



MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

TRABAJO FIN DE MÁSTER

ANÁLISIS DE LOS SISTEMAS DE TRATAMIENTO DE AGUA PARA EL CONSUMO HUMANO Y MODELO DE SELECCIÓN

Autor: Teresa Jarabo Sastre

Director: Carlos Fuertes Kronberg

Co-Director: Rafael Abajo Pérez

Co-Director: Jaime Suárez Alba

Madrid 2022

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título
**Análisis de los Sistemas de Tratamiento de Agua para Consumo Humano y Modelo
de Selección**

en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el
curso académico 2021/22 es de mi autoría, original e inédito y
no ha sido presentado con anterioridad a otros efectos.

El Proyecto no es plagio de otro, ni total ni parcialmente y la información que ha sido
tomada de otros documentos está debidamente referenciada.



Fdo.: Teresa Jarabo Sastre

Fecha: 06/07/2022

Autorizada la entrega del proyecto
EL DIRECTOR DEL PROYECTO



Fdo.: Carlos Fuertes Kronberg

Fecha: 06/07/2022



MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

TRABAJO FIN DE MÁSTER

ANÁLISIS DE LOS SISTEMAS DE TRATAMIENTO DE AGUA PARA CONSUMO HUMANO Y MODELO DE SELECCIÓN

Autor: Teresa Jarabo Sastre

Director: Carlos Fuertes Kronberg

Co-Director: Rafael Abajo Pérez

Co-Director: Jaime Suárez Alba

Madrid 2022

ANÁLISIS DE LOS SISTEMAS DE TRATAMIENTO DE AGUA PARA CONSUMO HUMANO Y MODELO DE SELECCIÓN

Autor: Jarabo Sastre, Teresa.

Director: Fuertes Kronberg, Carlos.

Entidad Colaboradora: Manos Unidas

RESUMEN DEL PROYECTO

La ausencia de un agua de calidad para el consumo humano afecta a 3 de cada 10 personas y causa muchas enfermedades gastrointestinales. Este problema puede ser resuelto con el tratamiento del agua. En este trabajo se ha creado una base de datos con 23 métodos de tratamiento y se ha desarrollado un modelo de selección que obtiene como resultado el método de tratamiento más adecuado dados unos parámetros de entrada.

Palabras clave: Agua potable, Tratamiento de Agua, Modelo de selección

1. Introducción

La ausencia de un agua de calidad para el consumo humano es un problema que lleva siglos preocupando al ser humano. Tres de cada diez personas carecen de agua potable [1]. El mayor problema no es la falta de agua, sino su contaminación, fruto de las actividades humanas, siendo uno de los mayores problemas la contaminación fecal del agua. Esta es una de las principales causas de las enfermedades diarreicas que producen la muerte de más de 800 niños al día. Este proyecto está relacionado con el Objetivo de Desarrollo Sostenible 6: Agua limpia y saneamiento.

2. Contexto del agua

No hay un único procedimiento para tratar el agua. Cada comunidad dispone de recursos diferentes y los contaminantes varían en función de las actividades. La OMS hace referencia a esta variabilidad en su documento *Guías para la calidad del agua potable* [2], e introduce los Planes de Seguridad del Agua. Los PSA se emplean para evaluar un sistema con el fin de determinar si el abastecimiento de agua cumple con los objetivos de protección de la salud. Incluyen directrices sobre la calidad microbiológica y química del agua, con la concentración de productos químicos y el número de agentes patógenos permitidos. Da pautas comunes para combatir la contaminación del agua.

Hay tres aspectos principales relacionados con la calidad del agua.

- **Aspectos microbiológicos:** la presencia de virus, bacterias y protozoos en el agua puede causar la contaminación de toda una población si el sistema no es seguro. Por eso se da gran importancia a la inocuidad microbiana. De hecho, el control de agentes patógenos en el agua es la mayor prioridad.
- **Aspectos químicos:** la presencia de sustancias químicas no supone un gran riesgo para el ser humano salvo si se trata de exposiciones prolongadas de hasta años. Sin embargo, en el agua se encuentran proporciones muy pequeñas de estas sustancias químicas peligrosas.
- **Aceptabilidad:** está relacionada con el aspecto, el sabor y el olor del agua. Es muy importante tomarse en serio la aceptabilidad ya que el ser humano usa sus sentidos para evaluar la calidad del agua. Si el agua tiene algún color, olor o sabor raro, buscará otras fuentes que a lo mejor no son tan seguras.

3. Métodos de tratamiento

Un proceso de potabilización suele estar comprendido por diversas etapas: pretratamiento, coagulación-floculación, decantación, filtración y desinfección. En el proyecto se han descrito 23 métodos de tratamiento que han compuesto la base de datos del modelo de selección.

Algunos métodos emplean la gravedad como mecanismo de tratamiento, algunos necesitan presión, y otros introducen sustancias químicas. Entre los métodos explicados se encuentran la cloración, los filtros de arena, la coagulación química, el carbón activado, los filtros cerámicos, la ósmosis inversa y los rayos UV.

Para comparar estos métodos de tratamiento se ha tenido en cuenta el volumen de agua tratada o el caudal de salida, la necesidad de electricidad, la dificultad de instalación y de mantenimiento, el precio relativo y la capacidad de remoción de contaminantes microbiológicos y químicos, y de turbidez. La Tab. 1 muestra un fragmento de la tabla comparativa.

TAB. 1 FRAGMENTO DE LA TABLA COMPARATIVA

<i>Método</i>	<i>Caudal (l/día)</i>	<i>Elec.</i>	<i>Instal.</i>	<i>Manten.</i>	<i>Precio relativo</i>	<i>Capac. microb.</i>	<i>Capac. quim.</i>	<i>Turb.</i>
Cloración - Gas de cloro licuado	1000000	1	4	4	4	5	2	1
Cloración - Hipoclorito de calcio	1000000	0	2	4	3	5	2	1
Ozonización	1000000	1	4	4	5	4	3	1
Desinfección por ebullición	30	2	1	1	1	3	1	1
Filtros rápidos por gravedad	8640	0	2	2	1	1	1	5

4. Descripción del modelo

Los métodos de tratamiento componen la base de datos del modelo de selección. El usuario debe introducir una serie de parámetros en la herramienta de selección, y esta da como resultado los métodos de tratamiento aptos para la situación. La herramienta se ha programado con Python, y se ha empleado Streamlit para desarrollar la interfaz del usuario. La herramienta está disponible en este [enlace](#).



FIG. 1 PLANTEAMIENTO DEL MODELO DE SELECCIÓN

Los parámetros de entrada se han dividido en dos grupos y tienen el objetivo de obtener información sobre el perfil del usuario y la calidad del agua disponible.

4.1. Perfil del usuario

En primer lugar, el usuario introduce si dispone de **electricidad** para llevar a cabo el tratamiento del agua. Esta electricidad puede venir de una conexión directa con la red eléctrica, o de generación propia (ej., placas solares). Si el usuario dispone de electricidad, la herramienta de selección mantiene todos los métodos de tratamiento, ya que es posible elegir un método que no necesite electricidad. Si, por el contrario, no se dispone de electricidad, se eliminarán las filas con los métodos sí necesiten electricidad para funcionar.

El segundo parámetro es la disponibilidad de una **red de distribución**. Es decir, si existe un sistema de tuberías para transportar el agua. Algunos métodos se instalan en tuberías, como el uso de lámparas UV, y otros en grifos, como el filtro de carbón activado de grifo o los descalcificadores. Al igual que con el primer parámetro, si se dispone de red de distribución la base de datos no se modificará, mientras que, si no hay una red de distribución, se eliminarán los métodos que la necesiten para funcionar.

Con el tercer parámetro se especifica cuál es el **uso del edificio**: individual o colectivo. Un usuario individual trata el agua en el punto de consumo. Es decir, una vez tratada, el agua no es distribuida a otros edificios, sino que es consumida por la familia, o por el aula del colegio. Un usuario colectivo cuenta con tratamiento central. El agua tratada es consumida por distintos subgrupos, como pueden ser las casas de una aldea.

El último parámetro para definir el perfil del usuario es el **número de consumidores habituales**. Con esta cifra se puede estimar el caudal de agua tratada necesario. Una persona consume de media 2 litros por día [2]. Con el agua que se necesita para limpiar alimentos, cocinar y lavar la ropa, se establece un consumo mínimo de 4 litros por día y por persona, y un consumo máximo de 20 litros por día.

4.2. Calidad del agua

En primer lugar, el usuario debe introducir la **fuentes de agua**. Esta puede ser un pozo, un manantial o río, un acuífero confinado o pozo profundo, un lago o embalse, el mar o la lluvia. En cada una de estas fuentes se ha dado un valor de 0 a 5 a la presencia de contaminantes microbiológicos y químicos, y de turbidez, donde 5 es la máxima. Esta presencia está directamente relacionada con la necesidad de tratamiento del agua.

En segundo lugar, el **uso de los suelos** próximos da información sobre la posible presencia de contaminantes (ej., pesticidas). Los usos que se han tenido en cuenta son industria, ganadería, agricultura, minería, pozos de gas o petróleo, gasolineras, casas con pozo séptico y deshielo de carreteras. También se evalúa de 0 a 5 la presencia de contaminantes.

En tercer lugar, se describen unos casos de **color y sabor** del agua de los cuales se conocen las causas: manchas de color café con sabor metálico, manchas negras, una película blanca y necesidad de mayor uso de jabón, sabor salado, y manchas azules y verdosas con sabor metálico. También se evalúa de 0 a 5 la presencia de contaminantes.

Por último, se introduce el **pH** del agua si está disponible. El pH del agua debe estar entre 6,5 y 8 para ser considerada aceptable. Agua con pH inferior a 6,5 es ácida e indica la

presencia de contaminantes químicos. Con un pH mayor de 8 se incrementará la dureza del agua por la cal.

En cada parámetro se da valor a la necesidad de tratamiento de contaminantes microbiológicos, contaminantes químicos y turbidez. La necesidad total de tratamiento de contaminantes microbiológicos será el valor máximo de los distintos parámetros de entrada por ser el más restrictivo. Lo mismo ocurre con los contaminantes químicos y con la turbidez.

La Tab. 2 muestra la lógica que sigue el modelo para filtrar la base de datos.

TAB. 2 CONDICIONES DEL MODELO

Input	Elec.	Red distr.	Uso edificio	Caudal	Presen. microb.	Presen. quím.	Turbidez
	=	=	=	<=	<=	<=	<=
Mét[i]	Elec.	Red distr.	Uso edificio	Caudal	Capac. microb.	Calidad quím.	Turbidez

5. Resultados

Una vez que el usuario responde a las preguntas, el modelo convierte las respuestas y filtra la base de datos como se ha explicado. Se obtienen los métodos de tratamiento que pueden ser usados en esa circunstancia. El usuario podrá ordenar los métodos según la dificultad de instalación o mantenimiento, y el precio relativo.

Métodos de tratamiento recomendados:

El modelo recibe como entrada los siguientes valores:

- Disponibilidad de electricidad: Si
- Disponibilidad de red de distribución: Si
- Uso del edificio: Individual
- Caudal: 150 L/día
- Fuente de agua: Pozos
- Uso de los suelos: Industria
- Color y sabor del agua: Ninguno
- pH del agua: Neutro

Contaminantes en el agua:

- Presencia microbiológica: 3
- Presencia química: 2
- Turbidez: 2

En ocasiones, es común instalar más de una máquina para llevar a cabo el tratamiento. Especialmente si el caudal es elevado.

Modifique el número de máquinas que puede instalar:

1 6 20

Cadual por máquina: 25.00 L/día

Dados los parámetros de entrada introducidos por el usuario, los modelos de selección que permitirán obtener un agua potable de calidad son:

	Metodo	Caudal	Electricidad	Uso de red	Uso del edificio	Capacidad microbiologica	Capacidad quimica	Turbidez
8	Filtros lentos de arena	28.80	0	2	2	4	2	3
16	Filtros ceramicos - Olla	72.00	0	0	0	3	2	4
17	Filtros ceramicos - Vela	28.80	0	0	0	3	2	4
19	Filtracion por destilacion	46.00	1	0	0	4	4	4
24	Filtros de sedimentos	39600.00	0	2	0	3	2	4

FIG. 2 INTERFAZ DEL USUARIO

El funcionamiento del modelo se ha puesto en práctica usando un proyecto proporcionado por Manos Unidas [3]. Se trata de la construcción de una planta de tratamiento de agua en Gode, Etiopía. La fuente de agua es el río Shebelle y el objetivo es abastecer a unas 20.000 personas. El modelo de selección propone los siguientes métodos de tratamiento dados los parámetros de entrada:

- Coagulación química
- Filtración rápida de arena (3 depósitos)

En el proyecto emplearon dos depósitos de filtración con arena, uno de los métodos propuestos por el modelo. La diferencia es que el modelo propone tres filtros para hacer frente a la demanda de agua.

6. Conclusiones

El principal objetivo de este trabajo era responder a la necesidad de Manos Unidas de crear un documento con distintos métodos de tratamiento, y determinar qué parámetros son necesarios para decidir cuándo un método de tratamiento es útil y cuándo debe cambiarse.

Para responder a esta necesidad, se ha creado una recopilación de distintos métodos de tratamiento que forman la base de datos de un modelo de selección. Los parámetros de entrada de dicho modelo han sido seleccionados después de un cuidadoso estudio de los métodos de tratamiento, y se han empleado para filtrar la base de datos. Como resultado se obtienen los métodos de tratamiento aplicables a la circunstancia descrita.

Con este proyecto se han logrado los objetivos planteados en el Resumen del Proyecto. Se han recopilado los sistemas de tratamiento de agua disponibles, se han decidido características para describir estos métodos, se ha creado un modelo de selección del sistema más adecuado, y se ha comprobado el funcionamiento del modelo con un ejemplo real.

7. Referencias

- [1] **Naciones Unidas. 2015.** Agua limpia y saneamiento: por qué es importante. *UN*. [En línea] 2015. https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/wp-content/uploads/sites/3/2016/10/6_Spanish_Why_it_Matters.pdf.
- [2] **Ginebra: Organización Mundial de la Salud. 2018.** *Guías para la calidad del agua de consumo humano*. [En línea] 2018.
- [3] **Blanco, Emilio, Santías, Isabel y Soriano, Miguel. 2020.** *Agua para Gode, Etiopía: Proyecto de planta de tratamiento de agua del río Shebelle y aplicación del KIT de calidad del agua*. 2020.

DRINKING WATER TREATMENT SYSTEMS ANALYSIS AND SELECTION MODEL

Author: Jarabo Sastre, Teresa.

Supervisor: Fuertes Kronberg, Carlos.

Collaborating Entity: Manos Unidas

ABSTRACT

The absence of high-quality drinking water affects 3 out of 10 people and causes many gastrointestinal diseases. This problem can be solved by treating the water. In this project, a database of 23 water treatment methods has been created, and a selection model has been developed to obtain the most appropriate treatment method, given some input parameters.

Keywords: Drinkable water, Water treatment, Selection model

1. Introduction

The absence of high-quality drinking water is a problem that has been present for centuries. Three out of ten people do not have access to drinking water [1]. The biggest issue is the water contamination due to human activities, rather than the lack of it. The main source of contamination is the human and animal feces. This is one of the main causes of diarrheal diseases, causing the death of more than 800 children per day. This project is related to the Sustainable Development Goal 6: Clean water and sanitation.

2. Water Context

There is no single procedure for treating water. Each community has access to different resources, and the contaminants vary depending on the activities. The WHO addresses this variability in its document *Guidelines for Drinking-water Quality* [2] and introduces the Water Safety Plans. The WSPs are used to evaluate whether a water system complies with the health-based targets. They include guidelines on the microbiological and chemical quality of the water, with the concentrations of chemicals and pathogens allowed. It provides basic standards to combat water contamination.

There are three key aspects related to the quality of water.

- **Microbial aspects:** waterborne viruses, bacteria and protozoa can cause the contamination of an entire population if the distribution system is not well designed. This is why great importance is placed on microbial safety. In fact, the control of pathogens in water has the highest priority.
- **Chemical aspects:** the presence of chemical substances does not pose a great risk to humans, except in the case of long exposures (up to years). However, very small proportions of these hazardous chemicals are found in water.
- **Acceptability aspects:** they are related to the appearance, taste and odor of water. It is very important to take the water acceptability seriously since humans use their senses to evaluate water quality. If the water has a strange color, odor, or taste, they will look for an alternative water source that might not be as safe.

3. Treatment Methods

A drinking-water treatment process usually consists of several stages: a pretreatment, coagulation-flocculation, decantation, filtration, and disinfection. In this project, 23 treatment methods have been defined, and they have been used as the database for a selection model.

Certain methods take advantage of gravity, some require pressure, and others add chemical substances. Some of the treatment methods are chlorination, sand filtration, chemical coagulation, activated carbon absorption, ceramic filtration, reverse osmosis, and UV radiation.

To compare these treatment methods the following parameters have been considered: the volume of water treated or the output flow, the need for electricity, the difficulty of installation and maintenance, the relative price, and the capacity to remove microbiological and chemical contaminants and turbidity. Table 3 shows a fragment of the comparative table.

TAB. 3 FRAGMENT OF THE COMPARATIVE TABLE

<i>Treatment method</i>	<i>Flow rate (l/day)</i>	<i>Elec.</i>	<i>Instal.</i>	<i>Mainten.</i>	<i>Relative price</i>	<i>Microb. Cap.</i>	<i>Chem. Cap.</i>	<i>Turb.</i>
Chlorination - Liquid chlorine gas	1000000	1	4	4	4	5	2	1
Chlorination - Calcium hypochlorite	1000000	0	2	4	3	5	2	1
Ozonation	1000000	1	4	4	5	4	3	1
Boiling disinfection	30	2	1	1	1	3	1	1
Rapid gravity filters	8640	0	2	2	1	1	1	5

4. Model Description

The treatment methods make up the database of the selection model. The user must give value to several input parameters, and the selection tool outputs the treatment methods that are suitable for the situation. The tool has been programmed with Python and Streamlit has been used to develop the user interface. The tool can be accessed using this [link](#).



FIG. 3 SELECTION MODEL APPROACH

The input parameters have been divided into two groups and have the goal of obtaining information on the user profile and the quality of the available water.

4.1. User profile

First, the user enters whether **electricity** is available to carry out the water treatment. This electricity may come from a direct connection to the grid, or from self-generated electricity (e.g., solar panels). If the user has electricity, the selection tool maintains all treatment methods in the database, since it is possible to choose a method that does not require electricity. If, on the other hand, electricity is not available, the rows with the methods that do need electricity to operate will be deleted.

The second parameter is the availability of a **distribution network**. That is, whether there is a piping system to transport the water. Some methods are installed in pipes, such as UV lamps, and others in taps, such as the activated carbon tap filter and water softeners. As with the first parameter, if a distribution network is available, the database will not be modified, while if there is no distribution network, the methods that need it to function will be eliminated.

The third parameter specifies the **use of the building**: individual or collective. An individual user treats the water at the point of consumption. That is, once treated, the water is not distributed to other buildings, but is consumed by the family, or by the school classroom. A collective user has central treatment. The treated water is consumed by different subgroups, such as houses in a village.

The last parameter to define the user profile is the **number of regular consumers**. If the number of users is known, the required treated water flow can be estimated. A person consumes on average 2 liters per day [2]. With the water needed for cleaning food, cooking and washing clothes, a minimum consumption of 4 liters per day per person and a maximum consumption of 20 liters per day was established.

4.2. Water quality

First, the user must enter the **water source**. This can be a well, a spring or river, a confined aquifer or deep well, a lake or reservoir, the sea, or rainfall. For each of these sources, a value from 0 to 5 was given to account for the presence of microbiological and chemical contaminants and turbidity, where 5 is the maximum. This presence is directly related to the need for water treatment.

Secondly, the **use of nearby soils** provides information on the possible presence of contaminants (e.g., pesticides). The uses considered are industry, cattle breeding, agriculture, mining, gas or oil wells, gas stations, houses with septic tanks and road de-icing. The presence of contaminants is also evaluated from 0 to 5.

Thirdly, some cases of the **water's color and taste** are described for which the causes are known: brown stains with metallic taste, black stains, a white film and need for more soap, salty taste, and blue and greenish stains with metallic taste. The presence of contaminants is also evaluated from 0 to 5.

Finally, the **pH** of the water is entered if available. The pH of the water must be between 6.5 and 8 to be considered acceptable. Water with a pH below 6.5 is acidic and indicates the presence of chemical contaminants. A pH greater than 8 will increase the hardness of the water due to lime scale.

For each parameter, a value is given for the need for treatment of microbiological contaminants, chemical contaminants, and turbidity. The total need for treatment of microbiological contaminants will be the maximum value of the different input parameters because it is the most restrictive. The same is true for chemical contaminants and turbidity.

Table 4 shows the logic that the model follows to filter the database.

TAB. 4 MODEL CONDITIONS

Input	Elec.	Distr. netw.	Use of building	Flow	Microb. presen.	Chem. presen.	Turbidity
	=	=	=	< =	< =	< =	< =
Met[i]	Elec.	Distr. netw.	Use of building	Flow	Microb. cap.	Chem. cap.	Turbidity

5. Results

Once the user answers the questions, the model converts the answers and filters the database as explained. The treatment methods that can be used in that circumstance are obtained. The user will be able to sort the methods according to difficulty of installation or maintenance, and relative price.

Métodos de tratamiento recomendados:

El modelo recibe como entrada los siguientes valores:

- Disponibilidad de electricidad: Si
- Disponibilidad de red de distribución: Si
- Uso del edificio: Individual
- Caudal: 150 L/día
- Fuente de agua: Pozos
- Uso de los suelos: Industria
- Color y sabor del agua: Ninguno
- pH del agua: Neutro
- Contaminantes en el agua:
 - Presencia microbiológica: 3
 - Presencia química: 2
 - Turbidez: 2

En ocasiones, es común instalar más de una máquina para llevar a cabo el tratamiento. Especialmente si el caudal es elevado.

Modifique el número de máquinas que puede instalar:



Caudal por máquina: 25.00 L/día

Dados los parámetros de entrada introducidos por el usuario, los modelos de selección que permitirán obtener un agua potable de calidad son:

	Metodo	Caudal	Electricidad	Uso de red	Uso del edificio	Capacidad microbiologica	Capacidad quimica	Turbidez
8	Filtros lentos de arena	28.80	0	2	2	4	2	3
16	Filtros ceramicos - Olla	72.00	0	0	0	3	2	4
17	Filtros ceramicos - Vela	28.80	0	0	0	3	2	4
19	Filtracion por destilacion	46.00	1	0	0	4	4	4
24	Filtros de sedimentos	39600.00	0	2	0	3	2	4

FIG. 4 USER INTERFACE

The performance of the model has been implemented using a project provided by Manos Unidas [3]. It consists of the construction of a water treatment plant in Gode, Ethiopia. The

water source is the Shebelle River, and the objective is to supply about 20,000 people. The selection model proposes the following treatment methods given the input parameters:

- Chemical coagulation
- Rapid sand filters

The project used two sand filtration tanks, one of the methods proposed by the model. The only difference is that the model proposes three filters to cope with the water demand.

6. Conclusions

The main objective of this work was to respond to Manos Unidas' need to create a document with different treatment methods, and to determine what parameters are necessary to decide when a treatment method is useful and when it should be changed.

To respond to this need, a collection of different treatment methods has been created to form the database of a selection model. The input parameters of such a model have been selected after a careful study of the treatment methods and have been used to filter the database. As a result, the treatment methods applicable to the described circumstance are obtained.

This project has achieved the objectives stated in the Project Summary. The available water treatment systems have been compiled, the characteristics to describe these methods have been decided, a model for selecting the most suitable system has been created, and the model has been tested with a real example.

7. References

- [1] Naciones Unidas. 2015. Agua limpia y saneamiento: por qué es importante. UN. [En línea] 2015. https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/wp-content/uploads/sites/3/2016/10/6_Spanish_Why_it_Matters.pdf.
- [2] Ginebra: Organización Mundial de la Salud. 2018. Guías para la calidad del agua de consumo humano. [En línea] 2018.
- [3] Blanco, Emilio, Santías, Isabel y Soriano, Miguel. 2020. Agua para Gode, Etiopía: Proyecto de planta de tratamiento de agua del río Shebelle y aplicación del KIT de calidad del agua. 2020.

Índice de la Memoria

1	<i>Introducción</i>	8
1.1	Manos Unidas.....	8
1.2	Motivación del Proyecto	9
1.3	Objetivos de Desarrollo Sostenible	9
2	<i>Contexto del Agua</i>	12
2.1	Gestión del Agua: Funciones y Responsabilidades	13
2.2	Planes de Seguridad del Agua (PSA)	15
2.2.1	<i>Evaluación y diseño del sistema</i>	15
2.2.2	<i>Monitoreo operacional</i>	19
2.2.3	<i>Planes de gestión, documentación y comunicación</i>	20
2.3	Verificación de la Calidad del Agua	21
2.3.1	<i>Calidad microbiológica del agua</i>	21
2.3.2	<i>Calidad química del agua</i>	21
2.4	Vigilancia	22
2.5	Identificación de los Aspectos de Interés Prioritarios	25
2.6	Creación de Normas de Calidad del Agua	26
2.7	La Calidad del Agua en Edificios.....	26
3	<i>Aspectos Microbiológicos</i>	27
3.1	Peligros Microbiológicos Relacionados con el Agua.....	27
3.1.1	<i>Transmisión de infecciones por el agua</i>	27
3.1.2	<i>Agentes patógenos de referencia</i>	28
3.2	Tratamiento de Contaminantes Microbiológicos	29
3.2.1	<i>Tratamiento central</i>	29
3.2.2	<i>Tratamiento domiciliario</i>	30
3.3	Monitoreo Microbiológico	32
4	<i>Aspectos Químicos</i>	33
4.1	Peligros Químicos en el Agua de Consumo Humano	33
4.2	Tratamiento de Contaminantes Químicos	34
4.2.1	<i>Eficacia del tratamiento de contaminantes químicos</i>	34
4.2.2	<i>Control de los subproductos de desinfección</i>	34
4.3	Valores de Referencia de Distintos Contaminantes Químicos	35
5	<i>Aspectos Radiológicos</i>	39
6	<i>Aspectos Relacionados con la Aceptabilidad</i>	40

7	<i>Sistemas de Tratamiento</i>	42
7.1	Cloración	43
7.2	Ozonización.....	44
7.3	Desinfección por Ebullición	45
7.4	Otros Métodos de Desinfección	46
7.5	Filtros Rápidos por Gravedad.....	47
7.6	Filtros Gruesos	48
7.7	Filtros a Presión.....	48
7.8	Filtros Lentos de Arena	49
7.9	Filtros Rápidos de Arena.....	50
7.10	Tanque de Almacenamiento	51
7.11	Filtración de Ribera.....	53
7.12	Aireación	54
7.13	Coagulación Química.....	55
7.14	Adsorción con Carbón Activado	56
7.15	Filtros Cerámicos	57
7.16	Filtros de Cal o Descalcificadores	59
7.17	Filtración por Destilación.....	60
7.18	Filtros de Membranas.....	61
7.19	Filtración por Ósmosis Inversa.....	61
7.20	Tratamiento con Rayos UV	63
7.21	Método SODIS	64
7.22	Filtros de Sedimentos	65
7.23	Filtración con Fibras y Telas	66
7.24	Almacenamiento y Decantación.....	68
8	<i>Tabla Comparativa</i>	69
8.1	Parámetros	69
8.1.1	<i>Caudal de agua</i>	69
8.1.2	<i>Electricidad</i>	69
8.1.3	<i>Dificultad de instalación</i>	69
8.1.4	<i>Dificultad de mantenimiento</i>	70
8.1.5	<i>Precio relativo</i>	70
8.1.6	<i>Capacidad de remoción de contaminantes microbiológicos</i>	70
8.1.7	<i>Capacidad de remoción de contaminantes químicos</i>	70
8.1.8	<i>Capacidad de remoción de turbidez</i>	70
8.2	Tabla Comparativa de los Sistemas de Tratamiento	71

9	<i>Modelo de Selección</i>	73
9.1	Razonamiento detrás del Modelo de Selección.....	73
9.2	Hipótesis Iniciales	73
9.3	Parámetros de Entrada.....	74
9.3.1	<i>Perfil del usuario</i>	74
9.3.2	<i>Calidad del agua</i>	77
9.4	Funcionamiento del Modelo.....	80
9.4.1	<i>Perfil del usuario</i>	80
9.4.2	<i>Calidad del agua</i>	81
9.4.3	<i>Pretratamiento y Desinfección</i>	84
9.4.4	<i>Base de Datos</i>	85
9.5	Código	89
9.6	Interfaz con el Usuario	90
10	<i>Ejemplos</i>	93
10.1	Escenarios.....	93
10.2	Caso Real. Proyecto de Manos Unidas en Gode, Etiopía.....	94
11	<i>Conclusiones</i>	95
12	<i>Anexos</i> 98	
A.	Valores de Referencia de los Contaminantes Químicos.....	98
B.	Casos de Contaminación del Agua.....	106
C.	Kits para Analizar Agua Potable	107
D.	Código de Python	110
13	<i>Bibliografía</i>	117

Índice de figuras

Figura 1 Metodología de la realización de proyectos.....	8
Figura 2 Objetivos de Desarrollo Sostenible.....	10
Figura 3 Reducción del riesgo de la diarrea relacionado con la mejora de la infraestructura del agua.....	11
Figura 4 Gestión del agua.....	13
Figura 5 Áreas de los PSA.....	15
Figura 6 Factores que afectan la calidad del agua.....	16
Figura 7 Método más eficaz contra agentes patógenos.....	18
Figura 8 Partes del sistema de abastecimiento de agua.....	22
Figura 9 Vías de contagio con sus respectivos agentes patógenos.....	27
Figura 10 Organismo patógeno de referencia.....	28
Figura 11 Adsorción.....	31
Figura 12 Ejemplos de respuesta ante el exceso de SPD.....	35
Figura 13 pH del agua.....	40
Figura 14 Fases de la potabilización del agua.....	42
Figura 15 Esquema de obtención del ozono.....	44
Figura 16 Esquemas de la instalación de ozonización.....	44
Figura 17 Esquema de un filtro rápido por gravedad y filtro.....	47
Figura 18 Esquema de un filtro grueso.....	48
Figura 19 Esquema del filtro a presión.....	49
Figura 20 Filtro rápido de arena.....	51
Figura 21 Tanque de almacenamiento.....	52
Figura 22 Esquema de la filtración por ribera.....	53
Figura 23 Sistema de aireación.....	54
Figura 24 Esquema del proceso de la coagulación química.....	55
Figura 25 Filtro de carbón activado.....	56
Figura 26 Filtro de flujo ascendente de carbón activado.....	57
Figura 27 Tipos de filtros cerámicos.....	58
Figura 28 Filtros cerámicos de tipo vela.....	58
Figura 29 Filtro de cal.....	60
Figura 30 Funcionamiento de la ósmosis inversa.....	62
Figura 31 Método SODIS.....	64
Figura 32 Filtros de sedimentos.....	66
Figura 33 Filtro de tela.....	67
Figura 34 Procedimiento del almacenamiento y la decantación.....	68
Figura 35 Diagrama de dificultad de instalación del sistema.....	69
Figura 36 diagrama de dificultad de mantenimiento del sistema.....	70
Figura 37 Diagrama del precio relativo del sistema.....	70
Figura 38 Diagrama del modelo de selección.....	73
Figura 39 Parámetros de entrada del modelo de selección.....	74
Figura 40 Esquema de distribución de agua.....	75
Figura 41 Uso del edificio.....	76
Figura 42 Diagrama de flujo de la filtración de métodos según el perfil del usuario.....	80

Figura 43 Etapa de pretratamiento en el modelo de selección	84
Figura 44 Etapa de desinfección en el modelo de selección	84
Figura 45 Esquema del código	89
Figura 46 Base de datos en la interfaz del usuario	90
Figura 47 Selección de parámetros de la interfaz del usuario (I)	90
Figura 48 Selección de parámetros de la interfaz del usuario (II).....	91
Figura 49 Métodos recomendados en la interfaz del usuario	91
Figura 50 Resumen de los resultados en la interfaz del usuario.....	92
Figura 51 Comprobación del funcionamiento del modelo	94
Figura 52 Kit para analizar el agua potable	107

Índice de tablas

Tabla 1 Objetivos de Desarrollo Sostenible estudiados	10
Tabla 2 Medidas de control en el monitoreo operacional	19
Tabla 3 Medidas de control en el monitoreo operacional	20
Tabla 4 Nivel de servicio de una fuente de agua	23
Tabla 5 Fuentes mejoradas y no mejoradas	24
Tabla 6 Calidad del agua cruda y morbilidad	28
Tabla 7 Métodos de tratamiento en las distintas etapas del sistema de agua	29
Tabla 8 Tratamiento domiciliario de contaminantes microbiológicos	30
Tabla 9 Fuentes de los componentes químicos	33
Tabla 10 Métodos de tratamiento de contaminantes químicos	34
Tabla 11 Valores de referencia de las sustancias químicas	36
Tabla 12 Tratamientos del agua para reducir los radionúclidos	39
Tabla 13 Contaminantes del agua en cuanto a su aspecto	40
Tabla 14 Procesos de tratamiento del aspecto	41
Tabla 15 Técnicas de cloración	43
Tabla 16 Ventajas y desventajas de la cloración	44
Tabla 17 Ventajas y desventajas de la ozonización	45
Tabla 18 Ventajas y desventajas de la ebullición	45
Tabla 19 Ventajas y desventajas de los filtros rápidos por gravedad	47
Tabla 20 Ventajas y desventajas de los filtros gruesos	48
Tabla 21 Ventajas y desventajas de los filtros a presión	49
Tabla 22 Ventajas y desventajas de los filtros lentos de arena	50
Tabla 23 Ventajas y desventajas de los filtros rápidos de arena	51
Tabla 24 Ventajas y desventajas de los tanques de almacenamiento	52
Tabla 25 Ventajas y desventajas de los filtros a presión	53
Tabla 26 Ventajas y desventajas de la aireación	54
Tabla 27 Dosis típicas de los coagulantes	55
Tabla 28 Ventajas y desventajas de la coagulación química	56
Tabla 29 Ventajas y desventajas del carbón activado	57
Tabla 30 Ventajas y desventajas de los filtros cerámicos	59
Tabla 31 Ventajas y desventajas de los descalcificadores	60
Tabla 32 Ventajas y desventajas de la destilación	60
Tabla 33 Ventajas y desventajas de los filtros de membrana	61
Tabla 34 Ventajas y desventajas de la ósmosis inversa	63
Tabla 35 Ventajas y desventajas de los rayos UV	64
Tabla 36 Ventajas y desventajas del método SODIS	65
Tabla 37 Ventajas y desventajas de los filtros de sedimentos	66
Tabla 38 Ventajas y desventajas de los filtros de fibras y telas	67
Tabla 39 Ventajas y desventajas del almacenamiento y la decantación	68
Tabla 40 Comparativa de los sistemas de tratamiento	71
Tabla 41 Variable electricidad	74
Tabla 42 Variable disponibilidad de una red de tuberías	75
Tabla 43 Uso del edificio	76

Tabla 44 Tipo de edificio.....	76
Tabla 45 Relación entre tipo de edificio y uso	77
Tabla 46 Fuentes de agua	78
Tabla 47 Usos del suelo y posibles contaminantes.....	78
Tabla 48 Causas del color y sabor del agua.....	79
Tabla 49 Contaminantes en el agua según la fuente de agua	81
Tabla 50 Contaminantes en el agua según el uso de los suelos.....	82
Tabla 51 Contaminantes en el agua según el color y sabor.....	82
Tabla 52 Contaminantes en el agua según el pH.....	82
Tabla 53 Ejemplo de la determinación de la calidad del agua	83
Tabla 54 Resumen de las condiciones del modelo de selección	83
Tabla 55 Significado de los valores en la base de datos.....	85
Tabla 56 Caudal máximo de los métodos que usan recipiente.....	86
Tabla 57 Base de datos del modelo de selección	87
Tabla 58 Parámetros de entrada del proyecto de Gode, Etiopía.....	94
Tabla 59 Objetivos del proyecto.....	95
Tabla 60 Sustancias químicas excluidas de la derivación de valor de referencia	98
Tabla 61 Sustancias químicas sin valor de referencia	99
Tabla 62 Valores de referencia de las sustancias químicas	102

1 Introducción

Una de las principales preocupaciones a nivel mundial es garantizar el acceso a agua potable a toda la población. Aunque se ha avanzado considerablemente en esta área, millones de personas tienen dificultades para acceder a uno de los recursos más elementales. Unos 1.800 millones de personas tienen acceso a una fuente de agua que está contaminada, el 40% de la población mundial sufre la escasez de agua y más del 80% de las aguas residuales son vertidas en los ríos o en el mar sin ser tratadas (Naciones Unidas, 2015). En muchas ocasiones, el problema no es la disponibilidad de agua sino su calidad, siendo necesario construir un sistema de filtrado o de tratamiento de agua.

La OMS estima que una persona adulta consume de base unos 2 litros de agua por día. Si se tienen en cuenta las necesidades de higiene personal, del lavado de ropa y la preparación de alimentos, la OMS calcula que cada persona necesita 7,5 litros diariamente.

1.1 Manos Unidas

Este trabajo de fin de Máster se realiza en colaboración con Manos Unidas y la Fundación de Ingenieros de ICAI. Manos Unidas está en 58 países del Sur, con el objetivo de apoyar a estos pueblos y de sensibilizar a la población española de sus necesidades. Manos Unidas ayuda en diversos sectores, y una de sus mayores preocupaciones es garantizar el acceso a agua para consumo humano, especialmente en el tercer mundo.

¿Cómo realizan sus proyectos? Una comunidad de los países con los que trabaja contacta con ellos para resolver una necesidad. En este caso, instalar un sistema de tratamiento de agua. Como en todo proyecto de ingeniería, es importante entender adecuadamente las necesidades de la comunidad para proponer un sistema que solucione correctamente sus problemas. Manos Unidas decide qué sistema de tratamiento es el idóneo para la situación concreta y se lo comunica a la comunidad. La organización financia el proyecto y actúa como consultora, pero son socios locales los que se encargan de la construcción y gestión del sistema. Esto último es muy importante para que la comunidad adopte el proyecto como propio y no como una idea impuesta por un grupo externo.



FIGURA 1 METODOLOGÍA DE LA REALIZACIÓN DE PROYECTOS

Dado el carácter urgente de sus proyectos, con este Trabajo de Fin de Máster se quiere agilizar el proceso de selección de sistema de tratamiento. Para ello, se va a realizar un análisis comprehensivo de los sistemas existentes, caracterizando los métodos y creando un modelo de selección basado en distintos parámetros de entrada.

En resumen, Manos Unidas quiere conocer los sistemas de tratamiento de agua disponibles y cuándo se pueden usar estos métodos. Es decir, qué parámetro hace que un método no se pueda usar más, como el caudal de entrada o el número de personas que puede abastecer.

1.2 Motivación del Proyecto

Como se ha explicado, el acceso a agua potable no es siempre posible, y esto requiere una solución fácil, rápida y económica. Naciones Unidas explica en su objetivo número 6, Agua limpia y saneamiento, que 3 de cada 10 personas carecen de servicios de agua potable seguros (ODS 6, 2015). Esto se debe en parte a que más del 80% de las aguas residuales resultantes de actividades humanas se vierten en los ríos o el mar sin ningún tratamiento, provocando su contaminación (ODS 6, 2015). De ahí que el principal problema no sea la falta de agua, sino la mala calidad de esta.

Una buena solución a este problema es la instalación de sistemas de tratamiento de agua. Para agilizar este proceso, es interesante tener claro cuál es el mejor sistema en cada situación, ya que las comunidades tienen acceso a fuentes de agua con distintas características (contaminantes químicos, sedimentos, etc.) y tienen unas necesidades diferentes. En cada proyecto se puede dar valor a una serie de parámetros de entrada y, a partir de estos parámetros, elegir el mejor sistema. En este trabajo se va a crear una base de datos con los distintos sistemas de tratamiento de agua. A continuación, se van a caracterizar dichos sistemas y se va a desarrollar una regla de decisión o un modelo de selección que obtenga de manera automática el más idóneo. Por último, se va a evaluar el funcionamiento de este modelo con un proyecto real, proporcionado por Manos Unidas.

Al final del proyecto se entregará a Manos Unidas un documento con los sistemas de tratamiento disponibles con sus características básicas, así como una herramienta capaz de proponer qué sistema de tratamiento hay que instalar dados unos parámetros de entrada. Si esto se realiza correctamente, se habrá conseguido facilitar la selección de sistema de tratamiento, haciendo más asequible la obtención de agua potable.

1.3 Objetivos de Desarrollo Sostenible

El acceso a agua apta para consumo humano es un problema que se quiere solucionar cuanto antes y que puede ser resuelto con la colaboración de todos. Más aún, el 40 % de la población mundial padece la escasez del agua y esto tiene repercusiones directas en la salud de los individuos.



FIGURA 2 OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE

En la agenda para 2030 de Naciones Unidas pueden resaltarse los siguientes objetivos que son tratados en este proyecto (UN, 2015):

TABLA 1 OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE ESTUDIADOS

<i>Dimensión ODS</i>	<i>ODS identificado</i>	<i>Rol</i>	<i>Objetivo</i>
Biosfera	ODS 6: Agua limpia y saneamiento	Primario	Garantizar la disponibilidad de agua y su gestión sostenible y el saneamiento para todos
Sociedad	ODS 3: Salud y bienestar	Secundario	Garantizar una vida sana y promover el bienestar para todos en todas las edades
Economía	ODS 9: Industria, innovación e infraestructura	Secundario	Construir infraestructuras resilientes, promover la industrialización sostenible y fomentar la innovación

Objetivo 6: Agua limpia y saneamiento

Millones de personas siguen sin acceso a agua potable y otros servicios básicos. Dentro de este objetivo se especifican una serie de metas a cumplir antes del 2030: (6.1) lograr el acceso universal y equitativo al agua potable a un coste asequible, (6.4) aumentar el uso eficiente de los recursos hídricos en todos los sectores, (6.a) ampliar la cooperación internacional y el apoyo a los países en desarrollo para la creación de capacidad en actividades y programas relativos al agua, y (6.b) apoyar y fortalecer la participación de las comunidades locales en la mejora de la gestión del agua y el saneamiento.

Objetivo 3: Salud y bienestar

Este objetivo busca promover una vida sana y el bienestar. El agua tiene un papel muy importante en la salud. Las enfermedades relacionadas con el agua y el saneamiento son una de las causas de muerte más comunes en menores de 5 años. Más de 800 niños fallecen cada día por estas enfermedades (Naciones Unidas, 2015). La gestión sostenible y el tratamiento del agua tiene efectos positivos en las comunidades.

Objetivo 9: Industria, innovación e infraestructura

Este objetivo promueve la industrialización sostenible, la innovación y la infraestructura, que tienen un papel clave en la introducción de tecnologías y el reparto de los recursos. En los países menos desarrollados se necesita una mayor inversión para alcanzar estos objetivos. En concreto, es interesante tener este ODS en mente a la hora de seleccionar el sistema de tratamiento de agua, ya que no todos los países tienen acceso a las mismas tecnologías.

La gestión adecuada de los recursos hídricos tiene como consecuencia inmediata un aumento de la calidad de vida de los individuos. Algunos plantean que el coste de corregir este problema es muy elevado y, por tanto, que no es rentable. Sin embargo, las organizaciones la OMS, UNICEF y el Grupo Banco Mundial realizaron una comparativa entre los escenarios “resolver” o “no resolver” el problema y llegaron a la conclusión de que la primera opción es más rentable.

- Resolver la problemática del agua:

Se estima que el coste de la instalación de servicios básicos de agua y saneamiento en comunidades necesitadas es de 28.400 millones de dólares al año entre 2015 y 2030 (Naciones Unidas, 2015).

- No resolver la problemática:

Por otro lado, se pueden asociar costes a la escasez de agua potable y los servicios básicos. El número de muertes por enfermedades diarreicas supera los 2 millones de personas al año. El 90% de las mismas ocurren por una mala gestión del agua, siendo los niños los más afectados. En el estudio se estima que el impacto económico corresponde con el 4,3% del producto interior bruto de África Subsahariana, y que el PIB de India se ve reducido en un 6,4% por la falta de infraestructuras (Naciones Unidas, 2015).

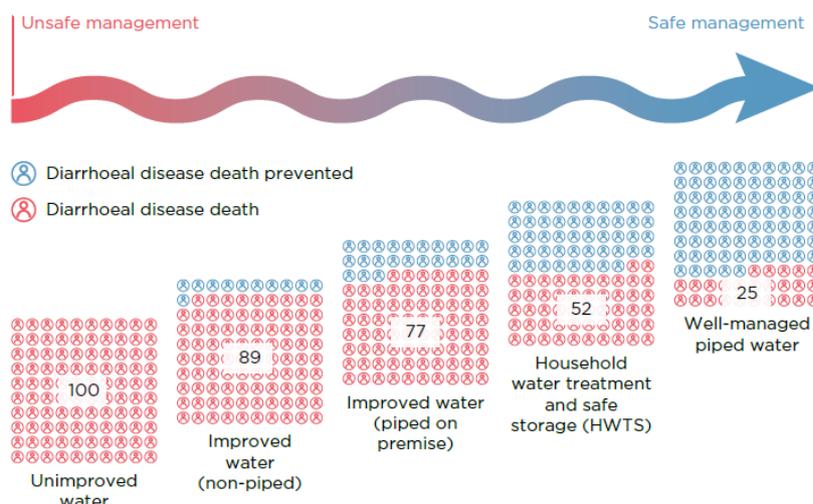


FIGURA 3 REDUCCIÓN DEL RIESGO DE LA DIARREA RELACIONADO CON LA MEJORA DE LA INFRAESTRUCTURA DEL AGUA

2 Contexto del Agua

En este apartado se explica el sistema de abastecimiento de agua, así como algunos aspectos básicos relacionados con la calidad del agua y su gestión.

El acceso a agua de consumo segura es un derecho básico del ser humano. Se dice que el agua es segura cuando puede ser consumida a lo largo de toda la vida sin generar un riesgo significativo para la salud. Aunque no se establece una norma a nivel mundial, ya que cada región tiene características diferentes, existen algunas guías que tienen como objetivo explicar cómo se mide la calidad del agua, así como la manera de garantizarla.

De esta manera, la *Guía para la calidad del agua potable* de la OMS (Ginebra: Organización Mundial de la Salud, 2018) recoge los principios fundamentales que hay que incluir en los reglamentos locales, y cuáles son las mejores prácticas para cuidar el abastecimiento del agua. Los planes de seguridad del agua (PSA) evalúan si el sistema es capaz de suministrar agua que cumpla con las metas de calidad mediante planes de evaluación y monitoreo del sistema.

El agua potable es necesaria para vivir, y es bueno tener acceso a agua de calidad para reducir la pobreza y para controlar la propagación de enfermedades. A pesar de que construir un sistema de tratamiento de agua conlleva una gran inversión, una mejoría en la calidad del agua tiene un impacto directo sobre la salud de los consumidores, ya que el agua puede infectar a comunidades enteras por la transmisión de enfermedades. La inversión es normalmente rentable al disminuir los gastos sanitarios relacionados con el tratamiento de enfermedades diarreicas.

De cara a asegurar la calidad del agua hay que tener en cuenta cuatro aspectos: microbiológicos, químicos, radiológicos y de aceptabilidad.

Para garantizar la inocuidad microbiana, la estrategia recomendada es aplicar varias barreras contra la contaminación en el abastecimiento de agua. El mayor riesgo microbiológico está asociado con la ingesta de agua con heces humanas o de animales, ya que son fuente de agentes patógenos (virus, protozoos y bacterias) y de la *Dracunculus medinensis* y la *Legionella*.

Es posible eliminar los agentes patógenos mediante la desinfección. La desinfección con productos químicos, como el cloro, generan subproductos que no suponen un alto riesgo. Aunque la desinfección proporciona una barrera eficaz contra la contaminación microbiana, no proporciona la seguridad del agua. Por tanto, es necesario emplear otras barreras junto con la desinfección para eliminar los microorganismos patógenos.

En cuanto a los productos químicos en el agua, solamente suponen un riesgo tras largos periodos de exposición. Es decir, una única ingesta de productos químicos no suele tener efectos adversos. Sin embargo, se establecen unos valores de referencia para algunos productos químicos con el fin de limitar sus concentraciones de manera que no supongan un riesgo para la persona si consume la misma agua durante toda la vida.

Asimismo, es importante considerar la presencia de radionúclidos en el agua. Estos pueden estar en el agua de manera natural o por la acción humana. La exposición a los radionúclidos en el agua no es la mayor (p.ej., el sol) y no suele ocasionar problemas. No hay valores de referencia, sino que se emplea un sistema que analiza las radiactividades alfa y beta totales en el agua.

Por último, hay que tener en cuenta los aspectos relacionados con la aceptabilidad del agua: el sabor, la apariencia y el olor. Los consumidores suelen evaluar la calidad del agua con los sentidos, prefiriendo aguas que no tengan sabores ni olores desagradables ni color.

2.1 Gestión del Agua: Funciones y Responsabilidades

Diversos organismos tienen un papel importante en la gestión del agua por lo que se persigue la colaboración de todos, promoviendo una **gestión integrada y preventiva**.

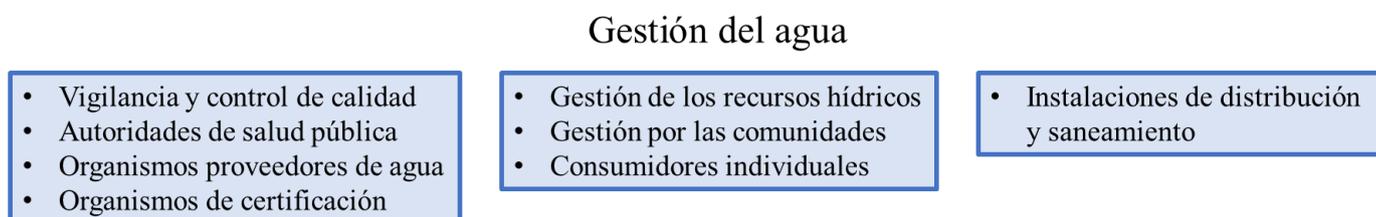


FIGURA 4 GESTIÓN DEL AGUA

- **Vigilancia y control de calidad del agua**

Tanto el **organismo de vigilancia** como el **proveedor del agua** tienen funciones y responsabilidades complementarias. Por eso es recomendable establecer un sistema dual para determinar las tareas de cada uno. Los organismos nacionales proporcionan un marco con normas, objetivos y legislación basados en las Guías internacionales de agua potable, para que garanticen la seguridad del agua de consumo humano permanentemente.

La vigilancia es una práctica de investigación que tiene como objetivo la identificación y evaluación de los riesgos del agua que tienen que ver con la salud. Normalmente, es el ministerio de salud el encargado de llevar a cabo esta tarea. La vigilancia debe estar formada por auditorías e inspecciones que analicen la totalidad del sistema: la fuente o actividad de captación de agua, la infraestructura de conducción (tuberías, canales), las plantas de tratamiento, el almacenamiento y los sistemas de distribución.

- **Autoridades de salud pública**

El ministerio de la salud pública participará en las siguientes actividades:

- La vigilancia de la salud pública y sus tendencias
- El establecimiento de metas de calidad, desempeño y seguridad del agua
- El desarrollo de políticas de alcance (de salud y gestión) de los recursos hídricos
- La vigilancia de los sistemas de agua mediante organismos descentralizados

- **Organismos proveedores de agua**

El sistema de abastecimiento de agua puede cubrir diferentes demandas en función de su diseño; desde poblaciones urbanas (millones de personas) a poblaciones pequeñas (comunidades). La mayoría de los países cuenta con abastecimiento con fuentes comunitarias y por tuberías.

- **Organismos de certificación**

Estos organismos verifican que los instrumentos (bombas de mano, instrumentos de recolección) y materiales (de las tuberías, productos químicos) del sistema de abastecimiento de agua cumplen con un estándar de calidad y seguridad para los consumidores.

- **Gestión de los recursos hídricos**

La primera barrera contra la contaminación microbiana y química es la protección de la fuente de agua, y es mejor prevenir riesgos en la fuente que curar con el tratamiento. La calidad del agua se ve afectada por el uso del suelo en los alrededores de la fuente: industria, agricultura, minería, ganadería...

- **Gestión por las comunidades**

La participación y el apoyo de las comunidades es clave para el correcto desempeño de la gestión de la calidad de agua. Sin la colaboración de la comunidad, el sistema de abastecimiento de agua no tiene sentido. Es necesario que la comunidad entienda el sistema y lo considere como propio, para despertar un interés en los integrantes por el uso y el cuidado de su fuente de agua. Por eso es conveniente involucrar a los miembros en todo el proceso; desde los estudios iniciales y la búsqueda de los pozos hasta la construcción de la infraestructura de captación de agua y la vigilancia del sistema.

Con el objetivo de concienciar a la comunidad de la importancia y la utilidad de su sistema de abastecimiento de agua, puede ser interesante llevar a cabo programas de educación. Estos programas exponen la importancia de la calidad del agua, el impacto directo en la salud y la necesidad de vigilancia, y enumeran los requerimientos para evitar la contaminación del sistema de abastecimiento.

- **Consumidores individuales**

El papel del consumidor es de gran relevancia ya que, a través de sus acciones, pueden contribuir a la seguridad del agua. Se puede hablar de diferentes sistemas de abastecimiento. En el caso de distribución de agua por tuberías, la red de distribución y saneamiento tiene que haber sido diseñada e instalada por personal cualificado para evitar conexiones cruzadas o reflujos. En hogares sin tuberías (agua de lluvia o pozos), hay que aplicar medidas que garanticen la recolección de agua, su almacenamiento y tratamiento en circunstancias seguras. En este último caso, es interesante que las personas traten el agua con el fin de aumentar su confiabilidad.

- **Instalaciones de distribución y saneamiento**

Ya se ha comentado que la red de distribución juega un papel importante en la calidad del agua. El correcto diseño de la instalación impide la contaminación dada por el refluo, el estancamiento o las conexiones cruzadas. Además del correcto diseño, hay que tener en cuenta los materiales usados en las tuberías y demás instrumentos. El uso de algunos materiales puede derivar en altas concentraciones de metales pesados (como ocurre en las cañerías de plomo) o puede favorecer la reproducción de bacterias. Algunas directrices para una correcta instalación son usar de tuberías con superficie interior lisa, minimizar los gradientes de presión, evitar la contaminación del agua de consumo humano por el contacto con aguas residuales y usar tuberías herméticas.

2.2 Planes de Seguridad del Agua (PSA)

Los PSA se emplean para evaluar un sistema con el fin de determinar si el abastecimiento de agua cumple con los **objetivos de protección de la salud**. Estos planes deben incluir directrices sobre la calidad microbiológica y química del agua, con la concentración de productos químicos y el número de patógenos permitidos.

Los PSA se basan en la implementación de múltiples barreras contra la contaminación y en el análisis de los riesgos, y tienen como objetivo la puesta en práctica de buenas prácticas para la protección de las fuentes de agua, la eliminación de la contaminación mediante el tratamiento y la reducción de los contaminantes en el abastecimiento.

Un Plan de Seguridad del Agua abarca tres áreas que son la Evaluación y diseño del sistema, el Monitoreo operacional y los Planes de gestión, documentación y comunicación.

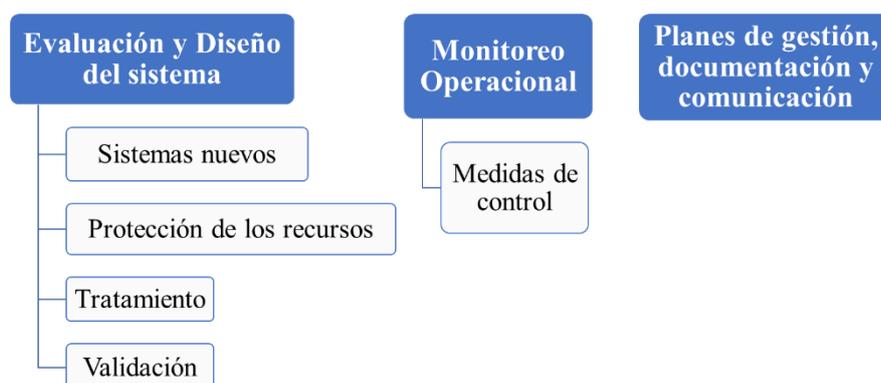


FIGURA 5 ÁREAS DE LOS PSA

2.2.1 Evaluación y diseño del sistema

La calidad del agua suele variar a lo largo del sistema, sea este de distribución por tuberías, comunitario con o sin tuberías o domiciliario de captación de lluvia. Por eso la evaluación se utiliza para determinar la calidad final del agua, es decir, la que ingiere el consumidor. Se

pueden identificar peligros potenciales, estimando el nivel de riesgo correspondiente, y se puede clasificar según la probabilidad de ocurrencia y la gravedad de las consecuencias.

Para realizar esta tarea correctamente debe formarse un **equipo de expertos multidisciplinar** para tener una visión global del sistema.

- **Sistemas nuevos de abastecimiento**

Cuando se diseñan nuevos sistemas de abastecimiento de agua es necesario analizar las posibles fuentes de contaminación de la fuente. Es importante considerar todos los factores de calidad del agua para la selección adecuada de las tecnologías de captación y de tratamiento. La turbidez del agua influye en la selección de las tecnologías. En el diseño de las plantas de tratamiento no se hacen los cálculos con valores promedio de la calidad del agua, sino que se tienen en cuenta las desviaciones, tanto las conocidas como las que podrían ocurrir con alta frecuencia.

- **Protección de los recursos y de las fuentes**

La disminución de la contaminación de la fuente está directamente relacionada con la reducción del tratamiento requerido. Por eso, la protección de la fuente es la primera barrera de protección. Es necesario conocer las características de las fuentes superficiales o no superficiales, e identificar las distintas causas y escenarios de contaminación.

Se pueden distinguir dos **factores que afectan la calidad del agua**: naturales y derivados del uso humano.

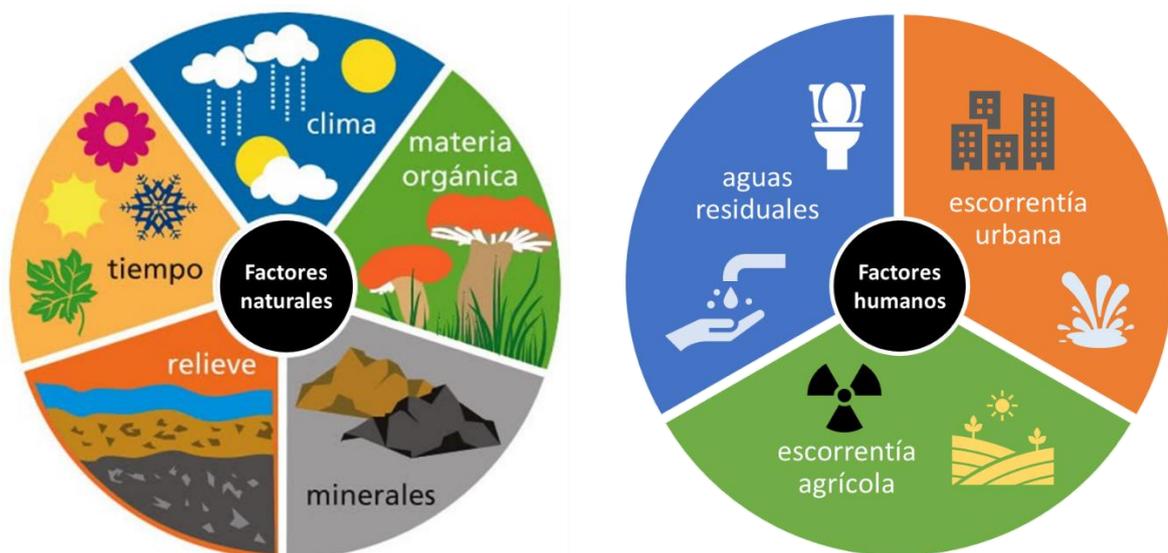


FIGURA 6 FACTORES QUE AFECTAN LA CALIDAD DEL AGUA

Los **factores naturales** que influyen en la calidad del agua son la vida silvestre, la vegetación, el clima, la topografía y la geología.

Los **factores derivados del uso humano** pueden ser causas puntuales o no puntuales. Un ejemplo de causa puntual es la descarga de aguas residuales, que son una fuente de agentes patógenos. Por otro lado, la escorrentía superficial es un ejemplo de causa no puntual, donde

escorrentía es el agua que rebasa de un depósito o de un cauce por el que debería discurrir el agua. La escorrentía urbana, la agrícola y la ganadera aumentan en la carga microbiológica del agua.

Los acuíferos profundos suelen ser microbiológica y químicamente seguros mientras que los no confinados pueden estar contaminados por prácticas agrícolas, redes de alcantarillado o residuos de la industria.

Se establecen unas **medidas de protección** de las **fuentes hídricas** que comienzan con el desarrollo y la implementación de planes de gestión de la cuenca con medidas para proteger el recurso hídrico, y la sensibilización de la comunidad respecto del impacto de sus acciones en la calidad del agua.

- **Tratamiento**

Tras la protección del acuífero, la siguiente línea de actuación es el tratamiento de agua. El proceso de tratamiento puede tener distintas maneras de aplicación, como la introducción de componentes químicos para desinfectar el agua o procesos más elaborados como la ósmosis inversa. Si la turbidez del agua es elevada, el proceso de tratamiento se puede saturar.

- Tratamiento previo

Usa filtros, microtamices o almacenamiento del flujo de agua para reducir la carga microbiológica, las partículas y la materia orgánica natural.

- Coagulación, floculación, sedimentación y filtración

Estas operaciones sirven para eliminar partículas en el agua, además de reducir el número de microorganismos (virus, bacterias y protozoos).

La eficiencia de la desinfección depende de estos procesos ya que es esencial para eliminar la turbidez y eliminar las partículas en las unidades de filtración granular.

- Tratamiento

Consiste en la implementación de diversos tipos de filtración como la filtración lenta en arena y la filtración de membrana (p.ej., ósmosis inversa). La filtración actúa como barrera contra los microorganismos patógenos.

- Desinfección

La aplicación de un desinfectante en la concentración adecuada es necesaria para reducir los contaminantes microbiológicos. El método más común es la cloración, que consiste en la disolución de cloro en el agua. Otros métodos usados son la ozonización, la cloraminación, el dióxido de cloro y la radiación ultravioleta. Estos procesos de desinfección destruyen las bacterias y ayudan con la inactivación de los virus.

El **método más eficaz** para la eliminación o reducción de componentes patógenos es la implementación de un sistema de filtración con coagulación o floculación, seguido de la desinfección.

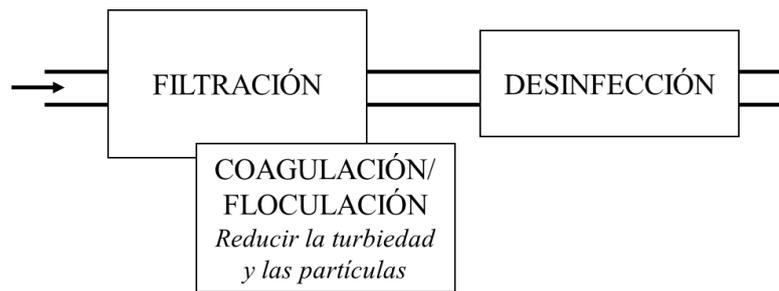


FIGURA 7 MÉTODO MÁS EFICAZ CONTRA AGENTES PATÓGENOS

En ocasiones resulta útil almacenar el agua para incrementar el tiempo de contacto con el desinfectante y mejorar así la desinfección de microorganismos más resistentes.

- **Sistemas de distribución de agua por tuberías**

Es importante evitar la proliferación microbiológica y la corrosión de las tuberías por lo que debe ponerse especial cuidado en el diseño y en la selección de los materiales de las tuberías y depósitos. En ocasiones, estos sistemas de distribución recorren kilómetros y tienen interconexiones, dando lugar a posibles contaminaciones del agua.

Los suministros intermitentes de agua dan lugar a variaciones en la presión que permiten el ingreso de agua en el sistema a través de grietas, rendijas o juntas. Dicha agua puede estar contaminada, afectando a la seguridad de todo el sistema de abastecimiento.

Antes de entrar en el sistema de distribución, el agua debe ser microbiológicamente segura. El sistema de distribución debe incluir algún mecanismo contra la contaminación del agua. Se suele introducir una dosis suficientemente elevada para mantener concentración residual del desinfectante en el agua. Este procedimiento dota al sistema de una protección parcial, y debe analizarse la presencia de bacterias indicadoras de contaminación fecal, como la *Escherichia coli*. Otros mecanismos son purgar y renovar las tuberías, reducir el tiempo de circulación en el sistema para evitar el estancamiento y mantener un gradiente de presión positivo.

- **Sistemas comunitarios y domiciliarios sin distribución por tuberías**

Estos sistemas incluyen aguas subterráneas, pozos, aguas superficiales y agua recolectada de la lluvia. Si la fuente está bien protegida de agentes externos, la contaminación microbiológica será menor y necesitará menos tratamiento o desinfección.

- **Validación**

Con la validación se conoce la eficacia de las medidas de control establecidas. Es necesaria para saber si los procesos de tratamiento funcionan como se espera de ellos en la eliminación de los peligros microbiológicos y químicos. Evalúa la información disponible sobre el sistema para determinar qué pruebas hay que realizar. Puede conducir a mejoras en la operación del sistema.

2.2.2 Monitoreo operacional

Esta acción conlleva la **observación y medición planificada** del sistema con el objetivo de evaluar las **medidas de control** y poder ver si el sistema está funcionando adecuadamente. Las medidas de control actúan en la prevención, la reducción o la eliminación de la contaminación.

El monitoreo operacional se hace con una frecuencia diferente según la medida de control. La consolidación de un plan estructurado de toma de muestras de las medidas de control es esencial para evitar agua insalubre.

Algunos ejemplos de parámetros observados son el cloro residual, la turbidez y la integridad de la infraestructura de la instalación. Los análisis microbiológicos y químicos son costosos y complejos por lo que se consideran actividades de verificación o validación, y no monitoreo operacional.

- **Determinación de las medidas de control del sistema**

Cada sistema tiene medidas de control relacionadas con los peligros existentes y reflejan la probabilidad de ocurrencia y las consecuencias. Las medidas de control tienen las siguientes características:

- Que puedan **medirse** para establecer límites de la operación eficaz
- Que puedan **monitorearse** con la frecuencia necesaria
- Que existan **medidas correctivas** en caso de superar los límites establecidos

La Tabla 2 recoge ejemplos de medidas de control en distintas etapas del abastecimiento de agua:

TABLA 2 MEDIDAS DE CONTROL EN EL MONITOREO OPERACIONAL

<i>Fuente de agua</i>	<i>Tratamiento</i>	<i>Sistema de distribución</i>
- Turbidez	- Concentración del desinfectante	- Cloro residual
- Algas	- Tiempo de contacto con el desinfectante	- Bacterias heterotróficas
- Color	- pH	- Potencial de oxidación-reducción
- Conductividad	- Integridad de la membrana	- Presión
- Infraestructura de extracción	- Color	- Turbidez
- Absorbancia de luz UV	- Turbidez	
- Caudal	- Intensidad de la luz UV	
- Condiciones meteorológicas locales		

La Tabla 3 tomada de la *Guía para la calidad del agua* (Ginebra: Organización Mundial de la Salud, 2018) muestra los parámetros de monitoreo operacional y la etapa del sistema de abastecimiento.

TABLA 3 MEDIDAS DE CONTROL EN EL MONITOREO OPERACIONAL

Parámetro operativo	Agua no tratada	Coagulación	Sedimentación	Filtración	Desinfección	Sistema de distribución
pH		✓	✓		✓	✓
Turbidez (o bajo recuento de partículas)	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Oxígeno disuelto	✓					
Caudal de ríos/arroyos	✓					
Lluvias	✓					
Color	✓					
Conductividad (sólidos disueltos totales)	✓					
Carbono orgánico	✓		✓			
Algas, toxinas y metabolitos de algas	✓					✓
Dosificación química		✓			✓	
Caudal		✓	✓	✓	✓	
Carga neta		✓				
Corriente circulante		✓				
Pérdida de carga				✓		
Ct (concentración de desinfectante × tiempo de contacto)					✓	
Desinfectante residual					✓	✓
Potencial de oxidación-reducción					✓	
SPD					✓	✓
Bacterias heterotróficas					✓	✓
Presión hidráulica						✓

Los límites operativos determinan el rango en el que el sistema funciona eficazmente. En caso de superar estos límites, el sistema debe llevar a cabo acciones correctivas que lo devuelvan al funcionamiento correcto.

2.2.3 Planes de gestión, documentación y comunicación

Los **planes de gestión** incluyen la evaluación de un sistema, los planes de monitoreo operacional y verificación, y las medidas a adoptar en funcionamiento normal y en caso de la ocurrencia de incidentes. Es esencial definir las responsabilidades de los organismos que participan en un sistema de abastecimiento, para determinar el marco de actuación de cada uno.

Se persigue que el sistema de **documentación** sea lo más simple posible, con un nivel de detalle suficiente para que un operador calificado pueda realizar el control operacional.

Por último, una **comunicación** eficaz puede influir en la concienciación de la comunidad, así como en el aumento de su conocimiento del sistema, otorgándoles la capacidad de tomar decisiones sobre la gestión de este.

2.3 Verificación de la Calidad del Agua

La verificación es un procedimiento distinto del monitoreo operacional que consiste en la aplicación de **pruebas adicionales** para determinar el funcionamiento del sistema de abastecimiento de agua. Analiza la calidad del agua según aspectos microbiológicos y químicos.

La frecuencia de muestreo depende del volumen de agua y de la población y es más importante emplear recursos en la detección de contaminantes microbiológicos que en contaminantes químicos.

2.3.1 Calidad microbiológica del agua

La verificación microbiológica analiza la presencia de microorganismos indicadores de contaminación fecal, como la *Escherichia coli*. La presencia de esta bacteria delata la existencia de contaminación fecal del agua, y esto no es aceptable.

La verificación microbiológica se diseña para obtener la máxima probabilidad de detección de la contaminación. En consecuencia, el muestreo se debe realizar en los lugares de contaminación más probable dadas las variaciones de la calidad a lo largo de sistema de abastecimiento.

Dado que la contaminación no se distribuye de manera uniforme en las tuberías, cuanto mayor sea la frecuencia de muestreo, mayor será la probabilidad de detección de las bacterias *E coli*. Asimismo, es mejor emplear métodos de análisis más sencillos para obtener los resultados antes. El muestreo ha de ser aleatorio e incrementar su frecuencia en caso de epidemias o inundaciones.

2.3.2 Calidad química del agua

La verificación química compara los resultados de análisis del agua con valores de referencia. Por regla general, se controla la calidad de los productos químicos que han sido añadidos en el agua, como el cloro en la cloración. La mayoría de los componentes químicos presentes en el agua no tienen un peligro asociado salvo en el caso de una exposición prolongada.

El control de los peligros asociados a la presencia de productos químicos en el agua se basa en encontrar los causantes del problema, como el uso de fertilizantes en un campo próximo a la fuente de agua.

Se define el valor de referencia de un componente químico como la concentración que no supone un riesgo en la salud si se consume a lo largo de toda la vida, en los grupos más vulnerables (niños y ancianos). Se entiende que estos valores protegerán al resto de la población.

2.4 Vigilancia

Se entiende por vigilancia a la **evaluación continua de la salud** mediante auditorías o por evaluación directa. Hay organismos que se encargan de la vigilancia y que realizan la **revisión periódica** e independiente de los aspectos relacionados con la seguridad del agua. La vigilancia emplea un programa sistemático de recolección de datos, a partir de los planes de seguridad del agua, del análisis del agua, de las inspecciones sanitarias, y de otros aspectos comunitarios. Deben incluir todo el sistema de abastecimiento.

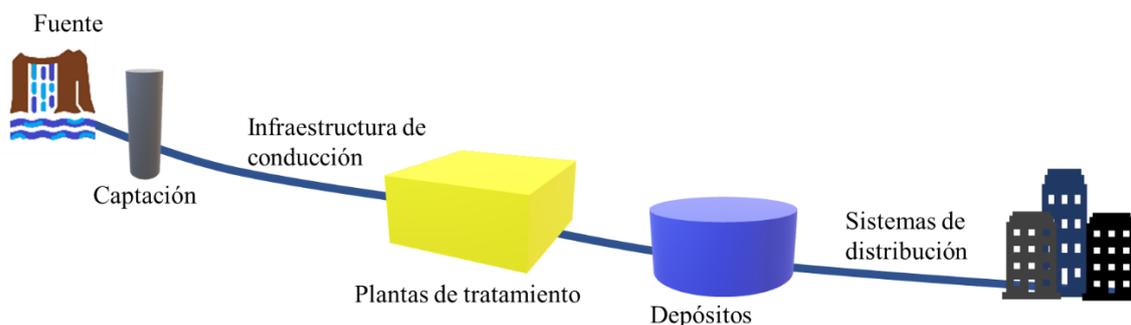


FIGURA 8 PARTES DEL SISTEMA DE ABASTECIMIENTO DE AGUA

La calidad del agua no es lo único que se evalúa en la vigilancia. La salud de la población es la preocupación principal, y esto implica vigilar otros aspectos relativos a la idoneidad del sistema.

- **Calidad:**

La calidad de un sistema es aceptable si tiene un PSA aprobado y está sujeto a auditorías frecuentes.

- **Cantidad:**

La cantidad refleja la proporción de la población que tiene acceso al abastecimiento de agua.

La cantidad de agua captada por cada hogar influye en la salud de los habitantes. El agua es una necesidad básica del ser humano, tanto para el consumo como para el saneamiento. La OMS estima que una persona adulta consume de base unos **2 litros de agua por día**. Este valor puede cambiar en función del clima y de la actividad. Si se tiene en cuenta también las necesidades de higiene personal, del lavado de ropa y la preparación de alimentos, la OMS estima que la persona necesita 7,5 litros diariamente.

Se distinguen diferentes niveles de acceso a la fuente de agua: sin acceso, acceso básico, acceso intermedio y acceso óptimo. Esta clasificación es función de la distancia desde el hogar hasta el lugar de suministro y del tiempo de recolección. La Tabla 4 (Ginebra: Organización Mundial de la Salud, 2018) recoge el nivel de servicio en función de los parámetros anteriores.

TABLA 4 NIVEL DE SERVICIO DE UNA FUENTE DE AGUA

Nivel de servicio	Distancia/tiempo	Volúmenes probables de agua captada	Riesgo para la salud pública debido a una higiene deficiente	Prioridad de intervención y medidas
Sin acceso	Más de 1 km / más de 30 min ida y vuelta	Muy bajo: 5 litros per cápita por día	Muy alto Práctica de higiene comprometida El consumo básico puede estar comprometido	Muy alta Suministro del nivel básico de servicio Educación sanitaria Tratamiento y almacenamiento seguro de agua a nivel domiciliario como una medida provisional
Acceso básico	En 1 km / en 30 min ida y vuelta	Promedio aproximado de 20 litros per cápita por día	Alto La higiene puede estar comprometida La ropa puede lavarse fuera de la parcela	Alta Suministro del nivel de servicio mejorado Educación sanitaria Tratamiento y almacenamiento seguro de agua a nivel domiciliario como una medida provisional
Acceso intermedio	Agua suministrada en la parcela mediante al menos un grifo como mínimo (suministro en el patio)	Promedio aproximado de 50 litros per cápita por día	Bajo La higiene no debería estar comprometida Es probable que la ropa se lave en la parcela	Baja La promoción de la higiene sigue generando beneficios para la salud Fomento del acceso óptimo
Acceso óptimo	Suministro de agua a través de múltiples grifos en la vivienda	Promedio de 100–200 litros per cápita por día	Muy bajo La higiene no debería estar comprometida La ropa se lava en la parcela	Muy baja La promoción de la higiene sigue generando beneficios para la salud

El nivel de servicio se utiliza como indicador en la vigilancia. De la tabla anterior se puede concluir que, si se dispone de un suministro de agua a una distancia inferior a 1 kilómetro o si el tiempo de recolección es menor de 30 minutos, la calidad de vida será mejor.

- **Accesibilidad:**

La accesibilidad se mide como la **proporción de la población con acceso confiable** a un sistema de abastecimiento de agua seguro.

Se plantea que una fuente de agua mejorada puede abastecer agua segura con mayor probabilidad, donde una fuente mejorada de agua está protegida de la contaminación gracias a su correcto diseño y construcción. La Tabla 5 muestra algunos ejemplos fuentes mejoradas y fuentes no mejoradas.

TABLA 5 FUENTES MEJORADAS Y NO MEJORADAS

<i>Fuentes mejoradas</i>	<i>Fuentes no mejoradas</i>
Servicio por tuberías	Manantiales y pozos sin protección
Fuentes públicas	Vendedores ambulantes
Pozos excavados cubiertos	Camión cisterna
Pozos perforados	Aguas superficiales
Manantiales cubiertos	Agua embotellada
Captación de agua de lluvia	

- **Asequibilidad:**

La asequibilidad es la **tarifa** que pagan los consumidores por el agua. Los hogares con acceso reducido al suministro de agua pagan más por el agua que los que están conectados por un sistema de tuberías. Esto hace que, si el coste es muy elevado, los hogares empleen otras fuentes de agua menos seguras.

- **Continuidad:**

La continuidad refleja el **porcentaje de tiempo** en el que el agua está **disponible** (por ejemplo, diaria, semanal y estacionalmente). Según las interrupciones, se puede hablar de distintos servicios:

- Fuente segura y sin interrupciones durante el año completo en la fuente y en el punto de consumo.
- Interrupciones diarias o semanales debido a:
 - Restricciones de la bomba por avería o cortes de electricidad
 - La capacidad de las tuberías no es suficiente para cubrir la demanda máxima
 - Fugas de agua en el sistema de distribución
- Variaciones estacionales que ocurren por:
 - Fluctuación natural del volumen de agua en la fuente
 - Uso de la fuente para otros fines como el riego
 - Incremento de la turbidez que imposibilitan su tratamiento
- Discontinuidad desmedida, tanto estacional como por causas humanas

Las interrupciones suelen estar asociadas a una pérdida de calidad en el agua y a exposición a agua contaminada, ya que el suministro intermitente ocasiona un gradiente de presión en la red de tuberías.

2.5 Identificación de los Aspectos de Interés Prioritarios

La presencia de componentes microbiológicos y químicos en el agua puede ser perjudicial para la salud. La detección de estos componentes suele ser lenta, costosa y compleja, limitando la posibilidad de detección temprana. Por tanto, no es práctico ni económico llevar a cabo un análisis de todos los parámetros de calidad, y es necesario establecer una serie de prioridades:

1. La actividad prioritaria es garantizar el suministro de agua de calidad segura en cuanto al aspecto **microbiológico** y mantenerlo así en el tiempo
2. Identificar y resolver los componentes **químicos** dañinos para la salud
3. Gestionar otros peligros químicos que influyen en la **aceptabilidad** del agua (olor, sabor y apariencia)
4. Desarrollar tecnologías que reduzcan las concentraciones de agentes patógenos y de componentes químicos directamente en la fuente de agua, hasta estar por debajo de los valores de referencia

La OMS no ha establecido valores de referencia para componentes relacionados con la aceptabilidad (olor, sabor y apariencia). Sin embargo, es frecuente encontrar normas para algunas de las sustancias con el fin de mejorar la apariencia porque el ser humano se guía por sus sentidos a la hora de escoger el agua de consumo, y puede escoger agua con mejor aspecto pero que no sea segura. Evidentemente, el criterio de aceptabilidad varía de una región a otra y está sujeto a preferencias locales.

- **Evaluación de la calidad del agua de consumo humano**

Para llevar a cabo la evaluación de la calidad hay que enumerar los tipos de sistemas de agua y la calidad de las fuentes de agua. Es interesante incluir el tipo de captación (si está o no protegida), la geología de la zona, las descargas de aguas residuales, las actividades de industria y los conocimientos de la comunidad.

- **Evaluación de las prioridades microbiológicas**

La contaminación microbiana supone el mayor riesgo en el consumo de agua. Es prioritario el control de agentes patógenos en el agua.

- **Evaluación de las prioridades químicas**

En función del país o de la región, se dará la presencia de unas sustancias químicas u otras. Se debe dar prioridad a las sustancias químicas que supongan un riesgo a las personas o que influyan en la aceptabilidad del agua. No muchas sustancias tienen efectos adversos sobre la salud. Algunas conocidas por dañar la salud son el arsénico, el fluoruro y el nitrato, y otras relacionadas con la aceptabilidad son el manganeso y el hierro.

En la mayoría de los casos, la ingesta de estas sustancias químicas perjudiciales contribuye mínimamente en comparación con la exposición general por lo que puede considerarse no analizar asiduamente estas sustancias dado el gasto asociado.

2.6 Creación de Normas de Calidad del Agua

Los valores de referencia varían de una región a otra por lo que se proponen unos como punto de partida científico. No existe un abordaje universal pero las normas parten de unos valores de referencia y de unos mínimos de calidad comunes, así como de un procedimiento de mejora de la calidad del agua similar. No se establece un programa fijo, sino que se propone un programa de metas modestas con pocos parámetros de calidad y valores de referencia alcanzables. Si se disponen de datos locales, es preferible usar estos a la hora de establecer los valores de referencia.

2.7 La Calidad del Agua en Edificios

El diseño de un sistema de agua de un edificio varía según el tipo de edificio (vivienda, escuela, hospital...) y del uso del agua. La red se suele dividir en una red de agua fría y otra de agua caliente. En edificios, la calidad del agua se garantiza con el diseño de la instalación, la limpieza habitual, la implementación de prácticas de gestión adecuadas y el control de la temperatura.

Un buen diseño carece de conexiones cruzadas con tuberías de aguas residuales o de productos químicos, emplea materiales adecuados que no se degradan (como acero inoxidable, PVC, o polietileno reticulado), y cuida las tuberías y las uniones. El mayor riesgo para las redes de agua en los edificios es la entrada de contaminantes de suministros de agua externos o las averías en el sistema. Cuando la red está conectada a dispositivos como una lavadora o un lavaplatos, es posible el reflujos. Otro problema que puede darse es la proliferación microbiana en las paredes de las tuberías en contacto con el agua, que podrían infectar heridas.

Para poder evaluar los riesgos es necesario tener la documentación de la red del sistema de agua. Debe incluir los materiales de las tuberías, las redes de agua fría y agua caliente, los tratamientos en el lugar de ingreso y en el de consumo, y los dispositivos y los equipos conectados a la red.

El sistema de distribución tiene como objetivo suministrar agua en las condiciones adecuadas: la presión y el flujo deben ser bajos. El sistema supone que la calidad del agua que entra en la red es segura ya que la calidad está garantizada por el suministrador.

Las medidas de control deben estar en los rangos establecidos, por lo que el monitoreo operacional debe controlar parámetros como el pH, la temperatura o la concentración del desinfectante residual.

3 Aspectos Microbiológicos

El consumo de agua contaminada por heces humanas o animales es lo más peligroso para la salud pública, en cuanto al consumo de agua. La aparición de enfermedades suele estar asociada con un tratamiento inadecuado del agua. Aplicando el principio de barreras múltiples desde la fuente de agua hasta el punto de consumo se puede evitar la contaminación.

3.1 Peligros Microbiológicos Relacionados con el Agua

La presencia de virus, bacterias y protozoos puede causar la contaminación de toda una población si el sistema de agua no es seguro. Por eso se da más importancia a la inocuidad microbiana que a otros contaminantes.

3.1.1 Transmisión de infecciones por el agua

No solo tiene importancia el análisis de la contaminación fecal (*E. coli*). Algunos organismos pueden proliferar en las paredes de las tuberías (p.ej., *Legionella*) y otros pueden estar en la fuente (p.ej., *Dracunculus medinensis*), y pueden causar enfermedades o brotes individuales.

La ingesta de agua contaminada es la manera más fácil de transmisión de enfermedades por el agua. Sin embargo, los agentes patógenos se pueden transmitir por otras vías: la inhalación de aerosoles y el contacto con la piel. La Figura 9 (Ginebra: Organización Mundial de la Salud, 2018) muestra las distintas vías de contagio con los agentes patógenos asociados.

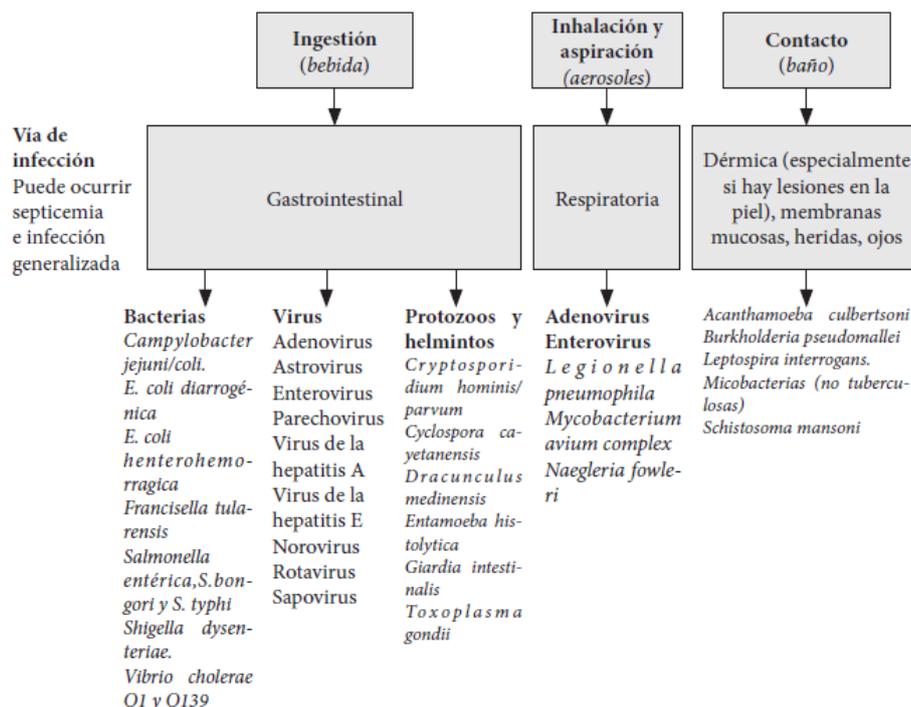


FIGURA 9 VÍAS DE CONTAGIO CON SUS RESPECTIVOS AGENTES PATÓGENOS

3.1.2 Agentes patógenos de referencia

No resulta eficaz analizar individualmente a cada agente patógeno por falta de recursos. Es más práctico agrupar a los agentes patógenos en grupos de características parecidas, escoger un organismo de referencia que represente al grupo completo, y analizar la presencia de este en el agua, considerando las diferencias que hay entre la referencia y el resto del grupo.

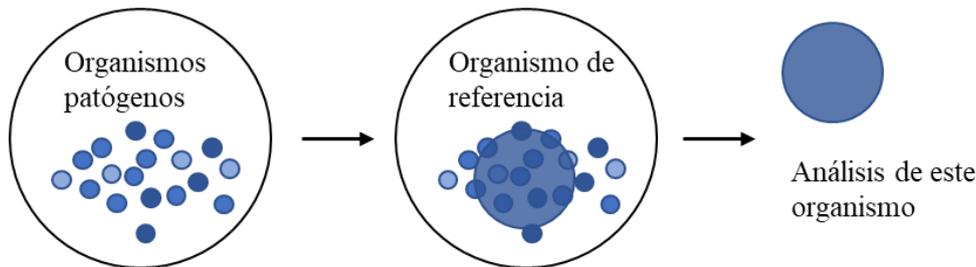


FIGURA 10 ORGANISMO PATÓGENO DE REFERENCIA

La Tabla 6 (Ginebra: Organización Mundial de la Salud, 2018) muestra la carga de agentes patógenos que el humano puede tolerar sin enfermar y la calidad del agua sin tratar.

TABLA 6 CALIDAD DEL AGUA CRUDA Y MORBILIDAD

Agua de río (contaminada con residuos humanos y del ganado)	Unidades	<i>Cryptosporidium</i>	<i>Campylobacter</i>	Rotavirus ^a
Calidad del agua cruda (C _R)	Organismos por litro	10	100	10
Efecto necesario del tratamiento para alcanzar un nivel de riesgo tolerable (PT)	Valor de reducción de log ₁₀	5.89	5.98	5.96
Calidad del agua de consumo humano (C _D)	Organismos por litro	1.3 × 10 ⁻⁵	1.05 × 10 ⁻⁴	1.1 × 10 ⁻⁵
Consumo de agua sin hervir (V)	Litros por día	1	1	1
Exposición al agua de consumo humano (E)	Organismos por litro	1.3 × 10 ⁻⁵	1.05 × 10 ⁻⁴	1.1 × 10 ⁻⁵
Dosis-respuesta (r) ^b	Probabilidad de infección por organismo	2.0 × 10 ⁻¹	1.9 × 10 ⁻²	5.9 × 10 ⁻¹
Riesgo de infección (P _{inf,d})	Por día	2.6 × 10 ⁻⁶	2.0 × 10 ⁻⁶	6.5 × 10 ⁻⁶
Riesgo de infección (P _{inf,y})	Por año	9.5 × 10 ⁻⁴	7.3 × 10 ⁻⁴	2.4 × 10 ⁻³
Riesgo de enfermedad (diarrea) cuando se ha producido infección (P _{ill,inf})	Probabilidad de enfermedad por infección	0.7	0.3	0.5
Riesgo de enfermedad (diarrea) (P _{ill})	Por año	6.7 × 10 ⁻⁴	2.2 × 10 ⁻⁴	1.2 × 10 ⁻³
Carga de morbilidad (db)	AVAD por caso	1.5 × 10 ⁻³	4.6 × 10 ⁻³	1.4 × 10 ⁻²
Fración susceptible (fs)	Porcentaje de población	100	100	6
Meta en términos de salud (HT)	AVAD por año ^c	1 × 10 ⁻⁶	1 × 10 ⁻⁶	1 × 10 ⁻⁶

<p>Fórmulas:</p> $C_D = C_R \div 10^{PT}$ $E = CD \times V$ $P_{inf,d} = E \times r$	$P_{ill} = P_{inf,y} \times P_{ill,inf}$ $HT = P_{ill} \times db \times f_s \div 100$
---	---

AVAD, años de vida ajustados en función de la discapacidad

Los años de vida ajustados en función de la discapacidad, o AVAD, se utilizan para incluir el riesgo de contraer una enfermedad y su morbilidad. El objetivo sanitario es tener 10^{-6} AVAD por persona al año.

En los países con menos recursos, la carga de morbilidad es mayor. Las metas de eficacia contra los virus son mayores en estos países, donde las metas de eficacia se suelen relacionar con la propia eficacia del tratamiento. Estas metas determinan la reducción microbiana necesaria para garantizar que el agua es segura. Es decir, para una calidad de agua equivalente, el impacto de una enfermedad transmitida por el agua tiene mayor gravedad en países con ingresos bajos.

3.2 Tratamiento de Contaminantes Microbiológicos

La validación es necesaria para determinar si el método de tratamiento cumple con las metas de eficacia establecidas, y concluye qué áreas deben ser mejoradas. El método de tratamiento puede tener distintos puntos de aplicación: en una planta de tratamiento central, en las tuberías de distribución, en el hogar o en el punto de consumo.

3.2.1 Tratamiento central

El tratamiento central se utiliza para eliminar los microorganismos patógenos. Incluso las fuentes de agua de alta calidad (acuíferos subterráneos, pozos confinados) necesitan algún tipo de tratamiento. Es usual encontrar métodos de tratamiento de etapas consecutivas, como la coagulación, la floculación, la sedimentación, la filtración y la desinfección.

Los tratamientos típicos para reducir el número de virus, protozoos y bacterias se pueden dividir según la etapa de tratamiento. La Tabla 7 muestra estos procesos de tratamiento, que se explicarán en detalle más adelante.

TABLA 7 MÉTODOS DE TRATAMIENTO EN LAS DISTINTAS ETAPAS DEL SISTEMA DE AGUA

<i>Pretratamiento</i>	<i>Coagulación, floculación y sedimentación</i>	<i>Filtración</i>	<i>Desinfección</i>
Filtros gruesos	Clarificación	Filtración lenta de arena	Cloro
Reservorios de almacenamiento	Flotación por aire disuelto	Filtración de membrana (ósmosis inversa)	Dióxido de cloro
Filtración en la orilla	Ablandamiento con cal		Ozono
			UV

La implementación de varias barreras de tratamiento es recomendable porque se mejora la eficiencia del proceso. De esta manera, una avería en una de las etapas no tendrá consecuencias irreversibles.

3.2.2 Tratamiento domiciliario

Existen múltiples tecnologías para tratar el agua en el punto de consumo. El acceso a dispositivos de tratamiento de agua permite a las comunidades inactivar o eliminar a los agentes patógenos que contaminan el agua en las tuberías.

El tratamiento domiciliario debería utilizarse como complemento de un tratamiento central ya que las tecnologías disponibles no eliminan agentes patógenos más resistentes como el *Cryptosporidium*.

TABLA 8 TRATAMIENTO DOMICILIARIO DE CONTAMINANTES MICROBIOLÓGICOS

<i>Tratamiento domiciliario</i>		
- Desinfección química	- Filtros de medios granulares	- Tecnologías térmicas
- Filtros de membrana, de cerámica porosa o compuestos	- Desinfección solar	- Coagulación, precipitación y sedimentación
	- Lámparas de luz UV	- Tratamientos combinados

- **Desinfección química**

La aplicación de cloro dióxido de cloro, ozono y otros desinfectantes químicos en la dosis adecuada mantiene una concentración residual en el agua. La presencia del desinfectante en el agua reduce la contaminación.

Es más común el uso de cloro libre en la desinfección domiciliaria. Si el agua no tiene turbidez excesiva se recomienda aplicar 2 mg/l de cloro libre, y si el agua tiene turbidez, se recomienda emplear 4 mg/l. Esta dosis de cloro permite mantener 0,2 mg/l de desinfectante residual en el agua.

En el tratamiento con ozono se tiene que generar el gas en el lugar de aplicación. Esto se consigue electrolíticamente o por descarga de corona. Estos procesos requieren electricidad, así que no es habitual encontrar este método de desinfección en lugares que no cuentan con electricidad o que no es fiable. En cuanto al coste, no es rentable montar un sistema tan complejo y costoso para una aplicación tan pequeña.

- **Filtros de membrana, de cerámica porosa o compuestos**

Estos filtros tienen poros de tamaño concreto que permiten el paso de moléculas más pequeñas, capturando los microbios y las partículas suspendidas de mayor tamaño. Pueden ser filtros de carbón en bloque, de membrana, de fibra o de cerámica porosa. Los filtros pueden tener capacidad antimicrobiana o contar con una superficie con compuestos químicos que inactiva a los microbios capturados o que evita su multiplicación.

La mayoría de los tratamientos por filtro domiciliario funcionan por gravedad o emplean la presión del agua para hacerla pasar por el filtro. También se puede aplicar una diferencia de presión entre la entrada y la salida del filtro, como ocurre con la nanofiltración o la ósmosis inversa, pero estos métodos precisan de electricidad.

- **Filtros de medios granulares**

Son filtros que retienen a los microbios combinando la filtración, la sedimentación y la adsorción. Pueden ser filtros de arena o lechos rellenos con partículas pequeñas. Al igual que los filtros de membrana, pueden tener superficies antimicrobianas que inactivan los microbios capturados y que ayudan con su biodegradación.

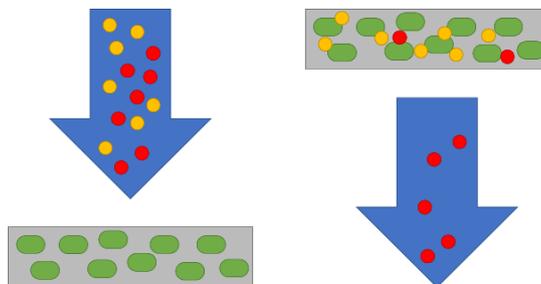


FIGURA 11 ADSORCIÓN

- **Desinfección solar**

Este método abarca a todas las tecnologías que desinfectan el agua con la radiación solar. Inactivan los microbios en recipientes oscuros usando el calor que genera la energía solar. La desinfección solar del agua (sistema SODIS) usa recipientes transparentes de plástico que permiten el paso de radiación UV. Alternativamente, se pueden utilizar bolsas de plástico o paneles como sistema de exposición a la radiación UV.

- **Lámparas de luz UV**

La luz UV de lámparas ultravioleta puede inactivar los microbios presentes en el agua. Estas lámparas suelen tener un arco de mercurio que produce una onda con propiedades germicidas de 254 nm de longitud. La aplicación de esta tecnología no es común en países en desarrollo ya que requiere electricidad, y la implementación y el mantenimiento son costosos.

- **Tecnologías térmicas**

Destruyen los organismos patógenos con calor generado por un combustible. El agua se somete a un proceso de pasteurización. Es decir, se eleva la temperatura hasta su ebullición, se retira la fuente de calor para que enfríe el agua y se somete a un postratamiento.

- **Coagulación, precipitación o sedimentación**

La coagulación o precipitación del agua es un proceso en el que un coagulante o precipitante se añade a un recipiente con agua y este hace precipitar a los microbios y las partículas suspendidas. Estos procesos mejoran la sedimentación del agua. Con la sedimentación, las partículas y microbios suspendidos en el agua o precipitados se eliminan con una fibra o tela. Este proceso suele llevarse a cabo en tres recipientes, uno detrás de otro. A medida que el agua circula por los recipientes, el agua se va decantando.

- **Tratamientos combinados**

Con los tratamientos combinados es posible implementar el principio de las barreras múltiples. Las tecnologías mencionadas se pueden combinar secuencial o simultáneamente, dando lugar a procesos más eficientes en la desinfección del agua. Algunos ejemplos de combinación son filtración más desinfección, coagulación más desinfección o dos o más filtraciones de membrana.

3.3 Monitoreo Microbiológico

El análisis de una muestra para determinar su inocuidad microbiana es un proceso muy costoso y largo que solo permite conocer la calidad del agua en un punto del sistema de abastecimiento y en un momento concreto del tiempo.

Los resultados de una muestra no pueden ser considerados representativos de todo el sistema de abastecimiento. Por tanto, es común evaluar la calidad del agua cruda (agua de la fuente) para determinar las metas de eficacia del tratamiento.

Conocida la calidad del agua de la fuente es posible diseñar los procesos de tratamiento requeridos para abastecer agua segura en el punto de consumo. De manera puntual se puede analizar el agua en el punto de consumo o tras el tratamiento para verificar la eficacia del tratamiento.

4 Aspectos Químicos

La presencia de sustancias químicas no supone un gran riesgo para el ser humano salvo si se trata de exposiciones prolongadas (años). Por eso se da prioridad a la inocuidad microbiana.

Si se usan desinfectantes químicos, es común encontrar en el agua subproductos de la desinfección (SPD). Si se usa cloro como desinfectante los SPD serán trihalometanos (THM) y ácidos haloacéticos (AHA). El objetivo será mantener los THM y los AHA en concentraciones menores a las de referencia.

4.1 Peligros Químicos en el Agua de Consumo Humano

Algunas sustancias químicas pueden ser dañinas para el ser humano si se encuentra expuesto a estas durante un tiempo prolongado. Sin embargo, en el agua se encuentran proporciones muy pequeñas de estas sustancias químicas peligrosas. Los contaminantes químicos también pueden influir en la aceptabilidad del agua, dotándola de un sabor o un color diferentes con concentraciones por debajo de las consideradas peligrosas.

En muchos países se conoce la presencia de contaminantes químicos en algunas fuentes. Esto permite implementar los sistemas de tratamiento adecuados. Sería mucho más peligroso encontrar contaminantes químicos en concentraciones peligrosas para el ser humano y no conocer el motivo de la presencia en el agua ni los efectos a largo plazo.

Los componentes químicos se pueden clasificar según su origen, lo que permitirá distinguir entre contaminantes que se pueden controlar o no (Ginebra: Organización Mundial de la Salud, 2018).

TABLA 9 FUENTES DE LOS COMPONENTES QUÍMICOS

Fuente de componentes químicos	Ejemplos de fuentes
Origen natural	Rocas, suelos y los efectos del marco geológico y el clima; masas de agua eutróficas (también influenciados por el vertido de aguas residuales y la escorrentía agrícola)
Fuentes industriales y núcleos habitados	Minería (industrias extractivas) e industrias de fabricación y procesamiento, aguas residuales (incluidos una serie de contaminantes que son motivo de preocupación), residuos sólidos, escorrentía urbana, fugas de combustibles
Actividades agropecuarias	Estiércoles, fertilizantes, prácticas de ganadería intensiva y plaguicidas
Tratamiento del agua o materiales en contacto con el agua de consumo humano	Coagulantes, SPD, materiales de tuberías
Plaguicidas añadidos al agua por motivos de salud	Larvicidas utilizados en el control de insectos vectores de enfermedades

4.2 Tratamiento de Contaminantes Químicos

En el sistema de abastecimiento de agua es una práctica común añadir sustancias químicas como los desinfectantes, conocidos como aditivos directos. Los aditivos indirectos surgen del contacto del agua con las tuberías o de la introducción de otros componentes químicos a través de los dispositivos conectados.

4.2.1 Eficacia del tratamiento de contaminantes químicos

La eficacia del tratamiento depende en gran medida de las concentraciones de los componentes químicos en el agua, del tipo de fuente, y de los procesos de tratamiento existentes. La turbidez y la materia orgánica natural dificultan el tratamiento del agua por lo que será conveniente filtrar el agua o usar algún método para reducir las partículas en el agua antes de someterla a tratamientos. Si no se puede alcanzar el valor de referencia, será necesario añadir etapas de tratamiento hasta alcanzar el límite aceptado. Si no es posible hacer esto, debe considerarse el uso de otras fuentes de agua.

La Tabla 10 muestra algunos procesos de tratamiento en orden creciente de complejidad de instalación y de inversión (Ginebra: Organización Mundial de la Salud, 2018).

TABLA 10 MÉTODOS DE TRATAMIENTO DE CONTAMINANTES QUÍMICOS

Categoría	Ejemplos de procesos de tratamiento
1	Cloración simple Filtración sencilla (rápida o lenta, en arena)
2	Precloración más filtración Aeración
3	Coagulación química Optimización de procesos para el control de los SPD
4	Tratamiento con carbón activado granular Intercambio de iones
5	Ozonización
6	Procesos de oxidación avanzados Tratamiento con membranas

4.2.2 Control de los subproductos de desinfección

La presencia de desinfectantes químicos siempre genera SPD, siendo los principales los trihalometanos (THM) y los ácidos haloacéticos (HAA). Los SPD pueden tener efectos adversos sobre la salud del ser humano por lo que es necesario controlar las concentraciones, manteniendo la concentración residual del desinfectante en el agua. Se pueden definir algunas estrategias para reducir los SPD.

- **Cambiar las condiciones del proceso**

Si se reduce el pH del agua, se reducirá la concentración de THM, pero incrementará la concentración de HAA, y viceversa. Por lo que se trata de encontrar el equilibrio perfecto. Otra opción es reducir la dosis de cloro, pero habrá que asegurarse de que la concentración residual es suficiente. En cuanto a otros SPD, no es posible eliminar el bromuro en agua no tratada y forma el bromato. Los filtros de carbono activado granular (CAG) pueden ayudar a eliminar el bromato.

- **Cambiar el desinfectante**

Se puede sustituir el cloro por monoclaramina o por dióxido de carbono. Sin embargo, el dióxido de carbono no tiene un efecto residual como el cloro, tan importante para reducir la contaminación microbiológica del agua en su distribución.

- **Emplear procesos de desinfección no químicos**

Alternativamente, la radiación UV y los filtros de membrana tienen efectos parecidos a la desinfección química. Ninguno de los procesos genera desinfección residual. A veces se combina con una dosis reducida de desinfectante, como el cloro o la monoclaramina, para mantener una pequeña concentración de desinfectante residual en el agua.

- **Eliminar los SPD antes de la distribución**

Es la estrategia menos práctica. Se pueden eliminar los SPD mediante el arrastre con aire, la luz UV y el carbón activado. Para garantizar la protección del agua de la contaminación microbiológica, es conveniente añadir desinfectante en una etapa posterior.

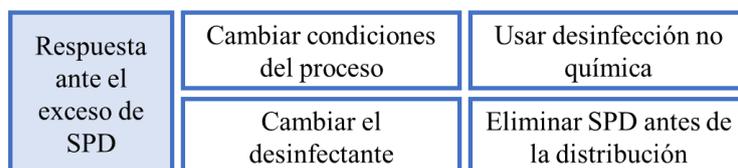


FIGURA 12 EJEMPLOS DE RESPUESTA ANTE EL EXCESO DE SPD

4.3 Valores de Referencia de Distintos Contaminantes Químicos

Los valores de referencia de los contaminantes químicos definen la concentración que no supone un riesgo en la salud si se consume a lo largo de toda la vida, en los grupos más vulnerables (niños y ancianos). Asimismo, se ha explicado que muchas sustancias químicas no suponen un peligro para la salud humana dada su baja concentración en las fuentes. Algunas sustancias químicas como el aluminio o el toxafeno carecen de un valor de referencia. Esto se debe a distintas razones, entre ellas:

- “Su presencia no es probable en el agua de consumo humano”.
- “Sus concentraciones en el agua de consumo humano son tan bajas, que no representan una preocupación para la salud”.
- “Los datos disponibles son insuficientes para permitir la derivación del valor de referencia basado en la salud”.

En el Anexo A se adjuntan dichas sustancias químicas y la razón por la que no tienen valor de referencia.

La Tabla 11 muestra los valores de referencia de las sustancias químicas que sí son peligrosas para la salud humana (Ginebra: Organización Mundial de la Salud, 2018).

TABLA 11 VALORES DE REFERENCIA DE LAS SUSTANCIAS QUÍMICAS

Sustancia química	Valor de referencia		Observaciones
	mg/l	µg/l	
Ácido edético	0.6	600	Aplicabe al ácido libre
Ácido nitrilotriacético	0.2	200	
Acrilamida	0.0005 ^a	0.5 ^a	
Alacloro	0.02 ^a	20 ^a	
Aldicarb	0.01	10	Aplicable al aldicarb sulfóxido y al aldicarb sulfona
Aldrín y dieldrín	0.000 03	0.03	Para la combinación de aldrín más dieldrín
Antimonio	0.02	20	
Arsénico	0.01 (A, T)	10 (A, T)	
Atrazina y sus metabolitos cloro-s-triazina	0.1	100	
Bario	1.3	1 300	
Benceno	0.01 ^a	10 ^a	
Benzo[a]pireno	0.0007 ^a	0.7 ^a	
Boro	2.4	2400	
Bromato	0.01 ^a (A, T)	10 ^a (A, T)	
Bromodiclorometano	0.06 ^a	60 ^a	
Bromoformo	0.1	100	
Cadmio	0.003	3	
Carbofurán	0.007	7	
Clorato	0.7 (D)	700 (D)	
Clordano	0.0002	0.2	
Cloro	5 (C)	5000 (C)	Para que la desinfección sea eficaz, debe haber una concentración de cloro residual libre ≥ 0.5 mg/l después de un tiempo de contacto de al menos 30 min a pH <8.0. El cloro residual se debe mantener en todo el sistema de distribución. En el punto de entrega, la concentración mínima del cloro residual debe ser 0.2 mg/l
Clorito	0.7 (D)	700 (D)	
Cloroformo	0.3	300	
Clorotolurón	0.03	30	
Clorpirifós	0.03	30	
Cloruro de vinilo	0.0003 ^a	0.3 ^a	
Cromo	0.05 (P)	50 (P)	Para el cromo total
Cobre	2	2000	El agua puede manchar la ropa y los aparatos sanitarios cuando el valor de referencia es menor

Sustancia química	Valor de referencia		Observaciones
	mg/l	µg/l	
Cianazina	0.0006	0.6	
2,4-D ^b	0.03	30	Aplicabe al ácido libre
2,4-DB ^c	0.09	90	
DDT ^d y sus metabolitos	0.001	1	
Dibromoacetoniitrilo	0.07	70	
Dibromoclorometano	0.1	100	
1,2-Dibromo-3-cloropropano	0.001 ^a	1 ^a	
1,2-Dibromoetano	0.0004 ^a (P)	0.4 ^a (P)	
Dicloroacetato	0.05 ^a (D)	50 ^a (D)	
Dicloroacetoniitrilo	0.02 (P)	20 (P)	
1,2-Diclorobenceno	1 (C)	1000 (C)	
1,4-Diclorobenceno	0.3 (C)	300 (C)	
1,2-Dicloroetano	0.03 ^a	30 ^a	
1,2-Dicloroetano	0.05	50	
Dicloroisocianurato de sodio	50 40	50 000 40 000	Como dicloroisocianurato de sodio
Diclorometano	0.02	20	Como ácido cianúrico
1,2-Dicloropropano	0.04 (P)	40 (P)	
1,3-Dicloropropeno	0.02 ^a	20 ^a	
Dicloroprop	0.1	100	
Di(2-etilhexil)ftalato	0.008	8	
Dimetoato	0.006	6	
1,4-Dioxano	0.05 ^a	50 ^a	Se deriva mediante el uso del abordaje de ingesta diaria tolerable, así como del modelo multietapa lineal
Endrín	0.0006	0.6	
Epiclorhidrina	0.0004 (P)	0.4 (P)	
Estireno	0.02 (C)	20 (C)	
Etilbenceno	0.3 (C)	300 (C)	
Fenoprop	0.009	9	
Fluoruro	1.5	1500	Al establecer normas nacionales se debe tener en cuenta el volumen de agua consumida y la ingesta de otras fuentes
Hexaclorobutadieno	0.0006	0.6	
Hidroxiatrazina	0.2	200	Metabolitos de la atrazina
Isoproturón	0.009	9	
Lindano	0.002	2	
Mecoprop	0.01	10	
Mercurio	0.006	6	Para el mercurio inorgánico
Metoxicloro	0.02	20	
Metolacoloro	0.01	10	
Microcistina-LR	0.001 (P)	1 (P)	Para microcistina-LR total (la libre más la intracelular)
Molinato	0.006	6	
Monocloramina	3	3000	

Sustancia química	Valor de referencia		Observaciones
	mg/l	µg/l	
Monocloroacetato	0.02	20	
Níquel	0.07	70	
Nitrato (como NO ₃ ⁻)	50	50 000	Basado en efectos de corto plazo, pero es protector contra los efectos de largo plazo
Nitrito (como NO ₂ ⁻)	3	3000	Basado en efectos de corto plazo, pero es protector contra los efectos de largo plazo
N-Nitrosodimetilamina	0.0001	0.1	
Pendimetalina	0.02	20	
Pentaclorofenol	0.009 ^a (P)	9 ^a (P)	
Perclorato	0.07	70	
Plomo	0.01 (A, T)	10 (A, T)	
Selenio	0.04 (P)	40 (P)	
Simazina	0.002	2	
2,4,5-T ^e	0.009	9	
Terbutilazina	0.007	7	
Tetracloroetano	0.04	40	
Tricloroacetato	0.2	200	
Tricloroetano	0.02 (P)	20 (P)	
2,4,6-Triclorofenol	0.2 ^a (C)	200 ^a (C)	
Trifluralina	0.02	20	
Trihalometanos			La suma de los cocientes de la concentración de cada uno y sus respectivos valores de referencia no debe ser mayor de 1
Uranio	0.30 (P)	30 (P)	Solo se abordan los aspectos químicos del uranio
Xilenos	0.5 (C)	500 (C)	

A, valor de referencia provisional, porque el valor de referencia calculado es menor que el nivel de cuantificación alcanzable; C, las concentraciones de la sustancia iguales o menores que el valor de referencia basado en efectos sobre la salud pueden afectar al aspecto, sabor u olor del agua y dar lugar a reclamos de los consumidores; D, valor de referencia provisional porque una desinfección eficaz puede exceder el valor de la referencia; P, valor de referencia provisional, debido a las incertidumbres en la base de datos de salud; T, valor de referencia provisional, porque el valor de referencia calculado es menor que el nivel que es posible alcanzar mediante métodos de tratamiento prácticos, protección de la fuente, etc.

^aEl valor de referencia de las sustancias que se consideran cancerígenas es la concentración en el agua de consumo humano asociada a un valor máximo del riesgo adicional vitalicio de cáncer de 10^{-5} (un caso adicional de cáncer por cada 100 000 personas que ingieren agua de consumo humano con la sustancia del valor de referencia durante 70 años). Las concentraciones asociadas con valores máximos del riesgo adicional vitalicio de cáncer de 10^{-4} y 10^{-6} pueden calcularse multiplicando y dividiendo, respectivamente, el valor de referencia por 10.

^bÁcido 2,4-diclorofenoxiacético.

^cÁcido 4-(2,4-diclorofenoxi)butírico.

^dDiclorodifeniltricloroetano.

^eÁcido 2,4,5-triclorofenoxiacético.

5 Aspectos Radiológicos

Es posible encontrar radionúclidos en el agua, y esto supone un riesgo para el ser humano. Al igual que en los contaminantes químicos, los riesgos asociados a la contaminación radiológica son muy bajos en comparación con la contaminación microbiológica. Asimismo, el ser humano está expuesto a otras fuentes de radiación con dosis mucho mayores, por lo que la ingesta de radionúclidos por contaminación en el agua no es tan preocupante.

Las causas de encontrar radionúclidos son diversas. Los radionúclidos derivados de la actividad humana se pueden controlar mejor que los naturales, cuyas dosis suelen ser mayores. Se suele abordar el riesgo de contaminación radiológica desde un punto de vista **preventivo**.

El límite de la dosis que puede recibir un ser humano está en 0,1 mSv/año. Si se supera este valor, es necesario investigar cuáles son las distintas fuentes de radiación e implementar medidas para reducir la dosis.

Si se descubre que la fuente tiene concentraciones de radionúclidos excesivas, las estrategias que se pueden implementar son cambiar de fuente de agua, mezclar el agua contaminada con agua de otra fuente o someter el agua a tratamientos adicionales.

Las plantas de tratamiento para eliminar los radionúclidos emplean distintos procesos en cadena. Al igual que en el tratamiento microbiológico, las plantas se componen de los procesos de coagulación, la sedimentación y la filtración en arena. Este método puede eliminar los radionúclidos en suspensión por completo.

La Tabla 12 muestra la capacidad de remoción de los radionúclidos de distintos tratamientos de agua (Ginebra: Organización Mundial de la Salud, 2018).

TABLA 12 TRATAMIENTOS DEL AGUA PARA REDUCIR LOS RADIONÚCLIDOS

Elemento	Coagulación	Filtración de arena	Carbón activado	Ablandamiento por precipitación	Intercambio iónico	Ósmosis inversa
Estroncio	XX	XX	X	XXXX	XXX	XXXX
Yodo	XX	XX	XXX	X	XXX	XXXX
Cesio	XX	XX	X	XX	XXX	XXXX
Radio	XX	XXX	XX	XXXX	XXXX	XXXX
Uranio	XXXX	X	XX	XXXX	XXXX	XXXX
Plutonio	XXXX	XX	XXX	X	XXXX	XXXX
Americio	XXXX	XX	XXX	X	XXXX	XXXX
Tritio	La remoción no es posible					

^a x = 0-10% de remoción; xx = 10-40% de remoción; xxx = 40-70% de remoción; xxxx = > 70% de remoción.

6 Aspectos Relacionados con la Aceptabilidad

La aceptabilidad se relaciona con el **aspecto**, el **sabor** y el **olor** del agua. Además de garantizar la inocuidad microbiana, se pone especial interés en la aceptabilidad del agua. El ser humano usa sus sentidos para evaluar la calidad del agua, así que, si esta presenta algún color, olor o sabor raro, buscará otras fuentes que a lo mejor no son tan seguras. Algunas sustancias pueden afectar la aceptabilidad del agua, aunque su concentración no sea dañina para el ser humano. La tolerancia a estas sustancias que modifican el sabor, el olor y el color es diferente en cada país y comunidad, y está relacionada con las costumbres de la comunidad.

El sabor y el olor del agua puede desarrollarse por la presencia de contaminantes químicos naturales orgánicos o inorgánicos y sustancias químicas derivadas del tratamiento, y por el almacenamiento y la proliferación microbiana en las tuberías y depósitos.

TABLA 13 CONTAMINANTES DEL AGUA EN CUANTO A SU ASPECTO

<i>Origen de los contaminantes</i>	<i>Contaminantes</i>
Biológico	Hongos, cianobacterias, algas, animales invertebrados...
Químico	Aluminio, amoniaco, zinc, cloraminas, cloro, cobre, estireno, hierro, manganeso, sodio, sulfato...

El agua no debería de tener color. Si presenta algún color, esto delata la existencia de materia orgánica, hierro u otro metal, procedentes de la corrosión de las tuberías. Si se juntan el calcio y el magnesio, la dureza del agua incrementará. El ser humano tolera entre 100 y 300 mg/l de dureza del agua.

El pH no tiene un efecto sobre el consumidor, pero sí influye en la calidad del agua. Un pH menor de 7 es corrosivo y se necesita que sea menor de 8 cuando se usa cloro como desinfectante. Por tanto, el pH estará entre **6,5** y **8** para que la calidad del agua sea óptima.

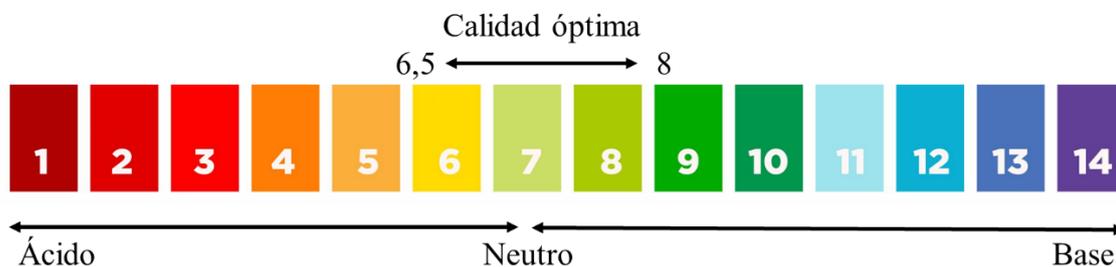


FIGURA 13 PH DEL AGUA

La temperatura también influye en la percepción de la calidad del agua. El sabor del agua fría es mejor y la alta temperatura potencia los problemas de corrosión, sabor y color, y contribuye a la proliferación de los microorganismos.

La mejor estrategia es asegurarse de que los procesos de tratamiento ya instalados son eficaces, como la coagulación, la sedimentación, la filtración y la cloración. Si esto no es suficiente, se pueden implementar tratamientos adicionales como la aeración, la ozonización y el carbón activado, que son técnicas capaces de eliminar sustancias químicas orgánicas e inorgánicas. Los sabores derivados de la desinfección se controlan modificando la concentración de desinfectante en el agua. Finalmente, la dureza puede disminuir con el intercambio iónico o la precipitación.

TABLA 14 PROCESOS DE TRATAMIENTO DEL ASPECTO

<i>Contaminante</i>	<i>Tratamiento</i>
Manganeso	Cloración más filtración
Sulfuro de hidrógeno	Aeración, carbón activado, oxidación o filtración
Amoniaco	Nitrificación biológica

7 Sistemas de Tratamiento

En los anteriores apartados se han explicado algunos métodos de tratamiento del agua que eliminan agentes patógenos o que reducen los contaminantes químicos. En este apartado se describen estos sistemas en profundidad con el objetivo de entender qué métodos son adecuados para combatir los riesgos microbiológicos y químicos.

Los sistemas de agua pueden implementarse con distintos objetivos. En el tratamiento de agentes patógenos se puede tener tratamiento central o domiciliario. En el caso de los contaminantes químicos se distinguen otros procesos.

En el tratamiento el agua es sometida a procesos fisicoquímicos para hacerla apta para consumo humano. Estos tratamientos se pueden clasificar según distintas etapas de aplicación, mostradas en la Figura 14.



FIGURA 14 FASES DE LA POTABILIZACIÓN DEL AGUA

7.1 Cloración

La cloración consiste en añadir cloro al agua con el fin de desinfectarla de contaminantes microbiológicos. El cloro que se añade puede tener distintas formas:

- Gas de cloro licuado: está comprimido en un recipiente a presión. Un equipo llamado clorador extrae el gas del recipiente y añade dosis controladas en el agua.
- Solución de hipoclorito de sodio: se puede dosificar usando una bomba eléctrica de desplazamiento positivo o usando la gravedad.
- Gránulos de hipoclorito de calcio: en primer lugar, se disuelven con agua y después se añaden al caudal principal.
- Generadores de cloro in situ.

En todas estas opciones, el cloro se disuelve formando ácido hipocloroso (HClO) y el ion hipoclorito (ClO⁻).



Se pueden distinguir diferentes técnicas de cloración:

TABLA 15 TÉCNICAS DE CLORACIÓN

<i>Cloración a punto de quiebre</i>	La dosis de cloro añadida oxida todo el nitrógeno de amonio del agua y se mantiene una concentración del cloro residual en el agua que evita la recontaminación.
<i>Supercloración o decloración</i>	Se añade una dosis de cloro grande que reacciona químicamente para lograr una desinfección rápida, y se produce la reducción del cloro residual. El exceso de cloro se elimina para no cambiar el sabor del agua. Este método es útil cuando existe una variación en la carga microbiana o cuando el tiempo en el depósito no es suficiente.
<i>Cloración marginal</i>	En aguas de alta calidad, se añade una dosis de cloro para mantener una concentración de cloro residual.

El objetivo de la cloración es la desinfección microbiana. Se deja actuar durante 30 minutos y además se mantiene una concentración residual en el agua después de su tratamiento y hasta el punto de consumo. El cloro puede oxidar también, lo que ayuda en la eliminación de componentes químicos. La única desventaja del cloro es que reacciona con la materia orgánica natural formando SPD.

Este método de tratamiento se puede usar para tratar distintos volúmenes de agua. A mayor volumen de agua, mayor será la dosis necesaria de cloro para mantener una concentración de cloro residual de 0,2 a 0,5 mg/l (WikiWater).

TABLA 16 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LA CLORACIÓN

<i>Ventajas de la cloración</i>	<i>Desventajas de la cloración</i>
<ul style="list-style-type: none"> - Es rápido - Es fácil de instalar e incluir en el proceso de desinfección - Es poco costoso - Se puede usar individual o colectivamente - La desinfección de microorganismos es eficaz durante días 	<ul style="list-style-type: none"> - El cloro reacciona con el agua dando lugar a los subproductos de desinfección que en ocasiones pueden plantear problemas para el ser humano - Las soluciones desinfectantes no siempre están disponibles - Es difícil determinar la dosis necesaria - A mayor volumen de agua, la desinfección es menos eficaz

7.2 Ozonización

El ozono purifica y potabiliza el agua basándose en la capacidad de oxidación del ozono, que elimina los microorganismos presentes y algunas sustancias químicas. Se puede usar como el desinfectante primario, sustituyendo al cloro.

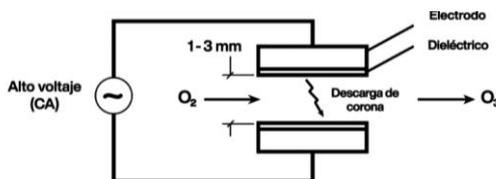


FIGURA 15 ESQUEMA DE OBTENCIÓN DEL OZONO

Para obtener gas de ozono (O_3), se hace pasar oxígeno o aire seco por un campo eléctrico. El campo eléctrico es de alta tensión y genera aire enriquecido en ozono, que es dosificado en el agua a través de difusores porosos. Los difusores porosos se sitúan en la base de unos tanques cuya profundidad es de 5 metros, con un tiempo de contacto de 10 a 20 minutos.

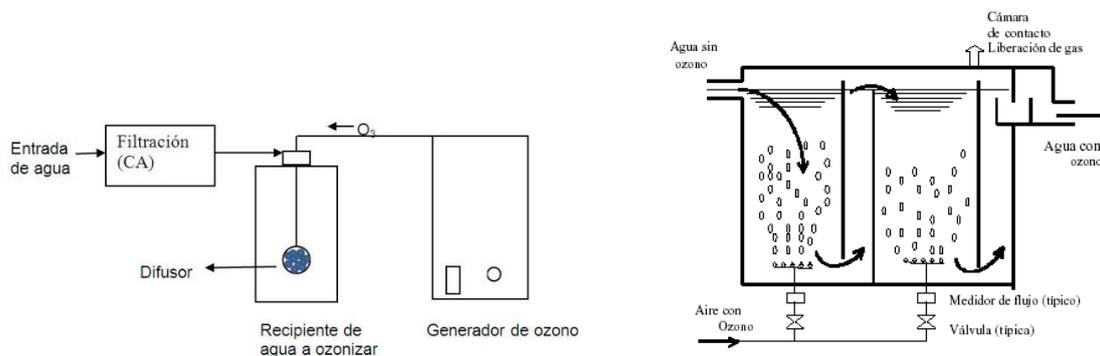


FIGURA 16 ESQUEMAS DE LA INSTALACIÓN DE OZONIZACIÓN

El aire que sale de la ozonización contiene ozono y se hace pasar por una etapa de liberación y destrucción del ozono, tras la cual sale a la atmósfera.

Después de la ozonización es conveniente mantener una concentración de 0,5 mg/l en el agua para combatir a los plaguicidas y compuestos químicos orgánicos. Para ello se dosifica entre 2 a 5 mg/l de ozono en función de la calidad del agua. El agua que no ha sido tratada requerirá una dosis mayor de ozono para obtener la concentración residual.

El ozono potencia la degradación de sustancias orgánicas naturales al reaccionar con ellas. Por eso se suele usar con un filtro biológico o de carbón activado granular (CAG) que elimina los compuestos biodegradables, y una dosis de cloro para conseguir el efecto residual.

El ozono puede degradar sustancias inorgánicas que dan sabor (hierro, cobre, manganeso) y color (ion sulfhídrico) al agua, compuestos orgánicos (algas), contaminantes industriales (plaguicidas, pesticidas) y subproductos de la desinfección del cloro.

Al igual que en la cloración, este método puede tratar diferentes volúmenes de agua, ya que la dosis puede variar.

TABLA 17 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LA OZONIZACIÓN

<i>Ventajas de la ozonización</i>	<i>Desventajas de la ozonización</i>
<ul style="list-style-type: none"> - No tiene subproductos derivados de la desinfección - Eficaz contra sustancias inorgánicas, sustancias orgánicas y pesticidas 	<ul style="list-style-type: none"> - Se necesita electricidad para crear el ozono - Necesita un tiempo de contacto de 10 a 20 minutos - No mantiene una concentración residual elevada

7.3 Desinfección por Ebullición

La ebullición del agua es útil para reducir o eliminar los agentes patógenos como quistes, virus o esporas. Debe llevarse a cabo durante al menos 5 minutos, siendo recomendable mantener el agua en ebullición durante 20 minutos. Este proceso conlleva un consumo de energía elevado y, como consecuencia de la ebullición, el aire sale del agua, modificando su sabor. Para resolver este problema, se recomienda remover el agua en el recipiente con el fin de oxigenarla. El caudal de salida está limitado al tamaño del recipiente por lo que este proceso se usa con fines específicos como en el hogar, en hospitales y en aulas de colegios.

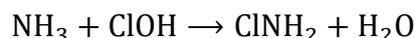
TABLA 18 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LA EBULLICIÓN

<i>Ventajas de la ebullición</i>	<i>Desventajas de la ebullición</i>
<ul style="list-style-type: none"> - No necesita una instalación compleja - Puede ser implementada en cualquier situación - Eficaz contra contaminantes patógenos 	<ul style="list-style-type: none"> - El volumen de agua tratado es muy limitado - Requiere energía, ya sea eléctrica o quemando madera - No elimina la turbidez ni los contaminantes químicos

7.4 Otros Métodos de Desinfección

Además de los métodos mencionados, se pueden emplear otros desinfectantes en aplicaciones de menor escala, como en el tratamiento domiciliario.

Cuando el cloro reacciona con el amoníaco en medio acuoso, esto da lugar a cloraminas (monocloramina, dicloramina y tricloramina). La única que se puede utilizar como desinfectante es la **monocloramina**. La monocloramina no es tan eficaz como el cloro libre, pero se emplea como desinfectante residual secundario por su persistencia y por no formar subproductos de desinfección.



Ya se comentó que añadir cloro en el agua genera subproductos de desinfección que pueden ser dañinos para la salud del ser humano. Otra alternativa consiste en añadir **dióxido de cloro** en el agua. Este se obtiene de la reacción de cloro en gas o en disolución acuosa con una disolución acuosa de clorito de sodio. Asimismo, el dióxido de cloro se descompone formando clorito y clorato, que pueden considerarse subproductos de desinfección, y que en altas concentraciones son perjudiciales para la salud.



En cuanto a su **capacidad antibacteriana**, los desinfectantes se pueden ordenar de la siguiente manera:

Ozono > Dióxido de cloro > Cloro libre > Cloraminas

En cambio, si se analiza la **estabilidad** y la **persistencia** del desinfectante en la red de distribución, el orden de los desinfectantes es:

Cloraminas > Dióxido de cloro > Cloro libre > Ozono

Finalmente, existen técnicas de desinfección a menor escala cuyo uso es común en el punto de consumo en los hogares. El **yodo** y el **bromo** pueden usarse en situaciones que tengan poca duración, como viajes. Otros productos químicos, como algunas formas de **plata**, pueden ser usados para desinfectar, pero su uso no está generalizado y no se conoce la eficacia de dichos productos para eliminar los agentes patógenos, la formación de subproductos y los riesgos a largo plazo.

7.5 Filtros Rápidos por Gravedad

Se trata de tanques rectangulares con plantas menores de 100 m², abiertos y con una profundidad de 0,6 a 2 metros. Estos tanques están llenos de **arena de sílice** a través de la cual fluye el agua. Los sólidos quedan capturados en las capas menos profundas del lecho y unas boquillas en la base del tanque permiten la recogida del agua tratada. Como se acumulan sólidos en las capas superiores del lecho, es necesario limpiarlas. Esto se puede conseguir haciendo pasar agua a contracorriente o con arrastre de aire.

Es común encontrar filtros con más de un material filtrante. Se escogen materiales cuyo tamaño vaya disminuyendo según aumenta la profundidad del filtro, y con la densidad correcta para poder separar las capas. En los filtros duales se suele encontrar **antracita** y **arena**, y en los filtros multimedia se añade una capa de granate.



FIGURA 17 ESQUEMA DE UN FILTRO RÁPIDO POR GRAVEDAD Y FILTRO

El uso de **filtros multimedia** incrementa la eficiencia para una misma profundidad ya que aprovechan mejor las propiedades de retención de los distintos materiales.

Estos filtros son útiles para la eliminación de los flóculos de aguas que han pasado por un proceso de coagulación, para la reducción de la turbidez del agua y para la disminución del manganeso y del hierro oxidado.

En la literatura sobre estos filtros no se especifica una velocidad de tratamiento, y se puede considerar que el caudal de salida está limitado por el volumen del depósito o por la capacidad del grifo de salida de agua tratada. Un grifo suele tener una capacidad de 6 litros por minuto (iVIGA, 2021).

TABLA 19 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS FILTROS RÁPIDOS POR GRAVEDAD

<i>Ventajas de los filtros rápidos por gravedad</i>	<i>Desventajas de los filtros rápidos por gravedad</i>
<ul style="list-style-type: none"> - No consumen electricidad - Reducen la turbidez del agua - El mantenimiento es sencillo 	<ul style="list-style-type: none"> - El volumen de agua tratada está limitado por el tamaño del depósito - Necesitan ser limpiados con frecuencia. La frecuencia es función de la turbidez del agua cruda - No elimina o reduce los contaminantes microbiológicos ni químicos

7.6 Filtros Gruesos

Los filtros gruesos están compuestos de **grava gruesa o piedras trituradas** y se emplean como prefiltros por su capacidad de reducir la turbidez del agua cuando es alta (superior a 50 unidades nefelométricas). Pueden ser horizontales o verticales. En filtros horizontales, la longitud puede llegar a ser 10 metros (Organización Panamericana de la Salud, 2005). El agua se filtra por la agitación de las partículas al chocar con la grava y también aprovecha el mecanismo de la sedimentación al circular por el filtro. Es necesario limpiarlo con frecuencia para deshacerse de las impurezas que se han adherido al filtro.

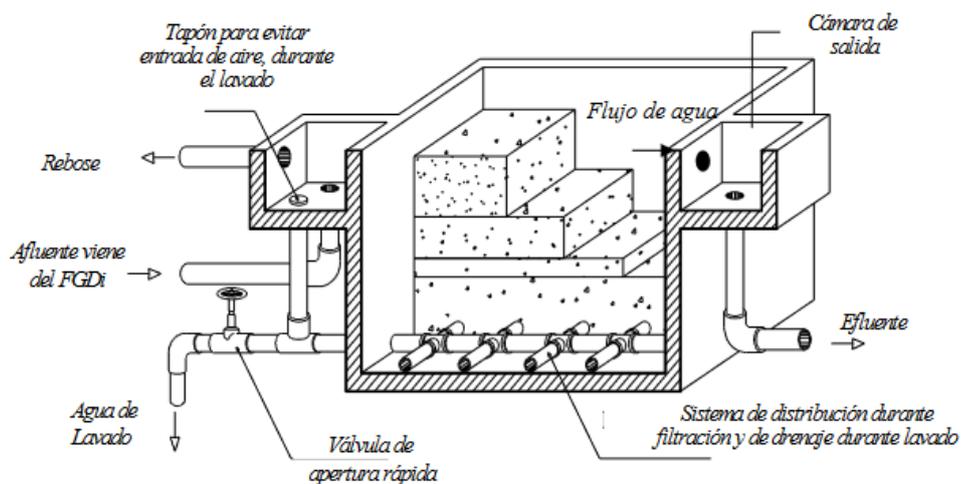


FIGURA 18 ESQUEMA DE UN FILTRO GRUESO

En cuanto al caudal de salida, se pueden encontrar distintos valores en función del diseño. Se pueden obtener valores de 2 litros por minuto (Organización Panamericana de la Salud, 2005).

TABLA 20 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS FILTROS GRUESOS

<i>Ventajas de los filtros gruesos</i>	<i>Desventajas de los filtros gruesos</i>
<ul style="list-style-type: none"> - Reducen la turbidez con alta eficacia - La dificultad de instalación es baja 	<ul style="list-style-type: none"> - Son lentos - Es necesario limpiarlos con frecuencia - No son efectivos contra contaminantes microbiológicos o químicos

7.7 Filtros a Presión

La filtración se lleva a cabo en una cámara cilíndrica a presión, aprovechando la bomba de suministro. Las carcasas pueden estar hechas de distintos materiales como plástico reforzado con fibra de vidrio o con acero. Tiene un comportamiento similar al de los filtros rápidos por gravedad y los filtros gruesos, por lo que también es necesario limpiarlos.

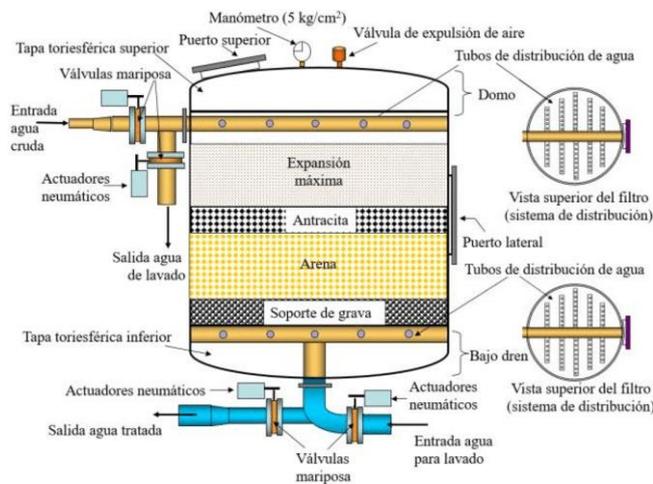


FIGURA 19 ESQUEMA DEL FILTRO A PRESIÓN

El caudal de salida está limitado por el volumen del recipiente y por el grifo de salida de agua tratada.

TABLA 21 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS FILTROS A PRESIÓN

<i>Ventajas de los filtros a presión</i>	<i>Desventajas de los filtros a presión</i>
<ul style="list-style-type: none"> - Es muy efectivo para reducir la turbidez 	<ul style="list-style-type: none"> - Necesita electricidad para funcionar - La instalación es compleja - Los equipos son sofisticados - No es efectivo contra contaminantes microbiológicos y químicos

7.8 Filtros Lentos de Arena

La filtración lenta por arena emplea el mismo mecanismo de purificación encontrado en la naturaleza: el agua de la lluvia atraviesa los estratos de la corteza terrestre hasta acabar en los acuíferos.

Los filtros lentos de arena se basan en la filtración biológica del agua cuando esta circula a través de un manto poroso de arena. A su paso por el manto, la suciedad del agua queda retenida en la arena, consiguiendo su degradación química y biológica. Se forma una capa biológica llamada *schmutzdecke* sobre la superficie del filtro que elimina los microorganismos. Está compuesta por algas y bacterias entre otros organismos orgánicos. Estos organismos atrapan, digieren y degradan la materia orgánica presente en el agua y son capaces de remover parte de su color. Es importante que el *schmutzdecke* esté húmedo en todo momento para que los organismos no mueran.

El diseño de estos filtros es parecido a los filtros rápidos por gravedad. En un tanque rectangular de 0,5 a 1,5 metros de profundidad se añade arena (0,15 a 0,3 mm de tamaño) a través de la cual fluye el agua. El agua cruda ingresa en el depósito y permanece en él entre tres y doce horas. El agua sale del tanque por unos drenajes situados en la base. La primera

capa se tiene que cambiar con frecuencia porque es donde se acumulan las partículas y la suciedad. En función de la turbidez será necesario llevar a cabo el mantenimiento del depósito con mayor o menor frecuencia.

Este filtro se suele usar con agua que ha sido filtrada o que tiene poca turbidez. Su principal función es eliminar microorganismos, aunque también puede eliminar algas y compuestos orgánicos como plaguicidas y el amoníaco.

Tiene la ventaja de que no requiere un mantenimiento complicado ni un operador especializado por lo que suele ser el método más usado en comunidades con pocos recursos (Col, 2017). El caudal de salida está en torno a 0,02 litros por minuto (Rivas Arrieta, y otros, 2017).

TABLA 22 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS FILTROS LENTOS DE ARENA

<i>Ventajas de los filtros lentos de arena</i>	<i>Desventajas de los filtros lentos de arena</i>
<ul style="list-style-type: none"> - No requiere un mantenimiento complicado - Alta tasa de eliminación de agentes patógenos - Eliminación de la turbidez, el olor y el color - Simple de construir - No requiere energía para funcionar ya que emplea la gravedad - Vida útil larga (superior a 10 años) - No requiere la adición de productos químicos - Puede usar recursos locales para construir el filtro 	<ul style="list-style-type: none"> - La capa <i>schmutzdecke</i> tarda entre 20 y 30 días en alcanzar la madurez - La tasa de inactivación de los virus es baja - Si la turbidez es alta (mayor de 30 NTU), el filtro quedará obstruido y será necesario limpiarlo - Debe ser usado continuamente - No elimina compuestos disueltos en el agua - La eficiencia del filtro disminuye si la temperatura es baja

7.9 Filtros Rápidos de Arena

La filtración rápida de arena se utiliza para eliminar partículas de mayor tamaño suspendidas en el agua. Al contrario que la filtración lenta de arena, la rápida es un proceso únicamente físico. Solamente retiene las partículas, por lo que se suele combinar con un proceso de floculación y coagulación, y otro de desinfección.

La construcción y gestión de estos filtros es compleja y costosa. Deben contar con bombas para mover el agua, lavado a contracorriente para limpiar el filtro y control del flujo. Por todo esto, es común encontrar estos filtros en países desarrollados donde el suministro de energía es continuo, el personal está formado, y la superficie disponible para tratar grandes volúmenes de agua es limitada.

Estos filtros están formados por la cámara de filtrado, la arena como medio filtrante, el soporte del medio filtrante, un sistema de drenaje y los canales para el lavado. El material empleado en la cámara de filtrado suele ser hormigón armado. El medio filtrante consiste en arena y grava de 1,5 a 2 metros altura. El agua sin tratar entra por la parte superior y circula a través de la arena y la grava, que va reteniendo los sólidos en suspensión. Se debe mantener un nivel de agua de 1,5 a 2 metros por encima de la arena para hacer que el agua fluya (Bruni, y otros, 2018).

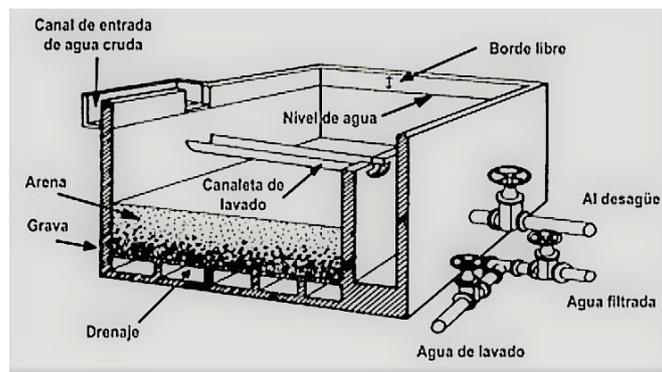


FIGURA 20 FILTRO RÁPIDO DE ARENA

Los sólidos en suspensión quedan retenidos en el medio filtrante gracias a la adsorción de las partículas (fuerzas van der Waals) y al esfuerzo mecánico (es decir, cuando se quedan atascadas). Pasado un tiempo, la pérdida de carga aumenta como resultado de la obstrucción del filtro. Por eso es necesario limpiar el filtro con frecuencia a través del lavado a contracorriente.

TABLA 23 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS FILTROS RÁPIDOS DE ARENA

<i>Ventajas de los filtros rápidos de arena</i>	<i>Desventajas de los filtros rápidos de arena</i>
<ul style="list-style-type: none"> - Alta eficacia en la eliminación de turbidez (alcanza < 0,1 a 1 NTU) - La velocidad de filtración es alta (4000 a 12000 litros por hora por metro cuadrado) - No necesita tratamiento previo - Necesita una superficie pequeña - El lavado a contracorriente no consume demasiado tiempo 	<ul style="list-style-type: none"> - No elimina microorganismos - Requiere una inversión alta - Necesita ser limpiado frecuentemente (después de 24 a 72 horas) - Consume mucha energía - El personal debe ser especializado

7.10 Tanque de Almacenamiento

El tanque de almacenamiento se emplea para almacenar agua antes de la distribución a toda la población y para mantener una presión uniforme del sistema de distribución (Roberti Pérez, 2018). Para ello, almacena agua cuando la demanda es baja (por la noche). También pueden ser empleados en emergencias y como almacenamiento temporal de agua tratada. No

hay un tamaño único ya que depende de las necesidades de la población y del dinero disponible.

Estos tanques se suelen situar a una altura superior a la población para que el agua emplee la gravedad para circular por las tuberías. El material de construcción puede ser hormigón, hormigón armado, fibra de vidrio, acero y polietileno. Estos filtros están compuestos por un depósito de almacenamiento y una caseta de válvulas.

Los tanques empleados en poblaciones rurales suelen ser apoyados y de forma cuadrada. La capacidad del tanque debe ser diseñada para cubrir la demanda teniendo en cuenta sus variaciones, las posibles emergencias y las interrupciones del suministro. La ubicación debe estar a la altura adecuada para garantizar la presión mínima en los puntos de consumo más elevados.

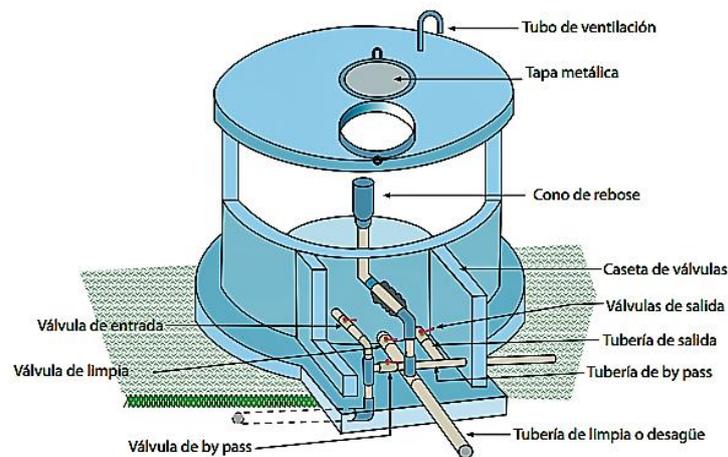


FIGURA 21 TANQUE DE ALMACENAMIENTO

Es necesario limpiar el tanque para evitar el crecimiento microbiano, la recontaminación o la acumulación de sedimentos en el fondo del tanque. Asimismo, es necesario mantener una concentración de cloro residual en el agua. Es común que el agua se purifique antes de ser distribuida.

TABLA 24 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS TANQUES DE ALMACENAMIENTO

<i>Ventajas de los tanques de almacenamiento</i>	<i>Desventajas de los tanques de almacenamiento</i>
<ul style="list-style-type: none"> - Puede abastecer agua en los momentos con mayor demanda - Abastece agua en caso de una emergencia - Mantiene la presión uniforme en el sistema de distribución 	<ul style="list-style-type: none"> - Requiere un alto mantenimiento que conlleva la limpieza e inspección del tanque - El agua debe ser analizada con frecuencia y tratada antes de ser consumida - Es necesario personal cualificado para diseñar y operar el tanque

7.11 Filtración de Ribera

Es un proceso que aprovecha el lecho del río para filtrar el agua. Como se muestra en la Figura 22, se coloca un pozo de bombeo junto a la fuente de agua superficial. Los sedimentos de la orilla actúan como filtro, reduciendo las concentraciones de agentes patógenos y contaminantes orgánicos. Puede reducir la turbidez, el color, la materia orgánica, las bacterias, virus y protozoos, los metales pesados, contaminantes químicos como pesticidas o herbicidas, y el nitrato. El pozo de bombeo puede ser vertical u horizontal.

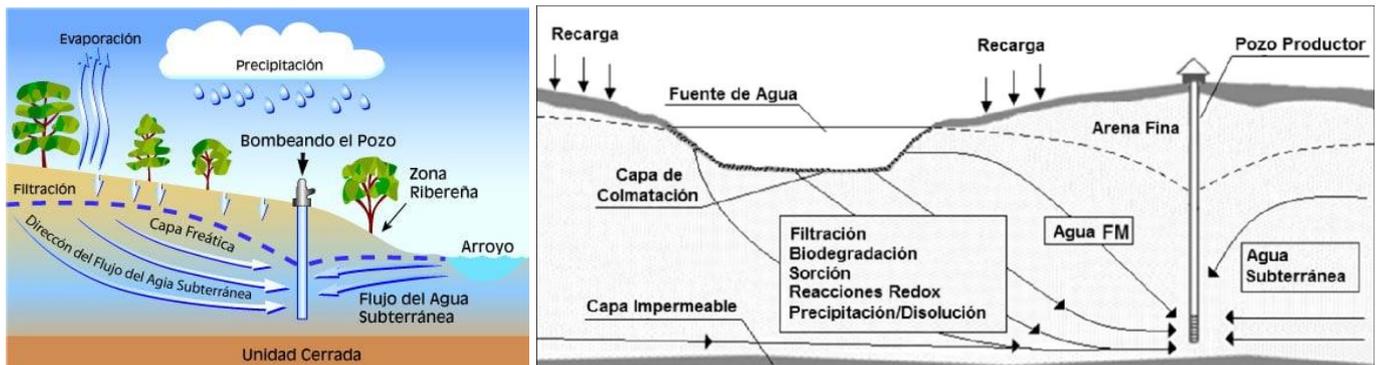


FIGURA 22 ESQUEMA DE LA FILTRACIÓN POR RIBERA

La reducción de los contaminantes ocurre por procesos de biodegradación. El primero ocurre en la capa de colmatación que es la biopelícula que se forma en el fondo del río, y el segundo se da con la circulación del agua desde la fuente hasta el pozo.

Este método de filtración reduce las partículas, microorganismos y compuestos orgánicos en el agua, dotándola de una calidad uniforme, para ser tratada más adelante. La geología tiene gran influencia en la operación de este filtro. Puede ser obstruido fácilmente, reduciendo la eficacia del filtro por la pérdida de carga. La situación del pozo es determinante para el correcto desempeño del filtro por lo que es necesario estudiar las condiciones del suelo, la calidad del agua superficial y la geología.

El caudal de salida del pozo varía según el diseño. Son procesos lentos.

TABLA 25 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS FILTROS A PRESIÓN

<i>Ventajas de los filtros a presión</i>	<i>Desventajas de los filtros a presión</i>
<ul style="list-style-type: none"> - Reduce los contaminantes microbiológicos - Reduce la turbidez 	<ul style="list-style-type: none"> - La dificultad de instalación es alta - Los operarios deben estar cualificados - El agua debe ser tratada posteriormente - El pozo puede ser obstruido fácilmente - Son procesos lentos

7.12 Aireación

El objetivo de estos procesos es reducir los gases como el dióxido de carbono, eliminar los compuestos volátiles que modifican el aspecto del agua (metano, sulfuro de hidrógeno), y oxidar los minerales que se encuentran en el agua ya que forman precipitados al entrar en contacto con el aire. En este método de tratamiento el agua incrementa su contenido en oxígeno en plantas especializadas en las que hay gran transferencia de masa entre las fases líquida y gaseosa. La aireación puede ser en cascada o por difusión de aire comprimido. Los aireadores de difusión se emplean en la oxidación o en la precipitación del manganeso o del hierro.

La aireación en cascada es la técnica de aireación más extendida ya que permite un mayor contacto entre el agua y el aire. El agua circula en una película delgada y una corriente de viento sopla contra ella.

El diseño de la torre de aireación depende de las propiedades del agua como la volatilidad, y la concentración de los compuestos. Es importante tener en cuenta que un exceso de oxígeno en el agua puede potenciar la corrosión de las instalaciones.



FIGURA 23 SISTEMA DE AIREACIÓN

Suele formar parte de una cadena de tratamiento por lo que el caudal de salida dependerá del resto de procesos.

TABLA 26 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LA AIREACIÓN

<i>Ventajas de la aireación</i>	<i>Desventajas de la aireación</i>
<ul style="list-style-type: none"> - Elimina compuestos volátiles en el agua - Es fácil de instalar 	<ul style="list-style-type: none"> - No es eficaz contra los contaminantes microbiológicos ni la turbidez - Requiere mantenimiento frecuente

7.13 Coagulación Química

La coagulación química es uno de los procesos más usados para tratar aguas superficiales. Los coagulantes químicos suelen ser sales de aluminio o de hierro. Cuando estas sales se añaden al agua forman un floculante que es un hidróxido del metal correspondiente.

TABLA 27 DOSIS TÍPICAS DE LOS COAGULANTES

<i>Coagulante</i>	<i>Dosis (mg/l)</i>
Aluminio	2 a 5
Hierro	4 a 10

El floculo precipita reduciendo los contaminantes que están suspendidos en el agua mediante la adsorción, la neutralización de la carga y el atrapamiento. La Figura 24 muestra este proceso. Los resultados varían en función de la calidad del agua cruda, de la dosis añadida y del pH del agua. El floculo precipitado se elimina posteriormente del agua mediante procesos de filtración, sedimentación o flotación.

Para determinar la dosis adecuada y el pH se realizan ensayos a pequeña escala. Se parte de agua de la fuente y se va incrementando la dosis de coagulante hasta que se alcanza el color y la turbidez deseados.

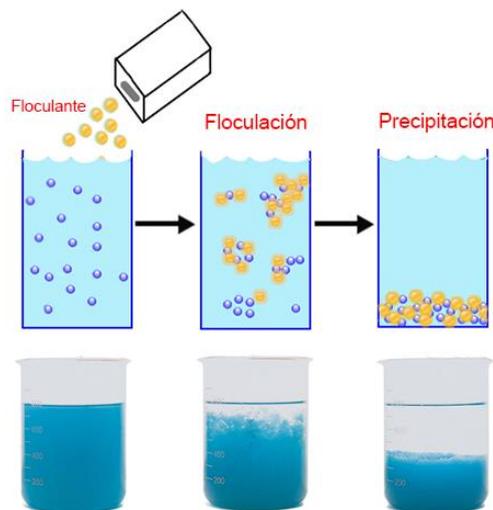


FIGURA 24 ESQUEMA DEL PROCESO DE LA COAGULACIÓN QUÍMICA

Se puede añadir carbón activado en polvo (CAP) para que adsorba los compuestos químicos orgánicos. El CAP se comporta como el floculo y es removido junto con el precipitado.

Antes de que el agua pase a la siguiente etapa es conveniente clarificar el agua, ya sea mediante la sedimentación o por flotación con aire disuelto. La sedimentación suele hacerse en clarificadores de flujo horizontal. En la flotación con aire, los floculos se adhieren a las burbujas de aire y suben hasta la superficie del filtro, donde son retiradas periódicamente.

Tras la coagulación química otros procesos pueden ser implementados, como la oxidación y la filtración del manganeso, la ozonización y la adsorción con carbón activado. Tras estos procesos el agua se somete a la desinfección.

Se puede usar la coagulación química en la eliminación de microorganismos, de algunos metales pesados y de algunos plaguicidas de solubilidad baja.

TABLA 28 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LA COAGULACIÓN QUÍMICA

<i>Ventajas de la coagulación química</i>	<i>Desventajas de la coagulación química</i>
<ul style="list-style-type: none"> - Es un proceso fácil de implementar - Reduce en cierta medida los contaminantes microbiológicos y químicos, y la turbidez 	<ul style="list-style-type: none"> - No consigue un efecto residual como en la cloración - El agua debe ser filtrada a su salida

7.14 Adsorción con Carbón Activado

El carbón activado es un carbón poroso capaz de atrapar impurezas, compuestos orgánicos y gases disueltos en un gas o un líquido. Los poros en el interior del carbón atrapan las sustancias químicas que se unen al carbón. El agua fluye a través del carbón activado y se purifica, eliminando los contaminantes y mejorando su sabor. Estos filtros son capaces de remover sustancias como el cloro, el amoníaco, el plomo, el benceno, el mercurio, herbicidas o pesticidas. Es conveniente usar este filtro en combinación con otros que sean capaces de eliminar las bacterias y los virus.

El carbón activado puede ser un bloque o puede estar granulado. El carbón activado en bloque es más eficiente en la remoción de contaminantes, pero el granulado soporta mayores flujos. Pueden remover partículas de 0,5 a 50 micras (WaterStation, 2020).



FIGURA 25 FILTRO DE CARBÓN ACTIVADO

Estos filtros se pueden instalar con facilidad y directamente en los grifos. Una opción de diseño muy sencilla consiste en introducir agua sobre el carbón activo y permitir que el agua circule a través de este por la acción de la gravedad. El carbón debe cambiarse periódicamente y no puede pasar temporadas largas sin ser usado porque puede convertirse en un criadero de bacterias dañinas.

La UNICEF propone un diseño de filtro de carbón de flujo ascendente, mostrado en la Figura 26.

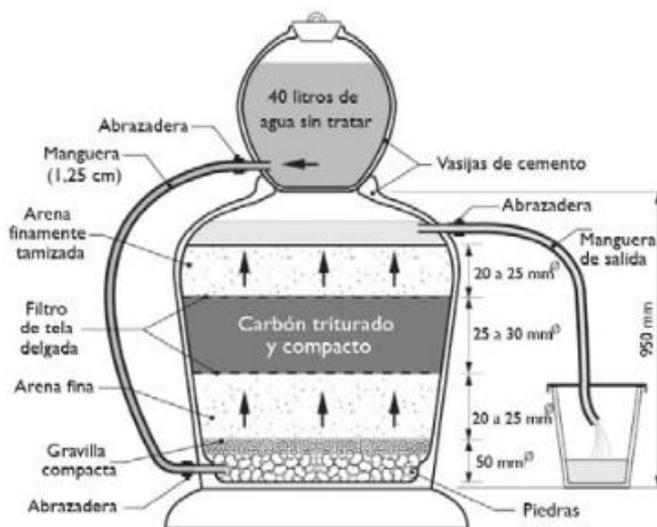


FIGURA 26 FILTRO DE FLUJO ASCENDENTE DE CARBÓN ACTIVADO

Estos filtros se suelen comercializar como filtros de grifo, y tienen un caudal máximo de 0,5 litros por minuto. También es posible encontrar jarras con un filtro de carbono.

TABLA 29 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL CARBÓN ACTIVADO

<i>Ventajas del carbón activado</i>	<i>Desventajas del carbón activado</i>
<ul style="list-style-type: none"> - Puede tener diferentes formas de uso, como jarras, grifos, depósitos... - Mejora el sabor - Gran capacidad de remoción de partículas - Reduce contaminantes químicos 	<ul style="list-style-type: none"> - El carbón debe cambiarse con frecuencia - No es eficaz contra contaminantes microbiológicos

7.15 Filtros Cerámicos

Los filtros cerámicos son una manera sencilla de tratar el agua domiciliaria. En estos filtros, el agua fluye a través de los microporos de una pieza cerámica con forma de vela, de olla o de disco, eliminando partículas en suspensión y atrapando algunos microorganismos de mayor tamaño. Sin embargo, no absorben componentes químicos. Cuentan con dos contenedores; uno contiene el agua cruda y el otro almacena el agua limpia tras su paso por el filtro cerámico. El agua debe ser hervida a su salida del filtro para eliminar los agentes patógenos. La fabricación de estos filtros puede ser costosa, pero pueden durar hasta 20 años.

Los filtros cerámicos se pueden mejorar al pintarse con partículas de plata coloidal o al añadir la plata a la arcilla. La plata coloidal se usa para desinfectar el agua de agentes patógenos, para evitar su crecimiento y para inactivarlos.

El funcionamiento de este filtro empieza con la introducción de agua en el contenedor superior, que fluye a través de los poros de la pieza cerámica hacia el contenedor inferior que sirve para almacenar el agua limpia. El agua limpia se puede consumir gracias a un grifo

que se encuentra en la parte inferior del depósito de almacenamiento. Las partículas se acumulan en la superficie de la vela. Es común colar el agua antes de introducirla en el filtro para reducir su turbidez. Es decir, se pueden usar estos filtros con agua de poca turbidez (< 5 UNT) y concentraciones de hierro reducidas ($< 0,3$ mg/l) (Shrestha, y otros, 2018). Para manejar la recontaminación se puede añadir cloro al agua, pero solamente después del filtrado.

El mantenimiento de los filtros cerámicos es un aspecto clave para el correcto funcionamiento de este proceso. El filtro debe ser limpiado cada dos meses usando un paño o un cepillo suave para eliminar la biopelícula y las partículas que obstruyen los poros. Debe hacerse con agua limpia sin jabones o químicos. A pesar de que es posible usarlos durante años si el mantenimiento es el adecuado, se recomienda cambiar las velas 6 meses o cada año, y las ollas cerámicas cada 1 o 2 años (Shrestha, y otros, 2018).

Existen distintas opciones de diseño. Todas cuentan con dos contenedores, un grifo y una tapa que se coloca sobre el recipiente superior. Los filtros de vela están atornillados en la base del depósito superior, y las vasijas pueden tener base redonda o base plana. El contenedor superior se apoya sobre un contenedor de plástico o de arcilla de mayor tamaño (entre 20 y 30 litros). El diámetro de los depósitos suele ser de 30 cm por 25 cm de profundidad.

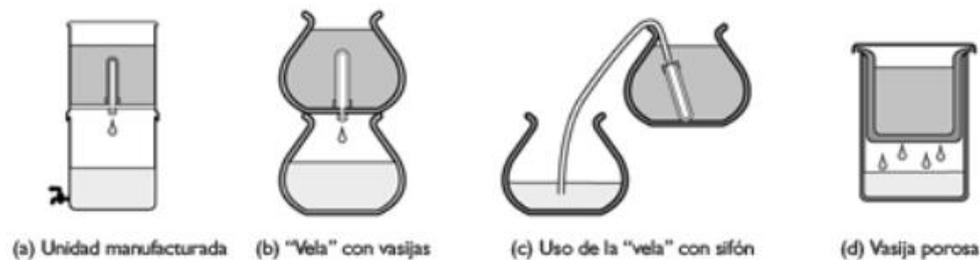


FIGURA 27 TIPOS DE FILTROS CERÁMICOS

El filtro de olla puede tener un flujo de salida de 0,05 litros por minuto, mientras que el de vela puede producir unos 0,02 litros por minuto y por vela, por lo que se suelen usar múltiples velas por filtro (Shrestha, y otros, 2018). El caudal del agua de salida es limitado por lo que la aplicación de los filtros cerámicos se limita al consumo domiciliario, pequeñas organizaciones y aulas en un colegio.



FIGURA 28 FILTROS CERÁMICOS DE TIPO VELA

TABLA 30 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS FILTROS CERÁMICOS

<i>Ventajas de los filtros cerámicos</i>	<i>Desventajas de los filtros cerámicos</i>
<ul style="list-style-type: none"> - Es una tecnología muy simple y económica - Atrapan las partículas en suspensión y algunos microorganismos - Mejoran el sabor, el color y el olor del agua - Pueden ser fabricados localmente con los recursos disponibles en la región - Pueden mantener el agua limpia y a la temperatura apropiada 	<ul style="list-style-type: none"> - No logran atrapar todos los microorganismos - No eliminan los contaminantes químicos - Requieren una limpieza frecuente ya que la turbidez del agua obstruirá los poros - El caudal de salida es reducido - Carecen de desinfección residual

7.16 Filtros de Cal o Descalcificadores

La cal aparece por la presencia de magnesio y calcio en el agua. Para capturar estos elementos, se emplea un sistema mecánico de intercambio de iones. En este sistema, el agua fluye a través de una resina en la que ocurre el intercambio iónico, reteniendo iones de calcio y magnesio y liberando iones de sodio (EC, 2021).

Las resinas tienen que regenerarse pasado un tiempo para garantizar el correcto funcionamiento del descalcificador. Suele instalarse un depósito de sal en el que se lleva a cabo la regeneración.

Estos filtros consumen muy poca energía al año. Se pueden distinguir los descalcificadores en función del mecanismo de tratamiento. En primer lugar, los **descalcificadores mecánicos** se utilizan en el hogar y funcionan de la misma manera que la ósmosis inversa. Se aplica una presión alta que hace que el agua atraviese una membrana semipermeable formada por la resina mencionada. Es necesario limpiar la membrana con frecuencia para que el tratamiento funcione de manera adecuada. El caudal de salida es pequeño en comparación con otros métodos. En segundo lugar, los **descalcificadores químicos** cuentan con cartuchos de pastillas de zeolita que realizan el intercambio de iones. Por último, los **descalcificadores catalíticos** se instalan en la industria. Sus filtros están hechos de una aleación especial que precipita el carbonato de calcio.

Estos filtros suelen usarse en los domicilios, directamente en los grifos, y tienen un caudal de salida máximo de 0,5 litros por minuto. También existen filtros descalcificadores para pozos, para el hogar, comunitarios, para lavadoras y cafeteras.



FIGURA 29 FILTRO DE CAL

TABLA 31 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS DESCALCIFICADORES

<i>Ventajas de los descalcificadores</i>	<i>Desventajas de los descalcificadores</i>
<ul style="list-style-type: none"> - Reduce la cal - Es fácil de instalar - Disminuye la turbidez del agua 	<ul style="list-style-type: none"> - Debe ir acompañado de un regenerador para purificar la resina - El material filtrante no está disponible con facilidad

7.17 Filtración por Destilación

La destilación aprovecha los distintos puntos de ebullición de los elementos disueltos en el agua. El agua es calentada hasta su evaporación y posteriormente condensada, obteniéndose una composición más pura, libre de químicos, minerales y microorganismos que presentan puntos de ebullición más altos. Si se repite el proceso varias veces, el agua obtenida será más pura. Otro aspecto importante es que el agua es estéril en el momento de finalizar el proceso de destilación, pero una vez almacenada es posible su contaminación. Este método no es eficaz cuando el agua presenta compuestos volátiles orgánicos, desperdicia agua y tiene un gasto energético elevado. El agua que se usa en este método es agua potable que ya ha sido sometida a un tratamiento previo. Su aplicación se suele limitar a laboratorios y actividades médicas en las que se requiere el uso de agua pura.

TABLA 32 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LA DESTILACIÓN

<i>Ventajas de la destilación</i>	<i>Desventajas de la destilación</i>
<ul style="list-style-type: none"> - Uso en laboratorios y hospitales - Reduce los contaminantes químicos y microbiológicos 	<ul style="list-style-type: none"> - Alto consumo de energía - Tarda mucho en obtener agua de calidad - Requiere agua que ha sido tratada previamente

7.18 Filtros de Membranas

Se trata de un método de separación física de moléculas de distintos tamaños y características gracias a la diferencia de presión a los lados de una membrana. Las membranas forman una barrera semipermeable limitando el paso de moléculas a través de ella. Consiguen retener partículas de menor tamaño, como sales o iones, que lo conseguido con filtros de arena o cerámicos.

Se distinguen diversos procesos de membranas: microfiltración, ultrafiltración, nanofiltración, ósmosis inversa, y ósmosis directa. Estas membranas están compuestas por capas de polímero, cerámica y otros materiales como grafeno u óxido de aluminio. Tienen distintos grados de permeabilidad. Las membranas de microfiltración tienen un tamaño de poro de 0,1 a 10 micras, las de ultrafiltración de 0,1 a 0,01 micras, y las de nanofiltración de 0,01 a 0,035 micras (condorchem envitech).

Existen distintos tipos de membrana (condorchem envitech): microporosas, densas, cargadas eléctricamente y anisotrópicas. Además, pueden estar en forma de tubo, de fibra hueca y en lámina plana. Las membranas deben estar formadas por un material compacto, deben tener poca resistencia al flujo tangencial, deben distribuir uniformemente la velocidad en toda el área, deben ser fáciles de limpiar y deben tener alta turbulencia en el lado de agua cruda.

Estos filtros retienen contaminantes con baja concentración, sin eliminarlos completamente. Es necesario limpiar las membranas pasado cierto tiempo ya que la eficacia del proceso depende en gran medida de la limpieza de estas. Con el paso del tiempo, se crean biopelículas y los poros quedan obstruidos por las impurezas.

El caudal varía en función de la presión aplicada y del diseño del filtro, pero se pueden obtener unos 0,25 litros por minuto.

TABLA 33 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS FILTROS DE MEMBRANA

<i>Ventajas de los filtros de membrana</i>	<i>Desventajas de los filtros de membrana</i>
<ul style="list-style-type: none"> - Gran eficacia en la reducción de la turbidez - Retienen partículas de tamaños muy reducidos 	<ul style="list-style-type: none"> - Necesitan ser limpiados con frecuencia - Filtros lentos - Es necesario aplicar presión

7.19 Filtración por Ósmosis Inversa

La filtración por ósmosis inversa es un tipo de filtración por membrana y es uno de los métodos de tratamiento más usados ya que puede eliminar más del 99% de la sales y bacterias en el agua (Benita Orozco, 2022).

Es un proceso natural que se basa en vencer la presión osmótica. Cuando dos líquidos están separados por una membrana semipermeable, el líquido tiende a incrementar su concentración en partículas. En la ósmosis inversa se lleva a cabo el proceso contrario con

la aplicación de presión en el lado del líquido concentrado. De esta manera, el agua fluye del lado más concentrado al que está menos concentrado, consiguiéndose la purificación del agua.

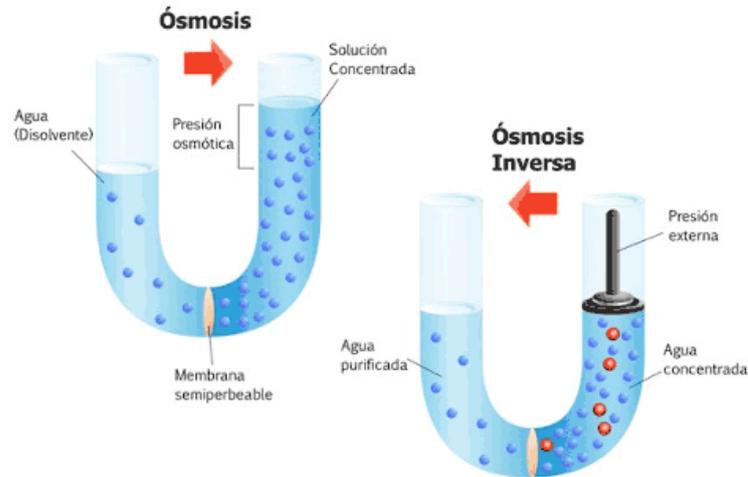


FIGURA 30 FUNCIONAMIENTO DE LA ÓSMOSIS INVERSA

El agua fluye a través de la membrana semipermeable con microporos que impiden el paso de moléculas más grandes que las de agua. Elimina elementos como el arsénico, los fluoruros, nitratos y percloratos (aquellos que no se eliminaban en los filtros de carbón activado) a excepción de los compuestos volátiles orgánicos, el cloro y los trihalometanos. En muchas ocasiones, se instalan junto con los filtros de carbón activado por su complementariedad.

Se han convertido en un método muy utilizado en estos últimos años. Sin embargo, en este proceso se desecha mucha agua en el filtrado (desde 3 a 20 veces el agua producida) y se aconseja usar la ósmosis inversa solamente con el agua que se vaya a consumir.

Los caudales de agua limpia dependen del tamaño de la planta, llegando a cifras de 191.000 m³ al día (ferrovial). Por su capacidad es recomendable usar este método para tratar el agua en hospitales u hoteles. También tiene aplicación residencial con la instalación de equipos de tamaño reducido y pudiendo obtener unos 350 litros de agua al día. Este método consume poca energía eléctrica y no requiere un mantenimiento frecuente.

Los filtros de ósmosis inversa tienen poros de 5 micras, reteniendo cualquier molécula de tamaño superior. Un equipo doméstico cuenta con las siguientes partes:

- Filtro de sedimentos: reduce la turbidez del agua reteniendo las partículas en suspensión. De esta manera, el agua que circula por el filtro no está tan sucia como el agua cruda y se mejora el rendimiento del tratamiento.
- Filtro de carbón en bloque: elimina el cloro y otros componentes químicos que modifican el sabor o el olor del agua.
- Membrana de ósmosis: filtra el resto de los contaminantes. Debe ser examinada desde 1 a 4 veces al año.
- Acumulador: es el depósito con el agua ya limpia.

TABLA 34 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LA ÓSMOSIS INVERSA

<i>Ventajas de la ósmosis inversa</i>	<i>Desventajas de la ósmosis inversa</i>
<ul style="list-style-type: none"> - Elimina la mayoría de los microorganismos, incluyendo la <i>Cryptosporidium</i> y la <i>Giardia</i>. - Elimina el olor y el sabor del agua. - Los filtros son de tamaño pequeño. 	<ul style="list-style-type: none"> - La ósmosis inversa desmineraliza el agua por lo que se pierden minerales beneficiosos para el ser humano. - Al eliminar los minerales, el agua se vuelve ácida y no es recomendable consumirla. - La membrana se puede obstruir si no se coloca un filtro de sedimentos aguas arriba del filtro. - El proceso es lento en comparación con otros métodos de tratamiento. - Se pierde mucha agua.

7.20 Tratamiento con Rayos UV

En este sistema se elimina la capacidad de reproducción y el carácter infeccioso de los microorganismos al modificar su ADN cuando pasan por una lámpara de rayos ultravioleta con una longitud de onda de 400 a 100 nm (FiltraShop, 2021). Se crea una radiación similar a la del sol, pero con menos fuerza. Se usa complementando a otros sistemas ya que no elimina los contaminantes químicos.

Se pueden distinguir tres tecnologías de desinfección del agua con UV (FiltraShop, 2021):

- Lámpara de bulbos UV de baja presión: la frecuencia de estas lámparas sirve para flujos menores. Es utilizada en domicilios.
- Lámpara de bulbos UV de baja y alta presión: la capacidad de variar la frecuencia es útil cuando el agua que circula por el aparato puede tener distinta temperatura.
- Lámpara de amalgamas de baja presión: se usa en aplicaciones industriales.

Las lámparas de luz UV son un método de desinfección de microorganismos muy eficaz que tienen como gran ventaja que no añaden químicos al agua. Esto permite recircular el agua a ríos o lagos sin peligro de contaminarlos.

Este tratamiento puede usarse en cualquier aplicación, con el inconveniente de que el agua que circula a través de los filtros debe ser sometida a un pretratamiento. La presencia de partículas en el agua reduce la eficacia del proceso. Otros factores que incrementan la eficacia del tratamiento son un elevado tiempo de exposición a la luz y una intensidad de la luz alta.

El diseño puede consistir en un tanque de acero inoxidable que contiene la lámpara de luz UV. Dicha lámpara está protegida con una funda de vidrio de cuarzo. El agua circula en

paralelo a la lámpara y se controla el tiempo de exposición mediante un controlador del flujo. Este método requiere de energía eléctrica para funcionar.

El mantenimiento de las lámparas de luz UV consiste en limpiar la carcasa de la luz ya que, si hay una capa de suciedad, la intensidad de la luz será menor. Para ello, se usa una solución de hidrosulfito de sodio (0,15%) (WaterStation, 2020). Asimismo, la lámpara debe ser reemplazada cada año. Aunque los equipos están diseñados para operar de forma continua, pueden apagarse si no van a ser utilizados en temporadas largas. Una vez encendidos, el equipo debe ser enjuagado con algún químico como el cloro.

Se pueden encontrar distintos tamaños que influyen en el caudal de salida. Este puede variar entre 3 y 45 litros por minuto.

TABLA 35 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS RAYOS UV

<i>Ventajas de los rayos UV</i>	<i>Desventajas de los rayos UV</i>
<ul style="list-style-type: none"> - No introduce productos químicos en el agua - Desinfección de bacterias y virus 	<ul style="list-style-type: none"> - Requiere un mantenimiento frecuente y reemplazo de la lámpara - Consume electricidad

7.21 Método SODIS

Este método de tratamiento de agua es similar al anterior, pero usa los rayos UV del sol para inactivar los agentes patógenos presentes en el agua. Consiste en introducir agua en recipientes transparentes que son expuestos al sol. Si es un día soleado, es suficiente con 5 horas, y si hay nubes, hay que dejar el recipiente al menos dos días para lograr la desinfección. Para que el tratamiento sea efectivo, el agua introducida en los recipientes no debe tener turbidez. Se consigue la desinfección gracias a la combinación de la radiación solar y del tratamiento térmico. Para aumentar la eficiencia del proceso resulta favorable pintar la mitad de la botella de color negro y exponer el lado transparente al sol. Esto incrementará la temperatura del agua, consiguiendo una mayor desinfección.



FIGURA 31 MÉTODO SODIS

El caudal de salida se limita a la capacidad de los recipientes que suele ser de 2 litros. Este proceso se emplea en el hogar o en aulas de los colegios.

TABLA 36 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL MÉTODO SODIS

<i>Ventajas del método SODIS</i>	<i>Desventajas del método SODIS</i>
<ul style="list-style-type: none"> - Fácil de emplear - Emplea pocos recursos - Eficaz contra agentes patógenos 	<ul style="list-style-type: none"> - Volumen de agua tratada limitado - No reduce la turbidez - Proceso lento

7.22 Filtros de Sedimentos

A pesar de ser sometida a múltiples tratamientos y de tener un buen aspecto, el agua contiene sedimentos imperceptibles para el ojo humano. El agua se hace pasar a través de una o varias capas de materiales con distinta granulometría. El agua se purifica a lo largo de su paso por el filtro, que retiene las partículas en suspensión, pero que no elimina los componentes químicos. La fuerza impulsora en este método es la gravedad.

El material de los filtros puede ser poliéster, polipropileno, celulosa, cerámica o fibra de vidrio (FiltrShop, 2021). En función del tamaño de partículas que pueden retener estos filtros, se pueden distinguir los filtros micrónicos y los submicrónicos, donde los micrónicos son capaces de retener partículas de hasta una micra.

Los filtros se pueden clasificar según su forma en cartuchos de superficie y cartuchos de profundidad. Los cartuchos de superficie incrementan la superficie de contacto introduciendo pliegues o rugosidades. Los cartuchos de profundidad pueden captar sedimentos de distintos tamaños.

Los **filtros de superficie plisados** cuentan con capas de microfibras que pueden formar un pliegue fino o uno grueso. Las partículas de gran tamaño quedan atrapadas en los pliegues y las más pequeñas quedan retenidas en la matriz del filtro. El mecanismo de retención es dual. Por un lado, las partículas quedan retenidas en la fibra al impactar contra ella. Y el otro mecanismo es la absorción de las partículas hacia el interior de la microfibra. Pueden dar caudales de 15 a 40 litros por minuto (FiltrShop, 2021).

Los **filtros profundos de cartuchos hilados** consisten en hilos de algodón, polipropileno, poliéster o nylon enrollados de manera que sean capaces de retener las partículas. Son muy versátiles en cuanto a tamaño y resistencia a temperaturas (70°C), y se pueden cambiar con facilidad.

Los **filtros profundos de cartucho Polyspun** emplean polipropileno de alta dureza. Al igual que los anteriores filtros, puede retener partículas de diferentes tamaños al contar con varias capas. Tiene mejor resistencia a productos químicos y a temperaturas altas (60°C). El rango de flujos de salida puede variar entre 8 y 30 litros por minuto (FiltrShop, 2021).



FIGURA 32 FILTROS DE SEDIMENTOS

Los **filtros profundos de cartucho termofundidos** son elaborados con polipropileno que ha sido fundido para conseguir un filtrado superior.

También se pueden encontrar **filtros de discos** que cuentan con discos de plástico superpuestos con ranuras pequeñas que dejan pasar el agua reteniendo los sedimentos.

Los filtros de lecho profundo están formados por capas de distintos materiales filtrantes, típicamente arena, antracita o zeolita. Estos materiales pueden usarse solos o en combinación. La capacidad de retención de estos filtros es de 15 a 20 micras y pueden tener flujos de 20 litros por minuto en los filtros más grandes (FiltroShop, 2021).

TABLA 37 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS FILTROS DE SEDIMENTOS

<i>Ventajas de los filtros de sedimentos</i>	<i>Desventajas de los filtros de sedimentos</i>
- Gran eficacia en la retención de partículas	- No elimina los contaminantes químicos - Los filtros deben ser fabricados o comprados

7.23 Filtración con Fibras y Telas

Este proceso es similar a la filtración con arena, con la ventaja de que se pueden limpiar con facilidad haciendo pasar agua a contracorriente. Su principal función consiste en reducir las partículas suspendidas en el agua y su uso es muy común en los prefiltros de aguas superficiales.

Estos filtros suelen tener un soporte en forma de disco o tambor, y un tejido filtrante llamado *polstoff*, formado por fibras sintéticas que tienen una longitud de 10 a 12 mm y un diámetro que varía entre 12 y 27 μm (MITA, 2022). Aprovecha la gravedad y la diferencia de nivel de la entrada de agua en la máquina y la salida.

Con el paso del agua a través de los discos, se van acumulando los sólidos, y se produce un aumento de la resistencia al paso del agua. Cuando la pérdida de carga es demasiado grande,

superior a 25 cm, se procede a la limpieza de los discos de tela mediante su retrolavado. Es posible eliminar los sólidos haciendo circular agua a contracorriente gracias a un sistema de bombeo, conectado a una serie de toberas de aspiración. Se eliminan los sólidos retenidos en las telas y se restablece su capacidad de filtración. El agua proveniente de la aspiración y los lodos extraídos se devuelven aguas arriba. Los sólidos acumulados en el fondo del tanque se eliminan con una bomba controlada por un temporizador. Este método de limpieza emplea un caudal de agua muy bajo comparado con otros métodos y consume muy poca energía.

Estos filtros pueden soportar gran variedad de caudales en función del diseño, que van desde 10 m³/h a 800 m³/h (MITA, 2022).



FIGURA 33 FILTRO DE TELA

El diseño de este filtro permite la circulación continua de agua y su consecuente filtración, sin la necesidad de unidades de reserva durante el periodo de lavado. Además, tiene una tasa de filtrado muy alta, obteniendo un total de sólidos suspendidos menor a 5 mg/l en la salida.

El material que recubre los tambores y discos filtrantes es del tipo “pila” o “fibra libre”. Durante la fase de filtración las fibras son deformadas y cruzadas formando una barrera muy eficaz en la separación y retención de fangos en suspensión.

Esta técnica de filtración con tela filtrante libre de fibras brinda la posibilidad de utilizar fibras muy finas y lograr eficiencias de separación óptimas, incluso en casos de alta carga hidráulica o de picos de carga y con caudales de agua de retrolavado mínimos.

TABLA 38 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS FILTROS DE FIBRAS Y TELAS

<i>Ventajas de los filtros de fibras y telas</i>	<i>Desventajas de los filtros de fibras y telas</i>
<ul style="list-style-type: none"> - Es fácil de mantener - Reduce la turbidez 	<ul style="list-style-type: none"> - Requiere una limpieza frecuente - No elimina contaminantes químicos o microbiológicos

7.24 Almacenamiento y Decantación

Un procedimiento tan simple como almacenar el agua en condiciones seguras durante un día mata la mitad de las bacterias presentes y puede reducir la turbidez al precipitar las partículas suspendidas. El almacenamiento se puede llevar a cabo en recipientes de distinto tamaño, en función del número de usuarios, y debe tener una tapa para evitar la entrada de nuevos contaminantes. Además, dicho recipiente debe limpiarse con frecuencia por lo que el cuello debe ser ancho.

El agua limpia de partículas y de bacterias se saca de la parte superior del depósito. Cuando se incrementa el periodo de almacenamiento se obtiene un agua con calidad superior. Si el tiempo de almacenamiento es superior a 48 horas, también se eliminan las cercarias, organismos responsables de la transmisión de enfermedades como la fiebre por caracoles.

Este método tiene un mayor uso en el hogar y puede tener una aplicación tan sencilla como el sistema de las tres vasijas. En dicho sistema se cuenta con tres vasijas y el agua va pasando de la primera a la tercera. La tercera vasija contiene el agua de consumo. En esta vasija el agua ha estado almacenada durante al menos dos días por lo que la calidad es superior. Es importante lavar esta vasija con frecuencia y, si es posible, esterilizarla con agua hirviendo. Todos estos vertidos han de realizarse lentamente con el fin de no remover el agua y así preservar en el fondo los sedimentos. Se puede usar un tubo flexible a modo de sifón reduciendo la turbulencia al verter el agua de una vasija a otra.

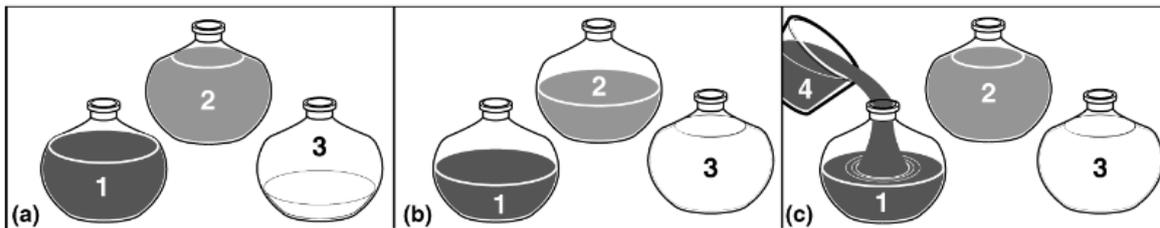


FIGURA 34 PROCEDIMIENTO DEL ALMACENAMIENTO Y LA DECANTACIÓN

El caudal de salida está limitado a la capacidad del último depósito. Este método se suele usar en el hogar o en aulas de colegios.

TABLA 39 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL ALMACENAMIENTO Y LA DECANTACIÓN

<i>Ventajas del almacenamiento y la decantación</i>	<i>Desventajas del almacenamiento y la decantación</i>
<ul style="list-style-type: none"> - Método fácil de implementar - Reduce la turbidez - No requiere equipos complejos 	<ul style="list-style-type: none"> - El volumen de agua tratada depende del tamaño del depósito - Requiere una limpieza frecuente - Es un proceso lento

8 Tabla Comparativa

Una vez conocidos los sistemas de tratamiento que van a ser incluidos en el modelo, se puede elaborar una tabla comparativa de los distintos tratamientos, según unos parámetros que serán tenidos en cuenta en la creación del modelo de selección.

8.1 Parámetros

8.1.1 Caudal de agua

La cantidad de agua tratada disponible es un parámetro clave del método de tratamiento. La cantidad de agua se ve afectada por el volumen de agua total disponible, así como por el flujo de agua instantáneo.

De esta manera, se consideran las siguientes restricciones en el caudal de salida:

- Tamaño del recipiente: restringe el agua total disponible. Esta categoría abarca mayoritariamente a los métodos de tratamiento que cuentan con un depósito donde el agua es tratada.
- Velocidad de tratamiento: el paso del agua a través del medio filtrante o de la instalación es variable según el método de tratamiento. Se mide en litros por minuto.
- Grifo de salida: muchos métodos que cuentan con un depósito tienen un grifo de salida para el agua. El caudal de salida típico de un grifo es 6 litros por minuto.

8.1.2 Electricidad

Muchos de los métodos analizados necesitan electricidad para funcionar, principalmente por la necesidad de ejercer presión, como ocurre en los procesos con membrana semipermeable. También se requiere una bomba para transportar el agua desde la fuente hasta el punto de tratamiento. Sin embargo, en este proyecto no se tiene en cuenta este problema y se asume que hay agua disponible en el punto de tratamiento.

8.1.3 Dificultad de instalación

Este parámetro evalúa de 1 a 5 la dificultad de instalación del sistema de tratamiento, siendo 5 el más difícil. Cuanto mayor sea la especialización requerida del personal de instalación y cuanto más complejos sean los equipos que se van a instalar, mayor será la dificultad total de instalación.

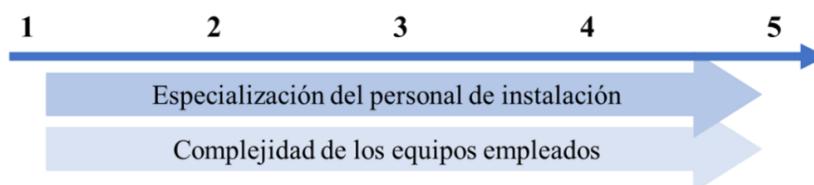


FIGURA 35 DIAGRAMA DE DIFICULTAD DE INSTALACIÓN DEL SISTEMA

8.1.4 Dificultad de mantenimiento

El mantenimiento se puntúa de 1 a 5 siendo 5 el que requiere más trabajo por requerir más tiempo, por ser más complicado de llevar a cabo o por requerir tecnologías más complejas, como ocurre con los descalcificadores, que necesitan un proceso de regeneración.

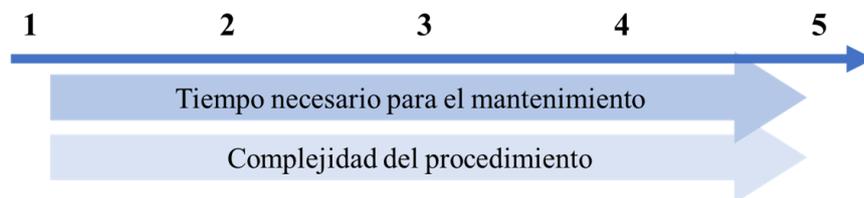


FIGURA 36 DIAGRAMA DE DIFICULTAD DE MANTENIMIENTO DEL SISTEMA

8.1.5 Precio relativo

El precio relativo tiene en cuenta el coste de los equipos empleados, así como el coste de la instalación del sistema de tratamiento. Métodos como la desinfección por ebullición o el método SODIS tendrán un precio relativo de 1. Procesos como la ósmosis inversa o la filtración de ribera tendrán un coste relativo de 5 (el más alto).

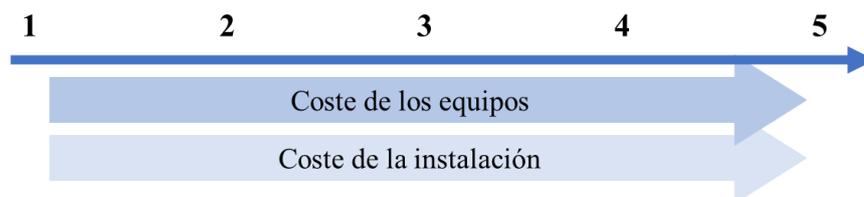


FIGURA 37 DIAGRAMA DEL PRECIO RELATIVO DEL SISTEMA

8.1.6 Capacidad de remoción de contaminantes microbiológicos

Se evalúa de 0 a 5 la eficacia del método para eliminar o reducir los contaminantes microbiológicos en el agua.

8.1.7 Capacidad de remoción de contaminantes químicos

Se evalúa de 0 a 5 la eficacia del método para eliminar o reducir la concentración de contaminantes químicos en el agua.

8.1.8 Capacidad de remoción de turbidez

Se evalúa de 0 a 5 la eficacia del método para eliminar o reducir la turbidez del agua.

8.2 Tabla Comparativa de los Sistemas de Tratamiento

Con los conocimientos obtenidos del análisis de los métodos de tratamiento, se ha dado un peso relativo a los distintos parámetros de comparación de los métodos de tratamiento.

TABLA 40 COMPARATIVA DE LOS SISTEMAS DE TRATAMIENTO

	<i>Caudal (lpm)</i>	<i>Elec.</i>	<i>Instal.</i>	<i>Mantenim.</i>	<i>Precio</i>	<i>Cap. microb.</i>	<i>Cap. Quím.</i>	<i>Turb.</i>
Cloración - Gas de cloro licuado	Todos	Sí	4	4	4	5	2	1
Cloración - Solución de hipoclorito de sodio	Todos	Ambos	4	4	3	5	2	1
Cloración - Gránulos de hipoclorito de calcio	Todos	No	2	4	3	5	2	1
Ozonización	Todos	Sí	4	4	5	4	3	1
Desinfección por ebullición	Recipiente	Ambos	1	1	1	3	1	1
Filtros rápidos por gravedad	Grifo	No	2	2	1	1	1	5
Filtros gruesos	2	No	2	3	2	1	1	5
Filtros a presión	Grifo	Sí	3	4	3	1	1	5
Filtros lentos de arena	0,02	No	2	3	2	4	2	3
Filtros rápidos de arena	66 a 200	Sí	3	3	3	2	2	5
Tanque de almacenamiento	Recipiente	Sí	3	4	4	2	1	2
Filtración de ribera		Sí	5	4	5	4	2	3
Aireación	Grifo	No	2	2	2	1	3	2
Coagulación química	Todos	No	3	3	3	3	3	3
Adsorción con carbón activado - Grifo	0,5	No	1	1	1	1	4	4
Adsorción con carbón activado - Jarra	Recipiente	No	1	1	1	1	4	4
Filtros cerámicos - Olla	0,05	No	1	2	3	3	2	4

	<i>Caudal (lpm)</i>	<i>Elec.</i>	<i>Instal.</i>	<i>Mantenim.</i>	<i>Precio</i>	<i>Cap. microb.</i>	<i>Cap. Quím.</i>	<i>Turb.</i>
Filtros cerámicos - Vela	0,02	No	1	2	3	3	2	4
Filtros de cal o descalcificadores	0,5	Sí	1	2	2	1	2	3
Filtración por destilación	Recipiente	Ambos	1	1	3	4	4	4
Filtros de membranas	0,25	Sí	2	3	4	4	3	4
Filtración por ósmosis inversa	0,5	Sí	5	4	5	5	3	4
Tratamiento con rayos UV	3 a 45	Sí	3	3	4	4	2	1
Método SODIS	Recipiente	No	1	1	1	3	1	2
Filtros de sedimentos	15 a 40	No	3	2	2	3	2	4
Filtración con fibras y telas	150 a 1000	No	1	1	2	2	1	4
Almacenamiento y decantación	Recipiente	No	1	1	1	3	1	4

9 Modelo de Selección

Conocidos los métodos de tratamiento y haciendo uso de la tabla comparativa, el siguiente paso es la creación del modelo de selección.

9.1 Razonamiento detrás del Modelo de Selección

El diagrama de la Figura 38 plantea de manera sencilla el razonamiento que va a seguir el modelo de selección. Se introducen una serie de parámetros en la herramienta de selección, y esta da como resultado los métodos de tratamiento aptos para la situación introducida.

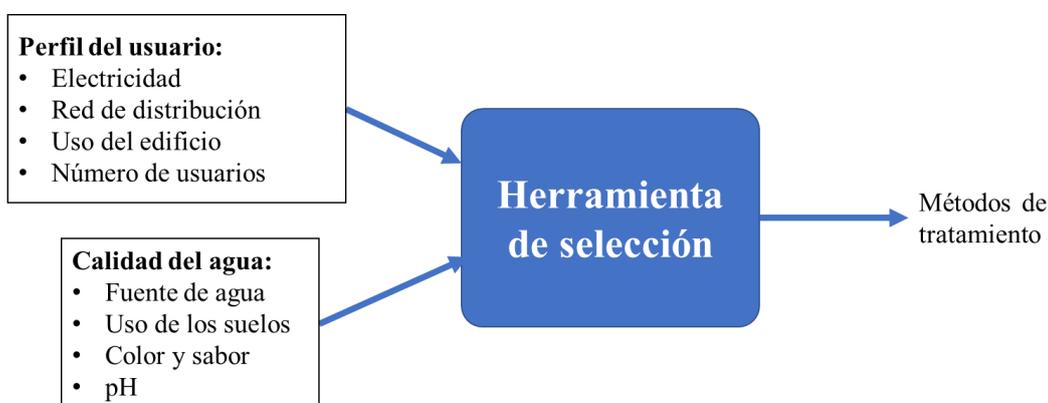


FIGURA 38 DIAGRAMA DEL MODELO DE SELECCIÓN

Los parámetros de entrada son restricciones que descartan sistemas de tratamiento que no cumplen con las condiciones impuestas.

Finalmente, si la herramienta devuelve varios métodos, el usuario podrá ordenarlos por precio relativo, dificultad de instalación y dificultad de mantenimiento.

9.2 Hipótesis Iniciales

Se han considerado las siguientes hipótesis iniciales en la elaboración del modelo de selección:

- Se dispone de una fuente de agua
- No hay un sistema instalado
- No se tiene en cuenta la manera en la que se transporta el agua al punto de tratamiento
- El agua llega al punto de tratamiento, ya sea mediante una red de tuberías o transportada en cántaros desde la fuente de agua

9.3 Parámetros de Entrada

La selección de los parámetros de entrada es uno de los pasos más importantes. Estos parámetros deben describir correctamente la situación del usuario para poder escoger el método de tratamiento más idóneo. A su vez, no pueden ser muy complicados para que cualquier persona pueda usar esta herramienta.

Los parámetros de entrada han sido escogidos después del cuidadoso estudio de los métodos de tratamiento de agua. Se han escogido características que determinan si se puede usar un método, como la disponibilidad de electricidad. También se pide al usuario información sobre el agua disponible, para hacerse una idea de su calidad.

Se distinguen dos grupos de parámetros. El primer grupo abarca los parámetros que ayudan a determinar el **perfil del usuario**. Con estos parámetros se quiere conocer con qué recursos cuentan y cuántas personas consumen el agua. El segundo grupo obtiene información relacionada con la **calidad del agua**, con preguntas sobre la fuente de agua, el uso de los suelos...

Perfil del usuario:	Calidad del agua:
<ul style="list-style-type: none"> • Electricidad • Red de distribución • Uso del edificio • Número de usuarios 	<ul style="list-style-type: none"> • Fuente de agua • Uso de los suelos • Color y sabor • pH

FIGURA 39 PARÁMETROS DE ENTRADA DEL MODELO DE SELECCIÓN

9.3.1 Perfil del usuario

- **Electricidad**

El usuario debe introducir si se dispone de electricidad para llevar a cabo el tratamiento. Varios métodos de tratamiento necesitan una fuente de energía para funcionar, como cuando hay que ejercer una presión o cuando se cuenta con equipos electrónicos para dosificar una sustancia, entre otros. Esta electricidad puede venir de una conexión directa con la red eléctrica, o de generación propia (ej., placas solares).

Si no se dispone de electricidad, métodos como los rayos UV, la ozonización, o la filtración de ribera, serán descartados. Por el contrario, si se dispone de electricidad, todos los métodos de tratamiento serán tenidos en cuenta.

TABLA 41 VARIABLE ELECTRICIDAD

<i>Electricidad</i>	<i>Descripción</i>
No	No se dispone de electricidad para llevar a cabo el tratamiento del agua.
Sí	Se dispone de una conexión a una red eléctrica o de un generador.

- **Red de distribución**

Múltiples métodos de tratamiento necesitan que el agua circule por un sistema de tuberías en el que se implementa el método. Por ejemplo, el tratamiento con rayos UV necesita que el agua circule a través del recipiente con la lámpara, para poder llevar a cabo la desinfección. Otros métodos pueden instalarse en grifos en el punto de consumo, como ocurre con los filtros de grifo de carbón activado.

Las redes de distribución suelen funcionar gracias a la presión ejercida por una bomba. De esta manera, es posible abrir un grifo en una planta superior y que salga agua.

Se entiende que los edificios tienen un sistema de tuberías instalado.

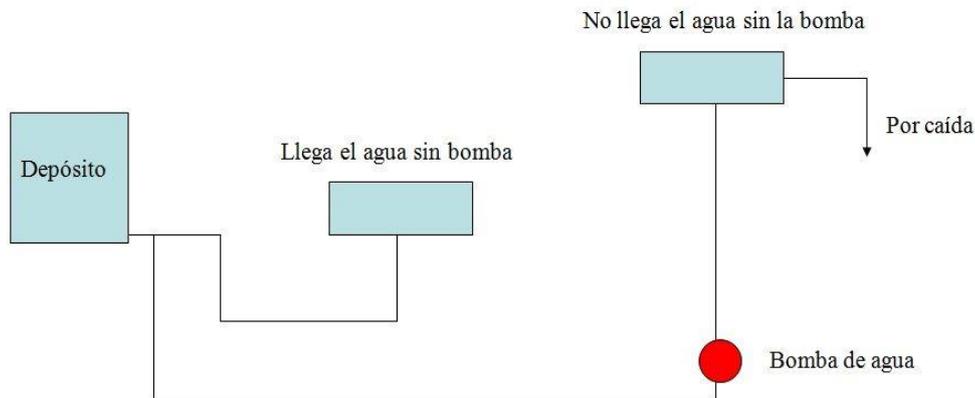


FIGURA 40 ESQUEMA DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA

En la Figura 40 se puede ver que, si el depósito está a la misma o mayor altura que el punto de consumo, será posible usar tuberías sin una bomba, ya que se ejercerá una presión que permitirá al agua circular por las tuberías. Si el punto de consumo está a una altura superior, no hay suficiente presión para superar la gravedad y es necesario usar una bomba para elevar el agua. Por eso es común encontrar depósitos en lugares elevados que aprovechan esa altura para presurizar las tuberías. Esta solución es muy útil para eliminar la bomba, que consume electricidad.

TABLA 42 VARIABLE DISPONIBILIDAD DE UNA RED DE TUBERÍAS

<i>Red de tuberías</i>	<i>Descripción</i>
No	No cuenta con un sistema de tuberías. El agua llega al punto de tratamiento de manera alternativa (cántaros, camiones...). Abarca los tratamientos que se llevan a cabo en depósitos.
Sí	Cuenta con una red de tuberías presurizada por una bomba o por un depósito en altura.

Todos los métodos de tratamiento pueden ser usados con sistema de tuberías mientras que algunos como el tratamiento con rayos UV solo pueden ser empleados si existe una red de tuberías.

- **Uso del edificio**

Para seleccionar el tipo de edificio se hace la distinción entre uso individual o colectivo. La Tabla 43 explica en qué consisten.

TABLA 43 USO DEL EDIFICIO

<i>Uso</i>	<i>Explicación</i>
Individual	Hace referencia a los usuarios que realizan el tratamiento del agua en el punto de consumo.
Colectivo	Cuenta con un tratamiento central del agua que abastece al edificio completo.

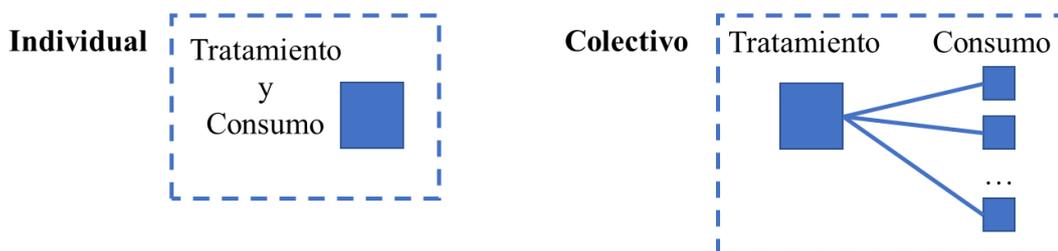


FIGURA 41 USO DEL EDIFICIO

La Tabla 44 muestra los tipos de edificios, explicando qué se entiende por cada uno.

TABLA 44 TIPO DE EDIFICIO

<i>Edificio</i>	<i>Explicación</i>
Domicilio	Casa o piso habitado por una unidad familiar o por un número determinado de personas.
Colegio	Edificio de tamaño mediano o pequeño empleado para dar clase a niños y adolescentes. El agua tratada es consumida por los alumnos y profesores durante la jornada escolar.
Hospital	Edificio de tamaño mediano o pequeño empleado para curar enfermos. El agua tratada es consumida por enfermos y por el personal del hospital.
Oficina	Edificio con pisos destinados a distintas empresas. El agua tratada es consumida por los trabajadores durante la jornada laboral. Se asume que cuenta con una red de tuberías.
Comunidad	Aldeas y pueblos pequeños.

Se ha decidido una relación entre el uso del edificio y el tipo, mostrada en la Tabla 45. Por ejemplo, el domicilio puede ser individual o colectivo. En el primer caso, el agua es tratada en el punto de consumo y es consumida únicamente por los residentes del hogar. En el segundo caso, el tratamiento del agua es central y común para un edificio residencial.

Se considera que los tanto los hospitales como las oficinas cuentan con un tratamiento central y, por tanto, es uso del edificio es colectivo.

TABLA 45 RELACIÓN ENTRE TIPO DE EDIFICIO Y USO

	<i>Individual</i>	<i>Colectivo</i>
Domicilio	X	X
Colegio	X	X
Hospital		X
Oficina		X
Comunidad	X	X

Esta distinción ayudará al usuario con la selección del uso que se da al edificio.

- **Número de usuarios**

Conocido el número de usuarios es posible calcular el agua que el sistema de tratamiento debe tratar para hacer frente a la demanda.

La OMS establece que una persona debe consumir de media 2 litros de agua al día. Además, necesita agua potable para limpiar los alimentos y para cocinar. Por ello, la OMS estima un consumo de hasta 7 litros al día. Se puede asumir que los 5 litros añadidos se pueden dividir entre varios miembros de la comunidad o de la unidad familiar, obteniéndose un consumo mínimo de **4 litros al día por persona**.

Se da la opción al usuario de introducir cuántos litros por día quiere emplear para calcular el caudal necesario. Puede variar entre **4 y 20 litros por día y por persona**.

Para calcular la demanda total, se multiplica el número de usuarios por los 4 litros al día, y el resultado debe ser menor o igual al caudal de salida del sistema de tratamiento en litros por día.

$$\sum d_i = 4 \text{ l/día} \cdot n^{\circ} \text{ usuarios} \leq x \text{ l/min} \cdot 60 \text{ min/h} \cdot 24 \text{ h/día}$$

donde x es el caudal de salida de la máquina en litros por minuto si se conoce el valor.

9.3.2 Calidad del agua

- **Fuente de agua**

El método de tratamiento más adecuado depende en gran medida de la fuente de agua. Conocida la fuente de agua cruda, se podrá determinar si es necesario centrarse en el tratamiento químico del agua, el microbiológico, la turbidez, o en todos. La Tabla 46 muestra las fuentes de agua que se están teniendo en cuenta en este trabajo, así como una breve descripción de cada tipo.

TABLA 46 FUENTES DE AGUA

<i>Fuente de agua</i>	<i>Descripción</i>
Pozos	Pueden estar expuestos a contaminantes derivados de las actividades humanas, como pesticidas o heces.
Manantiales o ríos	Al tratarse de una corriente de agua, el riesgo de contaminantes microbiológicos es menor. Pueden estar expuestos a contaminantes químicos.
Acuíferos confinados	Suelen ser seguros y estables en cuanto a los contaminantes microbiológicos y químicos en ausencia de contaminación directa.
Lagos o embalses	Al retener el agua en los embalses, la contaminación fecal disminuye con la sedimentación. Gracias a la radiación solar, algunos contaminantes microbiológicos se inactivan.
Mar	El agua del mar debe ser desalinizada. Puede tener contaminantes químicos y microbiológicos.
Lluvia	El agua de lluvia puede tener contaminantes microbiológicos y químicos. Esto ocurre con mayor frecuencia en ciudades o en áreas con alta actividad industrial. En zonas rurales, esto no suele ser un problema. Es recomendable cuidar la calidad microbiológica.

- **Uso de los suelos**

En función del uso de los suelos cerca de la fuente de agua, será necesario comprobar la presencia de unos contaminantes. Por ejemplo, si se trata de cultivos, será interesante instalar un método de tratamiento que sea efectivo contra pesticidas o herbicidas. Si se trata de industrias, habrá que considerar la presencia de otros contaminantes químicos. La Tabla 47 muestra el uso de los suelos con las respectivas sustancias que deben ser analizadas (Swistock, 2021). En el Anexo B se incluyen casos de contaminación del agua.

TABLA 47 USOS DEL SUELO Y POSIBLES CONTAMINANTES

<i>Uso del suelo</i>	<i>Posibles contaminantes</i>	<i>Tratamiento</i>
Industria	Escaneos orgánicos	Microbiológico
Ganadería	Heces de animales	Microbiológico
Agricultura	Nitratos, escaneos pesticidas	Químico
Minería	Fe, Mn, Al, sulfatos	Químico
Perforación de pozos de gas o petróleo	Cl, Ba	Químico
Gasolineras	Productos de petróleo	Químico
Casas con pozo séptico	Nitratos, bacterias	Microbiológico
Deshielo de carreteras	Na, Cl	Químico

- **Color y sabor del agua**

Si el agua cuenta con un color particular puede deberse a la presencia de contaminantes químicos u otros compuestos orgánicos. La Tabla 48 muestra algunos ejemplos de colores y sabores del agua y cuáles son los posibles motivos (Swistock, 2021). El usuario introducirá la opción que más se ajuste a su caso para que el modelo pueda determinar si hay que prestar especial atención en la desinfección de unos contaminantes.

TABLA 48 CAUSAS DEL COLOR Y SABOR DEL AGUA

<i>Color y sabor</i>	<i>Posibles contaminantes</i>	<i>Tratamiento</i>
Manchas color café anaranjadas, sabor metálico	Fe, Mn	Químico
Motas o manchas negras	Mn, Fe	Químico
Película blanca o gris, necesidad de mayor uso de jabón	Dureza	Turbidez
Sabor salado	Cl	Químico
Manchas azules y verdosas, sabor metálico	pH, índice de corrosividad, Cu, Pb	Químico

- **pH del agua**

El pH da información sobre el agua. Debe medirse cada 3 años y debe ser **superior a 6,5 e inferior a 8**. Un pH fuera de esos límites resulta corrosivo para el plomo y el cobre de las tuberías. Existen unos kits económicos y simples para medir el pH, que además dan otra información sobre la calidad del agua. En el Anexo C se da más información sobre estos kits.

9.4 Funcionamiento del Modelo

Ya se han explicado los parámetros de entrada. En este apartado se explica la lógica detrás del modelo de selección.

9.4.1 Perfil del usuario

La Figura 42 muestra la lógica detrás de la filtración de la base de datos en cuanto al perfil del usuario.

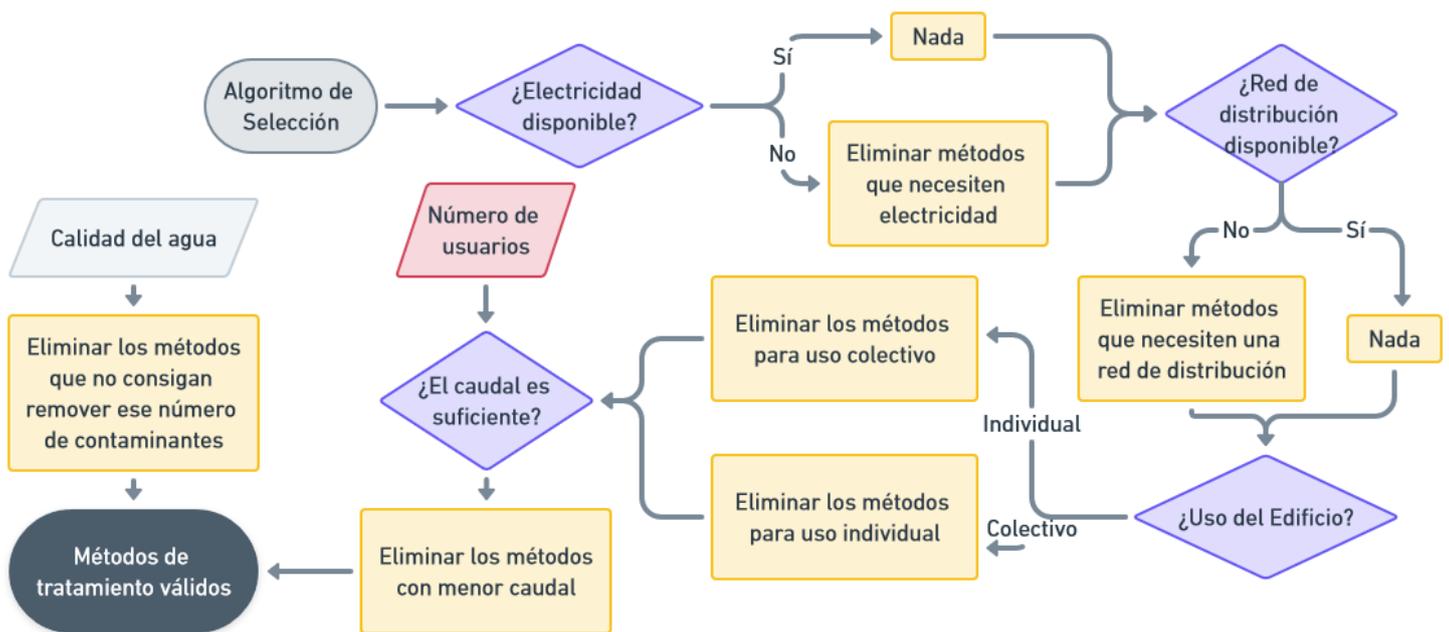


FIGURA 42 DIAGRAMA DE FLUJO DE LA FILTRACIÓN DE MÉTODOS SEGÚN EL PERFIL DEL USUARIO

En primer lugar, el usuario introduce si dispone de **electricidad** para llevar a cabo el tratamiento del agua. Si el usuario dispone de electricidad, la base de datos mantiene todos los métodos de tratamiento, ya que es posible elegir un método que no necesite electricidad. Si, por el contrario, no se dispone de electricidad, se eliminarán las filas con los métodos sí necesiten electricidad para funcionar.

El segundo parámetro es la disponibilidad de una **red de distribución**. Al igual que con el primer parámetro, si se dispone de red de distribución la base de datos no se modificará, mientras que, si no hay una red de distribución, se eliminarán los métodos que la necesiten para funcionar.

Con el tercer parámetro se especifica cuál es el **tipo de usuario**: individual o colectivo. Si el usuario es individual, se eliminan los métodos que solo pueden ser usados con uso colectivo, y viceversa.

La electricidad, la red de distribución y el uso del edificio eliminan los métodos usando una condición de “igual”. Es decir, eliminan los métodos que no tengan la misma condición de entrada:

$$\text{Input} == \text{Base de datos}$$

Con el **número de consumidores** habituales se puede estimar el caudal de agua tratada necesario. Con el caudal se eliminan los métodos de tratamiento que no tengan suficiente caudal de salida para cubrir la demanda:

$$\text{Input caudal} \leq \text{Base de datos}$$

9.4.2 Calidad del agua

La calidad del agua se obtiene como la presencia de contaminantes, y viene determinada por los cuatro parámetros de entrada explicados: fuente de agua, uso de los suelos, color y sabor del agua y pH del agua. Esta varía en función del escenario introducido. Es decir, la calidad de un pozo no es la misma que de la lluvia. Con estos parámetros se quiere determinar el nivel de contaminantes microbiológicos, contaminantes químicos y turbidez en el agua.

La presencia de contaminantes está relacionada con la importancia del tratamiento de los contaminantes microbiológicos o químicos y de la turbidez. Conocida la calidad del agua, será posible filtrar los métodos de tratamiento que no tengan capacidad suficiente de remoción de dichos contaminantes.

Se evalúa de 0 a 5 el nivel de contaminación, donde 5 implica una mayor presencia. Los valores de las siguientes tablas han sido derivados del estudio del contexto del agua. Estos valores representan la presencia de contaminantes en el agua.

- **Fuente de agua**

Manos Unidas trabaja mayoritariamente con comunidades rurales en las que la presencia de contaminantes químicos es muy baja. Su mayor preocupación es la inocuidad microbiana.

TABLA 49 CONTAMINANTES EN EL AGUA SEGÚN LA FUENTE DE AGUA

<i>Fuente de agua</i>	<i>Presencia microbiológica</i>	<i>Presencia química</i>	<i>Turbidez</i>
Pozos	3	2	2
Manantiales o ríos	2	2	3
Acuíferos confinados	1	1	2
Lagos o embalses	1	2	2
Mar	2	2	1
Lluvia	2	1	1
Ninguno	0	0	0

- **Uso de los suelos**

TABLA 50 CONTAMINANTES EN EL AGUA SEGÚN EL USO DE LOS SUELOS

<i>Nombre</i>	<i>Presencia microbiológica</i>	<i>Presencia química</i>	<i>Turbidez</i>
Industria	2	1	0
Ganadería	4	0	0
Agricultura	0	2	0
Minería	0	2	1
Perforación de pozos de gas o petróleo	0	2	0
Gasolineras	0	2	0
Casas con pozo séptico	3	0	0
Deshielo de carreteras	0	2	0
Ninguno	0	0	0

- **Color y sabor del agua**

TABLA 51 CONTAMINANTES EN EL AGUA SEGÚN EL COLOR Y SABOR

<i>Nombre</i>	<i>Presencia microbiológica</i>	<i>Presencia química</i>	<i>Turbidez</i>
Manchas color café anaranjadas y sabor metálico	0	1	0
Motas o manchas negras	0	1	0
Película blanca o gris y necesidad de mayor uso de jabón	0	0	1
Sabor salado	0	1	0
Manchas azules y verdosas y sabor metálico	0	1	0
Ninguno	0	0	0

- **pH del agua**

Un pH ácido suele deberse a la presencia de contaminantes químicos en el agua. Un pH básico implica una mayor presencia de cal en el agua, lo cual aumenta la dureza del agua.

TABLA 52 CONTAMINANTES EN EL AGUA SEGÚN EL PH

<i>Nombre</i>	<i>pH</i>	<i>Presencia microbiológica</i>	<i>Presencia química</i>	<i>Turbidez</i>
Ácido	[0; 6,5)	0	2	0
Neutro	[6,5; 8]	0	0	0
Básico	(8; 14]	0	0	1

- **Determinación de la calidad del agua**

El usuario escoge la opción que más se ajuste a su situación para cada uno de los parámetros anteriores. Cada una de las opciones proporciona el nivel de contaminantes en el agua.

El nivel de contaminantes del agua está relacionado con la necesidad de tratamiento del agua.

Para determinar el nivel de contaminantes microbiológicos, se escoge el **valor máximo** de los distintos parámetros por ser el más restrictivo. Lo mismo ocurre con los contaminantes químicos y con la turbidez.

La Tabla 53 muestra un ejemplo de cómo funcionaría el algoritmo de selección de la calidad del agua.

El usuario cuenta con un pozo como fuente de agua, el uso de los suelos próximos es la agricultura, no presenta ningún color o sabor y el pH del agua es 7. El nivel de contaminantes microbiológicos según la fuente de agua es 3, según el uso de suelos es 0, según el color y sabor es 0 y según el pH es 0. De estos valores, el nivel de contaminantes más restrictivo es 3, dado por la fuente de agua. Se necesita un método de tratamiento que sea capaz de tratar los contaminantes microbiológicos con una eficacia de 3 o mayor.

La presencia de contaminantes químicos es 2 según la fuente de agua y 2 según el uso de los suelos. Un método capaz de tratar los contaminantes químicos con una eficacia de 2 o más resolverá ambos problemas. De ahí que se escoja el valor máximo de cada columna.

TABLA 53 EJEMPLO DE LA DETERMINACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA

	<i>Input</i>	<i>Microbiológica</i>	<i>Química</i>	<i>Turbidez</i>
Fuente de agua	<i>Pozo</i>	3	2	2
Uso de los suelos	<i>Agricultura</i>	0	2	0
Color y sabor	<i>Ninguno</i>	0	0	0
pH del agua	<i>7</i>	0	0	0
CALIDAD	<i>MAX (col)</i>	3	2	2

Por tanto, el máximo de cada columna resulta ser 3, 2 y 2 para los contaminantes microbiológicos, contaminantes químicos y turbidez. El modelo deberá filtrar la tabla, eliminando los métodos de tratamiento que no tengan la capacidad de tratar el agua según los valores obtenidos.

TABLA 54 RESUMEN DE LAS CONDICIONES DEL MODELO DE SELECCIÓN

<i>Input</i>	Elec.	Red distr.	Uso edificio	Caudal	Presen. microb.	Presen. quím.	Turbidez
	=	=	=	<=	<=	<=	<=
<i>Mét[i]</i>	Elec.	Red distr.	Uso edificio	Caudal	Capac. microb.	Capac. quím.	Turbidez

9.4.3 Pretratamiento y Desinfección

En la introducción de los métodos de tratamiento se mencionó que la potabilización del agua suele estar compuesta por varios procesos. Para desarrollar el modelo de selección se han tenido en cuenta los distintos métodos por separado. El problema de esto es que no es una solución real. Por eso, se ha decidido dar la opción al usuario de introducir una etapa de pretratamiento y una etapa de desinfección.

La etapa de **pretratamiento** suele consistir en filtros de arena o filtros de gravedad que reducen la turbidez del agua. Si el usuario selecciona que va a instalar pretratamiento, la turbidez del agua se reducirá a un valor de 1.

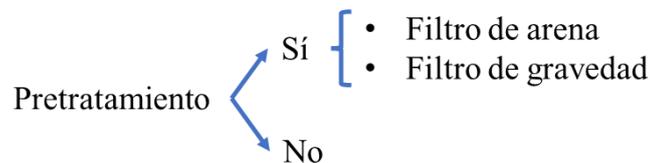


FIGURA 43 ETAPA DE PRETRATAMIENTO EN EL MODELO DE SELECCIÓN

La etapa de **desinfección** reduce o elimina los contaminantes microbiológicos. Suele ser la última etapa del tratamiento del agua y se usa en combinación con otros métodos, ya que no reduce la turbiedad y no es muy efectivo contra los contaminantes químicos. Si el usuario selecciona la desinfección, deberá emplear la cloración o la ozonización, en función de la disponibilidad de electricidad. La presencia microbiológica en el agua tendrá un valor de 0.

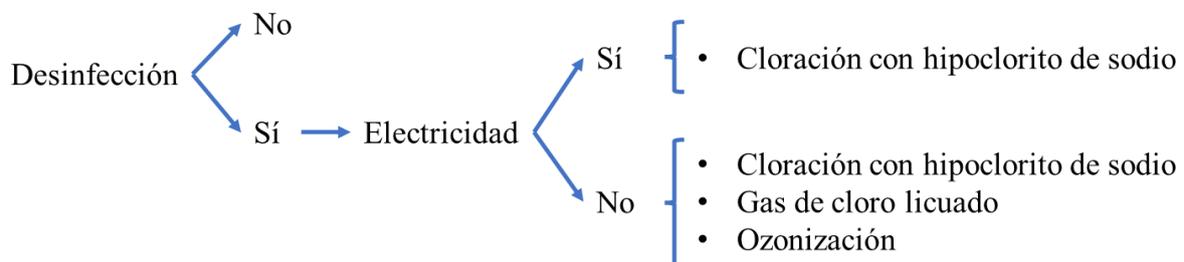


FIGURA 44 ETAPA DE DESINFECCIÓN EN EL MODELO DE SELECCIÓN

Al incluir estas opciones, el modelo se ajusta mejor a la realidad, ya que estas etapas suelen usarse en conjunto con otros métodos.

9.4.4 Base de Datos

La base de datos es muy similar a la tabla comparativa obtenida. En esta se ha dado valor numérico a los caudales de entrada y se ha introducido la necesidad de una red de distribución y el uso del edificio.

Las columnas de electricidad, uso de red y tipo de edificio tienen un valor numérico: 0, 1 o 2. En la Tabla 55 se explica el significado de estos valores.

TABLA 55 SIGNIFICADO DE LOS VALORES EN LA BASE DE DATOS

Número	Significado
0	El método de tratamiento no necesita electricidad, no necesita una red de distribución, o se usa en aplicaciones individuales.
1	El método necesita electricidad, necesita una red de distribución, o se usa en aplicaciones colectivas.
2	El método puede ser usado con o sin electricidad, con o sin red de distribución, o con fines individuales o colectivos.

- **Valor numérico de los caudales**

En la tabla comparativa, se muestra el caudal de salida de diferentes maneras. En algunos métodos se conoce la velocidad de filtración. En otros, el caudal de salida está limitado por la capacidad del grifo. Algunos métodos tratan el agua en recipientes de distintos tamaños. Y otros métodos pueden pertenecer a varias de las categorías explicadas, pero se tiene en cuenta el caudal más restrictivo.

Si el método se puede usar para tratar cualquier caudal, se ha dado un valor suficientemente alto para que esta variable no sea una restricción.

Si se conoce el caudal de salida, el caudal total disponible en el día se obtiene de la siguiente forma:

$$Q \left[\frac{l}{\text{día}} \right] = x \left[\frac{l}{\text{min}} \right] \cdot 60 \left[\frac{\text{min}}{h} \right] \cdot 24 \left[\frac{h}{\text{día}} \right]$$

Se considera que el método instalado está tratando agua durante el día completo, y que el agua tratada puede ser almacenada. Por tanto, se disponen de las 24 horas del día para tratar el agua.

La variable “x” representa el caudal de salida conocido de los métodos de tratamiento. Si el caudal de salida del método está limitado por el **grifo**, el caudal será **6 litros por minuto** de media (iVIGA, 2021).

Los métodos que tratan el agua en recipientes pueden usar distintos tamaños. Cuando se usan estos métodos, es común instalar varios recipientes en paralelo porque el caudal de salida es pequeño.

La **desinfección por ebullición** se lleva a cabo en ollas que suelen tener una capacidad de 5 litros o más. En un día se puede llevar a cabo este procedimiento cuantas veces sean

necesarias. Si es recomendable mantener el agua en ebullición durante 20 minutos, y se considera una ventana de 12 horas, el caudal máximo será **30 litros en un día**.

La **filtración por destilación** sigue el mismo razonamiento que la desinfección por ebullición. Su uso suele estar limitado a laboratorios y hospitales. Un equipo de destilación de laboratorio produce **46 litros de agua al día**.

Las **jarras con filtro de carbón activado** pueden usarse tantas veces como sea necesario. Estas jarras suelen tener una capacidad de 3 a 4 litros. El caudal de agua tratada al día puede ser tan alto como **400 litros** con una jarra.

$$Q \left[\frac{l}{\text{día}} \right] = 8 \text{ jarras/hora} \cdot 4 \text{ litros/jarra} \cdot 12 \text{ horas/día} = 384 \text{ l/día}$$

Los **filtros cerámicos** suelen tener un depósito de almacenamiento de unos 20 o 30 litros. Sin embargo, la velocidad de filtración es el factor limitante en estos filtros (de 0,02 a 0,05 lpm). Por eso se suelen usar varios de estos filtros en paralelo.

El **método SODIS** se lleva a cabo en garrafones o botellas de plástico de hasta **20 litros** de capacidad. Se pueden poner tantos garrafones en paralelo como sea necesario.

Por último, en el **almacenamiento y decantación** se pueden usar recipientes de hasta **20 litros**. Se pueden poner tantos recipientes en paralelo como sea necesario.

Los filtros cerámicos, el método SODIS y el almacenamiento y decantación pueden tener varias instalaciones en paralelo.

TABLA 56 CAUDAL MÁXIMO DE LOS MÉTODOS QUE USAN RECIPIENTE

<i>Método</i>	<i>Caudal de un equipo (l/día)</i>	<i>Número máximo de equipos</i>	<i>Caudal máximo en un día (l/día)</i>
Filtros cerámicos de olla	72	20	1440
Filtros cerámicos de vela	28	20	560
Método SODIS	20	20	400
Almacenamiento y decantación	20	20	400

Como el caudal de una máquina no suele ser suficiente para tratar el agua y abastecer a todos los usuarios, se suelen instalar varias máquinas o unidades filtrantes en paralelo. El usuario puede escoger el número de máquinas que quiere instalar (entre 1 y 20). Esto es útil especialmente con los métodos de tratamiento en recipiente.

- **Base de datos**

Teniendo todo lo anterior en cuenta, se obtiene la Base de Datos es la mostrada en la Tabla 57. Estos datos alimentan el modelo de selección que filtra los métodos según los parámetros de entrada.

TABLA 57 BASE DE DATOS DEL MODELO DE SELECCIÓN

<i>Método</i>	<i>Caudal (L/día)</i>	<i>Electricidad</i>	<i>Uso de red</i>	<i>Uso del edificio</i>	<i>Cap. microb.</i>	<i>Cap. quím.</i>	<i>Turbidez</i>
Cloración - Gas de cloro licuado	1000000	1	2	2	5	2	1
Cloración - Solución de hipoclorito de sodio	1000000	2	2	2	5	2	1
Cloración - Gránulos de hipoclorito de calcio	1000000	0	2	2	5	2	1
Ozonización	1000000	1	1	1	4	3	1
Desinfección por ebullición	30	2	0	0	3	1	1
Filtros rápidos por gravedad	8640	0	2	2	1	1	5
Filtros gruesos	2880	0	2	2	1	1	5
Filtros a presión	8640	1	2	1	1	1	5
Filtros lentos de arena	28,8	0	2	2	4	2	3
Filtros rápidos de arena	191520	1	2	2	2	2	5
Tanque de almacenamiento	8640	1	2	1	2	1	2
Filtración de ribera	0	1	2	1	4	2	3
Aireación	8640	0	2	1	1	3	2
Coagulación química	1000000	0	2	1	3	3	3
Adsorción con carbón activado - Grifo	720	0	1	0	1	4	4
Adsorción con carbón activado - Jarra	400	0	0	0	1	4	4
Filtros cerámicos - Olla	72	0	0	0	3	2	4

<i>Método</i>	<i>Caudal (L/día)</i>	<i>Electricidad</i>	<i>Uso de red</i>	<i>Uso del edificio</i>	<i>Cap. microb.</i>	<i>Cap. quím.</i>	<i>Turbidez</i>
Filtros cerámicos - Vela	28,8	0	0	0	3	2	4
Filtros de cal o descalcificadores	720	1	1	0	1	2	3
Filtración por destilación	46	1	0	0	4	4	4
Filtros de membranas	360	1	2	1	4	3	4
Filtración por osmosis inversa	720	1	2	1	5	3	4
Tratamiento con rayos UV	34560	1	1	1	4	2	1
Método SODIS	20	0	0	0	3	1	2
Filtros de sedimentos	39600	0	2	0	3	2	4
Filtración con fibras y telas	828000	0	2	0	2	1	4
Almacenamiento y decantación	20	0	0	0	3	1	4

9.5 Código

El modelo de selección ha sido programado en **Python**. Este incluye todo lo que se ha ido explicando sobre el algoritmo y la manera de selección de los métodos más idóneos. El código se adjunta en el Anexo D.

Python es un lenguaje de programación sencillo, utilizado por su potencia y su facilidad de uso. Se ha trabajado en **Visual Studio Code** para desarrollar la aplicación y se ha usado la biblioteca “**Streamlit**” para crear la interfaz del usuario.

Las tablas mostradas en los apartados anteriores han sido empleadas para filtrar los métodos de tratamiento. Son introducidas en formato .csv.

Para trabajar con las tablas, se ha empleado la biblioteca “**pandas**”. Esta biblioteca de software es útil para manipular y analizar datos, lo que permite modificar la base de datos de los métodos de tratamiento de agua.

La aplicación cuenta con 4 ficheros.

1. **Main:** contiene toda la programación de la interfaz del usuario, así como el algoritmo de selección. Es donde se filtra la base de datos, dados unos parámetros de entrada.

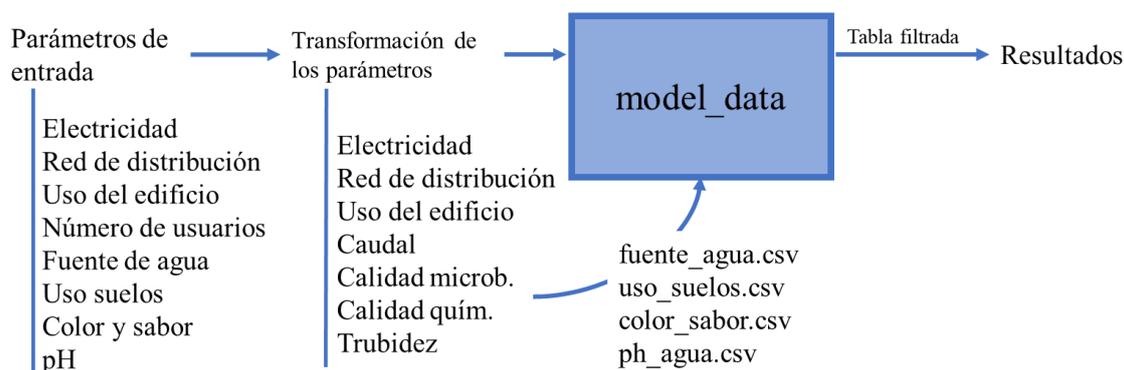


FIGURA 45 ESQUEMA DEL CÓDIGO

El usuario responde a una serie de preguntas sobre los parámetros de entrada. La aplicación transforma esta información en restricciones, usando los archivos .csv que contienen las tablas de la calidad del agua. Estas restricciones eliminan las filas que no cumplan con todas las restricciones. Como resultado se obtiene una tabla filtrada con los métodos que sí son aptos dadas unas condiciones de entrada.

2. **Base de datos:** muestra la tabla completa con los diferentes métodos de tratamiento.
3. **Tablas:** muestra todas las tablas que se han usado en la determinación de la calidad del agua (fuente, uso de los suelos, color y sabor, y pH).
4. **Tabla comparativa:** muestra la tabla comparativa con los caudales ya transformados en cifras.

9.6 Interfaz con el Usuario

El usuario puede acceder a este modelo de selección a través de la [página web](#). Para hacer esto posible, se ha empleado [Streamlit](#).

En primer lugar, se presenta la base de datos con un fragmento de la tabla.

Base de Datos

El modelo emplea como base de datos 27 métodos de tratamiento incluidos en la siguiente tabla.

Base de datos del modelo de selección

	Metodo	Caudal	Electricidad	Uso de red	Uso del edificio	Capacidad microbiológica	Capacidad química	Turbidez
0	Cloración - Gas de cloro licuado	1000000.00	1	2	2	5	2	1
1	Cloración - Solucion de hipoclorito de sodio	1000000.00	2	2	2	5	2	1
2	Cloración - Granulos de hipoclorito de calcio	1000000.00	0	2	2	5	2	1
3	Ozonización	1000000.00	1	1	1	4	3	1
4	Desinfección por ebullición	30.00	2	0	0	3	1	1

El caudal está en litros por minuto

Los valores mostrados en la tabla son el resultado del análisis de los distintos métodos de tratamiento.

Tabla completa +

FIGURA 46 BASE DE DATOS EN LA INTERFAZ DEL USUARIO

En segundo lugar, se pide al usuario que introduzca la información sobre su caso concreto.

Selección de los parámetros de entrada:

Seleccione la opción que mejor se ajuste a su situación.

Perfil del usuario

- Electricidad:**
Indique si dispone de electricidad en el punto de tratamiento del agua. Puede venir de la red o de un generador separado (p. ej. placa solar).
¿Hay electricidad disponible?
Si
- Red de distribución:**
Se entiende por red de distribución un sistema de tuberías que transporta el agua desde la fuente de agua hasta el punto de tratamiento, o en el propio edificio.
¿Existe una red de distribución?
Si
- Uso del edificio:**
Un edificio es de uso **individual** cuando el agua es tratada en el punto de consumo y es empleada por un solo grupo (p. ej., domicilio, colegio, comunidad).
Un edificio de uso **colectivo** cuenta con un sistema de tratamiento central, y el agua es consumida por distintos grupos de personas (p. ej., domicilio, colegio, hospital, oficina, comunidad).
¿El edificio es de uso individual o colectivo?
Individual

FIGURA 47 SELECCIÓN DE PARÁMETROS DE LA INTERFAZ DEL USUARIO (I)

Número de usuarios:

El número de usuarios determina el caudal que se necesita obtener del método de tratamiento. La OMS estima que una persona adulta consume 2 litros de agua al día. Aparte de hidratarse, el ser humano consume agua para lavar alimentos, cocinar y la higiene personal. Se plantea un consumo mínimo de 4 litros por día por persona. Sin embargo, se da la opción de introducir un consumo por parte del usuario. El rango del consumo por persona debe estar entre 4 y 20 litros por persona y por día.

¿Cuál es el número usual de usuarios?

15

Introduzca el consumo de agua requerido (L/día):

4 16 20

Calidad del agua

Fuente de agua: Pozos

Uso de los suelos: Industria

Color y sabor del agua: Ninguno

pH del agua:

Se considera que si el pH del agua está entre 6,5 y 8, esta puede ser consumida. Un pH inferior a 6,5 indica que el agua es ácida, y habrá que prestar atención a los contaminantes químicos. Un pH superior a 8 indica que el agua es básica e incrementará su dureza, por lo que se revisará su turbidez.

¿Se dispone del pH del agua?

Pretratamiento y desinfección

¿Desea incluir un pretratamiento? ⓘ

¿Desea incluir desinfección? ⓘ

FIGURA 48 SELECCIÓN DE PARÁMETROS DE LA INTERFAZ DEL USUARIO (II)

Una tabla muestra los métodos de tratamiento que el modelo de selección escoge como idóneos para el caso introducido.

Métodos de tratamiento recomendados:

El modelo recibe como entrada los siguientes valores:

- Disponibilidad de electricidad: Si
- Disponibilidad de red de distribución: Si
- Uso del edificio: Individual
- Caudal: 150 L/día
- Fuente de agua: Pozos
- Uso de los suelos: Industria
- Color y sabor del agua: Ninguno
- pH del agua: Neutro
- Contaminantes en el agua:
 - Presencia microbiológica: 3
 - Presencia química: 2
 - Turbidez: 2

En ocasiones, es común instalar más de una máquina para llevar a cabo el tratamiento. Especialmente si el caudal es elevado.

Modifique el número de máquinas que puede instalar:

1 6 20

Caudal por máquina: 25.00 L/día

Dados los parámetros de entrada introducidos por el usuario, los modelos de selección que permitirán obtener un agua potable de calidad son:

	Metodo	Caudal	Electricidad	Uso de red	Uso del edificio	Capacidad microbiologica	Capacidad quimica	Turbidez
8	Filtros lentos de arena	28.80	0	2	2	4	2	3
16	Filtros ceramicos - Olla	72.00	0	0	0	3	2	4
17	Filtros ceramicos - Vela	28.80	0	0	0	3	2	4
19	Filtracion por destilacion	46.00	1	0	0	4	4	4
24	Filtros de sedimentos	39600.00	0	2	0	3	2	4

FIGURA 49 MÉTODOS RECOMENDADOS EN LA INTERFAZ DEL USUARIO

Por último, se muestra un resumen con la opción de ordenar los métodos según la dificultad de instalación, la dificultad de tratamiento y el precio relativo, y se añade otra información relacionada con

Resumen de los resultados

En la siguiente tabla puede filtrar los métodos de tratamiento según la dificultad de instalación, la dificultad de mantenimiento y el precio relativo.

Seleccione la característica con la que quiere ordenar los métodos:

Instalacion

Tabla ordenada:

	Metodo	Caudal	Electricidad	Uso de red	Uso del edificio	Instalacion	Mantenimiento	Precio relativo	Capacidad microbiologica	Capacidad quimica	Turbidez
16	Filtros ceramicos - Olla	72.00	0	0	0	1	2	3	3	2	4
17	Filtros ceramicos - Vela	28.80	0	0	0	1	2	3	3	2	4
19	Filtracion por destilacion	46.00	1	0	0	1	1	3	4	4	4
8	Filtros lentos de arena	28.80	0	2	2	2	3	2	4	2	3
24	Filtros de sedimentos	39600.00	0	2	0	3	2	2	3	2	4

FIGURA 50 RESUMEN DE LOS RESULTADOS EN LA INTERFAZ DEL USUARIO

En otras pestañas se adjuntan como anexos las tablas empleadas en el modelo de selección.

10 Ejemplos

10.1 Escenarios

Se asume en estos escenarios que el pH de la fuente de agua está dentro del rango de pH aceptable (entre 6,5 y 8).

- **Hogar en una aldea de familia de 10 miembros, con un pozo**

En este primer escenario, se plantea un hogar en una aldea que cuenta con 10 miembros. El uso del edificio es individual ya que tratarán el agua en el punto de consumo. No se dispone de electricidad ni de una red de distribución. La aldea se dedica a la agricultura. Si se requiere un consumo de 15 litros al día por persona, los métodos de tratamiento propuestos por el modelo son:

- 1 equipo – Filtros de sedimentos
- 2 equipos – Filtros cerámicos de olla
- 6 equipos – Filtros cerámicos de vela, Filtros lentos de arena

- **Edificio con 15 viviendas y 5 personas por vivienda, con un acuífero**

Se plantea un edificio de 3 pisos con 5 apartamentos por piso. Si de media hay 5 habitantes por apartamento, el número de usuarios es 75. Se dispone de electricidad y de una red de distribución. El uso del edificio es colectivo ya que contarán con tratamiento central. Se encuentran en una zona industrial. Si se requiere un consumo de 15 litros al día por persona, los métodos de tratamiento propuestos son:

- 1 equipo – Filtros rápidos de arena, Tanque de almacenamiento, Coagulación química
- 2 equipos – Filtración por ósmosis inversa
- 4 equipos – Filtros de membranas

- **Aldea completa de 100 miembros, con un río**

El uso del sistema de tratamiento es colectivo. No se dispone de electricidad, pero sí que una red de distribución. La aldea está localizada cerca de una mina. Se requieren 15 litros de agua al día por persona. Si se dispone de pretratamiento, el modelo propone:

- 1 equipo – Coagulación química, Cloración con hipoclorito de sodio y con hipoclorito de calcio

- **Aula en un colegio con 30 alumnos, con un pozo**

El uso del escenario es individual. No disponen de electricidad ni de red de distribución. Se requiere un consumo de 10 litros al día por persona. Si se dispone de desinfección, el modelo propone los métodos:

- 1 equipo – Filtros de sedimentos, Adsorción con carbón activado (jarra)
- 5 equipos – Filtros cerámicos de olla
- 11 equipos – Filtros cerámicos de vela

10.2 Caso Real. Proyecto de Manos Unidas en Gode, Etiopía

Manos Unidas proporcionó un proyecto que se realizó en Etiopía, en 2020. Se trata de una comunidad en Gode, y el objetivo es abastecer a 20.000 habitantes con un mínimo de 20 litros por persona al día (Blanco, y otros, 2020).

La planta de tratamiento cuenta con un decantador, filtros de arena, un depósito enterrado y un depósito elevado para presurizar el agua.

Los datos introducidos en el modelo se muestran en la Tabla 58.

TABLA 58 PARÁMETROS DE ENTRADA DEL PROYECTO DE GODE, ETIOPÍA

Disponibilidad de electricidad	Sí
Disponibilidad de red de distribución	No
Tipo de edificio	Colectivo
Número de usuarios	20.000
Fuente de agua	Manantiales o ríos
Uso de los suelos	Ninguno
Color y sabor	Ninguno
pH del agua	7,5

Conocidos los datos de entrada, el modelo de selección propone los siguientes métodos de tratamiento:

- Filtros rápidos de arena (3 filtros)
- Coagulación química

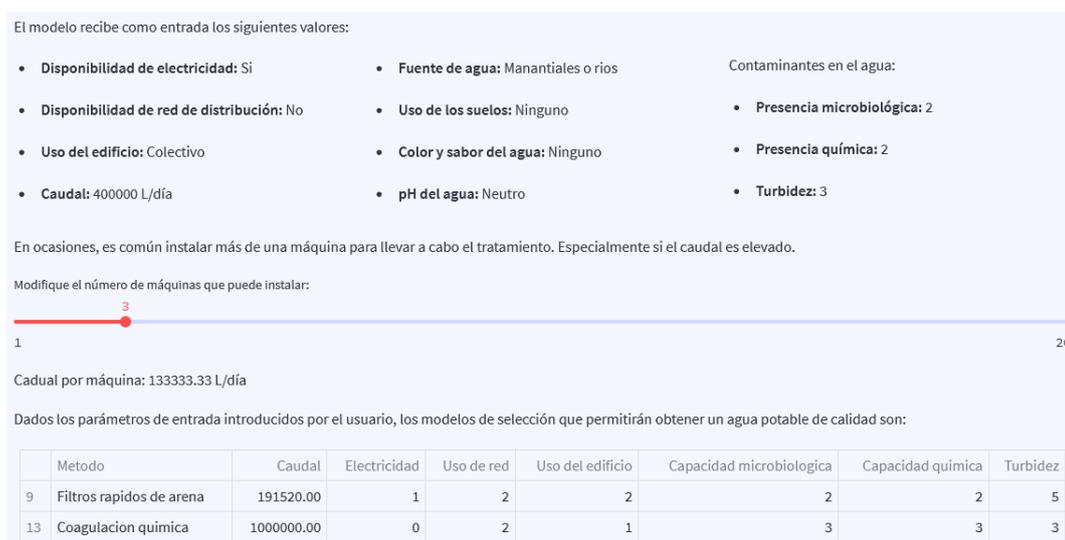


FIGURA 51 COMPROBACIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DEL MODELO

En el **proyecto real**, se instalaron dos filtros de arena, y este método de tratamiento está incluido en los que el modelo recomienda. Sin embargo, según el modelo se necesitan tres filtros de arena para hacer frente a la demanda diaria.

11 Conclusiones

El principal objetivo de este trabajo era responder a la necesidad de Manos Unidas de crear un documento con distintos métodos de tratamiento, y determinar qué parámetros son necesarios para decidir cuándo un método de tratamiento es útil y cuándo debe cambiarse.

Para responder a esta necesidad, he creado una recopilación de distintos métodos de tratamiento que forman la base de datos de un modelo de selección. Los parámetros de entrada de dicho modelo han sido seleccionados después de un cuidadoso estudio de los métodos de tratamiento, y se han empleado para filtrar la base de datos. Como resultado se obtienen los métodos de tratamiento aplicables a la circunstancia descrita.

Con este proyecto he logrado los objetivos planteados en el Resumen del proyecto:

TABLA 59 OBJETIVOS DEL PROYECTO

Recopilar los métodos de tratamiento de agua disponibles	✓
Encontrar un criterio para clasificar estos métodos	✓
Crear un modelo de elección del sistema más adecuado	✓
Comprobar la validez del modelo con un ejemplo real	✓

- **Recopilación de los sistemas de tratamiento de agua disponibles**

Con este trabajo he querido unificar y resumir los diferentes sistemas de tratamiento de agua disponibles en la industria. Para ello, la primera parte del proyecto ha consistido en la revisión de literatura sobre el contexto de agua a nivel mundial. He leído libros y documentos explicando la problemática de la contaminación del agua. Con esta lectura he descubierto qué es la calidad del agua y me he dado cuenta de la importancia de su tratamiento. He aprendido que no existen normas generales ya que cada caso concreto es un mundo. Esta lectura me ha ayudado a adentrarme en los métodos de tratamiento al poseer un mayor entendimiento sobre la calidad del agua y sus los requisitos mínimos. En la primera parte del documento resumo lo aprendido sobre la situación del agua.

La segunda parte del documento se centra en describir los métodos de tratamiento, con sus características básicas.

- **Criterio de clasificación de estos métodos**

Gracias al estudio de los métodos de tratamiento he podido definir características para compararlos: caudal, uso de electricidad, dificultad de instalación, dificultad de mantenimiento, precio relativo y capacidad de remoción de contaminantes microbiológicos, contaminantes químicos y turbidez. Esta primera comparación me ha servido como base del modelo de selección.

- **Modelos de selección**

En cuanto a la creación del modelo de selección, se planteaba en el resumen del proyecto llevarlo a cabo en Excel y convertirlo en página web. Después de intentarlo de diversas maneras, me di cuenta de que esto no iba a ser posible. Tenía parte del modelo creado. El usuario podía escoger los parámetros de entrada. Sin embargo, los problemas comenzaron cuando intenté automatizar el proceso. Probé a usar filtros avanzados, grabar macros... sin éxito. Después del tiempo invertido, no podía usar Excel. Este tiempo no fue en vano ya que me ayudó a tener una idea más clara sobre lo que quería de este modelo, qué parámetros influían de verdad, y cómo quería que funcionara.

Como ya no podía usar Excel, tuve que recurrir a otras herramientas. Siguiendo los consejos de un profesor, decidí que la mejor opción era usar Python, especialmente si después quería crear una página web. El problema era que no sabía programar en Python así que tuve que aprender desde cero. Estoy muy contenta de haber hecho esto porque me resistía a aprender Python. Este contratiempo me ha ayudado a salir de mi zona de confort y he podido aprender un nuevo lenguaje de programación.

Uno de los pasos más importantes ha sido la selección de los parámetros de entrada. Necesitaba unos parámetros que me permitieran definir la situación de partida y que fuesen suficientemente sencillos como para ser rellenados por cualquier persona. Con esto en mente decidí crear dos grupos de parámetros: perfil del usuario y calidad del agua.

Con el perfil del usuario busco conocer la disponibilidad tecnológica del usuario y el número de consumidores habitual.

Con la calidad del agua hago preguntas al usuario para determinar cuál es la necesidad de tratamiento de la fuente de agua.

A lo largo de la programación, se me iban ocurriendo nuevas características que podían mejorar el modelo, y las iba incluyendo en el código. El modelo ha cambiado bastante desde la primera iteración.

- **Validez del modelo**

Desde Manos Unidas compartieron conmigo un antiguo proyecto de diseño de un sistema de tratamiento en Gode, Etiopía. Del documento del proyecto obtuve los parámetros de entrada y los introduje en el modelo. Obtuve como resultado unos métodos de tratamiento. Entre los métodos propuestos se encontraba el que habían instalado en la vida real. La diferencia es que, para hacer frente a la demanda, mi modelo necesitaba tres filtros para llevar a cabo el tratamiento y hacer frente a la demanda, mientras que en la práctica se instalaron dos filtros. Creo que esta discrepancia es consecuencia de las diferencias que hay entre lo teórico y lo práctico.

- **Mejoras**

Este proyecto se podría mejorar entrenando el modelo con ejemplos reales. Los valores de las tablas que indican el nivel de contaminación o la capacidad de tratamiento han sido derivados del análisis de los métodos de tratamiento y de la revisión de literatura. Se podría añadir una sección al código que usaría ejemplos reales de todo el mundo para rellenar estas tablas. Entrenando el modelo, se podría comprobar si los valores actuales se ajustan a los propuestos por el código y a la realidad.

Con todo, en este Trabajo de Fin de Máster he recopilado los métodos de tratamiento de agua disponibles, he comparado estos métodos según unas características, y he creado un modelo de selección que emplea como entrada parámetros suficientemente simples como para poder ser **usado por cualquier persona**.

12 Anexos

A. Valores de Referencia de los Contaminantes Químicos

TABLA 60 SUSTANCIAS QUÍMICAS EXCLUIDAS DE LA DERIVACIÓN DE VALOR DE REFERENCIA

Sustancia química	Razón de la exclusión
Amitraz	Se degrada rápidamente en el ambiente y no se espera su presencia en concentraciones medibles en los sistemas de abastecimiento de agua de consumo humano
Cipermetrina	Su presencia no es probable en el agua de consumo humano
Clorobencilato	Su presencia no es probable en el agua de consumo humano
Clorotalonilo	Su presencia no es probable en el agua de consumo humano
Deltametrina	Su presencia no es probable en el agua de consumo humano
Diazinón	Su presencia no es probable en el agua de consumo humano
Dinoseb	Su presencia no es probable en el agua de consumo humano
Etilentiourea	Su presencia no es probable en el agua de consumo humano
Fenamifós	Su presencia no es probable en el agua de consumo humano
Forato	Su presencia no es probable en el agua de consumo humano
Formotión	Su presencia no es probable en el agua de consumo humano
Hexaclorociclohexanos (mezcla de isómeros)	Su presencia no es probable en el agua de consumo humano
MCPB ^a	Su presencia no es probable en el agua de consumo humano
Metamidofós	Su presencia no es probable en el agua de consumo humano
Metomil	Su presencia no es probable en el agua de consumo humano
Mirex	Su presencia no es probable en el agua de consumo humano
Monocrotofós	Su uso ha sido retirado en muchos países y su presencia no es probable en el agua de consumo humano
Oxamil	Su presencia no es probable en el agua de consumo humano
Óxido de tributilestaño	Su presencia no es probable en el agua de consumo humano
Piridato	No es persistente y es raro que se encuentre en el agua potable
Propoxur	Su presencia no es probable en el agua de consumo humano
Quintoceno	Su presencia no es probable en el agua de consumo humano
Toxafeno	Su presencia no es probable en el agua de consumo humano
Triazofós	Su presencia no es probable en el agua de consumo humano
Triclorfón	Su presencia no es probable en el agua de consumo humano

^aÁcido 4-(4-cloro-o-toliloxi) butírico

TABLA 61 SUSTANCIAS QUÍMICAS SIN VALOR DE REFERENCIA

Sustancia química	Razón por la que no se ha establecido un valor de referencia
Aluminio	Se podría derivar un valor basado en la salud de 0.9 mg/l, pero este valor excede los niveles que optimizan el proceso de coagulación en plantas de tratamiento de agua de consumo humano que emplean coagulantes con aluminio: 0.1 mg/l o menos en grandes plantas de tratamiento de agua y 0.2 mg/l o menos en plantas pequeñas
Amoniaco	Sus concentraciones en el agua de consumo humano son tan bajas, que no representan una preocupación para la salud
Asbesto	No hay pruebas consistentes de que la ingestión de asbesto sea peligrosa para la salud
<i>Bacillus thuringiensis israelensis</i> (Bti)	No se considera adecuado establecer valores de referencia para los plaguicidas que se usan para controlar vectores en el agua de consumo humano
Bentazona	Se encuentra en el agua potable o en fuentes de agua potable en concentraciones muy por debajo de las que representan una preocupación para la salud.
Berilio	Rara vez se encuentra en el agua de consumo humano en concentraciones que representen una preocupación para la salud
Bromocloroacetato	Los datos disponibles son insuficientes para permitir la derivación del valor de referencia basado en la salud
Bromocloroacetoneitrilo	Los datos disponibles son insuficientes para permitir la derivación del valor de referencia basado en la salud
Bromuro	Sus concentraciones en el agua de consumo humano son tan bajas, que no representan una preocupación para la salud
Carbaril	Sus concentraciones en el agua de consumo humano son tan bajas, que no representan una preocupación para la salud
Cianuro	Sus concentraciones en el agua de consumo humano son tan bajas, que no representan una preocupación para la salud, excepto en situaciones de emergencia después de un derrame en una fuente de agua
Cinc	Los niveles que se encuentran en el agua de consumo humano no son un problema de salud ^a
Cloroacetonas	Los datos disponibles para las cloroacetonas son insuficientes para permitir la derivación del valor de referencia basado en la salud
2-Clorofenol	Los datos disponibles son insuficientes para permitir la derivación del valor de referencia basado en la salud
Cloropicrina	Los datos disponibles son insuficientes para permitir la derivación del valor de referencia basado en la salud
Cloruro	Los niveles que se encuentran en el agua de consumo humano no son un problema de salud ^a
Cloruro de cianógeno	Sus concentraciones en el agua de consumo humano son tan bajas, que no representan una preocupación para la salud
Di(2-etilhexil)adipato	Sus concentraciones en el agua de consumo humano son tan bajas, que no representan una preocupación para la salud
Dialquiltina	Los datos disponibles sobre las dialquiltinas son insuficientes para permitir la derivación del valor de referencia basado en la salud
Dibromoacetato	Los datos disponibles son insuficientes para permitir la derivación del valor de referencia basado en la salud
Dicloramina	Los datos disponibles son insuficientes para permitir la derivación del valor de referencia basado en la salud
1,3-Diclorobenceno	Los datos disponibles son insuficientes para permitir la derivación del valor de referencia basado en la salud
1,1-Dicloroetano	Los datos disponibles son insuficientes para permitir la derivación del valor de referencia basado en la salud

Sustancia química	Razón por la que no se ha establecido un valor de referencia
2,4-Diclorofenol	Los datos disponibles son insuficientes para permitir la derivación del valor de referencia basado en la salud
1,3-Dicloropropano	Los datos disponibles son insuficientes para permitir la derivación del valor de referencia basado en la salud
Diclorvos	Se encuentran en el agua potable o en fuentes de agua potable en concentraciones muy por debajo de las que representan una preocupación para la salud.
Dicofol	Su presencia es poco probable en el agua potable o en fuentes de agua potable ^b
Dicuat	Se puede usar como herbicida acuático para el control de malezas acuáticas libres flotantes y sumergidas en estanques, lagos y canales de riego, pero rara vez se encuentra en el agua de consumo humano
Diflubenzurón	No se considera adecuado establecer valores de referencia para los plaguicidas que se usan para controlar vectores en el agua de consumo humano
Dióxido de cloro	Se reduce principalmente a clorito, clorato y cloruro en el agua potable, y a clorito y cloruro al ser ingerido; los valores provisionales de la guía para el clorito y el clorato protegen contra la toxicidad potencial del dióxido de cloro
Dureza	Los niveles que se encuentran en el agua de consumo humano no son un problema de salud ^a
Endosulfán	Sus concentraciones en el agua de consumo humano son tan bajas, que no representan una preocupación para la salud
Estaño inorgánico	Sus concentraciones en el agua de consumo humano son tan bajas, que no representan una preocupación para la salud
2-Fenilfenol y su sal sódica	Sus concentraciones en el agua de consumo humano son tan bajas, que no representan una preocupación para la salud
Fenitrotión	Sus concentraciones en el agua de consumo humano son tan bajas, que no representan una preocupación para la salud
Fluoranteno	Sus concentraciones en el agua de consumo humano son tan bajas, que no representan una preocupación para la salud
Formaldehído	Sus concentraciones en el agua de consumo humano son tan bajas, que no representan una preocupación para la salud
Glifosato y AMPA ^b	Sus concentraciones en el agua de consumo humano son tan bajas, que no representan una preocupación para la salud
Heptacloro y epóxido de heptacloro	Sus concentraciones en el agua de consumo humano son tan bajas, que no representan una preocupación para la salud
Hexaclorobenceno	Sus concentraciones en el agua de consumo humano son tan bajas, que no representan una preocupación para la salud
Hidrato de cloral	Sus concentraciones en el agua de consumo humano son tan bajas, que no representan una preocupación para la salud
Hierro	No es un preocupación para la salud en los niveles que causan problemas de aceptabilidad del agua de consumo humano ^a
Malatión	Sus concentraciones en el agua de consumo humano son tan bajas, que no representan una preocupación para la salud
Manganeso	No representa una preocupación para la salud en los niveles que suelen causar problemas de aceptabilidad en el agua potable. Sin embargo, hay circunstancias en las que el manganeso puede permanecer en solución en concentraciones más altas en algunas aguas ácidas o anaerobias, especialmente en las aguas subterráneas
MCPA ^d	Se encuentra en el agua potable o en fuentes de agua potable en concentraciones muy por debajo de las que representan una preocupación para la salud
Metil paratión	Sus concentraciones en el agua de consumo humano son tan bajas, que no representan una preocupación para la salud

Sustancia química	Razón por la que no se ha establecido un valor de referencia
Metil-terc-butil-éter (MTBE)	Cualquier valor de referencia que se derivaría sería significativamente mayor que las concentraciones en las que el MTBE sería detectable por el olor
Metopreno	No se considera adecuado establecer valores de referencia para los plaguicidas que se usan para controlar vectores en el agua de consumo humano
Molibdeno	Sus concentraciones en el agua de consumo humano son tan bajas, que no representan una preocupación para la salud
Monobromoacetato	Los datos disponibles son insuficientes para permitir la derivación del valor de referencia basado en la salud
Monoclorobenceno	Sus concentraciones en el agua de consumo humano son tan bajas, que no representan una preocupación para la salud, y el valor basado en la salud superaría con creces los umbrales más bajos reportados para el sabor y olor
MX	Sus concentraciones en el agua de consumo humano son tan bajas, que no representan una preocupación para la salud
Nitrobenceno	Rara vez se encuentra en el agua de consumo humano en concentraciones que representen una preocupación para la salud
Novalurón	No se considera adecuado establecer valores de referencia para los plaguicidas que se usan para controlar vectores en el agua de consumo humano
Paratión	Sus concentraciones en el agua de consumo humano son tan bajas, que no representan una preocupación para la salud
Permetrina	No se recomienda su adición directa al agua de consumo humano de acuerdo con la política de la OMS de excluir el uso de piretroides como larvicidas de mosquitos vectores de enfermedades humanas
pH	Los niveles que se encuentran en el agua de consumo humano no son un problema de salud ^e
Pirimifos-metilo	No se recomienda su aplicación directa en el agua de consumo humano, a menos que no se disponga de otros tratamientos efectivos y seguros
Piriproxifeno	No se considera adecuado establecer valores de referencia para los plaguicidas que se usan para controlar vectores en el agua de consumo humano
Plata	Los datos disponibles son insuficientes para permitir la derivación del valor de referencia basado en la salud
Potasio	Sus concentraciones en el agua de consumo humano son tan bajas, que no representan una preocupación para la salud
Productos derivados del petróleo	Su sabor y olor, en la mayoría de los casos, serán detectable en concentraciones inferiores a las que representan una preocupación para la salud, particularmente en la exposición a corto plazo
Propanil	Se transforma rápidamente en metabolitos que son más tóxicos; no se considera adecuado establecer un valor de referencia para la sustancia original y no hay datos suficientes para calcular valores de referencia para los metabolitos.
Sodio	Los niveles que se encuentran en el agua de consumo humano no son un problema de salud ^a
Sólidos disueltos totales	Los niveles que se encuentran en el agua de consumo humano no son un problema de salud ^a
Spinosad	No se considera adecuado establecer valores de referencia para los plaguicidas que se usan para controlar vectores en el agua de consumo humano
Sulfato	Los niveles que se encuentran en el agua de consumo humano no son un problema de salud ^a

Sustancia química	Razón por la que no se ha establecido un valor de referencia
Sulfuro de hidrógeno	Los niveles que se encuentran en el agua potable no son un problema de salud ^a
Temefós	No se considera adecuado establecer valores de referencia para los plaguicidas que se usan para controlar vectores en el agua de consumo humano
Tricloramina	Los datos disponibles son insuficientes para permitir la derivación del valor de referencia basado en la salud
Tricloroacetnitrilo	Los datos disponibles son insuficientes para permitir la derivación del valor de referencia basado en la salud
Triclorobencenos (total)	Sus concentraciones en el agua de consumo humano son tan bajas, que no representan una preocupación para la salud, y el valor basado en la salud superaría con creces los umbrales más bajos reportados para el sabor y olor
1,1,1-Tricloroetano	Sus concentraciones en el agua de consumo humano son tan bajas, que no representan una preocupación para la salud
Yodo	Los datos disponibles son insuficientes para permitir la derivación del valor de referencia basado en la salud, y la exposición a lo largo de la vida debido a la desinfección del agua con yodo es poco probable

^a Puede afectar la aceptabilidad del agua de consumo humano (vea el capítulo 10).

^b Aunque el dicofol no cumple uno de los tres criterios para ser evaluado en las Guías, se ha preparado un documento de antecedentes y se ha establecido un valor basado en la salud para atender una solicitud de orientación de los Estados Miembros

^c Ácido aminometilfosfónico

^d Ácido 4-(2-metil-4-clorofenoxi)acético.

^e Es un parámetro operativo importante de la calidad del agua.

TABLA 62 VALORES DE REFERENCIA DE LAS SUSTANCIAS QUÍMICAS

Sustancia química	Valor de referencia		Observaciones
	mg/l	µg/l	
Ácido edético	0.6	600	Aplicabe al ácido libre
Ácido nitrilotriacético	0.2	200	
Acrilamida	0.0005 ^a	0.5 ^a	
Alacloro	0.02 ^a	20 ^a	
Aldicarb	0.01	10	Aplicable al aldicarb sulfóxido y al aldicarb sulfona
Aldrín y dieldrín	0.000 03	0.03	Para la combinación de aldrín más dieldrín
Antimonio	0.02	20	
Arsénico	0.01 (A, T)	10 (A, T)	
Atrazina y sus metabolitos cloro-s-triazina	0.1	100	
Bario	1.3	1 300	
Benceno	0.01 ^a	10 ^a	
Benzo[a]pireno	0.0007 ^a	0.7 ^a	
Boro	2.4	2400	
Bromato	0.01 ^a (A, T)	10 ^a (A, T)	
Bromodiclorometano	0.06 ^a	60 ^a	
Bromoformo	0.1	100	
Cadmio	0.003	3	

Sustancia química	Valor de referencia		Observaciones
	mg/l	µg/l	
Carbofurán	0.007	7	
Clorato	0.7 (D)	700 (D)	
Clordano	0.0002	0.2	
Cloro	5 (C)	5000 (C)	Para que la desinfección sea eficaz, debe haber una concentración de cloro residual libre ≥ 0.5 mg/l después de un tiempo de contacto de al menos 30 min a pH <8.0. El cloro residual se debe mantener en todo el sistema de distribución. En el punto de entrega, la concentración mínima del cloro residual debe ser 0.2 mg/l
Clorito	0.7 (D)	700 (D)	
Cloroformo	0.3	300	
Clorotolurón	0.03	30	
Clorpirifós	0.03	30	
Cloruro de vinilo	0.0003 ^a	0.3 ^a	
Cromo	0.05 (P)	50 (P)	Para el cromo total
Cobre	2	2000	El agua puede manchar la ropa y los aparatos sanitarios cuando el valor de referencia es menor
Cianazina	0.0006	0.6	
2,4-D ^b	0.03	30	Aplicabe al ácido libre
2,4-DB ^c	0.09	90	
DDT ^d y sus metabolitos	0.001	1	
Dibromoacetnitrilo	0.07	70	
Dibromoclorometano	0.1	100	
1,2-Dibromo-3-cloropropano	0.001 ^a	1 ^a	
1,2-Dibromoetano	0.0004 ^a (P)	0.4 ^a (P)	
Dicloroacetato	0.05 ^a (D)	50 ^a (D)	
Dicloroacetnitrilo	0.02 (P)	20 (P)	
1,2-Diclorobenceno	1 (C)	1000 (C)	
1,4-Diclorobenceno	0.3 (C)	300 (C)	
1,2-Dicloroetano	0.03 ^a	30 ^a	
1,2-Dicloroetano	0.05	50	
Dicloroisocianurato de sodio	50 40	50 000 40 000	Como dicloroisocianurato de sodio
Diclorometano	0.02	20	Como ácido cianúrico
1,2-Dicloropropano	0.04 (P)	40 (P)	
1,3-Dicloropropeno	0.02 ^a	20 ^a	
Diclorprop	0.1	100	
Di(2-etilhexil)ftalato	0.008	8	
Dimetoato	0.006	6	
1,4-Dioxano	0.05 ^a	50 ^a	Se deriva mediante el uso del abordaje de ingesta diaria tolerable, así como del modelo multietapa lineal

Sustancia química	Valor de referencia		Observaciones
	mg/l	µg/l	
Endrín	0.0006	0.6	
Epiclorhidrina	0.0004 (P)	0.4 (P)	
Estireno	0.02 (C)	20 (C)	
Etilbenceno	0.3 (C)	300 (C)	
Fenoprop	0.009	9	
Fluoruro	1.5	1500	Al establecer normas nacionales se debe tener en cuenta el volumen de agua consumida y la ingesta de otras fuentes
Hexaclorobutadieno	0.0006	0.6	
Hidroxiatrazina	0.2	200	Metabolitos de la atrazina
Isoproturón	0.009	9	
Lindano	0.002	2	
Mecoprop	0.01	10	
Mercurio	0.006	6	Para el mercurio inorgánico
Metoxicloro	0.02	20	
Metolacloro	0.01	10	
Microcistina-LR	0.001 (P)	1 (P)	Para microcistina-LR total (la libre más la intracelular)
Molinato	0.006	6	
Monocloramina	3	3000	
Monocloroacetato	0.02	20	
Níquel	0.07	70	
Nitrato (como NO ₃ ⁻)	50	50 000	Basado en efectos de corto plazo, pero es protector contra los efectos de largo plazo
Nitrito (como NO ₂ ⁻)	3	3000	Basado en efectos de corto plazo, pero es protector contra los efectos de largo plazo
N-Nitrosodimetilamina	0.0001	0.1	
Pendimetalina	0.02	20	
Pentaclorofenol	0.009 ^a (P)	9 ^a (P)	
Perclorato	0.07	70	
Plomo	0.01 (A, T)	10 (A, T)	
Selenio	0.04 (P)	40 (P)	
Simazina	0.002	2	
2,4,5-T ^e	0.009	9	
Terbutilazina	0.007	7	
Tetracloroetano	0.04	40	
Tricloroacetato	0.2	200	
Tricloroetano	0.02 (P)	20 (P)	
2,4,6-Triclorofenol	0.2 ^a (C)	200 ^a (C)	
Trifluralina	0.02	20	
Trihalometanos			La suma de los cocientes de la concentración de cada uno y sus respectivos valores de referencia no debe ser mayor de 1

Sustancia química	Valor de referencia		Observaciones
	mg/l	µg/l	
Uranio	0.30 (P)	30 (P)	Solo se abordan los aspectos químicos del uranio
Xilenos	0.5 (C)	500 (C)	

A, valor de referencia provisional, porque el valor de referencia calculado es menor que el nivel de cuantificación alcanzable; C, las concentraciones de la sustancia iguales o menores que el valor de referencia basado en efectos sobre la salud pueden afectar al aspecto, sabor u olor del agua y dar lugar a reclamos de los consumidores; D, valor de referencia provisional porque una desinfección eficaz puede exceder el valor de la referencia; P, valor de referencia provisional, debido a las incertidumbres en la base de datos de salud; T, valor de referencia provisional, porque el valor de referencia calculado es menor que el nivel que es posible alcanzar mediante métodos de tratamiento prácticos, protección de la fuente, etc.

^aEl valor de referencia de las sustancias que se consideran cancerígenas es la concentración en el agua de consumo humano asociada a un valor máximo del riesgo adicional vitalicio de cáncer de 10^{-5} (un caso adicional de cáncer por cada 100 000 personas que ingieren agua de consumo humano con la sustancia del valor de referencia durante 70 años). Las concentraciones asociadas con valores máximos del riesgo adicional vitalicio de cáncer de 10^{-4} y 10^{-6} pueden calcularse multiplicando y dividiendo, respectivamente, el valor de referencia por 10.

^bÁcido 2,4-diclorofenoxiacético.

^cÁcido 4-(2,4-diclorofenoxi)butírico.

^dDiclorodifeniltricloreto.

^eÁcido 2,4,5-triclorofenoxiacético.

B. Casos de Contaminación del Agua

- Intoxicación masiva en un cordón industrial chileno: “Está todo contaminado: suelo, agua y aire” – <https://elpais.com/chile/2022-06-15/intoxicacion-masiva-en-un-cordon-industrial-chileno-esta-todo-contaminado-suelo-agua-y-aire.html>
- El Gobierno publica el mapa de aguas afectadas por contaminación por nitratos – https://www.elconfidencial.com/medioambiente/agua/2022-05-26/mapa-aguas-afectadas-por-contaminacion-nitratos-espana_3430812/
- Los pesticidas contaminan el agua de 25 pueblos de Lleida – https://es.ara.cat/sociedad/medio-ambiente/pesticidas-contaminan-agua-25-pueblos-lleida_1_4396195.html
- Ternium extrae 45 millones de litros de agua diarios en Xoxtla para fabricar acero – <https://www.lajornadadeoriente.com.mx/puebla/ternium-extrae-45-millones-agua-xoxtla-fabricar-acero-activistas/>
- Derrame de zinc en río Chillón: Minsa lanza alerta epidemiológica en Lima Norte y Canta – <https://www.infobae.com/america/peru/2022/06/19/derrame-de-zinc-en-rio-chillon-minsa-lanza-alerta-epidemiologica-en-lima-norte-y-canta/>
- Minería: la UNCuyo detectó contaminación en el río Jáchal – <https://www.losandes.com.ar/sociedad/mineria-la-uncuyo-detecto-contaminacion-en-el-rio-jachal/>
- El 94 % de las mareas negras oceánicas son causadas por la actividad humana – <https://www.elespectador.com/ambiente/blog-el-rio/el-94-de-las-mareas-negras-oceanicas-son-causadas-por-la-actividad-humana-noticias-hoy/>
- Continúan trabajos de limpieza de un derrame de petróleo en zona rural de Neiva – <https://www.semana.com/nacion/articulo/continuan-trabajos-de-limpieza-de-un-derrame-de-petroleo-en-zona-rural-de-neiva/202210/>
- El agua del grifo de la provincia de Zamora, líder en contaminantes químicos de la región – <https://www.laopiniondezamora.es/zamora-ciudad/2022/06/02/agua-grifo-provincia-zamora-lider-66796556.html>

C. Kits para Analizar Agua Potable

Todos los parámetros mencionados dan información sobre la calidad del agua de manera cualitativa. Sin embargo, existen unos kits capaces de analizar la calidad del agua usando unas tiras. Estas son introducidas en el agua y, en función del color en que se tornen, delatarán la presencia de un contaminante o un nivel de pH determinado.

El “[Drinking Water Test Kit - 9in1 Tap & Well Analysis](#)” de la compañía Health Metric analiza 9 parámetros clave para determinar la calidad del agua (Layton, 2020).



FIGURA 52 KIT PARA ANALIZAR EL AGUA POTABLE

1. pH

El pH mide la acidez del agua. Si se encuentra por debajo de 7, el pH es ácido, si está por encima de 7, el pH es básico, y un pH de 7 es neutro. El rango de pH del agua aceptable es de 6,5 a 8. Por debajo de este rango, el agua es ácida y causa problemas de corrosión en las tuberías de cobre. El agua tiene un sabor metálico como resultado de la corrosión. Si, por el contrario, el pH está por encima de este rango, el agua es básica, los problemas de alcalinidad aumentan.

2. Alcalinidad total

La alcalinidad mide la presencia de minerales de bicarbonato y carbonato en el agua. No están directamente relacionado con la salud del ser humano, pero son necesarios para evitar que el agua se torne ácida. La alcalinidad se utiliza para controlar la acidez del agua. Se recomienda que esté dentro del rango de 75 mg/l a 150 mg/l (Layton, 2020), aunque es aceptable que supere dicho rango para garantizar un pH alto y prevenir la corrosión.

3. Dureza total

La dureza del agua está relacionada con la cantidad de calcio y magnesio disueltos en el agua. El agua puede ser blanda o dura, con poca cantidad o mucha cantidad de estos minerales disueltos respectivamente. La presencia de estos minerales no es dañina para la salud, pero pueden crear problemas en los electrodomésticos al calentar el agua, ya que se crean incrustaciones de carbonato de calcio sobre el elemento calefactor. El rango recomendado de dureza es de 10 mg/l a 100 mg/l (Layton, 2020).

4. Cloro

La desinfección con cloro y cloraminas es muy común en aguas municipales y pozos privados. Su función es evitar la proliferación de bacterias, algas, hongos y otros microorganismos dañinos para la salud humana. Se establece una concentración residual máxima de 4 mg/l (Layton, 2020) que sigue protegiendo el agua. Esta concentración modifica el sabor del agua, afectando a la aceptabilidad de esta. Asimismo, el cloro reacciona con sustancias en el agua y forma los subproductos de desinfección, los trihalometanos y los ácidos haloacéticos, que pueden ser dañinos para la salud humana. Una manera eficaz de reducir el cloro es emplear filtros de carbón activado.

5. Nitrato y nitrito

El nitrato y el nitrito son compuestos derivados del nitrógeno. Su presencia en el agua se debe a que cuando llueve, son transportados por el suelo y hasta el suministro de agua. La contaminación del suelo suele estar relacionada con el uso de fertilizantes químicos, zonas de pasto para animales mal gestionadas, o con el mal funcionamiento de un sistema séptico.

La presencia de estos compuestos es dañina para la salud humana, creando problemas de digestión en el caso del nitrato, e impidiendo el transporte de oxígeno en la sangre con el exceso de nitrito. La EPA (United States Environmental Protection Agency) establece un máximo de 10 mg/l para el nitrato y 1 mg/l para el nitrito (Layton, 2020). Estas sustancias se pueden reducir usando procesos purificadores como la ósmosis inversa.

6. Plomo

Antiguamente, el plomo se usaba en pesticidas, lo que permitía la contaminación de las fuentes de agua. Hoy en día, la principal causa de contaminación de plomo se debe al uso de tuberías, grifos, bombas y otros elementos de plomo. El consumo de plomo conlleva un mayor riesgo de cáncer, enfermedad renal, derrame cerebral, pérdidas de memoria y presión arterial alta. Las mujeres embarazadas y los niños son los consumidores con más riesgo. La EPA establece un máximo de plomo de 15 partes por billón (ppb).

7. Cobre

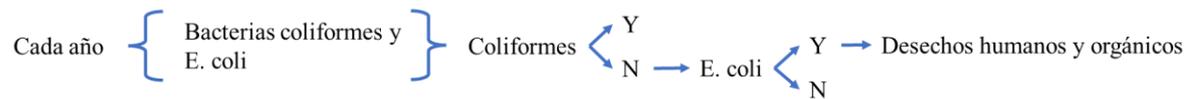
El cobre es necesario para plantas y animales. En concentraciones bajas, es completamente seguro, pero en altas concentraciones es dañino para la salud. La presencia del cobre en el agua viene dada por la corrosión de las tuberías y otros accesorios de cobre. La cantidad de cobre que el agua absorbe varía con los minerales que hay en el agua y con el nivel de pH, y se acumula cuando el agua permanece estancada en la tubería de cobre toda la noche. El

consumo de agua con exceso de cobre está relacionado con enfermedades gastrointestinales. Se establece un máximo de 1,3 partes por millón (ppm). Para reducir el cobre, se puede dejar correr el agua durante un minuto.

8. Bacterias coliformes

Las bacterias coliformes están presentes de forma natural en la tierra, el agua y las heces de algunos animales, incluidos los humanos. La mayoría de las bacterias coliformes no son peligrosas para el ser humano, pero algunas cepas, como la *E. coli*, son dañinas. Estas se encuentran en los intestinos de los humanos y los animales. La presencia de bacterias coliformes en el agua es inaceptable ya que es un indicador de posible contaminación fecal del agua. La presencia de algunas bacterias coliformes como la *E. coli* está relacionada con enfermedades gastrointestinales, siendo los niños y los ancianos los más vulnerables.

Si el test de bacterias coliformes es positivo, no implica que el agua contenga *E. coli*, por lo que es necesario comprobar la presencia de esta en el agua.



D. Código de Python

- **Main.py**

```
import streamlit as st
import pandas as pd

df = pd.read_csv('model_data.csv') # Base de datos
df_fuente = pd.read_csv('fuente_agua.csv')
df_suelos = pd.read_csv('uso_suelos.csv')
df_color_sabor = pd.read_csv('color_sabor.csv')
df_pH = pd.read_csv('pH_agua.csv')
df_comparativa = pd.read_csv('tabla_comparativa.csv')

# to run use: streamlit run Main.py

header = st.container()
dataset = st.container()
seleccion_input = st.container()
seleccion_modelo = st.container()
ordenar_resultados = st.container()

with header: # use for the title of the webpage
    st.title('¿Cuál es el método de tratamiento de agua más adecuado?')
    st.markdown('Dados unos parámetros de entrada simples, este modelo de
selección obtiene el método de tratamiento de agua más adecuado.')

with dataset:
    st.header('Base de Datos')
    st.markdown('El modelo emplea como base de datos 27 métodos de
tratamiento incluidos en la siguiente tabla.')

    st.subheader('Base de datos del modelo de selección')
    st.table(df.head().style.format(subset=['Caudal'],
formatter="{:.2f}"))

    st.caption('El caudal está en litros por día')

    st.markdown('Los valores mostrados en la tabla son el resultado del
análisis de los distintos métodos de tratamiento.')

    # Para ver la tabla
    with st.expander('Tabla completa'):
        st.table(df.style.format(subset=['Caudal'], formatter="{:.2f}"))

with seleccion_input:
    st.markdown('___')
    st.header('Selección de los parámetros de entrada:')

    st.markdown('Seleccione la opción que mejor se ajuste a su
situación.')
```

```

# Drop-down menus
# Electricidad:
st.subheader('Perfil del usuario')
st.markdown('* **Electricidad:**') # incluir después de esto la
explicación
st.markdown(''
Indique si dispone de electricidad en el punto de tratamiento del
agua.
Puede venir de la red o de un generador separado (p. ej. placa
solar).''')
input_elec = st.selectbox('¿Hay electricidad disponible?', options=[
'Si', 'No'])

# Red de distribución
st.markdown('* **Red de distribución:**')
st.markdown(''
Se entiende por red de distribución un sistema de tuberías que
transporta el agua desde la fuente de agua
hasta el punto de tratamiento, o en el propio edificio.'')
input_red = st.selectbox('¿Existe una red de distribución?',
options=[
'Si', 'No'])

# Uso del edificio
st.markdown('* **Uso del edificio:**')
st.markdown(''
Un edificio es de uso individual cuando el agua es tratada en el
punto de consumo y es empleada por un solo grupo (p. ej., domicilio,
colegio, comunidad). \n
Un edificio de uso colectivo cuenta con un sistema de tratamiento
central, y el agua es consumida por distintos
grupos de personas (p. ej., domicilio, colegio, hospital, oficina,
comunidad).''')
input_uso_edificio = st.selectbox('¿El edificio es de uso individual
o colectivo?', options=[
'Individual', 'Colectivo'])

# Introducir el número de usuarios
st.markdown('* **Número de usuarios:**')
st.markdown(''El número de usuarios determina el caudal que se
necesita obtener del método de tratamiento.
La OMS estima que una persona adulta consume 2 litros de agua al día.
Aparte de hidratarse, el ser humano consume
agua para lavar alimentos, cocinar y la higiene personal.
Se plantea un consumo mínimo de 4 litros por día por persona. Sin
embargo, se da la opción de introducir un consumo por parte del usuario.
El rango del consumo por persona debe estar entre 4 y 20 litros
por persona y por día.'')
input_usuarios = st.number_input(
'¿Cuál es el número usual de usuarios?', min_value=0,
max_value=100000)
consumo_agua = st.slider('Introduzca el consumo de agua requerido
(L/día):', min_value=4, max_value=20, value=4)
caudal = input_usuarios * consumo_agua # 4 L/día

# Calidad del agua
st.subheader('Calidad del agua')

```

```

coll1, col2, col3 = st.columns(3)
with coll1:
    st.markdown('* **Fuente de agua:**')
    input_fuente = st.selectbox('Escoja la fuente de agua:',
options=[
                                'Pozos',
                                'Manantiales o rios',
                                'Acuiferos confinados',
                                'Lagos o embalses',
                                'Mar',
                                'Lluvia',
                                'Ninguna'])

    with col2:
        st.markdown('* **Uso de los suelos:**')
        input_uso_suelos = st.selectbox('Escoja el uso de suelo
cercano:', options=[
                                'Industria',
                                'Ganaderia',
                                'Agricultura',
                                'Mineria',
                                'Perforacion de pozos de gas
o petroleo',
                                'Gasolineras',
                                'Casas con pozo septico',
                                'Deshielo de carreteras',
                                'Ninguno'])

    with col3:
        st.markdown('* **Color y sabor del agua:**')
        input_color_sabor = st.selectbox('¿El agua tiene un color o sabor
particular?', options=[
                                'Manchas color cafe
anaranjadas y sabor metalico',
                                'Motas o manchas negras',
                                'Pelicula blanca o gris y
necesidad de mayor uso de jabon',
                                'Sabor salado',
                                'Manchas azules y verdosas y
sabor metalico',
                                'Ninguno'])

    st.markdown('* **pH del agua:**')
    st.markdown('''Se considera que si el pH del agua está entre **6,5 y
8**, esta puede ser consumida.
    Un pH inferior a 6,5 indica que el agua es ácida, y habrá que prestar
atención a los contaminantes químicos.
    Un pH superior a 8 indica que el agua es básica e incrementará su
dureza, por lo que se revisará su turbidez.'')
    pH_conocido = st.checkbox('¿Se dispone del pH del agua?')
    if pH_conocido:
        input_pH = st.number_input('¿Cuál es el pH del
agua?',min_value=0.0,max_value=14.0,value=7.0)
        if float(input_pH) < 6.5:
            pH_agua = 'Acido'
        elif float(input_pH) > 8:
            pH_agua = 'Basico'
        else:
            pH_agua = 'Neutro'

```

```

    if (float(input_pH) > 10) | (float(input_pH) < 5):
        st.warning('Es recomendable que *busque otra fuente de
agua.*')
    else:
        pH_agua = 'Neutro'

# BOTONES PRETRATAMIENTO Y DESINFECCION
st.subheader('Pretratamiento y desinfección')
pretratamiento = st.checkbox('¿Desea incluir un pretratamiento?',
                             help='El pretratamiento consiste en un filtro
de arena o un filtro de gravedad que reduce la turbidez del agua')

desinfeccion = st.checkbox('¿Desea incluir desinfección?',
                            help='La desinfección reduce los
contaminantes microbiológicos')

def calcular_calidad(fuente, suelos, color_sabor, pH):
    # Calidad microbiológica -> obtengo tablas de una fila
    new_df_fuente = df_fuente.loc[df_fuente['Nombre'] == fuente]
    new_df_suelos = df_suelos.loc[df_suelos['Nombre'] == suelos]
    new_df_color_sabor = df_color_sabor.loc[df_color_sabor['Nombre']
== color_sabor]
    new_df_pH = df_pH.loc[df_pH['Nombre'] == pH]

    # microb está en la columna 2
    microb = max(new_df_fuente.iloc[0, 1], new_df_suelos.iloc[0, 1],
                 new_df_color_sabor.iloc[0, 1], new_df_pH.iloc[0, 1])
    # quimic está en la columna 3
    quimic = max(new_df_fuente.iloc[0, 2], new_df_suelos.iloc[0, 2],
                 new_df_color_sabor.iloc[0, 2], new_df_pH.iloc[0, 2])
    turb = max(new_df_fuente.iloc[0, 3], new_df_suelos.iloc[0, 3],
               new_df_color_sabor.iloc[0, 3], new_df_pH.iloc[0, 3])

    return [microb, quimic, turb]

calidad = calcular_calidad(input_fuente, input_uso_suelos,
input_color_sabor, pH_agua)

# Modificar calidad microbiológica y turbidez si se selecciona
pretratamiento y desinfección
if pretratamiento:
    calidad[2] = 1
if desinfeccion:
    calidad[0] = 0

with seleccion_modelo:
    st.markdown('___')
    st.header('Métodos de tratamiento recomendados:')

# Mostrar las entradas del modelo según las opciones seleccionadas:
st.markdown('El modelo recibe como entrada los siguientes valores:')
coll1, coll2, coll3 = st.columns(3)
with coll1:

```

```

    st.markdown(f'* **Disponibilidad de electricidad:**'
{input_elec}')
    st.markdown(f'* **Disponibilidad de red de distribución:**'
{input_red}')
    st.markdown(f'* **Uso del edificio:**' {input_uso_edificio}')
    st.markdown(f'* **Caudal:**' {caudal} L/día')
    with col2:
        st.markdown(f'* **Fuente de agua:**' {input_fuente}')
        st.markdown(f'* **Uso de los suelos:**' {input_uso_suelos}')
        st.markdown(f'* **Color y sabor del agua:**' {input_color_sabor}')
        st.markdown(f'* **pH del agua:**' {pH_agua}')
    with col3:
        st.markdown('Contaminantes en el agua:')
        st.markdown(f'* **Presencia microbiológica:**' {calidad[0]}')
        st.markdown(f'* **Presencia química:**' {calidad[1]}')
        st.markdown(f'* **Turbidez:**' {calidad[2]}')

new_df = df

if input_elec == 'No':
    # Me quedo solo con los métodos que no usen electricidad o
funcionen con ambos
    new_df = new_df.loc[(df['Electricidad'] == 0) |
(df['Electricidad'] == 2)]

if input_red == 'No':
    # Me quedo solo con los mét. que no necesiten red de distribución
o funcionen con ambos
    new_df = new_df.loc[(df['Uso de red'] == 0) | (df['Uso de red']
== 2)]

if input_uso_edificio == 'Individual':
    new_df = new_df.loc[(df['Uso del edificio'] == 0) | (df['Uso del
edificio'] == 2)]
else:
    new_df = new_df.loc[(df['Uso del edificio'] == 1) | (df['Uso del
edificio'] == 2)]

# Número de máquinas
st.write('')
st.markdown('')
        En ocasiones, es común instalar más de una máquina
para llevar a cabo el tratamiento.
        Especialmente si el caudal es elevado.'')
n_maquinas = st.slider('Modifique el número de máquinas que puede
instalar:', min_value=1, max_value=20)

new_df = new_df.loc[(new_df['Caudal'] >= caudal/n_maquinas) &
(new_df['Capacidad microbiologica'] >=
calidad[0]) &
        (new_df['Capacidad química'] >= calidad[1]) &
        (new_df['Turbidez'] >= calidad[2])]
st.markdown(f'Cadual por máquina: {caudal/n_maquinas:0.2f} L/día' )

## EXCEPCIONES:
if input_fuente == 'Mar':

```

```

new_df = pd.concat([new_df, df.loc[df['Metodo'] == 'Filtracion
por osmosis inversa']])

if pH_agua == 'Basico':
    new_df = pd.concat([new_df, df.loc[df['Metodo'] == 'Filtros de
cal o descalcificadores']])

st.markdown('Dados los parámetros de entrada introducidos por el
usuario, los modelos de selección que permitirán obtener un agua potable
de calidad son:')
st.table(new_df.style.format(subset=['Caudal'], formatter="{:.2f}"))
st.caption('El caudal está en litros por día')

with ordenar_resultados:
    st.markdown('___')
    st.subheader('Resumen de los resultados')
    # Guardo los métodos en una cadena
    metodos = new_df['Metodo']

    st.markdown('''
        En la siguiente tabla puede filtrar los métodos de
        tratamiento según la dificultad de instalación,
        la dificultad de mantenimiento y el precio relativo.'''

    new_tabla = pd.DataFrame()

    for metodo in metodos:
        new_row = df_comparativa.loc[df_comparativa['Metodo'] == metodo]
        new_tabla = pd.concat([new_tabla, new_row])

    ordenar = st.selectbox('Seleccione la característica con la que
    quiere ordenar los métodos:', options=[
        'Instalacion',
        'Mantenimiento',
        'Precio relativo'])

    st.markdown('*Tabla ordenada:*')
    new_tabla.sort_values(ordenar)
    st.table(new_tabla.sort_values(ordenar,
    ascending=True).style.format(subset=['Caudal'], formatter="{:.2f}"))
    st.caption('El caudal está en litros por día')

    if pretratamiento:
        st.markdown('* Ha seleccionado incluir un **pretratamiento** por
        lo que debe instalar un **filtro de arena** o un **filtro de
        gravedad**.')

    if desinfeccion:
        st.markdown('* Ha seleccionado incluir **desinfección**.')
        if input_elec == 'No':
            st.markdown('Como **no** dispone de electricidad, debe
            instalar **Cloración con hipoclorito de sodio**.')
        elif input_elec == 'Si':
            st.markdown('Como dispone de electricidad, puede usar
            **cloración con hipoclorito de sodio, gas de cloro licuado o la
            ozonización**.')

```

- **1_Base_de_datos.py**

```
import streamlit as st
import pandas as pd

st.subheader('Base de datos del modelo')
df = pd.read_csv('model_data.csv') # Base de datos

st.table(df.style.format(subset=['Caudal'], formatter="{:.2f}"))
st.caption('El caudal está en litros por día')
```

- **2_Tablas.py**

```
import streamlit as st
import pandas as pd

df_fuente = pd.read_csv('fuente_agua.csv')
df_suelos = pd.read_csv('uso_suelos.csv')
df_color_sabor = pd.read_csv('color_sabor.csv')
df_pH = pd.read_csv('pH_agua.csv')

st.header('La calidad del agua')
st.markdown('A continuación se muestran las tablas empleadas en el modelo de selección para averiguar la calidad del agua.')
```

```
st.subheader('Fuente de agua')
st.table(df_fuente)

st.subheader('Uso de los suelos')
st.table(df_suelos)

st.subheader('Color y sabor del agua')
st.table(df_color_sabor)

st.subheader('pH del agua')
st.table(df_pH)
```

- **3_Tabla_comparativa.py**

```
import streamlit as st
import pandas as pd

df_comparativa = pd.read_csv('tabla_comparativa.csv')

st.header('Tabla comparativa')
st.table(df_comparativa.style.format(subset=['Caudal'],
formatter="{:.2f}"))
st.caption('El caudal está en litros por día')
```

13 Bibliografía

- Benita Orozco, Cinthya. 2022.** ¿Cómo funciona la ósmosis inversa? *FiltraShop*. [En línea] 2022. <https://filtrashop.com/como-funciona-la-osmosis-inversa/>.
- Blanco, Emilio, Santías, Isabel y Soriano, Miguel. 2020.** *Agua para Gode, Etiopía: Proyecto de planta de tratamiento de agua del río Shebelle y aplicación del KIT de calidad del agua*. 2020.
- Bruni, Marco y Spuhler, Dorothee. 2018.** Filtración rápida de arena. *SSWM*. [En línea] 2018. <https://sswm.info/es/gass-perspective-es/tecnologias-de-agua-y-saneamiento/tecnologias-de-abastecimiento-de-agua/filtraci%C3%B3n-r%C3%A1pida-de-arena>.
- Col, Gustavo. 2017.** Filtros lentos de arena: una alternativa de depuración de agua en pequeñas comunidades. *iagua*. [En línea] 2017. <https://www.iagua.es/blogs/gustavo-florez/filtros-lentos-arena-alternativa-depuracion-agua-pequenas-comunidades>.
- condorchem envitech.** Tratamiento de aguas residuales: tipos de membranas de filtración y posibles configuraciones. *condorchem envitech*. [En línea] <https://condorchem.com/es/blog/tratamiento-de-aguas-residuales-tipos-de-membranas-de-filtracion-y-posibles-configuraciones/>.
- EC. 2021.** Los mejores descalcificadores de agua para eliminar la cal. *El Confidencial*. [En línea] 2021. https://www.elconfidencial.com/decompras/2021-03-07/descalcificadores-de-agua-para-eliminar-la-cal_2970440/.
- ferrovial.** Ósmosis inversa. *ferrovial*. [En línea]
- FiltraShop. 2021.** Filtros de sedimentos ¿Qué son y cómo funcionan? *FiltraShop*. [En línea] 2021. <https://filtrashop.com/filtros-de-sedimentos-que-son-y-como-funcionan/>.
- . 2021. Lámpara UV vs Ozono comparativa y ventajas. *FiltraShop*. [En línea] 2021. <https://filtrashop.com/lampara-uv-vs-ozono-comparativa-y-ventajas/>.
- Ginebra: Organización Mundial de la Salud. 2018.** *Guías para la calidad del agua de consumo humano*. [En línea] 2018.
- iVIGA. 2021.** ¿Cuánta agua usa el grifo? *iVIGA*. [En línea] 2021. <https://www.viga.cc/es/how-much-water-does-the-faucet-use/>.
- Layton, James. 2020.** Understanding the results of your Drinking Water Test. *Health Metric*. [En línea] 2020. <https://www.health-metric.com/products/drinking-water-testing-kit>.
- MITA. 2022.** Filtros de tela. *MITA water technologies*. [En línea] 2022. <https://www.mitawatertechnologies.com/es/prodotti/filtros-de-tela-descrpcion/>.

Naciones Unidas. 2015. Agua limpia y saneamiento: por qué es importante. *UN*. [En línea] 2015. https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/wp-content/uploads/sites/3/2016/10/6_Spanish_Why_it_Matters.pdf.

ODS 6. 2015. Objetivo 6: Garantizar la disponibilidad de agua y su gestión sostenible y el saneamiento para todos. *UN*. [En línea] 2015. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/water-and-sanitation/>.

Organización Panamericana de la Salud. 2005. Guía para diseño de sistemas de tratamiento de filtración en múltiples etapas. [En línea] 2005. <http://www.elaguapotable.com/Guia%20dise%C3%B1o%20filtraci%C3%B3n%20en%20m%C3%BAltiples%20etapas.pdf>.

Rivas Arrieta, María José y García Méndez, Wendy Johana. 2017. *Evaluación de la filtración lenta de arena para la potabilización del agua en el corregimiento de San José de Playón*. 2017.

Roberti Pérez, Luis. 2018. Tanque de almacenamiento. *SSWM*. [En línea] 2018. <https://sswm.info/es/gass-perspective-es/tecnologias-de-agua-y-saneamiento/tecnologias-de-abastecimiento-de-agua/filtraci%C3%B3n-r%C3%A1pida-de-arena>.

Shrestha, Lerica G., Shrestha, Raju y Spuhler, Dorothee. 2018. Filtros de cerámica. *SSWM*. [En línea] 2018. <https://sswm.info/es/gass-perspective-es/tecnologias-de-tecnologias-de-abastecimiento-de-agua/manejo-seguro-en-el-hogar/filtros-de-cer%C3%A1mica>.

Swistock, Bryan. 2021. Análisis de agua potable. *Penn State Extension*. [En línea] 2021. <https://extension.psu.edu/analisis-de-agua-potable>.

UN. 2015. Objetivos de Desarrollo Sostenible. *Naciones Unidas*. [En línea] 2015. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>.

WaterStation. 2020. El carbón activado y su poder purificador. *WaterStation*. [En línea] 2020. <https://waterstation.mx/agua-purificada-para-empresas/carbon-activado-y-su-poder-purificador/>.

—. 2020. Purificadores de agua con luz UV: ¿Cómo funcionan? *WaterStation*. [En línea] 2020. <https://waterstation.mx/agua-y-salud/purificadores-de-agua-con-luz-uv/>.

WikiWater. WikiWater. *El tratamiento del agua por cloración*. [En línea] <https://wikiwater.fr/e18-el-tratamiento-del-agua-por>.

- <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/drinking-water>
- <https://www.bbva.com/es/sostenibilidad/que-es-el-proceso-de-potabilizacion-del-agua-y-cuales-son-sus-fases/>
- <https://wikiwater.fr/e18-el-tratamiento-del-agua-por>
- <http://www.elaguapotable.com/Guia%20dise%C3%B1o%20filtraci%C3%B3n%20en%20m%C3%BAltiples%20etapas.pdf>
- <https://repositorio.unicartagena.edu.co/bitstream/handle/11227/4154/Tesis%20Garcia%26Rivas.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- <https://www.iagua.es/blogs/gustavo-florez/filtros-lentos-arena-alternativa-depuracion-agua-pequenas-comunidades>
- <https://sswm.info/es/gass-perspective-es/tecnologias-de-agua-y-saneamiento/tecnologias-de-abastecimiento-de-agua/filtraci%C3%B3n-r%C3%A1pida-de-arena>
- <https://sswm.info/es/gass-perspective-es/tecnologias-de-agua-y-saneamiento/tecnologias-de-abastecimiento-de-agua/tanque-de-almacenamiento>
- <https://waterstation.mx/agua-purificada-para-empresas/carbon-activado-y-su-poder-purificador/>
- <https://sswm.info/es/gass-perspective-es/tecnologias-de/tecnologias-de-abastecimiento-de-agua/manejo-seguro-en-el-hogar/filtros-de-cer%C3%A1mica>
- https://www.elconfidencial.com/decompras/2021-03-07/descalcificadores-de-agua-para-eliminar-la-cal_2970440/
- <https://www.cromtek.cl/2021/01/20/agua-cual-es-la-diferencia-entre-purificar-y-destilar/>
- <https://www.ferrovial.com/es/recursos/osmosis-inversa/>
- <https://filtrashop.com/como-funciona-la-osmosis-inversa/>
- <https://www.carbotecnia.info/aprendizaje/osmosis-inversa/que-es-la-osmosis-inversa-purificador/>
- <https://waterstation.mx/agua-y-salud/osmosis-inversa-ventajas-y-desventajas/>
- <https://filtrashop.com/lampara-uv-vs-ozono-comparativa-y-ventajas/>
- <https://waterstation.mx/agua-y-salud/purificadores-de-agua-con-luz-uv/>
- <https://filtrashop.com/filtros-de-sedimentos-que-son-y-como-funcionan/>
- <https://www.mitawatertechnologies.com/es/prodotti/filtros-de-tela-descripcion/>
- <https://extension.psu.edu/analisis-de-agua-potable>
- <https://blogs.worldbank.org/es/voices/como-examinar-la-calidad-del-agua>
- <https://extension.psu.edu/analisis-de-agua-potable>

<https://wikiwater.fr/e18-el-tratamiento-del-agua-por>

<https://equipamientojm.com/purificadores-de-agua/para-laboratorio/destilador-durastill-46c/>

Programación:

<https://streamlit.io/>

<https://www.markdownguide.org/basic-syntax/#line-breaks>

[Simple Excel Data Entry Work Form Tutorial - YouTube](#)

[🌐 How to make interactive Excel Map charts - YouTube](#)

[How to Collect User Input with Streamlit - Part 2 - YouTube](#)

[\(235\) How to Build a Streamlit App \(Beginner level Streamlit tutorial\) - Part 1 - YouTube](#)

[\(230\) Basic Guide to Pandas! Tricks, Shortcuts, Must Know Commands! Python for Beginners - YouTube](#)

[\(230\) Python Tutorial - Python Full Course for Beginners - YouTube](#)

[\(230\) 🏠 Python for Beginners Tutorial - YouTube](#)

[\(233\) Complete Python Pandas Data Science Tutorial! \(Reading CSV/Excel files, Sorting, Filtering, Groupby\) - YouTube](#)

[\(230\) python pandas library - YouTube](#) [What is Python? | Python Programming For Beginners | Python Tutorial | Edureka - YouTube](#) [Excel Drop Down List Tutorial - YouTube](#)

[\(227\) Kevin Stratvert drop down list - YouTube](#) [VLOOKUP in Excel | Tutorial for Beginners - YouTube](#)