales circulantes ornamentales, en los que está impedido el acceso del público al agua. | No se fija límite | 10.000 UFC/100 mL | 35 mg/L | No se fija límite | OTROS CONTAMINANTES contenidos en la autorización de vertido aguas residuales: se deberá limitar la entrada de estos contaminantes al medio ambiente. En el caso de que se trate de sustancias peligrosas deberá asegurarse el respeto de las NCAs.<br>$P_T$ : 2 mg P/L (en agua estancada) |

[1] Cuando exista un uso con posibilidad de aerosolización del agua, es imprescindible seguir las condiciones de uso que señale, para cada caso, la autoridad sanitaria, sin las cuales, esos usos no serán autorizados

| USO DEL AGUA PREVISTO | VALOR MÁXIMO ADMISIBLE (VMA) | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | NEMATODOS INTESTINALES | *ESCHERICHIA COLI* | SÓLIDOS EN SUSPENSIÓN | TURBIDEZ | OTROS CRITERIOS |
| **5.- USOS AMBIENTALES** | | | | | |
| CALIDAD 5.1<br>a) Recarga de acuíferos por percolación localizada a través del terreno. | No se fija límite | 1.000 UFC/100 mL | 35 mg/L | No se fija límite | $N_T$ [1]: 10 mg N/L<br>$NO_3$ : 25 mg $NO_3$/L<br>Art. 257 a 259 del RD 849/1986 |
| CALIDAD 5.2<br>a) Recarga de acuíferos por inyección directa. | 1 huevo/10 L | 0 UFC/100 mL | 10 mg/L | 2 UNT | |
| CALIDAD 5.3<br>a) Riego de bosques, zonas verdes y de otro tipo no accesibles al público.<br>b) Silvicultura. | No se fija límite | No se fija límite | 35 mg/L | No se fija límite | OTROS CONTAMINANTES contenidos en la autorización de vertido aguas residuales: se deberá limitar la entrada de estos contaminantes al medio ambiente. En el caso de que se trate de sustancias peligrosas deberá asegurarse el respeto de las NCAs. |
| CALIDAD 5.4<br>a) Otros usos ambientales (mantenimiento de humedales, caudales mínimos y similares). | La calidad mínima requerida se estudiará caso por caso | | | | |

[1] Nitrógeno total, suma del nitrógeno inorgánico y orgánico presente en la muestra

## ANEXO I.B: FRECUENCIA MÍNIMA DE MUESTREO Y ANÁLISIS DE CADA PARÁMETRO

El control deberá realizarse a la salida de la planta de regeneración, y en todos los puntos de entrega al usuario.

La frecuencia de análisis se modificará en los siguientes supuestos:

i. Tras 1 año de control se podrá presentar una solicitud motivada para reducir la frecuencia de análisis hasta un 50%, para aquellos parámetros que no sea probable su presencia en las aguas.
ii. Si el número de muestras con concentración inferior al VMA del Anexo I.A es inferior al 90% de las muestras durante controles de un trimestre (o fracción, en caso de periodos de explotación inferiores), se duplicará la frecuencia de muestreo para el periodo siguiente.
iii. Si el resultado de un control supera al menos en uno de los parámetros los rangos de desviación máxima establecidos en el Anexo I.C, la frecuencia de control del parámetro que supere los rangos de desviación se duplicará durante el resto de este período y el siguiente.

Las frecuencias mínimas de análisis se especifican en la tabla siguiente:

| USO | CALIDAD | NEMATODOS INTESTINALES | *ESCHERICHIA COLI* | SS | TURBIDEZ | NT Y PT | OTROS CONTAMINANTES | OTROS CRITERIOS |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **1.- USO URBANO** | 1.1 y 1.2 | Quincenal | 2 veces semana | Semanal | 2 veces semana | ---- | El Organismo de cuenca valorará la frecuencia de análisis sobre la base de la autorización de vertido y del tratamiento de regeneración. | Mensual |
| **2.- USO AGRARIO** | 2.1 | Quincenal | Semanal | Semanal | Semanal | ---- | | Mensual |
| | 2.2 | Quincenal | Semanal | Semanal | ---- | ---- | | Quincenal |
| | 2.3 | Quincenal | Semanal | Semanal | ---- | ---- | | ----- |
| **3.- USO INDUSTRIAL** | 3.1 | ----- | Semanal | Semanal | Semanal | ---- | | Mensual |
| | 3.2 | Semanal | 3 veces semana | Diaria | Diaria | ---- | | *Legionella spp*. 3 veces semana |
| **4.- USO RECREATIVO** | 4.1 | Quincenal | 2 veces semana | Semanal | 2 veces semana | ---- | | ----- |
| | 4.2 | ----- | Semanal | Semanal | ----- | Mensual | | ----- |
| **5.- USO AMBIENTAL** | 5.1 | ----- | 2 veces semana | Semanal | ----- | Semanal | | ----- |
| | 5.2 | Semanal | 3 veces semana | Diaria | Diaria | Semanal | | Semanal |
| | 5.3 | ---- | ---- | Semanal | ---- | ----- | | ----- |
| | 5.4 | | | | | | | Frecuencia igual al uso más similar |

## ANEXO I.C: EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DE LAS AGUAS REGENERADAS

La calidad de las aguas regeneradas se valorará mediante el análisis de muestras tomadas sistemáticamente en todos los puntos de entrega de las mismas y con las frecuencias mínimas previstas en el Anexo I.B.

### CRITERIOS DE CONFORMIDAD

La calidad de las aguas regeneradas se considerará adecuada a las exigencias de este real decreto si en los controles analíticos de un trimestre, o fracción cuando el periodo de explotación sea inferior, cumpla simultáneamente:

i. El 90% de las muestras tendrá resultados inferiores a los VMA en todos los parámetros especificados en el Anexo I.A.,
ii. Las muestras que superen el VMA del Anexo I.A no sobrepasen los límites de desviación máxima establecidos a continuación
iii. Para las sustancias peligrosas deberá asegurarse el respeto de las Normas de Calidad Ambiental en el punto de entrega de las aguas regeneradas según la legislación propia de aplicación

| PARÁMETRO | LIMITE DE DESVIACIÓN MÁXIMA* |
|---|---|
| Nematodos intestinales | 100% del VMA |
| *Escherichia coli* | 1 unidad logarítmica |
| *Legionella spp* | 1 unidad logarítmica |
| *Taenia saginata* | 100% del VMA |
| *Taenia solium* | 100% del VMA |
| Sólidos en suspensión | 50% del VMA |
| Turbidez | 100% del VMA |
| Nitratos | 50% del VMA |
| Nitrógeno Total | 50% del VMA |
| Fósforo Total | 50% del VMA |
| *Se entiende por desviación máxima la diferencia entre el valor medido y el VMA | |

### MEDIDAS DE GESTIÓN FRENTE A INCUMPLIMIENTOS

1º. Se procederá a la suspensión del suministro de agua regenerada en los casos en los que no se cumplan los criterios de conformidad i e iii anteriores.
2º. Si en un control se superan en un parámetro los límites de desviación máxima de la tabla anterior, se procederá a realizar un segundo control a las 24 horas. En el caso de persistir esta situación se procederá a la suspensión del suministro.
3º. El suministro se reanudará cuando se hayan tomado las medidas oportunas en lo relativo al tratamiento para que la incidencia no vuelva a ocurrir, y se haya constatado que el agua regenerada cumpla los VMA del Anexo I.A durante cuatro controles efectuados en días sucesivos.
4º. En los casos de incumplimiento descritos en los apartados 1º, 2º y 3º será de aplicación la modificación de frecuencias de control prevista en el Anexo I.B.

## ANÁLISIS DE LAS MUESTRAS

Los métodos o técnicas analíticas de referencia que se proponen en este Anexo se tomarán como referencia o guía. Se podrán emplear métodos alternativos siempre que estén validados y den resultados comparables a los obtenidos por el de referencia. Para el caso del análisis de contaminantes deberán cumplir los valores de incertidumbre y límite de cuantificación especificados en la tabla correspondiente.
Los análisis deberán ser realizados en laboratorios de ensayo que dispongan de un sistema de control de calidad según la Norma UNE-EN ISO/IEC 17025.

## MICROBIOLÓGICOS

| PARÁMETRO | MÉTODOS O TÉCNICAS ANALÍTICAS DE REFERENCIA |
|---|---|
| Nematodos intestinales | Método Bailinger modificado por Bouhoum & Schwartzbrod. "Analysis of wastewater for use in agriculture" Ayres & Mara O.M.S. (1996) |
| *Escherichia coli* | Recuento de Bacterias Escherichia Coli β- Glucuronidasa positiva |
| *Legionella spp* | Norma ISO 11731 parte 1: 1998 Calidad del Agua. Detección y enumeración de Legionella.- |
| *Taenia saginata* | ------ |
| *Taenia solium* | ----- |

## CONTAMINANTES

| PARÁMETRO | TÉCNICA DE REFERENCIA | U[1] | LC[2] |
|---|---|---|---|
| Sólidos en suspensión | Gravimetría con filtro de fibra de vidrio | 30% | 5 mg/L |
| Turbidez | Nefelometría | 30% | 0,5 UNT |
| Nitratos | Espectroscopía de absorción molecular<br>Cromatografía Iónica | 30% | 10 mg $NO_3$/L |
| Nitrógeno Total | Suma de Nitrógeno Kjeldahl, nitratos y nitritos<br>Autoanalizador | 30% | 3 mg N/L |
| Fósforo Total | Espectroscopía de absorción molecular<br>Espectrofotometría de plasma | 30% | 0,5 mg P/L |
| Sustancias Peligrosas | Cromatografía<br>Espectroscopía | Metales: 30%<br>Orgánicos: 50% | 30% de NCA |

[1] Incertidumbre máxima expandida con un factor de cobertura de 2.
[2] Límite de cuantificación, es decir, concentración mínima de interés que puede determinarse con el nivel de incertidumbre requerido en la tabla.