

## Capítulo 18

# TECNOLOGÍAS INNOVADORAS EN LA REGENERACIÓN Y REUTILIZACIÓN DE AGUAS RESIDUALES

### Resumen

La mayor parte de las tecnologías utilizadas actualmente en la regeneración y reutilización de aguas residuales deriva de tecnologías ya existentes en el tratamiento de aguas residuales. No obstante, la regeneración y reutilización de aguas ofrece grandes posibilidades para desarrollar tecnologías innovadoras debido al valor económico que el agua residual regenerada tendrá como recurso hídrico alternativo. Se está realizando un progreso significativo en el desarrollo de tecnologías solventes para la producción de recursos hídricos de alta calidad a partir de agua residual regenerada.

Se describen diversas tecnologías empleadas en la regeneración de aguas. El criterio seguido para su inclusión ha sido su reciente aparición o la modificación de sistemas para la adaptación a procesos de regeneración.

**Palabras clave:** fangos activos, tratamiento físico y químico, sistemas de filtración, tecnologías de membrana, tratamientos terciarios, reutilización de aguas residuales.

### Introducción

Los proyectos de regeneración y reutilización de aguas residuales tienen como objetivos el control de la contaminación de las aguas, el aumento de los recursos hídricos a través de la recarga de agua subterránea y superficial, o generar un recurso de agua alternativo.

Antes de considerar la reutilización del agua residual, es estrictamente necesario garantizar el mantenimiento de una calidad fija del agua regenerada en el punto de reutilización, en todo momento y en cualquier condición. Esto significa que los sistemas de regeneración han de ser fiables, pero también que a lo largo de los sistemas de distribución y del proceso de reutilización la calidad del agua se ha de mantener. Consecuentemente, cualquier tipo de tratamiento debe estar definido en relación a la calidad del agua obtenida y a la capacidad del sistema de resistir variaciones externas.

Las tecnologías empleadas se pueden clasificar de acuerdo con sus principales características: espacio ocupado (intensivas o extensivas), método de tratamiento empleado (físico, químico, biológico) y utilidad final del agua regenerada (*Tabla 1*).

### Tratamientos naturales

#### *Infiltración-percolación*

La Infiltración-Percolación (IP) es un sistema de tratamiento avanzado, natural, extensivo y basado en el uso de arena. Se trata de un filtro secuencial, aerobio y con biopelícula. Se emplea arena fina (entre 0,1 y 2 mm) y es importante que esta arena sea uniforme. Se filtra efluente primario o secundario a través de un espesor de material como el definido, de forma secuencial y programada. Es importante que el lecho no quede saturado para permitir el intercambio de gases; para ello sólo se puede aplicar una carga máxima calculada en función de la DQO y del contenido en NTK. Es un proceso muy fiable si se le da un mantenimiento adecuado. Puede incluso llegar a cumplir las especificaciones para generar agua con la que se puede regar sin restricciones.

Se está estudiando la posibilidad de emplear este mismo sistema enterrado (la superficie puede destinarse a otros usos) con alimentación mediante riego subterráneo por goteo.

### ***Sistemas de lagunaje***

Es una tecnología conocida desde hace mucho tiempo y que se basa en la potenciación de la eutrofización, mediante la simbiosis de algas y bacterias. La biomasa está en suspensión y se suelen emplear diversas lagunas en serie (anaerobias, facultativas y de maduración; aunque estas pueden a su vez subdividirse y actuar en paralelo). Si se debe reutilizar el agua cobra especial importancia la fase de maduración. El sistema es capaz de lograr una buena desinfección por la acción de la radiación UV del sol.

Es imprescindible una buena gestión evitando los caminos preferenciales. Se considera que los lagunajes son capaces de tratar efluentes domésticos de hasta 300 mg/L DBO<sub>5</sub> con rendimientos aceptables. Su principal problema es la superficie que ocupan. Se está recuperando esta tecnología (a menudo únicamente los estanques de maduración después de un tratamiento intensivo) para la regeneración de aguas residuales.

### ***Zonas húmedas construidas (Wetlands)***

Las ZH son terrenos inundados, con profundidades del medio del orden de 60 cm, y con plantas acuáticas emergentes. Combinan zonas anaerobias (principalmente) con aerobias y anóxicas. Se considera que el papel principal en la depuración lo llevan a cabo las colonias instaladas en la grava o arena (material de relleno) y en las raíces y rizomas de las plantas. Estas últimas tienen también un papel activo en el transporte de oxígeno a la zona de las raíces, creando las zonas anóxicas.

Se emplean principalmente dos tipos, los de flujo horizontal sumergido y los de flujo vertical. Se emplean en pequeñas comunidades como tratamiento total o bien como sistema de afinado del efluente (tratamiento terciario) si no se dispone de mucho espacio.

## **Tratamientos intensivos**

### ***Filtros de anillas***

En este proceso, la filtración tiene lugar por anillas planas de material plástico provistas de ranuras. Dichas anillas están colocadas una sobre otra y comprimidas, formando el elemento filtrante. Los cruces entre las ranuras de cada par de discos adyacentes forman pasos de agua, cuyo tamaño varía según las anillas utilizadas y la situación relativa de los discos.

Los pasos de agua en un mismo tipo de anillas son máximos donde la ranura de una anilla coincide con la ranura del otro y mínimos donde esta coincide con el espacio entre dos ranuras; este paso mínimo es el que define el grado de filtración de las anillas.

### ***SBR (Reactores secuenciales discontinuos)***

Se trata de un desarrollo de los lodos activados en el cual las funciones de aireación, sedimentación y decantación se llevan a cabo en el mismo reactor. Normalmente se emplea un mínimo de dos tanques de reacción para poder garantizar un tratamiento del agua en continuo. Ocupan muy poca superficie y tienen unos costes muy competitivos, generando un efluente de buena calidad fácilmente tratable para regeneración.

### ***Biodiscos***

Los biodiscos son reactores de biomasa fija, y consisten en discos montados sobre un eje rotatorio. Mediante esta rotación, el conjunto de discos situados en paralelo está expuesto alternativamente al aire y al agua a depurar. Los microorganismos fijados descomponen la materia orgánica empleando procesos aerobios.

El proceso es fiable y barato en cuanto a la energía empleada, y especialmente en pequeñas instalaciones bien dimensionadas el efluente es de muy buena calidad por lo que suele bastar una desinfección para la reutilización posterior.

### **Bioreactores de membrana**

Esta tecnología se basa en situar una membrana en el interior de un sistema de aireación (tratamiento por lodos activados). La membrana no permite el paso de los biosólidos que quedan en el reactor y se obtiene un efluente de buena calidad, fácilmente desinfectable.

También se emplean membranas externas al reactor. En ambos casos se puede describir una eliminación de los patógenos de mayor tamaño (por ejemplo, *Giardia* y *Cryptosporidium*).

### **Sistemas físico-químicos**

Se trata básicamente de sistemas en los que mediante un reactivo se procede a la coagulación-floculación, seguida habitualmente de una filtración por arena u otro sistema. Los reactivos empleados suelen ser coagulantes inorgánicos (sales de hierro o aluminio) o bien polímeros orgánicos (polielectrolitos) y a veces se combinan ambos.

Tienen una cierta acción desinfectante, ya que las bacterias y virus fijados a los sólidos en suspensión son eliminados con éstos.

### **Tecnologías de desinfección**

No incluimos aquí la cloración, puesto que se desaconseja para el tratamiento de las aguas residuales ya que genera muchos subproductos.

#### **Ozonización**

En el agua residual el ozono puede perderse en la atmósfera, reaccionar directamente con la materia orgánica y entrar en una serie de reacciones con radicales. Parte de estas acciones tienen como efecto desinfectar el agua. Actúa principalmente contra virus y bacterias.

Al mismo tiempo reduce los olores, no genera sólidos disueltos adicionales, no es afectado por el pH y aumenta la oxigenación de los efluentes. Se genera in situ mediante equipos comerciales.

Si el contenido en materia orgánica es elevado, se requieren dosis comparativamente elevadas para obtener una buena desinfección.

#### **Dióxido de cloro**

Se considera como una de las mejores alternativas a la cloración convencional. Es un oxidante efectivo que se emplea en aguas con fenoles y elimina los problemas de olores. Al mismo tiempo tiene el inconveniente que oxida un gran número de compuestos e iones, como hierro, manganeso, y nitritos. No reacciona con el amonio ni con el bromo. Se tiene que generar in situ debido a su inestabilidad y no genera subproductos en cantidad apreciable. Se considera un buen biocida y afecta también a las algas.

#### **Radiación ultravioleta**

Se basa en la acción de una parte del espectro electromagnético sobre ácidos nucleicos y proteínas, con lo que se altera la reproducción de determinados patógenos. Se emplea la radiación a 253,7 nm, que se considera la más adecuada para el proceso. Es activo especialmente contra bacterias y virus y se describe con lámparas de media intensidad una acción contra *Giardia* y *Cryptosporidium*.

Se emplean lámparas de alta, media y baja presión. Hasta el momento las más utilizadas en desinfección de aguas residuales son las de baja presión. Es importante que el efluente a desinfectar tenga pocos sólidos en suspensión. Uno de los problemas más importantes de esta tecnología es el proceso de limpieza de las lámparas

## **Tecnologías de membrana**

### ***Microfiltración***

Elimina los sólidos en suspensión de tamaño superior a 0,1 – 1,0  $\mu\text{m}$ . Es efectiva eliminando los patógenos de gran tamaño como *Giardia* y *Cryptosporidium*. Se suele emplear la ultrafiltración cuando la concentración de STD (Sólidos Totales Disueltos) no es problemática, ya que los poros de la membrana son comparativamente grandes como para filtrar partículas muy pequeñas. Más usualmente se emplea como pretratamiento de sistemas con las membranas más delicadas, como la osmosis inversa o la nanofiltración.

### ***Ultrafiltración***

Puede emplearse para eliminar esencialmente todas las partículas coloidales y alguno de los contaminantes disueltos más grandes (0,01  $\mu\text{m}$ ). Se utiliza la UF cuando deben eliminarse prácticamente todas las partículas coloidales (incluyendo la mayor parte de microorganismos patógenos). Estos sistemas, capaces de eliminar bacterias y virus se suelen utilizar como pretratamiento para sistemas de nanofiltración, hiperfiltración u osmosis inversa. Puesto que los coloides se eliminan, el agua tratada debe tener una turbidez prácticamente nula.

### ***Nanofiltración***

Elimina los contaminantes de tamaño superior al nanómetro (0.001 $\mu\text{m}$ ). Las membranas de NF se emplean cuando se requiere eliminar prácticamente, aunque no todos, los sólidos disueltos. La tecnología se llama también ablandamiento por membrana, ya que se eliminan del agua los iones de la dureza que tienen 2 cargas (calcio y magnesio) mejor que los que solo tienen una (sodio, potasio, cloro, entre otros)

### ***Ósmosis inversa***

Es una tecnología de membrana en la cual el solvente (agua) es transferido a través de una membrana densa diseñada para retener sales y solutos de bajo peso molecular. La OI elimina prácticamente todas las sales y los solutos de bajo peso molecular. Se considera una eliminación prácticamente total de todas las sales disueltas y total de los sólidos en suspensión. Debido a esto, las membranas de OI son la elección cuando se necesita agua muy pura o de bebida, especialmente si la fuente es agua salobre o agua de mar.

### ***Electrodiálisis reversible***

La EDR separa las moléculas o iones en un campo eléctrico debido a la diferencia de carga y de velocidad de transporte a través de la membrana. Las membranas tienen lugares cargados y poros bastante estrechos (1-2 nm). En la célula de electrodiálisis se sitúa un cierto número de membranas de intercambio catiónico y aniónico entre un ánodo y un cátodo de forma que cuando se aplica la corriente eléctrica los iones con carga positiva migran a través de la membrana de intercambio catiónico y viceversa.

### ***Electrodesionización***

La EDI emplea corriente eléctrica continua como fuente de energía para la desalinización. Los iones en solución son atraídos hacia los electrodos con carga eléctrica opuesta. Dividiendo los espacios entre electrodos mediante membranas selectivas para cationes y aniones, lo que crea compartimentos, las sales pueden ser eliminadas de la mitad de los

compartimentos y concentradas en los restantes. Una de las principales diferencias entre la EDR y la EDI es el contenido de los compartimentos de desalinización. Los de la EDI se rellenan con resinas de intercambio iónico de lecho mezclado.

**Anexo I**

Tipo	Tecnología	Tratamiento de regeneración		Utilizado para	Fiabilidad	Coste		Notas	
		Pretratam	Desinfección			Construcción	Gestión		
Extensivo/ Natural	Biomasa fijada	IP (Infiltración-Percolación)	++	+++	Terciario, agricultura, Sin desinfección adicional	+++	**	**	1
		IPS (IP Subterránea)	++	+++	Terciario, agricultura, Sin desinfección adicional	+++	**	**	1
		Zona húmeda construida	++	++	Muy buena integración ambiental y paisajística	+++	**	**	2
	Biomasa libre	Estanques (lagunaje)	+	+++	Pequeñas comunidades con suficiente espacio disponible	+++	**	**	3
Intensivo / Duro	Modificaciones de los lodos activados	SBR	++	+	Cargas variables. Carga orgánica elevada	++	***	**	
		RBC	++	+	Pequeñas comunidades	++	***	****	
		MBRs	++	+++	Comunidades pequeñas o medianas	++	***	***	
	Químicos	Ozono	++++	+++	Desinfección, descomposición de la materia orgánica. Los virus son sensibles	++	****	***	4
		APA	++++	++	Desinfección en grandes depuradoras	+++	*	*	
		ClO <sub>2</sub>	++++	++	Desinfección. Menos subproductos que el cloro	+++	*	*	

**Anexo I**

	<b>Físicos</b>	Filtro de Anillas	+++	+	Terciario. Gran eliminación de SS	++	+++	+++	
		UV	++++	+++	Sin reactivos, sin subproductos. Útil en todos los sistemas (dimensión)	+++	*	*	
		Físico-químico	+++	+	Adecuado para medianas y grandes instalaciones. Elimina DBO y SS	++	***	****	
		Sonicación	++++	++++	Degradación de contaminantes. Desinfección en estudio	+++	-	-	I
	<b>Tecnologías de membrana</b>	MF	+++++	+++	Eliminar contaminantes de más de 0,1-1 µm	+++	**	**	N
		UF	+++++	++++	Eliminar contaminantes de más de 0,01-0,1 µm	+++	**	**	N
		NF	+++++	++++	Eliminar contaminantes de más de 0,001-0,01 µm	+++	***	***	N+I
		OI	+++++	TOTAL	Eliminar contaminantes de más de 0,001 µm	+++	****	****	N+II
		EDR	+++++	NA	Eliminación de sales	+++	**	**	
		EDI	+++++	NA	Eliminación de sales	+++	-	-	I