

MEMORIA DEL TRABAJO DE FIN DE GRADO

Reutilización del agua en la agricultura: una propuesta de solución desde el enfoque de la economía circular.

Water reuse in agriculture: a proposed solution from the circular economy approach.

Autores: Herminia Curbelo Curbelo, Carlota de la Torre Godínez y David Díaz Mendoza

Tutorizado por: Juan José Díaz Hernández

Grado en Administración y Dirección de Empresas

FACULTAD DE ECONOMÍA, EMPRESA Y TURISMO

Curso Académico 2021/2022

Convocatoria de julio

San Cristóbal de La Laguna, a 5 de julio de 2022

RESUMEN

El agua es un recurso que se ha vuelto escaso debido a su sobreexplotación y los problemas derivados del cambio climático. El propósito de esta investigación es la búsqueda de una solución eficaz, mediante los principios de la economía circular, para los problemas de escasez de agua, concretamente para agricultura, a través del uso de agua regenerada. Por ello, se analiza el sector agrícola como principal consumidor de agua natural y receptor del agua residual regenerada, así como la situación de Canarias en este aspecto. Además, se realiza un estudio sobre la depuración y sus distintos métodos para, posteriormente, establecer una estructura de costes individual y comparativa de los métodos naturales y los convencionales. Con esto, se podrá concluir si la solución propuesta es viable y permite mantener un equilibrio hídrico y medioambiental.

Palabras clave: agua, reutilización, depuración, economía circular, España, Canarias, agricultura

ABSTRACT

Water is a resource that has become scarce due to its overexploitation and the problems arising from climate change. The purpose of this research is the search for an effective solution, through the principles of the circular economy, to the problems of water scarcity, specifically for agriculture, through the use of reclaimed water. For this reason, the agricultural sector is analysed as the main consumer of natural water and recipient of reclaimed wastewater, as well as the situation of the Canary Islands in this respect. In addition, a study is carried out on purification and its different methods in order to subsequently establish an individual and comparative cost structure of natural and conventional methods. With this, it will be possible to conclude whether the proposed solution is viable and allows maintaining a water and environmental balance.

Keywords: water, reuse, depuration, circular economy, Spain, Canary

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN.....	5
2. SITUACIÓN ACTUAL.....	6
2.1. CICLO DEL AGUA.....	6
2.2. PROBLEMÁTICA DE LA ESCASEZ.....	7
2.3. DISPONIBILIDAD ACTUAL DEL AGUA EN ESPAÑA Y CANARIAS.....	8
2.4. REUTILIZACIÓN DEL AGUA DESDE EL ENFOQUE DE LA ECONOMÍA CIRCULAR ..	11
3. LA AGRICULTURA. PRINCIPAL DESTINATARIO DE AGUA REGENERADA.....	13
3.1. EL CASO DE CANARIAS.....	16
4. LA DEPURACIÓN Y REGENERACIÓN DE AGUAS RESIDUALES COMO LA SOLUCIÓN MÁS EFICAZ.....	19
4.1. NORMATIVA QUE REGULA LA DEPURACIÓN.....	19
4.2. SITUACIÓN ACTUAL DE LA DEPURACIÓN EN ESPAÑA Y CANARIAS.....	21
4.3. PROCESO Y MÉTODOS DE DEPURACIÓN.....	25
4.3.1. Métodos naturales de depuración o sistemas blandos.....	25
4.3.2. Métodos convencionales de depuración.....	28
4.4. ESTRUCTURA DE COSTES.....	29
5. CONCLUSIONES.....	33
6. BIBLIOGRAFÍA.....	34
7. ANEXO.....	39

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ciclo del agua.....	6
Figura 2. Distribución de la depuración de las aguas por comunidad autónoma.....	24

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1. Volumen de agua residual tratada en España.....	21
Gráfico 2. Volumen de agua residual por comunidades autónomas.....	22
Gráfico 3. Volumen de agua residual tratada en Canarias	22
Gráfico 4. Volumen de agua depurada en España	23
Gráfico 5. Volumen de aguas depuradas en Canarias	23

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Volumen de agua disponible.....	8
Tabla 2. Volumen de agua distribuida	9
Tabla 3. Volumen de agua utilizada en el regadío por comunidad autónoma.....	16
Tabla 4. Estimación de agua consumida para la producción por productos	18
Tabla 5. Volumen de agua exportada a través de la exportación de la producción	18
Tabla 6. Requisitos de los vertidos de las aguas residuales	20
Tabla 7. Costes de depuración con Sistema de Biorreactor de Membranas.....	30
Tabla 8. Coste de depuración con métodos naturales	31

1. INTRODUCCIÓN

El agua es uno de los recursos naturales más importantes, pues representa el 70% del planeta. Sin embargo, es un bien cada vez más limitado que debe ser gestionado de forma eficaz con el fin de evitar su desabastecimiento.

En la actualidad, el crecimiento demográfico está provocando un uso más intensivo del agua para poder cubrir las necesidades básicas de toda la población. Esto ha supuesto un incremento tanto de la demanda urbana como de otras actividades tales como la industria o la agricultura. No obstante, el incremento en la demanda no se corresponde con la oferta disponible, pues factores como el cambio climático, la contaminación y la acción humana originan su escasez.

Para comprender esta situación se hace necesario entender de donde proviene gran parte del agua disponible, es decir, el ciclo natural de agua, así como algunos de los determinantes que lo convierten en un recurso limitado. Además, se propone dejar a un lado el enfoque lineal tradicional, donde los bienes una vez utilizados son desechados sin posibilidad de ofrecerles una nueva oportunidad como recurso, para adoptar la perspectiva circular con base en la reutilización y regeneración teniendo en cuenta la huella ambiental. De esta forma, se tomarán los principios de la economía circular como una alternativa viable para solventar el desequilibrio existente entre la demanda y la oferta hídrica.

Como se ha señalado anteriormente, la agricultura es una de las actividades que cuenta con un uso muy intensivo del agua. Por tanto, se realizará un análisis de su situación actual, además de establecer aquellas zonas y cultivos que necesitan una mayor cantidad de agua, haciendo hincapié en Canarias y los principales productos que se cultivan y exportan.

Una vez analizada la problemática que rodea a la disponibilidad del agua y el usuario principal de la misma, se plantea el uso de agua regenerada en la agricultura como la solución más viable para frenar el uso excesivo del agua natural consiguiendo establecer un cierto equilibrio hidrológico. Por ello, se profundizará en esta idea estableciendo los métodos y tecnologías existentes para dotar al agua residual de una calidad óptima que la convierta en un recurso eficiente para el riego, sin que suponga un riesgo para la seguridad alimentaria. Asimismo, se establecerá la estructura básica de costes con el fin de conocer cuáles serían las principales limitaciones económicas y aquellos métodos más eficientes y eficaces en función de las características del entorno en el que se implantaría esta posible solución.

De esta forma, esta investigación consta de tres partes diferenciadas. En primer lugar, se explicará de forma detallada la demanda y la oferta del agua, así como el enfoque de esta situación desde la perspectiva de la economía circular. En segundo lugar, se establecerá la agricultura como la principal consumidora de agua y, por tanto, aquella en la que se debe aplicar el uso de agua regenerada. Finalmente, se expondrá la depuración y regeneración como la solución más viable para equilibrar el consumo de agua, además de los costes económicos que supone su utilización.

2. SITUACIÓN ACTUAL DEL AGUA

En este apartado se analizará la procedencia de la oferta de agua y los factores que provocan su reducción, así como la disponibilidad actual de este recurso en España y Canarias. Finalmente, se propondrá la reutilización como una alternativa de solución con un enfoque basado en la economía circular.

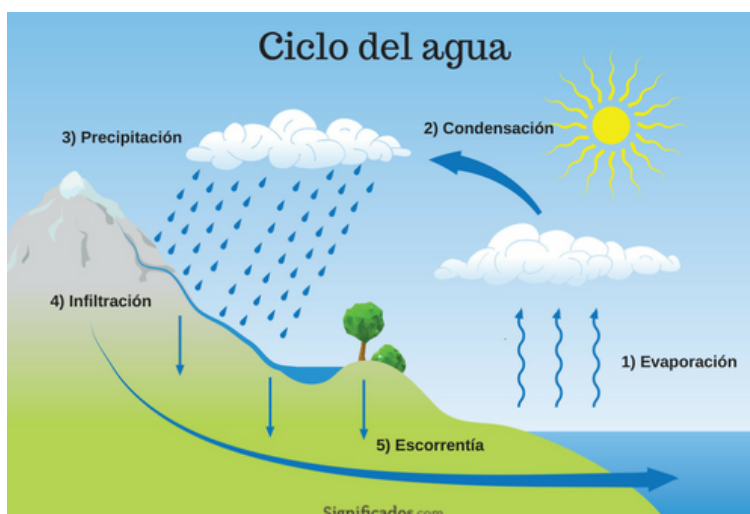
2.1. CICLO DEL AGUA.

Como ya se nombró en el apartado anterior, el agua es uno de los recursos naturales más importantes del planeta, y es que la vida de cada organismo se fundamenta en ella. Según el Ministerio de Educación y Tecnología de Argentina (S.F), solo el 3% de esta agua es dulce y el 2,99% es agua subterránea o proveniente de los casquetes polares y glaciares dificultando su acceso, por lo que su oferta es limitada.

Este recurso se puede encontrar en tres estados diferentes, por lo que sería conveniente comprender el ciclo hidrológico para conocer el proceso de transformación y circulación del agua por el planeta, puesto que es la principal fuente de oferta del agua.

Con el fin de ilustrar el proceso natural del agua se presenta la imagen 1 donde se pueden observar las diferentes fases que sigue dicho recurso para poder ser aprovechado.

Figura 1. Ciclo del agua



Fuente: Significados.com

De esta forma, el proceso comienza con la evaporación cuando el agua pasa de su estado líquido al gaseoso por la intervención del sol. A medida que esta agua evaporada se eleva produce la condensación por la bajada de las temperaturas, provocando la formación de las nubes, neblina o rocío. Cuando se acumula una gran cantidad de agua en ellas, esta se descarga en forma de lluvia, nieve o granizo, dando lugar al proceso de precipitación. Una vez llega a la superficie terrestre puede darse la infiltración, donde el agua es absorbida por la tierra formando acuíferos, o la escorrentía, provocando que el agua se desplace por el terreno hasta los lagos o mares.

2.2. PROBLEMÁTICA DE LA ESCASEZ DEL AGUA

Actualmente, existe cierta incertidumbre en la sociedad por la posible escasez de agua debido al aumento de la demanda, pues tal y como indican Cosgrove y Loucks (2015) el crecimiento demográfico, unido al mayor consumo de agua per cápita, ha supuesto un incremento exponencial del uso de este recurso. Debido a ello, el sector energético y alimentario se han visto obligados a aumentar su consumo hídrico con el fin de satisfacer las necesidades de la población.

De esta forma, se calcula que las centrales termoeléctricas, nucleares y diferentes factorías extraen cerca del 19% de las reservas de agua dulce (AQUASTAT, S.F). Esto, a su vez, supone la pérdida de calidad de ésta, puesto que las industrias suelen estar ubicadas cerca de grandes fuentes de agua y, tras ser utilizada, es devuelta a los caudales pese a contener grandes cantidades de contaminantes orgánicos y químicos. Por lo que, a día de hoy, se conoce que un poco más de la cuarta parte del agua disponible en el planeta está contaminada (Carrasco y Menéndez, 2010).

Por su parte, como ya se ha comentado, la expansión demográfica genera la necesidad de aumentar la producción de alimentos y, por tanto, el uso del agua en el regadío. Por tanto, “se ha identificado de forma global que entre las actividades económicas que más inducen este declive en el almacenamiento de agua está el excesivo uso de agua para el riego agrícola” (Pedrozo Acuña, 2022, p.3). Así, según los datos más recientes extraídos de IPCC (2019), se conoce que el 69% del agua potable disponible en el planeta es utilizada para la agricultura, mientras que en España el 80% del agua disponible a nivel nacional es utilizada para este mismo fin.

La principal fuente de obtención de agua para esta actividad son los acuíferos, por lo que nos encontramos ante una peligrosa dependencia de los recursos no renovables que está causando que los niveles de agua subterránea disminuyan muy por debajo de los naturales. Debido a esto, hay que tener un extremo cuidado en los procesos de extracción, ya que una mala ejecución puede ocasionar que el agua de dichos acuíferos termine contaminada e inutilizable como consecuencia de las filtraciones de elementos extraños o por cercanía de los acuíferos al mar, provocando una salinización del agua potable. Por lo que se deben tomar todas las precauciones posibles, puesto que es un agua que no se regenera a escala de tiempo humana y no es posible estimar por cuánto más podremos beneficiarnos de ella.

Además del aumento exponencial de la demanda, la oferta de agua se ve limitada por factores ambientales como el cambio climático y el calentamiento global, situaciones que afectan al ciclo natural del agua y a la calidad de esta. En primer lugar, la quema de combustibles fósiles, la huella de carbono generada por nuestra actividad cotidiana y el desperdicio de alimentos da lugar a gases de efecto invernadero que provocan un calentamiento global insostenible para el planeta. Cabe resaltar que entre el 2010 y 2016, la pérdida global de alimentos supuso el 8-10% de la emisión de gases de efecto invernadero (FAO, 2013; IPCC, 2019).

Esta situación genera fenómenos extremos de lluvias en algunas regiones del mundo, que vienen acontecidos por largos periodos de sequía originados por las extremas olas de calor que perjudican directamente a las reservas de agua, ya sea por los preocupantes descensos en la capa de nieve y glaciares o por el drástico incremento de la evaporación. Además, el incremento de las temperaturas está contribuyendo a la floración de cianobacterias (FAN) altamente contaminantes y dañinas para el ser humano y otros tipos de animales, provocando que esta agua contaminada sea inutilizable.

Pese a todo ello, no se puede achacar la crisis del agua al calentamiento global, ya que la intervención humana no solo influye en la generación de este cambio climático, sino que, por medio de diferentes formas, como las que ya hemos visto, participa directa o indirectamente en la destrucción y contaminación de las reservas de agua dulce.

Según la UNESCO (2020), para el 2050 se calcula que aproximadamente uno de cuatro habitantes vive en países con graves problemas de escasez de agua dulce, como será el caso de África, Asia Central, Occidental y Meridional, Estados Unidos Occidental, México y América Central, por lo que cerca del 52% sufrirá las consecuencias de vivir bajo el estrés hídrico. Del mismo modo, se prevé que aumenten considerablemente los períodos y las intensidades de las sequías, lo que generará un gran problema para la agricultura. Esta situación provocará la necesidad de incrementar las extracciones de agua subterránea, cuyas cantidades existentes hoy en día son desconocidas. Por esto, es necesario establecer la cantidad de agua disponible en la actualidad, así como de buscar nuevas formas para aprovechar el agua ya consumida.

2.3. DISPONIBILIDAD ACTUAL DE AGUA EN ESPAÑA Y CANARIAS.

Dados los factores mencionados que generan una reducción del agua disponible, es necesario presentar la disponibilidad actual de dicho recurso en España y Canarias. Para ello, se expone en primer lugar los diferentes conceptos que serán utilizados para explicar la disponibilidad.

- Volumen de agua disponible: cantidad de agua utilizable (potabilizada o sin potabilizar).
- Volumen de agua registrada: cantidad de agua medida por los contadores.
- Volumen de agua distribuida: cantidad de agua repartida entre la población.
- Importe de la inversión en servicios de suministro: recursos monetarios dedicados a mejorar o aumentar los servicios de suministro.
- Pérdidas reales: cantidad de agua perdida por fugas, roturas o averías en la red de suministro.

Tabla 1. Volumen de agua disponible

	2014		2016		2018	
	Miles de m ³	%	Miles de m ³	%	Miles de m ³	%
ESPAÑA						
Volumen de agua disponible no potabilizada	4.313.077	46,79	4.278.776	45,13	3.875.742	44,83
Volumen de agua disponible para su potabilización	4.870.238	53,03	5.201.705	54,87	4.769.709	55,17
VOLUMEN TOTAL DE AGUA DISPONIBLE	9.183.315		9.480.481		501.735	
CANARIAS						
Volumen de agua disponible no potabilizada	246.514	49,38	255.924	45,37	230.188	45,88
Volumen de agua disponible para su potabilización	252.656	50,62	308.104	54,63	271.547	54,12
VOLUMEN TOTAL DE AGUA DISPONIBLE	499.170		564.028		501.735	

Fuente: elaboración propia a partir de los datos del INE.

Como se puede observar la tabla 1, España contaba en el 2018 con 8.645.451 metros cúbicos de agua, siendo una cantidad inferior a la de años anteriores. Además, se puede comprobar como la cantidad de agua va disminuyendo conforme pasa el tiempo. Esta diferencia se aprecia en la comparativa de cuatro años, es decir, entre el 2018 y 2014 se observa una variación porcentual de 2,14, tanto en la cantidad de agua potabilizada como la que está sin potabilizar, lo que se traduce en una diferencia de 537.864 metros cúbicos de agua.

Los datos del INE más recientes indican que el agua de Canarias representa únicamente el 5,8% de la totalidad de agua con la que cuenta España y, al igual que esta, también sufre la misma disminución en los recursos hídricos. Al hacer la comparativa entre los dos últimos años, se aprecia un descenso de 62.293 metros cúbicos de agua, aunque cabe resaltar que, en el caso de Canarias, en el traspaso del año 2014 al 2016 hubo un incremento considerable de estos recursos, que a día de hoy se han visto reducidos en la misma medida.

Cabe destacar que desde el 2013 hasta el 2018 España estaba pasando un periodo de sequía que explican los datos de estudio. Además, según AEMET el 2017 fue el segundo año más seco desde 1965, donde en los periodos de lluvias (octubre-Diciembre) las precipitaciones acumuladas fueron un 43% menos si se compara con el año anterior.

Con el fin de realizar un enfoque más profundo sobre el agua potable distribuida a la población, así como los costes de la inversión que hacen esto posible, se presenta la tabla 2.

Tabla 2. Volumen de agua distribuida

ESPAÑA	2014		2016		2018	
	Miles de m ³ /Miles de euros	% sobre total de agua	Miles de m ³ /Miles de euros	% sobre total de agua	Miles de m ³ /Miles de euros	% sobre total de agua
1. Volumen total de agua registrada y distribuida	3.214.034	75,2%	3.199.910	74,58 %	3.188.055	75,26 %
- Importe facturado por el agua registrada	531.721	-	553.132	-	523.861	-
-Importe total de la inversión en los servicios de suministro	39.448	-	80.711	-	44.759	-
2. Volumen de agua no registrada	1.057.932	24,8%	1.090.647	25,42 %	1.047.892	24,74 %
-Perdidas reales	651.061	15,2%	701.087	16,34 %	652.841	15,41 %
VOLUMEN TOTAL DE AGUA DISTRIBUIDA	4.271.966,00		4.290.557,00		4.235.947,00	

CANARIAS	Miles de m³/Miles de euros	% sobre total de agua	Miles de m³/Miles de euros	% sobre total de agua	Miles de m³/Miles de euros	% sobre total de agua
1. Volumen total de agua registrada y distribuida	144.545	70,89 %	157.510	69,43 %	147.470	69,30 %
- Importe facturado por el agua registrada	248.536	-	299.082	-	253.542	-
-Importe total de la inversión en los servicios de suministro	9.478	-	6.956	-	13.298	-
2. Volumen de agua no registrada	59.361	29,11 %	69.336	30,57 %	65.344	30,70 %
-Perdidas reales	41.315	20,26 %	52.254	23,04 %	50.896	23,92 %
VOLUMEN TOTAL DE AGUA DISTRIBUIDA	203.906		226.846		212.814	

Fuente: elaboración propia a partir de datos del INE.

Si se comparan ambas tablas se puede apreciar que en la tabla 1 del año 2014 al 2016 hay un aumento del agua disponible, lo que debería suponer un aumento del agua distribuida, pero en los datos de la tabla 2 se demuestra lo contrario. El volumen de agua distribuida sufre una reducción como consecuencia de la disminución del agua registrada, en favor de las pérdidas reales (agua no registrada) que incluyen las fugas, roturas o averías en la red de suministro. Esto supone una merma en la cantidad de recursos hídricos, puesto que si se realiza una media anual para los tres años de estudio se obtiene una pérdida cercana a 668.329 metros cúbicos, lo que es igual al 15,66% del total de agua de cada año. Además de estas pérdidas reales, en el 2016 se experimentó un incremento de los costes en la factura de consumo del agua en un 1,6%, lo que también podría ofrecer una pequeña explicación sobre la disminución del agua distribuida a la población.

Al contrario que a nivel nacional, se observa que en Canarias sí se aprovechó este incremento en la cantidad de agua disponible del 2014 al 2016, puesto que el volumen de agua distribuida aumentó en 12.965 m³ durante estos años. Sin embargo, en 2018 este volumen de agua registró una reducción cercana a la cantidad del incremento anterior. Aun así, el volumen de agua perdida entre los años 2014 y 2016 subió un 2,77%, es decir, 10.939 m³ de agua. No obstante, cabe resaltar que estas pérdidas han disminuido en 2018, aunque, a día de hoy, tal y como indica un estudio realizado por la Universidad de la Laguna (2022), se conoce que en Canarias se pierde en torno a un 50% del agua por las redes de suministro. Según este estudio, antes de llegar al usuario final, en Tenerife se pierde cerca del 60% del agua extraída de los acuíferos y del mar.

Por ello se concluye que, pese a que la gestión del agua en Canarias es competencia de organismo públicos tales como la Consejería de Transición Ecológica, Lucha contra el Cambio Climático y Planificación Territorial, el 95% del agua obtenida tiene titularidad privada (Luis Domínguez y Socas García, 2015). Además, se ha aumentado la inversión destinada a mejorar las redes de suministro (de 6.956 miles de euros en el 2016 a de 13.298 miles de euros en el 2018), pero no ha sido suficiente, pues sigue siendo necesario subsanar aquellos fallos que provocan estas grandes pérdidas de agua.

Esta situación permite establecer que la cantidad de agua disponible para el consumo es cada vez menor, haciendo necesario buscar nuevas formas para aprovechar el agua ya consumida, es decir, es importante investigar la reutilización del agua residual por medio potabilización, desalinización y regeneración, siendo esta última una de las opciones mejor valoradas.

2.4. REUTILIZACIÓN DEL AGUA DESDE EL ENFOQUE DE LA ECONOMÍA CIRCULAR

En nuestra economía, la mayor parte de los recursos siguen un sistema lineal basado en la extracción, fabricación, utilización y eliminación, sin posibilidad de optar a ser reutilizados. Este sistema ha alcanzado sus límites, dejando de ser sostenible por el incremento de la intensidad material y energética, reforzado por el crecimiento del consumo, así como por el creciente impacto de las emisiones de agentes contaminantes (Fundación COTEC, 2019). Este sistema provoca el agotamiento de los recursos naturales y combustibles fósiles que son difícilmente renovables.

En el caso del agua, este sistema lineal se ve reflejado en el ciclo integral del agua donde ésta realiza un recorrido por diferentes fases hasta ser devuelta a la naturaleza.

- **Captación:** en esta primera etapa se utilizan diferentes mecanismos para la obtención de agua directamente del medio natural, ya sea subterránea (acuíferos) o superficial (ríos, embalses, pozos, etc.).
- **Potabilización:** una vez captada el agua es necesario realizar una serie de procesos para convertirla en un recurso con calidad necesaria para ser consumido. Además, se debe distinguir su uso posterior, ya que existen diferentes tratamientos de potabilización en función de si se utilizará para consumo humano, agrícola o industrial.
- **Almacenamiento y distribución:** una vez el agua es tratada pasa a ser almacenada en depósitos urbanos para quedar a disposición de una red interconectada de tuberías y canales que transportan el agua hasta los consumidores finales, domicilios, zonas industriales o agrícolas.
- **Consumo y saneamiento:** el agua tras haber sido utilizada pasa a convertirse en agua residual que es recogida por esta red de alcantarillado para transportarla hasta las plantas de depuración (EDAR) donde nuevamente serán tratadas para devolverlas a la naturaleza.
- **Vertido:** una vez eliminada la mayor cantidad de contaminantes posibles, estas aguas tratadas son devueltas a los ríos u océanos por medio de emisarios submarinos.

A través de este proceso, se obtiene un agua que es consumida y vertida al medio, es decir, de un solo uso, generando un rápido agotamiento de esta. Por ello, se plantea la necesidad de iniciar un periodo de transición hacia un modelo circular en el que todos los recursos, y el agua en particular, puedan ser reutilizados evitando un rápido desabastecimiento de estos.

De esta forma, la economía circular ofrece una nueva forma de ver las relaciones existentes entre mercados, clientes y recursos naturales, promoviendo prácticas sostenibles y eficientes en el uso de los recursos. Siendo el principal objetivo conseguir que el valor de los productos, los materiales y los recursos se mantengan en la economía durante el mayor tiempo posible, además de reducir al mínimo la generación de residuos. De acuerdo con Melgarejo Moreno (2019), la economía circular permite al sector global en materia de recursos hídricos alcanzar suministros de agua seguros, sostenibles y de calidad para el futuro.

Según Cerdá y Khalilova (2016), la economía circular se apoya en tres principios claves que abordan varios retos que existen en la economía.

- Principio 1: Preservar y aumentar los bienes naturales, controlando los stocks finitos de modo que se equilibren los flujos de recursos renovables. El sistema circular se encarga de seleccionar aquellos recursos de la forma más adecuada posible, utilizando para ello las tecnologías y procesos que permitan obtener un mayor aprovechamiento
- Principio 2: Optimizar el rendimiento de los recursos, circulando siempre productos, componentes y materiales en su nivel más alto de utilidad, en los ciclos técnico y biológico. Esto implica modificar y reciclar aquellos componentes o materiales de forma que conserven su máxima calidad y utilidad para que siempre estén disponibles y permitan el máximo aprovechamiento de los recursos.
- Principio 3: Promover la efectividad del sistema, haciendo patentes y proyectando eliminar las externalidades negativas. Se trata de evitar o reducir los efectos negativos que pueda tener esta reutilización en torno al uso humano, fomentando un empleo seguro en el ámbito alimentario, movilidad, vivienda...

Así, la economía circular con base en la reutilización es la principal solución a los problemas de escasez de agua. Por tanto, se hace necesario establecer la situación actual de la reutilización

En la actualidad, la reutilización del agua se encuentra cada vez más extendida por el mundo, situación que permite comenzar a realizar una gestión más sostenible de este recurso, al reducir la sobreexplotación superficial y subterránea. Este método se ha desarrollado con más fuerza en países desarrollados y, sobre todo, en aquellos situados en el área mediterránea, pues se trata de un proceso que ofrece una gran cantidad de ventajas donde el estrés hídrico ejerce una mayor presión.

En el caso de España, se reutiliza aproximadamente el 75% de toda el agua reutilizada en la Unión Europea (Sala-Garrido, Molinos-Senante, Fuentes y Hernández-Sancho, 2020). Según datos del INE, en 2018 se reutilizaron 1.534.100 m³ de agua al día, siendo la Comunidad Valenciana (36,7%), Murcia (17,7%) y Galicia (12,3%) las regiones donde la reutilización del agua es mayor. En Canarias la reutilización respecto al total de España se sitúa en el 4%.

Por otra parte, analizando los datos proporcionados por el INE se establece que el 65,8% de esta agua va destinada a la agricultura, el 26,1% al riego de zonas verdes como campos de golf, el 3,8% a la industria, el 2,5% al saneamiento del alcantarillado y vías públicas y un 1,8% a otros usos. Según la Fundación COTEC (2017), España es el país de la Unión Europea que más ha promovido la utilización de las aguas regeneradas.

Fuera de la Unión Europea, Israel es uno de los países donde más se ha fomentado el uso de la reutilización como fuente alternativa a los recursos naturales. Este país sufre de un gran estrés hídrico debido a la explotación exhaustiva de sus abastecimientos naturales, como consecuencia de diferentes factores como la economía del país, su clima seco y por su densidad demográfica.

Según Cabezas (2019), Israel cuenta con los mejores datos de reutilización del mundo, pues se tratan cerca de 470 millones de m³ /año, lo que supone el 93% del total de agua residual producida, de la cual el 82% (aproximadamente 400 millones de m³) será reutilizada en base a la economía circular.

Teniendo en cuenta esta situación, la problemática del agua y la necesidad de gestionarla, nuestra propuesta es apostar por la regeneración del agua basándonos en los principios de la economía circular y utilizarla, sobre todo, para el sector agrícola, pues según un estudio de la Agencia Europea de Medioambiente (2020), “la agricultura representa alrededor del 59% del uso total de agua, seguida del 18% para la producción de energía y el 11% para las industrias manufactureras. Los hogares utilizan casi el 9% del agua total en Europa”.

3. LA AGRICULTURA COMO PRINCIPAL DESTINATARIO DE AGUA REGENERADA

Según Carrasco y Menéndez (2010), la agricultura es el sector que más agua disponible consume en España, siendo este consumo del 80%. Además, según los datos del INE (2018), el volumen de agua utilizada para el riego agrícola ascendió a 15.495 hm³ /ha y, tal como indica el Informe sobre Regadíos en España realizado por el Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación (2020), la superficie agrícola que cuenta con sistemas de regadío es de 3.774.286 ha. Dicho informe, establece que en 2020 las Comunidades Autónomas que más consumen agua para el regadío son Andalucía, Castilla - La Mancha, Castilla y León y Aragón, siendo del total nacional un 29,18%, 14,94%, 12,09% y 10,79% respectivamente.

Por su parte, los cultivos que cuentan con mayor superficie de regadío son los cereales (24,39%), el olivar (22,24%), el viñedo (0,37%) y los frutales no cítricos (10,24%). Esta situación concuerda con las zonas donde más regadío se emplea, pues son aquellas en las que se realizan este tipo de cultivos.

La encuesta sobre el uso del agua en el sector agrario realizada por el INE en el año 2018 establece que, en España, el 74,3% del agua utilizada para el riego proviene, principalmente, de fuentes superficiales, seguida de aguas subterráneas con un 23,9%. En contraposición, otro tipo de recursos hídricos, como pueden ser el agua depurada/regenerada y el agua desalada, cuentan con una aportación de 1,8%, una cantidad bastante reducida dados los problemas de escasez de este recurso que existen en la actualidad. Por este motivo, es conveniente incrementar la reutilización del agua en el riego agrícola. Además, genera beneficios en el riego al contener gran cantidad de nutrientes y materia orgánica. Sin embargo, su uso extendido en el tiempo puede provocar diversos problemas medioambientales si no se realiza un estricto control y manejo.

El agua regenerada ofrece una gran cantidad de ventajas que se pueden utilizar para mejorar la productividad en la agricultura, entre ellas se encuentran:

- Tiene un alto aporte nutritivo dado que cuenta con diferentes componentes necesarios para el desarrollo vegetal y la producción de alimentos, como es el nitrógeno, fósforo y potasio.

Además, esta composición la convierte en un fertilizante natural evitando la utilización de componentes químicos y reduciendo los costes de producción.

- Existe una gran disponibilidad de este recurso, por lo que se evitaría seguir sobreexplotando las reservas hídricas del planeta.
- Dada la gran cantidad de componentes orgánicos que contiene este tipo de agua, se favorece la regeneración de los suelos, lo que ayuda a continuar con la actividad agraria.
- La obtención de las aguas regeneradas puede tener un coste menor a la de otro tipo de aguas, siendo económicamente atractiva para los agricultores.
- Como producto final de la depuración se generan los lodos, una materia formada por diferentes componentes orgánicos que, si cumple con las exigencias de calidad, puede ser utilizada como compostaje o fertilizante.

Por otro lado, se puede observar que la utilización de agua regenerada en la agricultura presenta una serie de inconvenientes que provocan su escaso uso:

- Una elevada carga de nutrientes en el agua, como el nitrógeno y el fósforo, o presencia de metales pesados, como el mercurio y el zinc, puede ser perjudicial para el terreno, los cultivos y el agua subterránea.
- La presencia de sólidos en suspensión en el agua puede generar obstrucciones de los sistemas de riego.
- En ocasiones, estas aguas regeneradas pueden presentar una alta cantidad de sales, lo que dificulta la absorción de agua por parte de las plantas, además de provocar daños en los cultivos y deteriorar la permeabilidad del suelo.
- Se hace necesario contar con infraestructuras adecuadas que permitan transportar el agua desde las EDAR a las zonas de riego, siendo esta una fase de difícil gestión y de aumento de los costes del proceso.
- Existe una cierta preocupación social sobre los efectos que pueda tener en la salud el uso de este tipo de agua, pues existe incertidumbre sobre la posibilidad de transmitir enfermedades debido a su contenido microbiológico.
- Los agricultores deben dar su consentimiento expreso para utilizar estas aguas. Ello dependerá de los beneficios económicos que obtengan y de su percepción ante la calidad del agua a utilizar.

Como se ha podido comprobar el uso del agua regenerada para el riego agrícola supone una gran fuente de beneficios para los agricultores, tanto económicos como ecológicos. Sin embargo, para que este uso no sea perjudicial, es necesario contar con controles exhaustivos sobre su uso y sobre la calidad del agua.

En base a esto, se pueden plantear las características mínimas con las que debe contar el agua regenerada para poder ser utilizada en la agricultura.

En el Real Decreto 1620/2007, se establece el régimen jurídico a aplicar para poder reutilizar las aguas residuales, así como las condiciones fisicoquímicas y sanitarias con las que debe contar para poder ser utilizada en la agricultura. En el anexo se puede observar la tabla (A) donde se

presentan las condiciones exigidas para el agua que tiene como fin ser empleada en el riego agrícola.

Por una parte, en este reglamento se muestran los niveles máximos de compuestos que pueden presentar estas aguas, al igual que aquellos componentes que deben ser controlados. Se debe tener gran precaución en su reutilización por los patógenos que pueden presentar, como es el caso de los nematodos intestinales (*Taenia saginata* y *Taenia solium*), parásitos infecciosos que se hospedan en el intestino de sus huéspedes, la *Escherichia coli*, bacteria que afecta al tracto gastrointestinal produciendo enfermedades, o la *Salmonella*, microorganismo que causa toxiinfecciones alimentarias y problemas intestinales y sistémicos.

De la misma forma, se deben controlar la cantidad de sólidos en suspensión que presenta este tipo de aguas, ya que pueden provocar una obturación de los poros del suelo de modo que dificulte la penetración del agua. Además, se debe tener en cuenta la cantidad de fósforo y nitrógeno, puesto que una gran abundancia de estos puede causar efectos negativos sobre las plantas.

Por otra parte, en este decreto se especifica aquellas formas más eficientes para poder utilizar el agua, es decir, las técnicas de regadío que permitan centralizar su acción y los beneficios que aporta. Según este documento, el riego localizado sería la opción más adecuada, ya que permite controlar las zonas en las que se quiere utilizar el agua.

Igualmente, se establece la infraestructura necesaria para poder depurar, regenerar, almacenar y transportar el agua, de modo que sea lo más eficiente posible para evitar incrementar los costes y que el proyecto sea económicamente inviable.

Como se ha estudiado, la utilización de aguas regeneradas tiene grandes ventajas en la agricultura, al igual que una serie de inconvenientes que, sumado a las especificaciones necesarias que se marcan en los reglamentos, pueden provocar que su uso para los agricultores sea cuestionable.

Según Aznar-Crespo, Aledo y Melgarejo (2019), en un estudio sobre la percepción social de las comunidades regantes españolas y la implementación de las aguas regeneradas, se muestra que el 50,9% de los agricultores hace uso de las aguas regeneradas, aunque estas solo representan entre el 30-50% del agua que utilizan en la mayoría de sus cultivos.

Por un lado, la investigación mostró la gran preocupación de los agricultores con la calidad de las aguas y la seguridad alimentaria. Los encuestados le dieron una puntuación media de 3,24 sobre 5 a la calidad de estos recursos, siendo la mayoría de las puntuaciones negativas. En consonancia, la trazabilidad y seguridad alimentaria fueron valoradas de la misma forma, ya que el 31,6% opinó que estas aguas no contribuyen de una forma muy positiva en la seguridad alimentaria, el 24,6% consideró el recurso como malo y el 7% como muy malo. Así, las aguas regeneradas obtuvieron una puntuación de 2,99 sobre 5 en este aspecto.

Por otro lado, el control de la disponibilidad obtuvo puntuaciones positivas, dado que genera menos incertidumbre que las fuentes convencionales de agua potable, pues al ser un recurso que se regenera no deben depender de los abastecimientos naturales.

Por su parte, el tema del coste de las aguas residuales fue sin duda el peor valorado, dado que el 40% de los encuestados desconocen cuál es su precio por metro cúbico mientras que el resto

de las respuestas son muy dispares entre sí. Sin embargo, sí son conscientes del coste que supone mantener esas aguas, es decir, todas aquellas infraestructuras necesarias para reutilizarlas. En este apartado el 32,4% de las opciones fueron negativas, obteniendo esta cuestión una puntuación media de 2,79.

Tras este estudio, se puede concluir que existe una percepción negativa en cuanto al uso de las aguas residuales regeneradas. En primer lugar, la opinión social sobre la calidad y seguridad que posee este recurso es muy cuestionado por las comunidades regantes, dado que genera una incertidumbre sobre la salubridad de sus productos futuros, aspecto de gran importancia para los agricultores. En segundo lugar, los costes juegan un papel significativo en la toma de decisión, pues es uno de los puntos que permiten obtener beneficios en su actividad.

En definitiva, queda una larga trayectoria para dar a entender todos los beneficios que se pueden obtener a través de una buena regulación de las aguas residuales, ya que el agua obtenida tras el proceso de depuración no solo ayuda a los cultivos y a la producción de alimentos, sino que es a su vez la solución más eficaz ante la inminente escasez de agua potable.

3.1. EL CASO DE CANARIAS

Como indica el Instituto Canario de Estadística (2022), el Archipiélago Canario cuenta aproximadamente con unas 744.695 hectáreas de superficie total de tierra, aunque, según la Consejería de Agricultura, Ganadería y Pesca (2021), únicamente posee un 17,51% (122.566,98 ha) de superficie agraria útil, de la cual solo el 6,46% (45.220,48 ha) del total está siendo utilizadas para el cultivo. Aun con estos datos, según la encuesta sobre superficies y rendimientos de cultivos en España (2021), Canarias es la Comunidad Autónoma con la mayor superficie de cultivo regada en relación con la cantidad de terreno disponible, pues se utilizan sistemas de riego en 34.322,93 ha. Según los datos proporcionados por el Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca (superficie de riego) y el INE (consumo de agua en agricultura) para el año 2018 se puede observar la relación entre la superficie de riego y el volumen de agua empleada en diversas comunidades autónomas. Con el fin de ilustrar esta conexión, se presenta la tabla 3 con datos del año 2018.

Tabla 3. Volumen de agua utilizada en el regadío por comunidad autónoma

COMUNIDAD AUTÓNOMA	SUPERFIE DE RIEGO (ha)	VOLUMEN DE AGUA (En miles de m ³)
Andalucía	1.102.144	4.175.562
Aragón	408.996	2.072.461
Castilla y León	448.680	2.236.904
Castilla – La Mancha	553.969	1.523.746
Cataluña	261.440	1.005.576
Comunidad Valenciana	291.798	1.337.413
Extremadura	281.059	1.777.957
La Rioja	41.813	156.856
Navarra	101.934	435.073
Región de Murcia	190.027	500.569
Canarias	25.590	19.000 (*)

(*) Dato extraído de la revista digital elpaiscanario.com

Fuente: elaboración propia a partir de los datos del Ministerio de Agricultura, el INE y elpaiscanario.com

Las islas cuentan con diferentes tipos de cultivos, entre los cuales se puede encontrar la platanera, la papa, el tomate y el aguacate, ordenados según su importancia dentro de la agricultura canaria.

En España, una de las frutas más consumidas es el plátano producido en Canarias, que está distinguido por el sello europeo de indicación geográfica protegida desde noviembre de 2013, lo que reconoce su calidad diferenciada al de otra variedad. Según el mapa de cultivos de Canarias (2021), la platanera posee 8.920,53 hectáreas destinadas a su plantación, contando todas ellas con sistemas de regadío. Se conoce que el plátano consume aproximadamente 500 litros (0,5 m³) de agua por cada kilo de producto producido. Además, teniendo en cuenta las estadísticas realizadas por la Consejería de Agricultura, Ganadería y Pesca de Canarias se conoce que en el 2020 se obtuvo una producción de 420.144.000 kilos de plátano en las islas de los cuales 382.226.000 kilos fueron exportadas, y es que Canarias representa el 52% de la producción de plátano europeo. Por lo que se puede concluir que, en 2020, se utilizaron 210.072.000 m³ de agua para la producción total de este cultivo en las islas, donde 191.113.000 m³ corresponden a la producción exportada.

La papa es otro de los alimentos más consumidos en Canarias y se calcula que hay unos 46 tipos diferentes de este producto. Por esto, es otro de los cultivos predominantes de las islas, pues cuenta con 2.957,29 ha dedicadas a su plantación (1.852,82 ha poseen sistemas de riego) en las cuales se producen cerca de 30 millones de kilos. Este tipo de cultivos no necesita unas grandes cantidades de agua, sino que consume aproximadamente 130 litros (0,13 m³) para poder producir un kilo, por lo que se estima que se realiza un consumo de 3.900.000 m³ de agua para generar toda la producción, una cantidad mínima comparada con el gasto que produce el plátano. Según los datos encontrados, Canarias no se sitúa como exportadora de papas como consecuencia de una plaga provocada por la polilla guatemalteca que impide realizar envíos a la península, por lo que el agua que se destina al cultivo de este producto permanece en las islas.

El tomate, por otra parte, es una de las frutas que, pese a no tener una gran superficie de cultivo en las islas, cuenta con una mayor cantidad de exportaciones. Se conoce que hay 616,66 ha con sistemas de regadío destinadas a su cultivo y que en el 2021 se produjeron 29.560.930 kg de producto que, según la Consejería de Agricultura, Ganadería y Pesca, fueron exportados en su totalidad. Según la FAO, para producir un tomate se utilizan 13 litros de agua, por lo que, realizando un cálculo aproximado de que cinco tomates equivalen a un kilogramo, se obtiene que para producir un 1kg de tomate es necesario 65 litros de agua. Por tanto, en 2021, el consumo de agua en Canarias para toda la producción de tomate se sitúa en 1.921.460,45 kg/m³ de agua, siendo exportada prácticamente en su totalidad.

El aguacate es otro de los alimentos cultivados en Canarias que, pese a no tener unas grandes superficies de cultivo (1860,68 ha con sistemas de regadío), es una de las frutas subtropicales que más agua consume, ya que para elaborar un kilo de producto es necesario 1.000 litros de agua. Según los datos proporcionados por el ISTAC para el año 2020, en Canarias hubo una producción de 13.293.400 kilos de aguacate, lo que para ese año supuso un gasto de 13.293.400 m³ de agua que, pese a ser una gran cantidad, sigue sin superar a la necesaria para la producción del plátano. El aguacate canario, por el momento, no exporta grandes cantidades y lo que envía es de calidad reducida. Sin embargo, la Fundación de Asociación de Organizaciones Productoras de Aguacate

de Canarias (Asguacan) planea comenzar con grandes exportaciones tanto a la península como a Europa en un corto plazo, por lo que se estima que haya un gran incremento en la producción del aguacate en Canarias.

Con el fin de sintetizar todos estos datos, se plantea la tabla 4 donde se recoge la producción total de producto y la cantidad de agua consumida por kilogramo con el fin de obtener la cantidad estimada total de agua consumida por los diferentes cultivos.

Tabla 4. Estimación de agua consumida para la producción por productos

PRODUCTOS	SUPERFICIE DE PRODUCTO (ha) *	CANTIDAD DE AGUA POR KILO (m ³)	PRODUCCIÓN (kg)	CANTIDAD DE AGUA ESTIMADA PARA LA PRODUCCIÓN (m ³)
Plátano	8.920,53	0,5	420.144.000	210.072.000
Papas	1.852,82	0,13	30.000.000	3.900.000
Tomate	616,66	0,065	29.560.930	1.921.460,45
Aguacate	1860,68	1	13.293.400	13.293.400

Fuente: elaboración propia (2022)

Tras el análisis que se ha realizado en el consumo de agua por una pequeña parte de la agricultura canaria, se puede llegar a la conclusión de que, efectivamente, el regadío tiene una gran importancia en la producción agrícola. Por este motivo, es importante resaltar que las islas no solo son exportadoras de alimentos, sino que se están convirtiendo en exportadoras de aguas a nivel nacional y europeo por cultivos como el plátano, tomate y, en un futuro, el aguacate. Como se ha comentado, el aguacate no es producto con una exportación elevada en la actualidad, pero, si hacemos una aproximación de la cantidad que se podrá exportar en el futuro y teniendo en cuenta que aproximadamente un 50% de la producción de aguacate del año 2020 será exportada, se obtiene que el total de agua que sale de Canarias a través de exportación de los productos analizados es de 199.681.160,45 m³ de agua. Esta situación se ilustra en la tabla 5 correspondiente al volumen de agua exportada a través de la exportación de la producción.

Tabla 5. Volumen de agua exportada a través de la exportación de la producción.

PRODUCTOS	CANTIDAD EXPORTADA (kg)	CANTIDAD DE AGUA NECESARIA POR KILO (m ³)	CANTIDAD DE AGUA ESTIMADA DE EXPORTACIÓN (km ³)
Plátano	382.226.000	0,5	191.113.000
Tomate	29.560.930	0,065	1.921.460,45
Aguacate (*1)	6.646.700	1	6.646.700
TOTAL			199.681.160,45

(*1) Se realiza una estimación suponiendo que se exportarán el 50% de los aguacates producidos en el año 2020

Fuente: elaboración propia (2022)

A la vista de estos datos, se arroja una preocupante realidad sobre la cantidad de agua consumida en las islas, teniendo en cuenta que solo se ha realizado el estudio con los cultivos

predominantes y de mayor interés en la agricultura canaria. Esta situación hace más que evidente la necesidad de buscar alternativas para la inminente escasez de agua, siendo la más viable el uso de agua depurada y regenerada para este fin.

4. LA DEPURACIÓN Y REGENERACIÓN DE LAS AGUAS RESIDUALES COMO LA SOLUCIÓN MÁS EFICAZ

El agua residual se genera en las zonas urbanas e industriales como consecuencia de las actividades domésticas y de producción. Además, puede ser originaria de la propia escorrentía pluvial si la red que recoge las lluvias es la misma que se utiliza para recolectar y conducir las aguas residuales domésticas e industriales. Este tipo de agua contiene una serie de contaminantes entre los que se puede encontrar material flotante (aceite y grasas, plásticos, colillas, etc.), materia coloidal y disuelta (orines y heces disueltas, aceites y grasas en emulsión, hidratos de carbono, sales, etc.) y materiales sedimentarios (restos de alimentos, pelos, arenas, etc.).

Para medir la contaminación presente en el agua residual se utilizan diversos parámetros, siendo los más habituales:

- La Demanda Química de Oxígeno (DQO) y la Demanda Bioquímica de Oxígeno a los 5 días (DBO5). Ambos miden la cantidad de materia orgánica que se encuentra en el agua residual en una magnitud de miligramos de oxígeno por litro de agua residual (mg O₂/l). Por un lado, la DQO establece el oxígeno que se necesita para oxidar la materia orgánica existente en el agua, es decir, expresa la cantidad de contaminantes que pueden ser oxigenados. Por su parte, la DBO5 hace referencia a la cantidad de oxígeno disuelto que consume el agua residual como consecuencia de la oxidación de la materia orgánica biodegradable durante 5 días a 20°C. Además, a través de ellos se puede medir el impacto que tendría verter las aguas residuales sobre masas de agua natural.
- Los Sólidos en Suspensión (SS) miden el impacto que tienen los sólidos en el cauce que va a recibir el agua residual. Su acumulación origina la turbidez del agua y la formación de fangos.
- El Nitrógeno Total (NT) y el Fósforo Total (PT) son los nutrientes que dan lugar al crecimiento excesivo de algas y otras plantas en el cauce que recibe el agua residual.

Para medir este grado de contaminación en el agua residual se utiliza el concepto habitante-equivalente (h-e) o población equivalente. Este concepto se corresponde con 60 gramos de DBO5, siendo esta la carga contaminante que puede generar una persona en una vivienda normal de forma diaria.

Con el fin de reducir la contaminación presente en el agua residual para poder reutilizarla o verterla al cauce natural, es necesario aplicar una serie de tratamientos. El proceso más habitual utilizado para tal fin es la depuración. Esta consiste en retirar del agua residual los contaminantes que ha recogido durante su uso hasta conseguir un estado adecuado para que pueda ser devuelta al ciclo natural del agua, cumpliendo con las garantías medioambientales exigibles.

4.1. NORMATIVA QUE REGULA LA DEPURACIÓN

Desde 1991, la Unión Europea estableció las condiciones mínimas para recoger, tratar y realizar el vertido de las aguas residuales urbanas. Para ello, se promulgó la Directiva 91/271/CEE

como norma comunitaria a la que deben acogerse todos los estados miembros. En ella se recogen las obligaciones sobre la depuración de aguas residuales, tratamientos secundarios y terciarios del agua, y la utilización de los lodos. De esta forma, a partir de 2005, se obliga a depurar los vertidos de las poblaciones inferiores a 2.000 h-e si se realiza en aguas continentales o desembocaduras al mar, mientras que en poblaciones inferiores a 10.000 h-e se debe depurar si el vertido se realiza en aguas costeras.

En el caso de los diferentes tipos de tratamiento, estos se aplican en función de la población equivalente y el lugar donde se realiza el vertido. Así, se debe emplear de forma obligatoria el tratamiento primario en poblaciones de 2.000 a 10.000 h-e si el vertido se lleva a cabo en desembocaduras al mar, mientras que en poblaciones de 10.000 a 15.000 h-e solo cuando el vertido sea en aguas costeras. Por otro lado, el tratamiento secundario es de obligada aplicación en poblaciones superiores a 2.000 h-e si el vertido se realiza en aguas continentales o desembocaduras al mar, mientras que en poblaciones de más de 15.000 cuando sea en aguas costeras.

Por su parte, en 1995 la directiva europea se traspuso al ordenamiento jurídico español a través del Plan Nacional de Saneamiento y Depuración de Aguas Residuales 1995-2005. Meses después, se aprobó el Real Decreto Ley 11/1995 por el que se regula el tratamiento de las aguas residuales urbanas y el Real Decreto 509/1996 que desarrolla dicha normativa.

En este último decreto, se recogen los requisitos que se exige a las aguas residuales urbanas en materia de calidad del vertido. A continuación, se presenta la tabla 6 contenida en dicho decreto para establecer las características del vertido bruto antes de ser tratado y las exigidas para el agua ya depurada.

Tabla 6. Requisitos de los vertidos de las aguas residuales

Parámetro	Concentración (Límite de vertido)	% Mínimo de reducción
Demanda bioquímica de oxígeno (DBO 5 a 20°C) sin nitrificación.	25 mg/l O ₂	70-90%
Demanda química de oxígeno (DQO)	125 mg/l O ₂	75%
Total de sólidos en suspensión (SS)	60 mg/l de 2.000 a 10.000 h-e 35 mg/l para más de 10.000 h-e	70% de 2.000 a 10.000 h-e 90% para más de 10.000 h-e
Nitrógeno total (NT)	15 mg/l N de 10.000 a 100.000 h-e 10 mg/l N para más de 100.000 h-e	80%
Fósforo total (PT)	2 mg/l N de 10.000 a 100.000 h-e 1 mg/l N para más de 100.000 h-e	70%-80%

Fuente: Real Decreto 509/1996.

Tal es la preocupación europea por la calidad que necesita el agua tratada para poder ser reutilizada que, en mayo de 2020, se publicó un nuevo reglamento del Parlamento Europeo y del Consejo de la Unión denominado 2020/741/UE y aplicable a partir del 27 de junio de 2023 de forma obligatoria. En este reglamento se considera que los recursos hídricos con los que cuenta la Unión Europea son escasos debido al cambio climático y su excesivo uso en la agricultura, industria y en otros fines de carácter urbano. De esta forma, el objetivo de la ordenanza es fomentar la reutilización del agua para abordar su escasez y, para ello, establece unos requisitos mínimos que evitarán la aparición de inconvenientes a la hora de utilizar esta agua en usos agrícolas, recreativos o medioambientales. Además, estos requisitos mínimos de calidad permitirán tener un cierto grado de seguridad relativa al uso de las aguas depuradas, aumentando la confianza de su reutilización dentro de la población.

La existencia de este marco normativo encarece los procesos necesarios para conseguir la calidad exigida. No obstante, permite garantizar que las aguas tratadas son seguras para el riego y la salud humana y animal, así como para promover la economía circular con base en la reutilización de los recursos.

4.2. SITUACIÓN ACTUAL DE LA DEPURACIÓN EN ESPAÑA Y CANARIAS

Tras la publicación de los datos sobre la depuración de aguas en Europa, por parte de la agencia Europea de Medio Ambiente, se han realizado diversos estudios para analizar la situación de la depuración a nivel nacional. El estudio de iAgua (2018), recoge que la capacidad de depuración de España es de 93.280 millones de h-e. Sin embargo, a las 2.111 depuradoras que había en funcionamiento en 2018, sólo llegaba una cantidad de 63.5 millones de h-e. Esto supone que en el año 2018 el porcentaje que representa el agua tratada sobre la capacidad instalada es del 68,07%.

Por otro lado, según datos extraídos del INE y como se puede observar en el gráfico 1, el volumen de aguas residuales tratadas en 2018 se sitúa en los 13.684.587 m³/día. Se observa que, durante el periodo analizado, el volumen de aguas tratadas ha sido relativamente constante hasta el año 2016, cuando el volumen se reduce a 12.949.076 m³/día. Este último dato concuerda con la situación explicada con anterioridad en referencia a la disminución de la cantidad de agua disponible durante el año 2016.

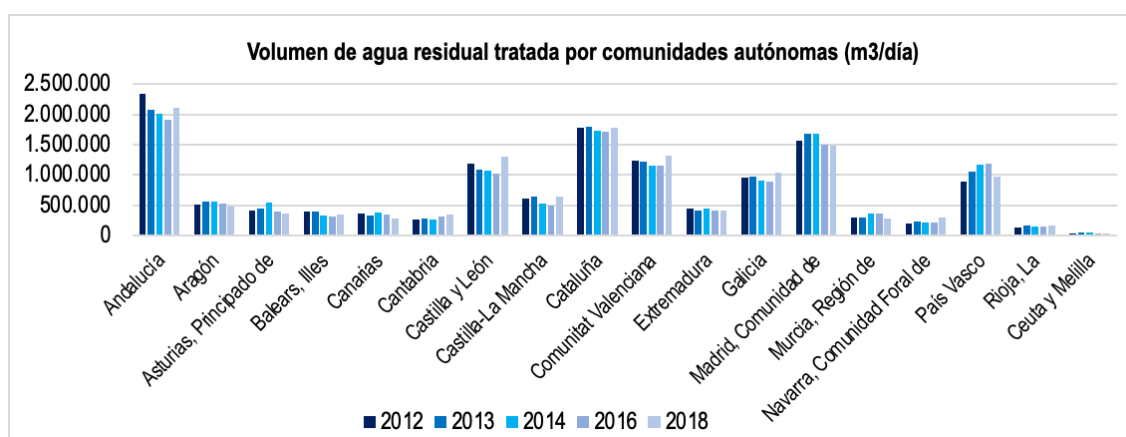
Gráfico 1. Volumen de agua residual tratada en España



Fuente: elaboración propia a partir de los datos del INE

Realizando un análisis con más profundidad, en el gráfico 2 se puede observar que Andalucía, Castilla y León, Cataluña, Comunidad Valenciana, Galicia, Madrid y País Vasco son las comunidades que cuentan con un mayor volumen de tratamiento. En el caso de Andalucía, Castilla y León, Cataluña y la Comunidad Valenciana, esto puede deberse al hecho de ser comunidades con un clima más seco y donde predomina el sector agrícola. Por su parte, Galicia y el País Vasco cuentan con grandes precipitaciones debido a su clima frío, lo que propicia una mayor cantidad de agua disponible. En lo que respecta a Madrid, es una de las comunidades más pobladas y que cuenta con un mayor número de industrias, al igual que Galicia, suponiendo esto una cantidad considerable de agua residual a tratar proveniente tanto del ámbito urbano como del industrial.

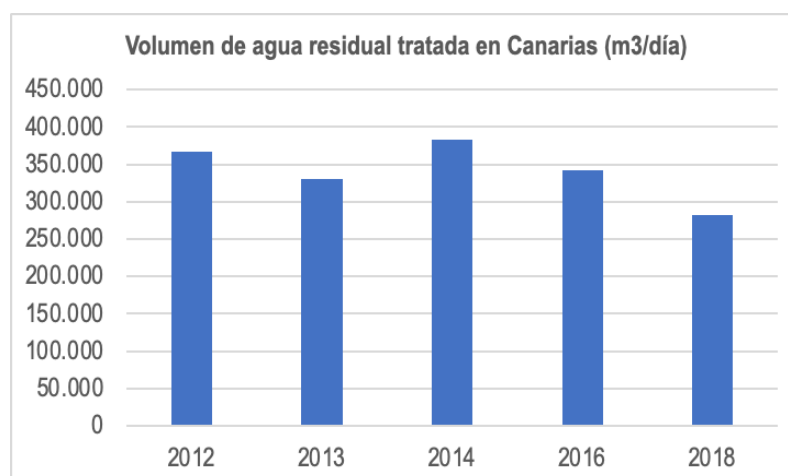
Gráfico 2. Volumen de agua residual por comunidades autónomas



Fuente: elaboración propia a partir de los datos del INE.

En el caso de Canarias, según se indica en el Plan Hidrológico de Tenerife 2015-2021, la capacidad máxima de tratamiento de agua residual es de 2.014.000 h-e, lo que equivale a 147.095.000 m³ al año. Por su parte, como se observa en el gráfico 3 el agua residual tratada desde el año 2012 hasta el año 2018, según el INE, ha ido disminuyendo, pasando de 134.059.390 m³/año a 103.145.350 m³/año. Esto supone que el porcentaje de agua tratada sobre la capacidad instalada en el año 2018 sea del 70,12%.

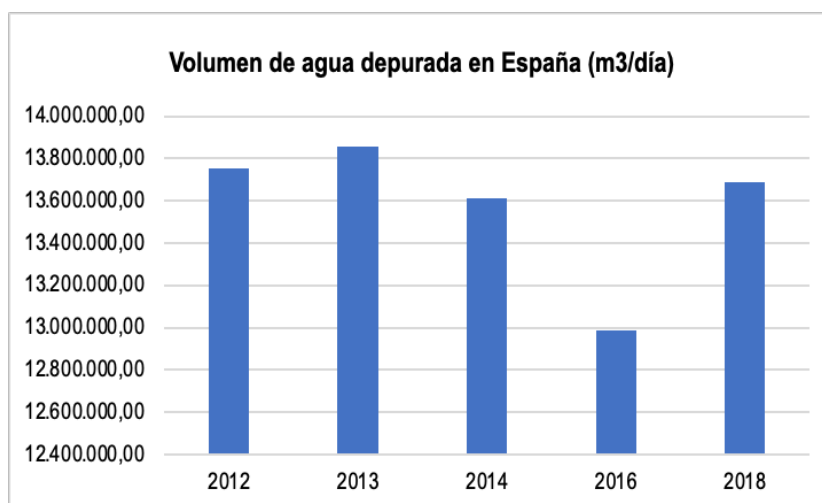
Gráfico 3. Volumen de agua residual tratada en Canarias



Fuente: elaboración propia a partir de los datos del INE.

En lo que se refiere a volumen de aguas depuradas, según el Plan Nacional de Depuración, Saneamiento, Eficiencia, Ahorro y Reutilización 2014-2023, en España se generan cerca de 5.000 millones de m³ al año de aguas residuales depuradas. Dado que, en el año 2018, el volumen de tratamiento de aguas residuales se situó en 4.997 millones de m³ al año y, como se observa en el gráfico 4, la depuración supuso 4.995 millones de m³, se puede decir que la gran mayoría del agua residual es tratada por medio de la depuración.

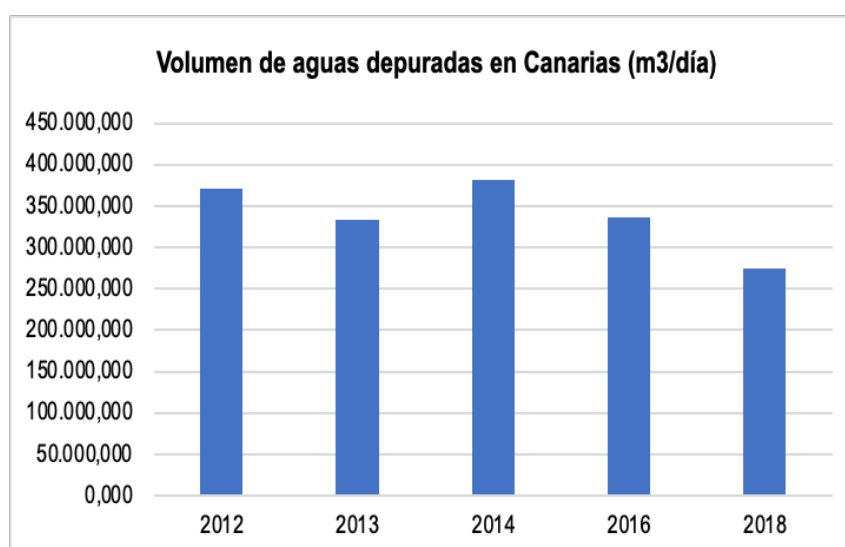
Gráfico 4. Volumen de agua depurada en España



Fuente: elaboración propia a partir de los datos del INE.

Esta misma situación tiene lugar en Canarias, pues de los 103.145.350 m³ del agua tratada en 2018, recogidos en el gráfico 5, se depuraron 100.182.048 m³, lo que supone el 97,13%

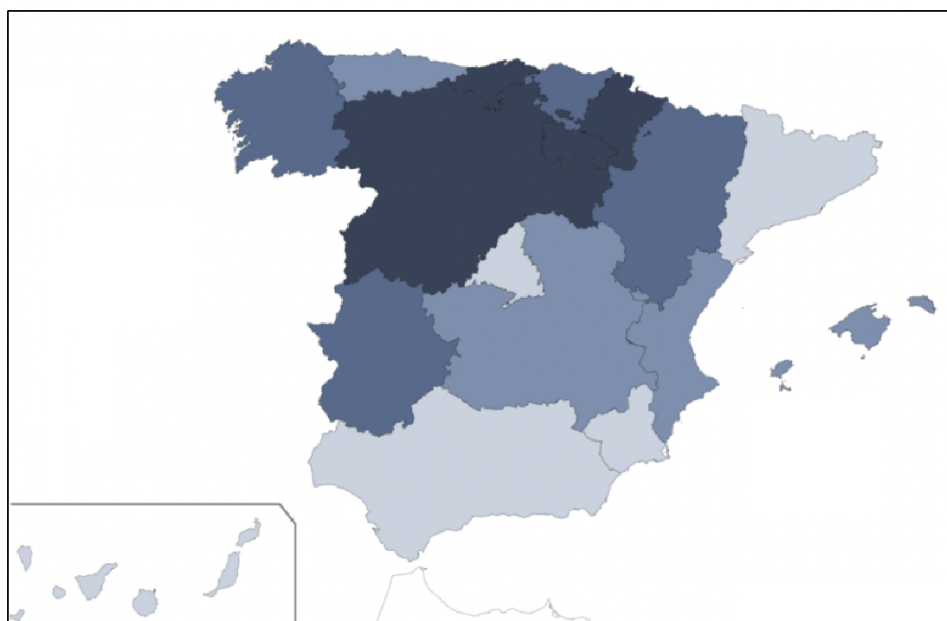
Gráfico 5: Volumen de aguas depuradas en Canarias



Fuente: elaboración propia a partir de los datos del INE.

En el siguiente mapa correspondiente a la figura 2, se puede observar como la depuración de las aguas en las diferentes comunidades autónomas coincide con el volumen de tratamiento de aguas residuales, siendo aquellas de la costa mediterránea, Madrid y Andalucía las que más utilizan este tipo de tratamiento.

Figura 2. Distribución de la depuración de las aguas por comunidad autónoma



Fuente: INE (2018).

Como se mencionó anteriormente, la legislación europea establece los requisitos de tratamiento de las aguas residuales urbanas para que estas puedan ser vertidas al medio natural. Sin embargo, España está quebrantando esta legislación, pues solo alcanza un nivel de cumplimiento del 40%, situándose por detrás de las primeras economías europeas como son Alemania, Reino Unido o Francia (PwC, 2018). Esta situación prolongada en el tiempo dio lugar a que, en 2016, la Comisión Europea abriese un expediente sancionador a España por la realización de vertidos de aguas sin tratar en 133 aglomeraciones (El País, 2022).

Tras este aviso, España comenzó a realizar avances en el tratamiento del agua residual, pero no fueron suficientes para cumplir con sus obligaciones. Por tanto, dada la falta reiterada de compromiso con la directiva de tratamiento de aguas residuales en núcleos urbanos, la Comisión Europea ha llevado a España ante el Tribunal de Justicia de la Unión Europea, con el fin de dictar una sentencia por incumplimiento de las normas medioambientales europeas. Una vez establecida la resolución, la Comisión podría volver a demandar a España si continua con el incumplimiento, solicitando en este caso una sanción económica.

Además de esta diligencia, España cuenta con otros tres expedientes europeos abiertos debido a la incorrecta aplicación de los tratamientos de depuración (El País, 2022). En uno de ellos, con sentencia de 2018, se le condenó a pagar 12 millones de euros por la infracción de las normas europeas sobre el tratamiento de aguas residuales urbanas, así como una cantidad adicional de 11 millones de euros por cada semestre que se amplíe el incumplimiento (Canarias7, 2018). En esta sanción se ha visto afectada Canarias, pues Güímar y Valle Guerra fueron dos de los municipios que contaban con un retraso en las obras de depuración, por lo que las administraciones canarias debieron abonar un mínimo de 5,8 millones de euros.

De esta forma, el Estado estimó que hasta 2022 tendrían que abonar las cantidades impuestas en las sanciones económicas, dado que se pretende conseguir un ajuste total a la normativa durante ese año.

4.3. PROCESO Y MÉTODOS DE DEPURACIÓN

Durante el recorrido del agua por el medio, el agua residual pasa por ciertos mecanismos de autodepuración que, en la actualidad, no son suficientes para alcanzar la cantidad de agua depurada necesaria para mantener el ciclo natural (Trapote, 2016).

Por ello, se hace necesaria la intervención del hombre para realizar estos tratamientos de depuración del agua residual en las Estaciones de Depuración de Aguas Residuales (EDAR). Estas infraestructuras tienen como objetivo conseguir, a partir del agua residual y mediante diferentes procedimientos físicos, químicos y biotecnológicos, un agua que cumpla con los requisitos de contaminación y calidad (Vilanova, Santin y Pedret, 2017).

Para realizar la descontaminación del agua se lleva a cabo un proceso ordenado que integra cuatro etapas. Las tres primeras son obligatorias para aquellas aguas que serán vertidas de nuevo al cauce natural, mientras que la última se aplicará en aquellas aguas que serán regeneradas y utilizadas en el riego agrícola.

En primer lugar, se realiza un pretratamiento que elimina aquellos contaminantes con un tamaño considerable como pueden ser los sólidos gruesos, las arenas o las grasas. En segundo lugar, se debe realizar un tratamiento primario mediante el que se conseguirá eliminar los sólidos flotantes. Seguidamente, se aplicará un tratamiento secundario para eliminar la materia orgánica biodegradable disuelta, los sólidos no eliminados en tratamientos anteriores y algunos de los nutrientes que contiene el agua. Finalmente, el tratamiento terciario permitirá conceder una mayor calidad al agua tratada, eliminando el resto de los nutrientes y patógenos, con el fin de que pueda ser vertida en zonas más sensibles y con unos requisitos de calidad superiores. Normalmente, este tratamiento se aplica en Estaciones de Regeneración de Aguas (ERA) que se encuentran integradas en las propias EDAR.

Es importante hacer mención a la generación de residuos durante este proceso, concretamente de lodos que pueden ser vertidos al medio si reciben un tratamiento de descontaminación que se realiza en las EDAR. Además, estos lodos pueden ser utilizados en la agricultura como fertilizantes.

Así pues, cuantos más tratamientos requiera el agua para alcanzar determinados niveles de calidad, más costoso será el proceso, pues el tratamiento secundario es el doble o el triple de costoso que el primario, mientras que el terciario equivale al coste del tratamiento primario y secundario en su conjunto (Beascochea, Muñoz y Curt Fernández de la Mora, 2014).

A la hora de realizar el proceso de depuración, se pueden utilizar diferentes mecanismos en función de la tecnología utilizada. De esta forma, se encuentran disponibles los sistemas naturales o blandos, donde el suelo y el medio natural son el elemento principal de depuración, y los métodos convencionales realizados a través de procesos físicos, químicos y biológicos en las Estaciones de Depuración más industrializadas.

4.3.1 Métodos naturales de depuración o sistemas blandos

Los métodos naturales de depuración o sistemas blandos comprenden aquellas técnicas donde la eliminación de los contaminantes presentes en el agua residual se realiza sin aditivos químicos,

es decir, únicamente por componentes del medio natural. Estos métodos son útiles en zonas ambientales sensibles, pero donde la densidad poblacional sea media o baja.

Dentro de las ventajas de este tipo de tratamiento se encuentran un reducido consumo de energía, una escasa necesidad de personal para el mantenimiento y una producción de lodos reducida. Además, permite una rápida adaptación al entorno natural y la eliminación eficaz de los contaminantes presentes en el agua manteniendo su calidad sanitaria.

Por el contrario, son métodos que necesitan una gran superficie de terreno para su ejecución, concretamente entre 4 y 44 m² por habitante (Garduno et al, 2016). Asimismo, son técnicas que pueden emplearse únicamente en vertidos totalmente degradables. De forma que, si existen restos tóxicos en el suelo o en el agua se deben eliminar antes de realizar el tratamiento natural, pues de no llevarse a cabo esta limpieza se corre el riesgo de provocar la contaminación del sistema de depuración que conlleva, por tanto, la alteración del medio al que se vierte el agua tratada.

Estas limitaciones hacen que el agua residual proveniente del vertido urbano sea la que más éxito tenga en el tratamiento de depuración. Por ello, debe evitarse aplicar dichas técnicas en aguas con un componente industrial demasiado elevado.

Dentro de los métodos naturales se pueden distinguir dos grupos de técnicas: los métodos de tratamiento mediante aplicación del agua sobre el terreno y los sistemas acuáticos. En ambos grupos, la depuración se realiza por una combinación de la acción del suelo, la vegetación y los microorganismos presentes en ambos lugares.

- **Métodos de aplicación sobre el terreno:**

Los métodos de aplicación sobre el terreno se caracterizan por desarrollar la depuración mediante procesos físicos, químicos y biológicos naturales. En ellos, las aguas residuales son vertidas al suelo para eliminar los nutrientes, microorganismos y otros componentes perjudiciales. Dentro de este tipo de métodos encontramos:

El **filtro verde** consiste en aplicar una cantidad controlada de agua residual sobre un terreno con vegetación, adaptada al nivel de tratamiento, permitiendo que se depure y favorezca el desarrollo vegetal. Se debe controlar la aplicación de estas aguas por medio de ciclos de 4 a 10 días para mantener su uso prolongado. Su instalación requiere una extensión de terreno de 40 m² por habitante, por lo que se emplea en poblaciones de menos de 25.000 habitantes, siendo este uno de sus inconvenientes. Además, en climas fríos la vegetación detiene su crecimiento, provocando una disminución del rendimiento del sistema. Sin embargo, este tratamiento consigue no producir lodos, además de reducir la cantidad de DBO₅ y de sólidos en suspensión en un 90% y 95% respectivamente.

La **infiltración rápida** consiste en la aplicación controlada del agua residual sobre balsas superficiales localizadas en suelos con una permeabilidad media-alta, alternando periodos de secado y de inundación. Este tipo de sistema suele utilizarse en poblaciones de menos de 5.000 habitantes y su principal inconveniente es la necesidad de aplicar un tratamiento primario previo al vertido sobre el terreno. Por su parte, el resultado que obtiene esta técnica es la reducción de la DBO₅ y de los sólidos en suspensión en un 90%.

La **escorrentía superficial** fuerza el recorrido del agua residual a través del riego por circulación superficial en láminas sobre un suelo con una pendiente del 2% al 8% y con vegetación baja. La aplicación del agua residual se realiza en ciclos de varias horas durante 5 a 7 días mediante aspersores o rociadores de baja presión u otros métodos superficiales. Tratándose así de un sistema que consigue su objetivo en poblaciones con menos de 500 habitantes y que requiere de un terreno con una extensión de entre 10 y 44 m² por habitante.

Los **lechos de turba** son canales por los que circula el agua residual situados sobre una capa de arena cubierta por grava. El proceso de depuración comprende un pretratamiento, un tratamiento primario mediante filtros autolimpiables, un tratamiento secundario realizado por los lechos de turba y un tratamiento terciario opcional para eliminar patógenos, obteniendo una eliminación del 80% de la DBO₅ y el 90% de los sólidos en suspensión.

Para realizar el proceso se tienen varios lechos, de forma que cuando unos están funcionando los otros están en conservación para realizar el mantenimiento y la aireación. Se trata de un sistema que obtiene resultados en poblaciones de menos de 2000 habitantes y que requiere una extensión de terreno de entre 0.6 y 1 m² por habitante, sin poder pasar de los 200 m², encareciendo su instalación, aunque con un bajo coste de explotación. Por su parte, es un sistema que no produce olores, se puede utilizar en climas fríos y soporta variaciones del caudal sin que su rendimiento se vea afectado.

Los **lechos de arena**, compuestos por material granular con un tamaño uniforme, son utilizados como sistema de tratamiento secundario. Su aplicación se realiza de forma intermitente a través de tuberías sobre un filtro granular y filtros de recircularización, pues el agua que se recoge del sistema de drenaje se incorpora de nuevo al proceso. Su principal inconveniente surge al no lograr depurar el agua a los niveles de calidad exigidos, por lo que es utilizado como un tratamiento complementario. Por su parte, las ventajas residen en un mayor volumen y resistencia de llenado con un coste menor, además de eliminar el 80% de los sólidos en suspensión y el 60% del DBO₅.

- **Métodos acuáticos**

Los métodos acuáticos son sistemas que pueden funcionar durante todo el año o de forma estacional, en función del clima, y que se diseñan para mantener un flujo continuo de descarga a ríos o lagos, interviniendo las raíces de las plantas y la actividad microbiológica asociada. Dentro de estos sistemas se encuentran:

El **lagunaje** almacena el agua residual durante 2-5 días para que los microorganismos recogidos en el medio acuático puedan degradar la materia orgánica. Se trata de un sistema aplicable en poblaciones de más de 200 habitantes con una disponibilidad de terreno de unos 6,5 m² por habitante como mínimo. Las lagunas se pueden clasificar en anaerobias, facultativas y aerobias en función de los microorganismos existentes que dependen del oxígeno disuelto en el medio.

- El proceso de depuración en las lagunas anaerobias puede ser utilizado como tratamiento primario o como único tratamiento en poblaciones de menos de 2.000 habitantes. En la primera etapa de depuración, se descompone la materia orgánica en ácidos grasos, aldehídos y alcoholes. En la segunda etapa, se transforma la materia

orgánica descompuesta en hidrógeno, anhídrido carbónico, metano y amoníaco, compuestos caracterizados por su mal olor. El resultado de este tratamiento es la reducción del 70% de la DBO5 y de sólidos en suspensión.

- Las lagunas aerobias dotan al agua de unos niveles de calidad superiores, por lo que se utilizan como tratamiento terciario, ya sea en combinación con las otras dos lagunas o con otros sistemas de depuración. Entre las ventajas de este método se encuentra la posibilidad de regular y almacenar agua apta para el riego, así como la utilización de los lodos producidos. Por otro lado, la necesidad de una superficie de terreno extensa, la pérdida de agua debido a la evaporación, la concentración de algas en el agua depurada y la dificultad para adaptarse al clima conforman los principales inconvenientes de este método.
- En las lagunas facultativas existe una zona aerobia cerca de la superficie, una zona anaerobia en el fondo y una zona intermedia donde se encuentran las bacterias facultativas. Así, pueden ser la primera fase de un proceso de depuración o ser un tratamiento secundario que sigue a las lagunas anaerobias.

Los humedales son terrenos pantanosos naturales o artificiales, con una profundidad aproximada de 0,6 m, donde el agua fluye de forma continua. Esta situación da lugar a humedales naturales o artificiales en los que la vegetación absorbe los contaminantes reduciendo entre un 75-80% la DBO5 y los sólidos en suspensión. Como variante de este método surgen los cultivos acuáticos que cuentan con un cultivo de plantas flotantes para eliminar algunos componentes del agua por medio de sus raíces y para evitar que entre la luz solar al estanque. Este sistema suele ser complementario a otros procesos de depuración, siendo normalmente empleado como un tratamiento terciario.

4.3.2. Métodos convencionales de depuración

Esta depuración consiste en recolectar el agua de las diferentes fuentes de producción y transportarla hasta los puntos de potabilización y distribución. Una vez consumida, una parte de esta vuelve a ser recolectada y depurada para poder reutilizarla o vertida al medio. El principal inconveniente se encuentra en los elevados costes de construcción y posterior mantenimiento de las EDAR, unido al uso de tecnologías caras y sofisticadas, los malos olores y residuos tales como grasas, arenas y lodos, así como un consumo energético bastante elevado.

El proceso de depuración comienza con un tratamiento físico donde se aplica la fuerza gravitatoria, centrífuga, de retención o de cohesión. Dentro de este tipo de procesos se encuentra el desarenado, el desbaste de sólidos, el desengrasado, el desarenado, etc. Tras esto, se añaden productos químicos al agua residual para provocar reacciones que favorezcan la reducción de la contaminación. Dentro de estos procesos se encuentran la oxidación, desinfección, coagulación, etc. Finalmente, se dan los procesos más complejos y con una mayor influencia en descontaminación donde se favorece la actividad biológica de algunas bacterias y microorganismos que se alimentan de las sustancias orgánicas biodegradables que contiene el agua residual.

Los métodos convencionales aplicados en la actualidad se basan en tres tipos de tecnologías:

- **Sistemas de ultrafiltración o microfiltración** para realizar el tratamiento terciario.

- **Sistema de Biorreactor de Membrana (MBR)** para realizar el tratamiento secundario y terciario de forma unificada.
- **Tecnologías de desalación** para reducir la salinidad del agua residual mediante ósmosis inversa, nanofiltración o electrodiálisis reversible.

Para realizar un análisis con más profundidad de este tipo de métodos, nos centraremos en el Sistema de Biorreactor de Membrana (MBR), dado que es el más común en las estaciones de depuración de aguas residuales de España. Este sistema está compuesto por diferentes etapas:

1. **Pretratamiento.** Elimina los sólidos y partículas de gran tamaño presentes en el agua por medio de rototamices de hasta 1 mm que actúan como un filtro.
2. **Reactor Biológico.** Cuenta con una fase anaeróbica y aerobia. Además, necesita un sistema de agitación y aireación que aporte oxígeno para que se pueda desarrollar la actividad depuradora de las bacterias.
3. **Separación sólido-líquido** mediante membranas de filtración o ultrafiltración. Estas membranas pueden estar situadas dentro o fuera del reactor.

4.4. ESTRUCTURA DE COSTES

Los costes de la depuración y regeneración de aguas dependen tanto de las características iniciales del agua que entra en la EDAR como de la tecnología utilizada para su tratamiento y el uso final que se le vaya a dar (Melgarejo, 2009). De esta forma, se pueden dividir en costes de implantación y de explotación, donde los primeros hacen referencia a las instalaciones necesarias para llevar a cabo los procesos y los segundos engloban todos los relacionados con la gestión de las aguas residuales en esas instalaciones.

En primer lugar, los costes de implantación de una EDAR varían en función de:

- El estado del agua que entra en la EDAR dado que, a mayor calidad, menos intensivos serán los tratamientos y, por tanto, las instalaciones serán menos costosas.
- El volumen de agua a tratar, pues a mayor volumen serán necesarias unas instalaciones de mayor tamaño y, por consiguiente, más costosas.
- Los tratamientos a realizar y la tecnología empleada para ello. Así, el coste será variable y creciente a medida que el agua a obtener requiera de una mayor calidad (Melgarejo, 2016)
- La ubicación de la planta depuradora, puesto que las infraestructuras destinadas al transporte de las aguas tienen un coste elevado, por lo que es importante establecer las EDAR en zonas que permitan minimizar costes.

En segundo lugar, los costes de explotación están integrados por costes fijos y costes variables. Así, los costes fijos se clasifican en tres grupos:

- Los costes de personal.
- Los costes de mantenimiento que aseguran el correcto funcionamiento de las infraestructuras y maquinaria.
- Costes varios que incluyen los costes de seguimiento y control y otros costes relacionados con la salud, la seguridad y la administración.

Por su parte, los costes variables dependientes del volumen de aguas tratadas y de los residuos generados, pueden dividirse en cuatro grupos:

- Los costes energéticos suelen ser los más elevados y cuentan con una cuota de potencia fija y una cuota variable dependiendo del uso.
- Los costes de los reactivos químicos para tratamientos convencionales.
- Los costes de tratamientos y evacuación de residuos generados. Concretamente de los lodos que deben transportarse hasta donde serán reutilizados.
- Los costes de reposición de membranas, pues estas se desgastan con el uso y dependen del mantenimiento que se les realiza.

A la hora de determinar los costes totales de depuración, no se puede generalizar dadas las diferentes características mencionadas. Sin embargo, se puede realizar una estimación basada en casos reales de diferentes EDAR.

En este caso, en la tabla 7 se realiza un análisis de costes según el caudal medio tratado, puesto que la mayor parte de las EDAR de las que se han podido obtener datos cuentan con la misma tecnología para realizar los tratamientos: Sistema de Biorreactor de Membranas.

Tabla 7. Costes de depuración con Sistema de Biorreactor de Membranas

EDAR	Caudal medio tratado (m ³ /año)	Costes fijos de explotación	Costes variables de explotación	Coste total en €	Coste por m ³ (€/m ³)
Rincón de León (Alicante, Comunidad Valenciana)	16.763.720	1.743.427 € Personal: 73,08% Mantenimiento: 19,23% Varios: 7,69 %	2.095.465 € Coste energético: 65,60% Reactivos: 17,60% Residuos: 16,80%	3.838.893	0,229
Peñíscola (Castellón, Comunidad Valenciana)	4.140.000	275.407 € Personal: 72,26% Mantenimiento: 4,88% Varios: 22,87%	646.726 € Coste energético Fijo: 47,45% Variable: 7,28% Reactivos: 16,98% Residuos: 28,28%	922.133	0,222
Santillana (Madrid)	1.186.250	143.570 € Personal: 90,27% Mantenimiento: 6,43% Varios: 3,30%	85.739 € Coste energético Fijo: 2,45% Variable: 83,70% Reactivos: 1,15% Residuos: 12,70%	229.309	0,193

Fuente: Elaboración propia (2022)

Para la realización de este análisis se ha considerado que las infraestructuras de depuración que utilizan tecnologías convencionales ya se encuentran instaladas y en funcionamiento, por lo que los costes de implantación son nulos.

De esta forma, se observa que la mayor parte de los costes se corresponden con la parte variable de la explotación y, a su vez, estos vienen determinados principalmente por el coste energético que supone más del 50% en todos los casos. Por otro lado, en los costes fijos de explotación predominan los referentes al personal.

Así, obteniendo el coste total de depuración y sabiendo el volumen de agua residual tratada, se puede obtener el coste por m³. Esta operación permite establecer que el coste de depuración se encuentra entre 0,19€/m³ y 0,23€/m³. Además, se puede comprobar que a medida que aumenta el volumen de agua residual tratada el coste por m³ no se incrementa de forma proporcional, sino que aumenta en un porcentaje reducido. Esto quiere decir que es apenas perceptible el aumento del volumen de agua tratada en el coste de tratamiento.

Una vez obtenido el intervalo de costes de la depuración a través de métodos convencionales de depuración, podemos compararlo con el coste de depuración asociados a la utilización de métodos naturales, cuyo análisis se recoge en la tabla 8.

Tabla 8. Costes de depuración con métodos naturales

EDAR	Caudal medio tratado (m ³ /año)	Costes implantación	Costes explotación	Coste total de depuración	Coste de obtención por m ³
Albergue de Bólico (Santa Cruz de Tenerife, Canarias)	2.400	16.663€	1.728 €/año	Año de implantación: 20.119€	8,38 €/m ³
		0€		Resto de años: 1.728€	0,72 €/m ³
Campus Universitario de Tafira (Las Palmas de Gran Canaria, Canarias)	7.300	18.110€	2.000 €/año	Año de implantación: 20.110€	2,75 €/m ³
		0€		Resto de años: 2.000€	0,27 €/m ³
Finca de la Data del Coronado (Santa Cruz de Tenerife, Canarias)	4.380	22.300 €	1.000 €/año	Año de implantación: 23.300 €	5,32 €/m ³
		0€		Resto de años: 1.000€	0,23 €/m ³

Fuente: Elaboración propia (2022)

Para calcular el volumen de agua tratada en la EDAR de Bolico se ha tenido en cuenta la capacidad de la fosa séptica utilizada, siendo esta de 100 m³. Dado que la recarga hidráulica se produce aproximadamente cada 15 días, se obtiene que mensualmente se depuran 200 m³ y, por tanto, 2.400 m³ anuales.

Por su parte, en la EDAR Finca de la Data del Coronado el caudal medio tratado se estima en 12 m³/día. Teniendo en cuenta el año natural de 365 días, se valora el caudal tratado a 4.380 m³/año. Así, en el caso de la EDAR de Tafira, el caudal medio de tratamiento se estima en 7.300 m³/año

Los costes de los sistemas naturales están mayoritariamente asociados a su implantación, pues los costes de explotación son mínimos y asociados al personal en el caso de la EDAR de Bolico y a los de mantenimiento en las otras dos EDAR. Con estos datos, se obtiene que en el año de implantación del sistema de depuración los costes ascienden a una media de 5,48 €/ m³. Sin embargo, tras la implantación los costes disminuyen drásticamente a una media de 0,41 €/ m³.

La ventaja de este tipo de tecnología radica en la posibilidad de incrementar la capacidad de tratamiento o implementar varios sistemas operados por el mismo personal. Esto permitiría aumentar el volumen de tratamiento manteniendo los costes. Por ejemplo, en la EDAR de Tafira, realizando la instalación de dos de estos sistemas, se puede llegar a tratar 14.600 m³ de agua residual al año, siendo el coste anual tras la implantación de 0,14 €/ m³.

Con este análisis de costes se puede concluir que las tecnologías convencionales son mucho más costosas que los métodos naturales. Además, estos últimos cuentan con economías de escala, pues a mayor caudal tratado menores son los costes. No obstante, cabe destacar que los métodos naturales son eficientes en pequeños núcleos de población, así como en fincas o terrenos agrícolas, mientras que los sistemas convencionales cuentan con más utilidad en grandes poblaciones. Estos últimos permitirían aglutinar las aguas residuales de diferentes poblaciones para obtener agua regenerada a un menor coste.

5. CONCLUSIONES

A lo largo del estudio se ha podido observar la necesidad de gestionar los recursos hídricos de una forma más eficiente debido al incremento de la demanda y a los problemas de oferta originados por el cambio climático. De esta forma, hemos apostado por los principios de la economía circular con base en la reutilización del agua regenerada focalizada principalmente en el sector agrícola, siendo uno de los mayores consumidores de este recurso y, por tanto, un gran participante en la generación del estrés hídrico del planeta. Situación que según Urban Climate Change Research Network (2018), irá incrementando con el paso de los años, pues se estima que, para el año 2050, 685 millones de personas sufrirán un 10% más de esta escasez como consecuencia del cambio climático.

La depuración es una solución que presenta distintas alternativas técnicas agrupadas en sistemas naturales y convencionales. Una vez analizadas sus características y resultados, se puede concluir que los sistemas naturales son los menos costosos, pero con un proceso más duradero. Por su parte, los métodos convencionales permiten obtener un agua depurada en un tiempo reducido, pero con un coste más elevado. Así, se concluye que para poblaciones con una densidad demográfica reducida las técnicas naturales proporcionan mejores resultados, mientras que en grandes ciudades las tecnologías convencionales aportarán un mayor grado de calidad y una mayor capacidad de tratamiento.

Pese a estas ventajas, el uso de agua depurada sigue siendo desfavorable por parte de las comunidades regantes debido al desconocimiento y a la incertidumbre que les genera la utilización de estas aguas para el riego de cultivos que serán empleados para consumo animal o humano. Por ello, a lo largo de este documento se propone la transparencia de los procesos, beneficios y costes que supone la obtención y utilización de esta agua.

En el caso que nos concierne, el archipiélago canario por su condición geográfica podría optar por la desalación del agua de mar, pero al ser uno de los métodos con mayores costes se recomienda la instalación de Estaciones de Depuración de Aguas Residuales. Esta implantación podría favorecer a Canarias puesto que, a parte del consumo urbano, la agricultura es uno de los principales demandantes de agua por las características de sus cultivos que convierte al archipiélago en una de las mayores exportadoras de agua a nivel nacional por las ventas de su producción al resto de España y la Unión Europea.

En definitiva, el agua es un bien preciado y escaso que requiere de una gestión eficaz para asegurar su conservación y disponibilidad futura. Así, emplear métodos de descontaminación del agua residual se posiciona como una de las vías más eficaces para garantizar este resultado y conseguir una mayor sostenibilidad ambiental.

6. BIBLIOGRAFÍA

A.R. (2017). El estado trabaja para agilizar la exportación de las papas canarias. *Periódico la Provincia*. Recuperado 22 de junio de: <https://www.laprovincia.es/economia/2017/04/05/trabaja-agilizar-exportacion-papas-canarias-9732441.html>

AEAS. (2017). *Informe Sobre Aguas Residuales en España*.

Bluegold. (2020). Biorreactor de membrana MBR: Descripción y su aplicación al tratamiento de las aguas residuales. *Bluegold.es*. Recuperado del 16 de junio de: <https://www.bluegold.es/biorreactores-de-membrana-mbr-descripcion-y-aplicacion/#:~:text=Un%20Reactor%20Biol%C3%B3gico%20de%20Membranas,el%20tratamiento%20de%20aguas%20residuales>

Bluegold. (2020). El tratamiento de lodos de depuración de aguas residuales. *Bluegold.es*. Recuperado el 17 de junio de: <https://www.bluegold.es/el-tratamiento-de-lodos-de-depuracion-de-aguas-residuales/>

Cabezas Ballester, D. (2019). *Ficha sector. El mercado del Watertech en Israel*. Oficina Económica y Comercial de España en Tel Aviv. ICEX.

Camarero Rodríguez, F. (2011). *Huella hídrica, desarrollo y sostenibilidad en España*. Madrid: Fundación Mapfre.

Canarias7. (2018). Canarias pagará 5,8 millones de la multa de la UE por depuración. *Periódico Canarias7*. Recuperado el 21 de mayo de: <https://www.canarias7.es/politica/canarias-pagara-5-8-millones-de-la-multa-de-la-ue-por-depuracion-DY5155544>

Carrasco Marín, F., y Menéndez Díaz, J. Á. (2010). *Nuevos materiales y tecnologías para el tratamiento del agua*. Sevilla: Universidad Internacional de Andalucía.

Cerdá, E., y Khalilova, A. (2016). Economía circular. *Economía industrial*, 401(3), 11-20

Consejería de Agricultura, Ganadería y Pesca. (2020). Evolución de la producción comercializada del plátano de canarias (1939-2020). Gobierno de Canarias. Recuperado el 24 de junio de: <https://www.gobiernodecanarias.org/agp/sgt/temas/estadistica/agricultura/index.html>

Consejería de Agricultura, Ganadería y Pesca. (2020). Evolución de la producción de tomate exportado. Canarias. Campaña 1979/80 – 2020/21. Gobierno de Canarias. Recuperado el 24 de junio de: <https://www.gobiernodecanarias.org/agp/sgt/temas/estadistica/agricultura/index.html>

Consejería de Agricultura, Ganadería y Pesca. (2021). Mapa de cultivos de Canarias. Gobierno de Canarias. Recuperado el 22 de junio de: https://www.gobiernodecanarias.org/agricultura/temas/mapa_cultivos/

Depuranat. (2018). *Cuestionario para Estaciones Depuradoras de aguas Residuales Existentes. Alberque de Bolico*.

Depuranat. (2018). *Cuestionario para Estaciones Depuradoras de aguas Residuales Existentes. Campus Universitario de Tafira*.

Depuranat. (2018). *Cuestionario para Estaciones Depuradoras de aguas Residuales Existentes. Finca de la Data del Coronado*.

Directiva 91/271/CEE del Consejo, de 21 de mayo de 1991, sobre el tratamiento de las aguas residuales urbanas.

El Día. (2016). La Junta de Gobierno autoriza la subida en la tarifa del agua. *Periódico El Día, La Opinión de Tenerife*. Recuperado el 25 de mayo de: <https://www.eldia.es/2016-07-19/SANTACRUZ/9-Junta-Gobierno-autoriza-subida-tarifa-agua.htm>

El País Canario. (2021). Las balsas de Tenerife inician el año con el mayor volumen desde 2014 gracias al agua regenerada. *Periódico Elpaiscanario.com*. Recuperado el 29 de junio de: <https://www.elpaiscanario.com/las-balsas-de-tenerife-inician-el-ano-con-el-mayor-volumen-desde-2014-gracias-al-agua-regenerada/>

Entitat de Sanejament, D. A. *Proyecto de Construcción de la Nueva EDAR y Colectores Generales de Peñíscola (Castellón)*. Anejo N°07.

García López, M. (2018). *El impacto ambiental de la depuración de aguas residuales. Análisis de la internalización de costes ambientales en Alicante y la Comunidad Valenciana*. (Memoria del Trabajo de Fin de Máster) Universidad de Alicante.

Gómez, M. V. y Planelles, M. (2022). Bruselas lleva a España ante la justicia europea por incumplir el tratamiento de aguas residuales en 133 poblaciones. *Periódico El País*. Recuperado el 21 de mayo de: <https://elpais.com/clima-y-medio-ambiente/2022-04-06/bruselas-lleva-a-espana-ante-la-justicia-europea-por-incumplir-el-tratamiento-de-aguas-residuales-en-133-poblaciones.html>

Hernández, I. A. (2018). Radiografía de la agricultura en Canarias, una actividad en peligro de extinción. *Periódico Canariasahora*. Recuperado el 23 de Junio de: https://www.eldiario.es/canariasahora/agricola/agricultura/agricultura-canarias-sector-primario_1_1891434.html#:~:text=Canarias%20tiene%20una%20superficie%20total,%2C%20el%2018%2C75%25.

Hernández, I. A. (2019). Canarias empuja a España al liderazgo en infracciones ambientales. *Periódico Canariasahora*. Recuperado el 21 de mayo de: https://www.eldiario.es/canariasahora/sociedad/canarias-espana-liderazgo-infracciones-ambientales_1_1721953.html

Hernández, I. A. (2022). Canarias pierde casi la mitad del agua que obtiene de acuíferos y el mar en las redes de distribución. *Periódico Canariasahora*. Recuperado el 20 de mayo de: https://www.eldiario.es/canariasahora/ciencia_y_medio_ambiente/canarias-pierde-mitad-agua-obtiene-acuiferos-mar-redes-distribucion_1_8892347.html

Hoekstra, A. Y., Chapagain, A. K., Aldaya, M. M., y Mekonnen, M. M. (2010). *Manual de Evaluación de la huella hídrica. Definiendo una norma global*. Madrid: AENOR Internacional, S.A.U.

Huertas, R., Marcos, C., Ibarguren, N., y Ordás, S. (2013). *Guía práctica para la depuración de aguas residuales en pequeñas poblaciones*. Confederación Hidrográfica del Duero. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medioambiente.

Idrica. (2020). Las 6 etapas del ciclo integral del agua. Recuperado el 27 de mayo de: <https://www.idrica.com/es/blog/las-6-etapas-del-ciclo-integral-del-agua/>

INE. (2020). *Encuesta sobre el uso del agua en el sector agrario (EUASA) Año 2018*.

- Locken. (2018). *La depuración de las aguas residuales urbanas en España*. iAgua. Recuperado 16 de mayo de 2022, de <https://www.aguasresiduales.info/revista/blog/la-depuracion-de-las-aguas-residuales-urbanas-en-espana>
- Luis Domínguez, A., y Socas García, M. I. (2015). *Análisis Económico de los Recursos Hidrológicos de Tenerife*. (Memoria del Trabajo de Fin de Grado) Facultad de Economía, Empresa y Turismo. Universidad de la Laguna.
- Mas Ortega, J. G. (2016). *Análisis coste/beneficio aplicado a los procesos de depuración y reutilización*. (Memoria del Trabajo de Fin de Máster) Universidad de Alicante.
- Medina, E. R. (2020). "la organización de productos de aguacates permitirá a La Palma exportar a Europa un producto de alta calidad" *Periódico Canariasahora*. Recuperado el 22 de junio de: https://www.eldiario.es/canariasahora/lapalmaahora/economia/organizacion-productores-aguacates-exportar-europa-alta-calidad-la-palma_1_6132003.html
- Melgarejo Moreno, J. (2009). *Efectos ambientales y económicos de la reutilización del agua en España*. *Clim.economía*, 15, 245-270
- Melgarejo Moreno, J. (2019). *Agua y Economía Circular*. Alicante: Universidad de Alicante
- Melgarejo-Moreno, J., y López-Ortiz, M. I. (2016). Depuración y reutilización de aguas en España. *Agua y Territorio*, 8, 22–35. <https://doi.org/10.17561/at.v0i8.3293>
- Melián-Navarro, A., y Fernández-Zamudio, M. (2016). Reutilización de agua para la agricultura y el medioambiente. *Agua y Territorio*, 8, 80–92. <https://doi.org/10.17561/at.v0i8.3298>
- Mercado digital. (2021). *La historia del tomate en Canarias*. Cabildo de Gran Canaria. Recuperado el 23 de junio de: <https://grancanariamegusta.com/blog/la-historia-del-tomate-en-canarias-n8>
- Merino, L., Fernández Jurado, M. A., Rubio Campos, J. C., Calaforra Chordi, J. M., López Geta, J. A., Beas Torroba, J., y Gómez López, J. A. (2003). *Los métodos naturales de depuración de aguas residuales urbanas. La depuración de aguas residuales urbanas de pequeñas poblaciones mediante infiltración directa en el terreno fundamentos y casos prácticos*, 13-27.
- Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. (2018). El Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente lanza una campaña para concienciar sobre el ahorro de agua. Gobierno de España. Recuperado el 26 de Junio de: <https://www.mapa.gob.es/es/prensa/historico/-el-ministerio-de-agricultura-y-pesca-alimentación-y-medio-ambiente-lanza-una-campaña-para-concienciar-sobre-el-ahorro-de-agua/tcm:30-437605>
- Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. (2020). El Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación fomenta el buen uso de las aguas no convencionales en el regadío. Gobierno de España. Recuperado el 19 de Junio de: <https://www.mapa.gob.es/es/prensa/ultimas-noticias/el-ministerio-de-agricultura-pesca-y-alimentación-fomenta-el-buen-uso-de-las-aguas-no-convencionales-en-el-regad%C3%ADo/tcm:30-550337>
- Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. (2020). *Encuesta sobre superficies y rendimientos de cultivos. Informe sobre regadíos en España*.

Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. (2021). *Plan Nacional de Depuración, Saneamiento, Eficiencia, Ahorro y Reutilización*. Secretaría de Estado de Medio Ambiente.

Miracle Sol, M. (2006). Consideraciones y casos en torno al ciclo del agua. *Polis. Revista Latinoamericana*, 14.

Nieto Tolosa, M. (2009). *Huella Hídrica: Una Aproximación Crítica*. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid.

Otiniano Pulido, C. (2021). El plátano de Canarias se aferra al mercado interno. *El PAÍS Economía*. Recuperado el 22 de junio de: https://cincodias.elpais.com/cincodias/2021/10/11/companias/1633943013_994756.html

Pedrozo Acuña, A. (2022). *Causas que originan el declive global de agua*. México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. DOI: <https://doi.org/10.24850/b-imta-perspectivas-2022-02>

Peñate, C. D. (2015). Canarias, la comunidad que más papas consume en España. *Periódico Canariasahora*. Recuperado del 22 de junio de: https://www.eldiario.es/canariasahora/premium-en-abierto/papas_1_2280599.html

PwC. (2018). *La gestión del agua en España. Análisis y retos del ciclo urbano del agua*. PricewaterhouseCoopers Asesores de Negocios, S.L.

Real Decreto 1620/2007, de 7 de diciembre, por el que se establece el régimen jurídico de la reutilización de las aguas depuradas. Boletín Oficial

Real Decreto 509/1996, de 15 de marzo, de desarrollo del Real Decreto-ley 11/1995, de 28 de diciembre, por el que se establecen las normas aplicables al tratamiento de las aguas residuales urbanas. Boletín Oficial del Estado, 77, de 29 de marzo de 1996. <https://www.boe.es/eli/es/rd/1996/03/15/509>

Reglamento (UE) 2020/741 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 25 de mayo de 2020, relativo a los requisitos mínimos para la reutilización del agua. *Diario Oficial de la Unión Europea*, L177, de 5 de junio de 2020. <http://data.europa.eu/eli/reg/2020/741/oj>

Sala-Garrido, R., Molinos-Senante, M., Fuentes, R., y Hernández-Sancho, F. (2020). *Reutilización de agua: estado actual y perspectivas*. Presupuesto y Gasto Público SE de P, 101, 187-204.

Sánchez Donado, R. (2019). *Diseño y estudio de viabilidad de una planta depuradora de aguas residuales*. (Memoria del Trabajo Final de Grado) Universidad Politécnica de Madrid

Santos Peraza, A., Scarpato Valencia, S. A., y Peraza Perera, J. (2019). *Sistema de depuración idóneo para la Comarca Isla Baja*. (Memoria del Trabajo Final de Grado) Facultad de Economía, Empresa y Turismo. Universidad de La Laguna.

Tollín, N., Jiménez, L. M. y Morató, J. (2017). *Situación y evolución de la economía circular en España*. Madrid: Fundación COTEC para la Innovación.

Trapote-Jaume, A. (2016). *Tecnologías de depuración y reutilización: nuevos enfoques*. *Agua y Territorio*, 8, 48–60. <https://doi.org/10.17561/at.v0i8.3295>

UNESCO. (2020). *Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2020: agua y cambio climático*. París: UNESCO

UNESCO. (2020). *Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2020: Agua y Cambio Climático*. Italia: UNESCO

Vilanova, R., Santín, I., y Pedret, C. (2017). Control y Operación de Estaciones Depuradoras de Aguas Residuales: Modelado y Simulación. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*, 14(3), 217–233. <https://doi.org/10.1016/j.riai.2017.05.004>

Viveros Barber. (S.F). Necesidades Hídricas de la Vid: ¿Cuándo y cuánto regar la viña? *VitiViniCultura.net*. Recuperado el 22 de junio de: <https://www.vitivinicultura.net/necesidades-hidricas-de-la-vid.html>

Zamora Gómez, J. P., y Prieto Garra, D. (2016). *Agua de calidad con equidad: Experiencias, debates y desafíos sobre acceso, tratamiento y uso del agua para la agricultura familiar en América Latina*. Ediciones INTA.

Zarzo Martínez, D. (2021). La reutilización en España, herramienta para la prevención de la sequía y el equilibrio hídrico. En J. Melgajero, M. I. López-Ortiz, y P. Fernández-Aracil (Eds.) *Inundaciones y sequías. Análisis multidisciplinar para mitigar el impacto de los fenómenos climáticos extremos* (pp. 591-609). Universidad de Alicante.

7. ANEXO

Tabla A. Condiciones exigidas del agua regenerada para el uso en el riego agrícola

Uso del agua	Nematodos intestinales	Escmerichia coli	Solidos en suspensión	Turbidez	Otros criterios
Riego de cultivos con contacto directo del agua regenerada con las partes comestibles de la alimentación humana en fresco	1 huevo/ 10L	100 UFC/100 mL Teniendo en cuenta un plan de muestreo a 3 clases con los valores: n =10 m=100 UFC/100 mL M=1.000 UFC/100 mL c=3	20mg/L	10 UNT	Es obligatorio llevar a cabo la detección de patógenos Presencia/Ausencia (Salmonella, etc.)
a) Riego de productos para consumo humano sin evitar contacto directo del agua regenerada con las partes comestibles, para consumo no en fresco sino con tratamiento industrial posterior b) Riego de pastos para consumo de animales productores de leche o carne. c) Acuicultura.	1 huevo/ 10L	1.000 UFC/100 mL Teniendo en cuenta un plan de muestreo a 3 clases1 con los siguientes valores: n =10 m=1.000 UFC/100 mL M=10.000 UFC/100 mL c=3	35mg/L	No se fija limite	tener en cuenta la presencia de Taenia saginata y Taenia solium: 1 huevo/L (si se riegan pastos para consumo de animales productores de carne) Es obligatorio llevar a cabo detección de patógenos Presencia/Ausencia (Salmonella, etc.) cuando se repita habitualmente que c=3 para M=10.000
a) Riego localizado de cultivos leñosos que impida el contacto del agua regenerada con los frutos consumidos en la alimentación humana. b) Riego de cultivos de flores ornamentales, viveros, invernaderos sin contacto directo del agua regenerada con las producciones. c) Riego de cultivos industriales no alimentarios, viveros, forrajes ensilados, cereales y semillas oleaginosas.	1 huevo/ 10L	1.000 UFC/100 mL	35mg/L	No se fija limite	En el caso de que se trate de sustancias peligrosas deberá asegurarse el respeto de las NCAs. Legionella spp. 100 UFC/L

Fuente: Real Decreto 1620/2007.