



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE GUAYAQUIL
CARRERA DE MECATRÓNICA

**PROTOTIPO A ESCALA DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE
AGUA RESIDUAL AUTOMATIZADA PARA ZONAS CON DIFÍCIL
ACCESO A RESERVAS DE AGUA**

Trabajo de titulación previo a la obtención del
Título de Ingeniero en Mecatrónica

AUTORES: Francis Joel Mora Cruz
Kevin Manuel Salazar Mendez
TUTOR: Ing. Jorge Bladimir Fariño Cedeño, Mgtr.

Guayaquil - Ecuador
2025

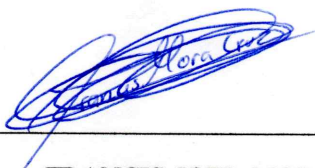
**CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

Nosotros, **FRANCIS JOEL MORA CRUZ** con documento de identificación N° **2000073490** y **KEVIN MANUEL SALAZAR MENDEZ** con documento de identificación N° **0943638171**, expresamos nuestra voluntad y por medio del presente documento cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del **PROTOTIPO A ESCALA DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL AUTOMATIZADA PARA ZONAS CON DIFÍCIL ACCESO A RESERVAS DE AGUA**, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero en Mecatrónica, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribimos este documento en el momento que hacemos la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Guayaquil, 29 de agosto del año 2025

Atentamente,



FRANCIS JOEL MORA CRUZ
CC.: 2000073490



KEVIN MANUEL SALAZAR MENDEZ
CC.: 0943638171

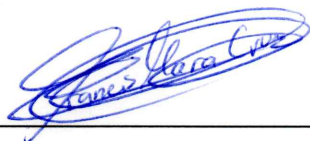
CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Nosotros, **FRANCIS JOEL MORA CRUZ** con documento de identificación N° **2000073490** y **KEVIN MANUEL SALAZAR MENDEZ** con documento de identificación N° **0943638171**; manifestamos que:


Somos los autores y responsables del presente trabajo; y, autorizamos a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo.

Guayaquil, 29 de agosto del año 2025

Atentamente,



FRANCIS JOEL MORA CRUZ
CC.: 2000073490



KEVIN MANUEL SALAZAR MENDEZ
CC.: 0943638171

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, **JORGE BLADIMIR FARIÑO CEDEÑO**, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: **PROTOTIPO A ESCALA DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL AUTOMATIZADA PARA ZONAS CON DIFÍCIL ACCESO A RESERVAS DE AGUA**, realizado por **FRANCIS JOEL MORA CRUZ** con documento de identificación N° **2000073490** y por **KEVIN MANUEL SALAZAR MENDEZ** con documento de identificación N° **0943638171**, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción **Dispositivo Tecnológico** que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Guayaquil, 29 de agosto del año 2025

Atentamente,



ING. JORGE BLADIMIR FARIÑO CEDEÑO, MGTR.
CC.: 0914335484

DEDICATORIA

Se dedica este trabajo de titulación a mi familia, mi madre quien ha sido un pilar fundamental en mi vida, quien me ha motivado con determinación y esfuerzo. Su ayuda incondicional, sacrificio y esfuerzo ha sido vital guiándome en momentos difíciles, permitiéndome alcanzar esta meta con perseverancia y dedicación.

A mi padre quien me enseñó el significado del esfuerzo y la disciplina. Aconsejándome continuamente, logrando aprender que a pesar de los diferentes obstáculos que se presenten en la vida, con determinación y un trabajo duro, todo se puede conseguir.

A mi hermano, por su apoyo incondicional, por creer en mí y por estar a mi lado en cada paso de esta etapa. La confianza y respaldo de mi familia ha sido una fuerza invaluable para poder continuar con esta etapa de mi formación académica.

Kevin Manuel Salazar Mendez

Este trabajo de titulación se lo dedico con todo mi cariño y gratitud a mis padres, quienes con su amor, apoyo incondicional y enseñanzas han sido la base de mi formación personal y profesional. Su esfuerzo, sacrificio y confianza en mí me han motivado a seguir adelante en cada etapa de este camino.

A mis primas, por su cercanía, comprensión y palabras de aliento en los momentos en que más lo necesité, convirtiéndose en un pilar importante de apoyo y compañía.

A mis amigos, quienes con su amistad sincera, consejos y compañía hicieron de este proceso una experiencia más llevadera y enriquecedora, recordándome siempre la importancia de compartir cada logro y dificultad con quienes están a nuestro lado.

Con cada uno de ustedes comparto este logro, pues sin su respaldo y motivación, alcanzar esta meta no hubiera sido posible.

Francis Joel Mora Cruz

AGRADECIMIENTO

Agradezco a toda mi familia quienes con su amor, esfuerzo y sacrificio han hecho posible que hoy alcance esta meta. El apoyo incondicional, tanto emocional como económico, han sido un pilar fundamental sobre el cual he construido mi educación y mis metas. Les agradezco por enseñarme el valor del trabajo duro y la importancia de nunca rendirme.

Agradezco a los docentes, mentores y amigos, quienes, por medio de las enseñanzas y compañía, han enriquecido mi formación académica y personal.

Kevin Manuel Salazar Mendez

Agradezco profundamente a Dios por brindarme la fortaleza, la salud y la sabiduría necesarias para culminar esta etapa tan importante de mi vida académica.

A mi madre, quien con su amor, esfuerzo y sacrificio me ha guiado e impulsado a luchar por mis metas, siendo siempre mi mayor ejemplo de perseverancia y dedicación.

A mis primas, por su constante apoyo, comprensión y por acompañarme en los momentos en los que más lo necesité, convirtiéndose en una fuente de motivación y confianza.

A mis amigos, quienes con su compañía, consejos y palabras de ánimo hicieron más llevadero este camino, brindándome apoyo incondicional en cada paso.

Francis Joel Mora Cruz

RESUMEN

El presente trabajo de tesis desarrolla un prototipo a escala de una planta de tratamiento de agua residual automatizada, diseñado específicamente para zonas con difícil acceso a reservas de agua. Su objetivo principal es optimizar el proceso de purificación del recurso hídrico mediante la implementación de tecnologías de automatización, que permitan un control eficiente y preciso de los parámetros críticos para el tratamiento del recurso hídrico.

El prototipo se basa en el uso de una placa Arduino como unidad central de control, encargada de gestionar la lectura y el procesamiento de datos provenientes de diversos sensores. Entre ellos, se emplean sensores ultrasónicos para medir los niveles de agua en los tanques de tratamiento, garantizando un monitoreo constante y previniendo desbordamientos o vaciados accidentales. Adicionalmente, se integra un sensor de pH para evaluar la acidez o alcalinidad del agua, permitiendo ajustar automáticamente el proceso de tratamiento y mantener la calidad del agua dentro de los rangos óptimos.

La automatización del sistema no solo mejora la eficiencia del tratamiento, sino que también reduce la necesidad de intervención humana constante, lo cual resulta especialmente beneficioso en comunidades rurales o de difícil acceso. Los resultados obtenidos indican que el prototipo es capaz de gestionar de forma autónoma el ciclo completo del tratamiento de agua residual, contribuyendo a la sostenibilidad y el acceso a recursos hídricos de calidad en entornos vulnerables.

Palabras claves: Tratamiento de agua residual, automatización, Arduino, sensor ultrasónico, sensor de pH, zonas rurales.

ABSTRACT

The work in this thesis develops a scaled prototype of an automated wastewater treatment plant, specifically designed for areas with difficult access to water reserves. The main objective is to optimize the water purification process through the implementation of automation technologies, which allow efficient and precise control of the critical parameters involved in the treatment of water.

The prototype is based on the use of an Arduino board as the central control unit, which manages the reading and processing of data from various sensors. Ultrasonic sensors are used to measure the water levels in the treatment tanks, ensuring constant monitoring and preventing possible overflows or accidental emptying. In addition, a pH sensor is integrated to evaluate the acidity or alkalinity of the water, allowing automatic adjustments to the treatment process and maintaining water quality within optimal ranges.

Automation of the system not only improves treatment and efficiency, but also partially reduces the need for constant human intervention, which is especially beneficial in rural or hard-to-reach communities. The results obtained demonstrate that the prototype is capable of autonomously managing the complete wastewater treatment cycle, thus contributing to sustainability and access to quality water resources in vulnerable environments.

Keywords: Wastewater treatment, automation, Arduino, ultrasonic sensor, pH sensor, rural areas.

ÍNDICE

| | |
|--|----|
| I. Problema | 1 |
| II. Justificación | 2 |
| III. Objetivos | 3 |
| III-A. Objetivo general | 3 |
| III-B. Objetivos específicos | 3 |
| III-C. Matriz de objetivos | 3 |
| IV. Fundamentos Teóricos | 4 |
| IV-A. Hidratación y aguas minerales naturales | 4 |
| IV-B. Microplásticos en aguas superficiales urbanas de Godavari, India | 4 |
| IV-C. Uso del agua para el reprocesamiento estéril en América Latina | 6 |
| IV-D. Uso potencial de las aguas residuales en la agricultura | 6 |
| IV-E. Usos finales residenciales del agua | 7 |
| IV-F. Impacto ambiental y social del tratamiento de aguas residuales | 7 |
| IV-G. Impacto de los filtros ultravioleta en el entorno natural | 7 |
| IV-H. Calidad del agua y predicción mediante IA de la densidad de algas | 7 |
| IV-I. Gestión de la contaminación en ríos con modelos matemáticos | 8 |
| IV-J. Gestión de nutrientes mediante reciclaje de agua en arrozales | 8 |
| IV-K. Recuperación de nutrientes en agua residual | 9 |
| IV-L. Riesgo de sustancias disruptoras endocrinas en aguas del mundo | 9 |
| IV-M. Cuidado y restauración en la calidad del agua | 10 |
| IV-N. Contaminación por microfibras textiles | 11 |
| IV-Ñ. Causas de la contaminación costera mundial | 11 |
| IV-O. Influencia de la contaminación del agua y el suelo en el desarrollo agrícola nacional e internacional | 12 |
| IV-P. Escasez y seguridad del agua en el mundo | 13 |
| IV-Q. Enfermedad a causa del agua residual | 14 |
| IV-R. Tecnología y método de tratamiento | 15 |
| IV-R1. Sistema de ósmosis inversa de agua | 15 |
| IV-R2. Sistema a base de carbono | 15 |
| IV-R3. Filtro automático auto-limpiante | 15 |
| IV-R4. Filtro rápido de arena | 16 |
| IV-R5. Filtro con membrana | 16 |
| IV-R6. Filtro de cerámica | 17 |
| IV-R7. Filtro de lecho profundo | 17 |
| IV-R8. Filtro de biocarbón | 17 |
| IV-R9. Filtración de Daphnia | 18 |
| IV-R10. Uso de floculante en el tratamiento de agua residual | 18 |
| IV-R11. Uso del Quitosano en aguas residuales | 19 |
| IV-R12. Uso de polímero compuesto | 19 |
| IV-R13. Tratamiento Anaeróbico de agua residual | 19 |
| IV-R14. Microalga para tratar el agua residual | 20 |
| IV-R15. Limpieza química formada en membrana cerámica impulsada por gravedad | 20 |
| IV-S. Comportamiento térmico del agua para uso residencial en tinacos de concreto y polietileno en un clima cálido-subhúmedo | 20 |
| IV-T. Componentes | 21 |
| IV-T1. Sensor ultrasónico | 21 |

| | | | |
|--------------|--|--|-----------|
| | IV-T2. | Luz piloto | 21 |
| | IV-T3. | Puente H | 22 |
| | IV-T4. | Bomba sumergible | 22 |
| IV-U. | | Diseño y modelado | 23 |
| | IV-U1. | Software de modelado 3D | 23 |
| | IV-U2. | Solidworks | 23 |
| | IV-U3. | Autodesk Inventor | 24 |
| V. | Metodología | | 25 |
| | V-A. | Descripción general | 25 |
| | V-B. | Contexto y población | 25 |
| | V-C. | Criterio de selección de equipo, método, modelo y dato | 25 |
| | | V-C1. Controlador | 25 |
| | | V-C2. Bomba | 25 |
| | | V-C3. Sensor | 26 |
| | | V-C4. Alimentación | 26 |
| | V-D. | Intervención, análisis estadístico y aspecto ético | 27 |
| | V-E. | Pretratamiento | 27 |
| | V-F. | Tratamiento de sedimentación | 28 |
| | | V-F1. Floculación | 28 |
| | V-G. | Tratamiento de desinfección | 28 |
| | | V-G1. Cloración | 28 |
| | V-H. | Automatización | 28 |
| | V-I. | Controlador Automatizado | 30 |
| | V-J. | Proceso del tratamiento | 30 |
| | V-K. | Monitoreo y Evaluación del Sistema | 31 |
| | V-L. | Sistema Eléctrico | 32 |
| | | V-L1. Datos del Prototipo | 32 |
| | | V-L2. Cálculo de Potencia Total | 32 |
| | | V-L3. Cálculo de Corriente Requerida | 33 |
| | V-M. | Diagrama de conexión eléctrica | 34 |
| | V-N. | Diagrama de flujo | 35 |
| VI. | Resultados | | 36 |
| VII. | Cronograma de actividades | | 38 |
| VIII. | Presupuesto | | 39 |
| IX. | Conclusiones | | 40 |
| X. | Recomendaciones | | 41 |
| | Anexo A: Programación del sistema | | 46 |
| | Anexo B: Pruebas con sensor ultrasónico | | 51 |
| | Anexo C: conexiones del tablero | | 52 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | | |
|-----|---|----|
| 1. | Sitios de muestreo para el análisis de micropartículas en el río Godavari. Datos tomados de investigación realizada en Febrero 2025 [10] | 5 |
| 2. | Sistema de reciclaje de agua de drenaje en arrozales [18] | 9 |
| 3. | Porcentaje de muestras de cada país. Datos tomados de investigación realizada en Enero 2022 [20] | 10 |
| 4. | Países con mayor extracción de agua al año y porcentaje destinado a la actividad agrícola. Datos tomados de investigación realizada en Septiembre 2022 [24] | 13 |
| 5. | Principales vías de contaminación del agua suministro intermitente de agua. [25] | 14 |
| 6. | Enfermedades del agua residual [27] | 14 |
| 7. | Sistema ósmosis inversa [29] | 15 |
| 8. | Filtro auto-limpiante [32] | 16 |
| 9. | Filtro rápido de arena [34] | 16 |
| 10. | Filtro con membrana [37] | 17 |
| 11. | Filtro de lecho profundo [40] | 17 |
| 12. | Filtro de biocarbón [42] | 18 |
| 13. | Uso de floculante [45] | 19 |
| 14. | Tratamiento anaeróbico [49] | 20 |
| 15. | Sensor ultrasónico [54] | 21 |
| 16. | Luz piloto [56] | 22 |
| 17. | Puente H esquema [58] | 22 |
| 18. | Bomba sumergible [60] | 23 |
| 19. | Funcionamiento de Bomba [60] | 23 |
| 20. | Solidworks [63] | 24 |
| 21. | Autodesk inventor [65] | 24 |
| 22. | Arduino Mega [66] | 25 |
| 23. | Sensor pH para Arduino [67] | 26 |
| 24. | Sensor ultrasónico hc-sr 04 [68] | 26 |
| 25. | Fuente conmutada. Fuente: Los Autores | 27 |
| 26. | Construcción de tablero. Fuente: Los Autores | 29 |
| 27. | Código de inicio del proceso. Fuente: Los Autores | 30 |
| 28. | Ingreso de muestra. Fuente: Los Autores | 30 |
| 29. | Lectura del sensor de pH. Fuente: Los Autores | 31 |
| 30. | Diagrama de conexión eléctrica. Fuente: Los Autores | 34 |
| 31. | Diagrama de flujo. Fuente: Los Autores | 35 |
| 32. | Vista general del dispositivo. Fuente: Los Autores | 36 |
| 33. | Cronograma de actividades. Fuente: Los Autores | 38 |
| 34. | Definiendo variables y pines. Fuente: Los Autores | 46 |
| 35. | Código de control. (Parte I) Fuente: Los Autores | 47 |
| 36. | Código de control. (Parte II) Fuente: Los Autores | 48 |
| 37. | Código de control. (Parte III) Fuente: Los Autores | 49 |
| 38. | Código de lectura de pH. Fuente: Los Autores | 50 |
| 39. | Programación del sensor ultrasónico. Fuente: Los Autores | 51 |
| 40. | Conexión eléctrica del tablero. Fuente: Los Autores | 52 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | | |
|-----|--|----|
| I. | Matriz de objetivos. Fuente: Los Autores | 3 |
| II. | Presupuesto. Fuente: Los Autores | 39 |

I. PROBLEMA

La escasez de agua y falta de acceso a sistemas de tratamiento eficientes de agua residual generan dificultades para comunidades en diversas regiones del mundo, situación que contribuye a la contaminación del entorno. Este problema afecta a sectores como la agricultura, en los cuales los productores enfrentan dificultades para mantener la productividad y la sostenibilidad de sus cultivos debido a la carencia de agua limpia y segura para el riego [1].

Esta situación se ve comprometida por la falta de acceso a reservas de agua, lo que provoca degradación ambiental y pérdida de recursos en la producción agrícola. Este escenario afecta negativamente la salud humana, la biodiversidad y la calidad del suelo de los cultivos, lo cual compromete la seguridad de los alimentos y el bienestar de las comunidades locales [2].

Una gestión ineficiente del agua provoca una degradación ambiental lo que genera una clara pérdida en la biodiversidad, erosión del suelo y una disminución en la calidad de los recursos naturales [3]. El prototipo se realiza como respuesta para optimizar la gestión del recurso hídrico, garantizar su disponibilidad y fomentar prácticas sostenibles tanto en el sector agrícola como en los hogares [4].

II. JUSTIFICACIÓN

La elaboración del prototipo se justifica en la necesidad de abordar la problemática de escasez de agua en regiones con dificultades para acceder a fuentes hídricas; donde la agricultura se encuentra considerablemente limitada debido a la ausencia de este recurso hídrico. La implementación de una planta automatizada para el tratamiento de agua residual responde no solo a la necesidad de optimizar su uso, sino también para contribuir a la mitigación de la contaminación ambiental [5].

La validación del sistema mecatrónico, realizada mediante el análisis de impurezas y la medición del pH, asegura el cumplimiento de estándares de calidad, lo que demuestra la viabilidad y eficiencia del prototipo. En síntesis, este proyecto busca ofrecer una solución práctica y sostenible para mejorar la disponibilidad de agua en sectores donde su obtención presenta dificultades [6].

La automatización del proceso, a través de la programación de un microcontrolador y el uso de tecnología de filtración, permite gestionar de manera más precisa y controlada los recursos, mejorando la eficiencia del tratamiento. Este enfoque facilita la eliminación efectiva de sedimentos y garantiza la calidad del agua para el riego de cultivos, incrementando la productividad agrícola y promoviendo prácticas sostenibles en dichas zonas [7].

El acceso a agua potable constituye un derecho humano fundamental; sin embargo, millones de personas en el mundo viven en zonas con escasez de recursos hídricos, especialmente en áreas rurales o comunidades remotas. La investigación y el desarrollo en esta área resultan esenciales para avanzar hacia un futuro sostenible donde toda la población tenga acceso al agua. Además de las ventajas mencionadas, este proyecto puede contribuir a la generación de empleo y la formación de capital humano en las comunidades beneficiadas.

III. OBJETIVOS

III-A. *Objetivo general*

Desarrollar un prototipo a escala de una planta automatizada para el tratamiento de agua residual mediante filtración de sedimentos destinada a consumo no humano.

III-B. *Objetivos específicos*

Implementar un sistema automatizado de tratamiento de agua residual mediante programación de un microcontrolador y red de sensores.

Elaborar un sistema de filtración para remoción de sedimentos sólidos del agua tratada.

Validar la eficiencia del sistema de tratamiento de aguas residuales mediante análisis de impurezas comunes y medición de pH.

III-C. *Matriz de objetivos*

Tabla I
MATRIZ DE OBJETIVOS. FUENTE: LOS AUTORES

| Objetivos | Planteamiento | Indicador | Meta |
|-----------|---|--|--|
| O.E 1 | Implementar un sistema automatizado de tratamiento de aguas residuales mediante la programación de un microcontrolador para los sensores utilizados en el desarrollo del prototipo. | Porcentaje de eficiencia del sistema de tratamiento de aguas residuales. | Se implementa un diseño funcional con una eficiencia del 95 %. |
| O.E 2 | Elaborar un proceso de filtración para remover los sedimentos sólidos garantizando la calidad del agua tratada. | Porcentaje de desempeño del sistema de filtrado. | Cumplimiento del 85 % de filtración de sedimento de las aguas residuales tratadas. |
| O.E 3 | Validar la eficiencia del sistema mecatrónico mediante análisis de impurezas comunes y medición del pH. | Rango óptimo del nivel de pH y eliminación de impurezas. | Nivel de pH entre 5.5 y 7.5 y eliminación del 80 % de impurezas. |

IV. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Es importante considerar la presencia de agentes contaminantes emergentes en las aguas residuales domésticas. Diversos estudios proponen el uso de microalgas como una solución sostenible para su eliminación. Aún existe el debate sobre las ventajas de las microalgas frente a otros métodos tradicionales, destacando su capacidad para degradar una amplia gama de contaminantes y su potencial para mejorar la calidad del agua tratada.

Otro estudio aborda el manejo de polímeros compuestos, su extracción y aplicación en el tratamiento de aguas residuales, con el objetivo de mejorar la pureza del recurso y permitir la eliminación segura de efluentes domésticos e industriales sin generar impactos ambientales negativos. El uso de polímeros naturales y sintéticos se fundamenta en su no toxicidad, viabilidad económica, amplia disponibilidad, renovabilidad, biocompatibilidad y biodegradabilidad. La investigación se enfoca particularmente en polímeros naturales como la celulosa, la quitina, la gelatina y otros derivados del almidón, los cuales son ampliamente utilizados en el tratamiento de aguas residuales [8].

IV-A. Hidratación y aguas minerales naturales

El agua es un nutriente fundamental para la mayoría de las funciones del organismo. Actúa como solvente, participa como sustrato en numerosas reacciones químicas y es el producto final de los procesos de oxidación. Asimismo, resulta esencial para que otros nutrientes puedan desempeñar correctamente sus funciones. La mayor parte del agua que ingresa al organismo se obtiene a través de los alimentos y bebidas que forman parte de la dieta habitual.

También desempeña un papel clave en el transporte de nutrientes y compuestos bioactivos, así como en la eliminación de toxinas y otras sustancias. De igual manera, contribuye a mantener el equilibrio térmico del cuerpo, distribuyendo el calor desde los tejidos activos hacia la piel y favoreciendo la disipación mediante la sudoración.

El agua no solo es indispensable para un adecuado desempeño físico y mental, sino que también juega un papel clave en la homeostasis, asegurando el correcto funcionamiento del sistema cardiovascular, renal y digestivo.

Además, es fundamental preservar las capacidades físicas y cognitivas en condiciones normales, por lo que mantener una hidratación adecuada es imprescindible para el correcto funcionamiento del organismo [9].

IV-B. Microplásticos en aguas superficiales urbanas de Godavari, India

Trata la contaminación por microplásticos en la India, específicamente en el distrito de West Godavari, donde fluye el río Godavari. Los microplásticos son pequeños fragmentos de plástico de 1 a 5000 micrómetros que se generan cuando objetos más grandes, como bolsas, botellas o fibras de ropa, se degradan por el sol, el agua y el uso humano. Estos fragmentos terminan en ríos, lagos y mares, afectando tanto a los ecosistemas como a la salud de las personas.

El estudio tomó muestras en 15 lugares distintos del río y de dos plantas de tratamiento de agua que abastecen a las ciudades de la zona. En total se identificaron 330 microplásticos en las aguas superficiales y más de 90 en las plantas. La mayoría de las partículas encontradas eran fibras azules y transparentes, más pequeñas de 500 micrómetros, lo que significa que son prácticamente invisibles al ojo humano. También se analizaron los tipos de plásticos y se identificaron materiales como polipropileno, PVC, nylon, PET y policarbonato, todos comunes en envases, tuberías, ropa y objetos de uso cotidiano.

Los resultados mostraron que el agua del río contiene en promedio 6,7 partículas de microplásticos por litro, con lugares donde la cifra llega hasta 15 partículas. Estas concentraciones son más altas que estudios previos en la misma región, aunque menores que en otros ríos de India como el Ganges. En las plantas de tratamiento se comprobó que, aunque logran reducir parte de los microplásticos, no los eliminan del todo: una planta tuvo una eficiencia del 57 % y la otra solo del 44 %, valores muy por debajo de otros países donde superan el 90 %. Esto implica que las personas que consumen esta agua siguen ingiriendo plásticos a diario.

El análisis de riesgos indicó que no solo importa la cantidad de microplásticos, sino también el tipo de plástico, ya que algunos como el PVC y el policarbonato son más tóxicos que otros. En ciertas zonas del río se detectaron niveles de riesgo ecológico altos y muy altos, lo que significa que la fauna acuática y la salud humana están en peligro. De hecho, se calculó que un adulto que bebe agua de estas plantas podría ingerir más de un millón de partículas plásticas a lo largo de su vida, mientras que un niño podría consumir más de medio millón.

La investigación advierte que India, siendo uno de los mayores productores de plásticos en el mundo, necesita mejorar de manera urgente la gestión de residuos, aplicar tecnologías más avanzadas en las plantas de tratamiento y realizar un monitoreo constante para reducir la entrada de plásticos en el ambiente y proteger tanto a la población como a los ecosistemas acuáticos [10].

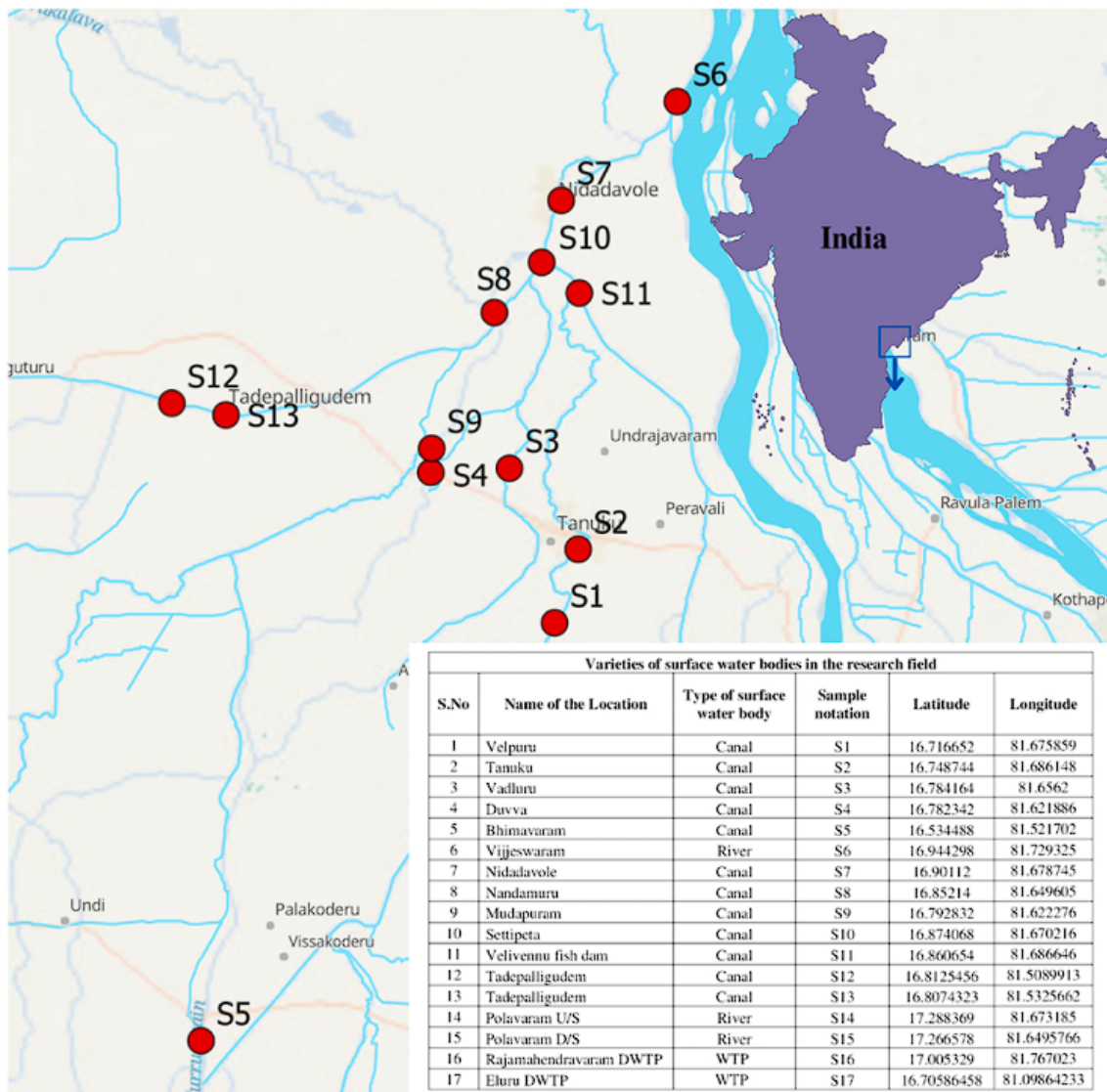


Figura 1. Sitios de muestreo para el análisis de micropartículas en el río Godavari. Datos tomados de investigación realizada en Febrero 2025 [10]

IV-C. Uso del agua para el reprocesamiento estéril en América Latina

La calidad del agua es un factor clave en todas las operaciones de una Central de Esterilización. Agua de baja calidad genera vapor deficiente, reduce la vida útil de los equipos de esterilización y lavado, dificulta el mantenimiento de instrumentos y dispositivos médicos debido a la acumulación de residuos químicos.

El agua sin tratar contiene diversas sustancias disueltas y en suspensión, como polvo, partículas, contaminantes, microorganismos y minerales. Estos minerales, al disolverse en agua, se separan en iones con carga eléctrica, y su composición varía según el origen geográfico del recurso hídrico, por lo que el tratamiento debe adaptarse a esta característica.

El agua dura posee altas concentraciones de sales solubles, principalmente de calcio y magnesio. Estas sales pueden precipitar y formar sólidos insolubles, lo que provoca la decoloración de instrumentos, el deterioro de elementos de calefacción y cámaras de equipos, la erosión de sellos de juntas y la corrosión.

Aunque América Latina posee la mayor cantidad de agua potable por habitante a nivel mundial y concentra el 31 % de los recursos hídricos globales, la calidad y disponibilidad del agua continúan siendo una preocupación para los gobiernos de la región. A pesar de los esfuerzos para controlar los contaminantes, muchos de ellos siguen infiltrándose en el suministro de agua, incluso en aquella que ha sido tratada para su potabilización [11].

IV-D. Uso potencial de las aguas residuales en la agricultura

Se analiza el uso de las aguas residuales en la agricultura y plantea que, aunque el agua es un recurso vital y cada vez más escaso, gran parte de la que usamos en la agricultura proviene de aguas residuales, muchas veces sin tratamiento adecuado. Esto ocurre porque en muchos lugares los agricultores no tienen otra opción para regar sus cultivos. Se estima que cerca del 80 % de las aguas residuales en el mundo se descargan sin tratar y en su mayoría se usan en el campo, lo que representa un riesgo sanitario por contener metales pesados, químicos tóxicos y microorganismos peligrosos.

La agricultura es el sector que más agua consume, alrededor del 70 % del total mundial, y que la demanda sigue creciendo por el aumento de la población y el desarrollo económico. Para cubrir esas necesidades se ha recurrido al uso de aguas residuales, ya que además de aportar agua, estas contienen nutrientes como nitrógeno, fósforo y potasio que pueden servir como fertilizantes naturales. Sin embargo, también pueden concentrar contaminantes que dañan el suelo, los cultivos y la salud de quienes consumen esos alimentos. Entre los riesgos más frecuentes se encuentran bacterias como *Escherichia coli* y *Salmonella*, parásitos intestinales, virus como la hepatitis A y E, y sustancias químicas como arsénico, cadmio, mercurio o pesticidas que permanecen en los alimentos y se acumulan en el cuerpo humano.

A nivel mundial se producen anualmente más de 380 mil millones de metros cúbicos de aguas residuales, y se espera que esta cifra aumente más de 50 % hacia 2050. Aunque muchos países han construido plantas para tratar y reutilizar estas aguas como Japón, Estados Unidos o varios países de Europa—, en regiones de América Latina, África y Asia el uso de aguas sin tratamiento sigue siendo común. Ejemplos en México, India, Sudáfrica y China muestran que los cultivos regados con estas aguas suelen estar contaminados con bacterias, metales y otros compuestos dañinos.

Las aguas residuales tratadas pueden ser una solución sostenible para enfrentar la escasez hídrica, siempre que se apliquen tecnologías de tratamiento eficientes y prácticas seguras de riego. Incluso, se destacan beneficios como la reducción en el uso de fertilizantes químicos y la posibilidad de recuperar nutrientes valiosos. No obstante, cuando no se tratan correctamente, representan un riesgo no solo para la salud humana sino también para el medio ambiente, ya que contaminan los suelos, reducen su fertilidad, generan gases de efecto invernadero y contribuyen al cambio climático [12].

IV-E. Usos finales residenciales del agua

Las estadísticas revelan que el uso doméstico se puede optimizar mediante técnicas de disgregación de datos, detectando actividades específicas con alto consumo y potencialmente ahorrador. Por ejemplo, algunos estudios indican que el uso en duchas, inodoros y lavadoras representa las mayores oportunidades para reducir el consumo. Además, la implementación de tecnologías como medidores inteligentes ha permitido recopilar información detallada sobre patrones horarios y de rutina, facilitando estrategias de conservación personalizadas y más efectivas.

Entre las principales consideraciones para conservar el agua, se destaca la necesidad de promover la conciencia y educación de los usuarios, así como instalar tecnologías que permitan monitorear en tiempo real y recibir retroalimentación sobre su consumo. Es importante también diseñar políticas de precios y tarifas que incentiven la reducción del uso, y adoptar medidas de infraestructura que minimicen pérdidas y fugas. La combinación de estos enfoques, apoyada en datos precisos, puede tener un impacto significativo en la conservación del recurso hídrico [13].

IV-F. Impacto ambiental y social del tratamiento de aguas residuales

En primer lugar, estas tecnologías contribuyen a reducir las cargas contaminantes al promover un uso circular del agua, lo que favorece la conservación de recursos hídricos y respalda la biodiversidad local. Una reutilización de aguas residuales puede disminuir la dependencia de fuentes de agua dulce, lo cual es crucial en regiones con escasez de agua. Sin embargo, es importante que se implementen procesos de tratamientos efectivos para así maximizar estos beneficios. Esto asegura que el efluente tratado no genere impactos ambientales negativos, como la contaminación de cultivos o ecosistemas. Una debida adopción de estándares de calidad y seguridad son esenciales para evitar la contaminación de los alimentos y proteger la salud pública [14].

IV-G. Impacto de los filtros ultravioleta en el entorno natural

Los productos que contienen filtros UV pueden liberar algunos de sus componentes en el entorno, especialmente en el agua, dependiendo de sus propiedades, las condiciones ambientales y diversos procesos fisicoquímicos. Estos filtros solares son utilizados a diario por millones de personas en todo el mundo, pero muchos no se degradan completamente y las plantas de tratamiento de aguas residuales no siempre logran eliminarlos eficazmente. Como resultado, estos compuestos se dispersan en el medio ambiente han sido detectados en suelos, ríos, océanos y en una amplia variedad de organismos, incluidos algas, corales, peces, mamíferos e incluso aves terrestres. Además, ciertos filtros UV, como la benzofenona y el octocrileno, han demostrado ser tóxicos para estas especies [15].

IV-H. Calidad del agua y predicción mediante IA de la densidad de algas

El estudio se centra en el embalse Dashanhe, en China el cual es una fuente importante de agua potable y enfrenta un problema recurrente: la proliferación excesiva de algas (floraciones algales), sobre todo en verano. Estas floraciones reducen el oxígeno disponible en el agua, incrementan la turbidez, generan contaminación orgánica y favorecen la aparición de bacterias, lo que complica el tratamiento para consumo humano.

La temporada más crítica es el verano, con efectos negativos que se prolongan hasta el otoño. Dentro de la comunidad de algas, el grupo dominante son las clorofitas (68 % del total), siendo *Chlorella* y, especialmente, *Cosmarium* las especies más abundantes. *Cosmarium* es la principal responsable de los deterioros en la calidad del agua durante los blooms estivales.

Para enfrentar este desafío, se aplicó un modelo de inteligencia artificial (Random Forest) que utiliza parámetros rutinarios de monitoreo de agua (temperatura, pH, oxígeno disuelto, amonio y turbidez). Con estos datos fue posible predecir la densidad de algas con un mes de anticipación, siendo particularmente eficaz en anticipar la proliferación de *Cosmarium*. El análisis reveló que los factores más influyentes para explicar los cambios en la densidad de algas

fueron la temperatura del agua, el pH y el amonio ($\text{NH}_3\text{-N}$).

Los resultados son relevantes porque permiten contar con alertas tempranas que ayudan a las plantas de tratamiento a prepararse para los periodos de mayor riesgo, mejorando la seguridad del agua potable [16].

IV-I. Gestión de la contaminación en ríos con modelos matemáticos

Este estudio aborda el problema de la contaminación de los ríos y propone herramientas matemáticas para que los gobiernos puedan tomar mejores decisiones al momento de limpiarlos y mantenerlos en buen estado. Se centra en dos preguntas clave: cuánto tiempo tarda un río contaminado en recuperar una calidad de agua segura y qué medidas deben mantenerse después para evitar que vuelva a deteriorarse.

Para responder, se desarrollan dos modelos basados en ecuaciones diferenciales. El primero, llamado Modelo de Tiempo de Recuperación, calcula cuántos años se necesitan para que un río alcance los niveles de calidad establecidos si se controla la cantidad de contaminantes que ingresan; en él se demuestra que mientras más estrictos sean los límites, más rápido se recupera el río, y que si las restricciones son demasiado permisivas, la recuperación puede ser imposible.

El segundo, denominado Modelo de Antidegradación, se aplica una vez que el río ya cumple con los estándares, y ayuda a definir cuánto contaminante adicional puede permitirse sin perder la seguridad, estableciendo tres escenarios: mantener o mejorar la calidad del agua, permitir una degradación controlada en función de necesidades socioeconómicas, o simplemente cumplir con los mínimos aceptables.

Como ejemplo, se analiza el caso del río Hun en China, mostrando que un río con contaminación cinco veces mayor a lo permitido puede recuperarse en aproximadamente siete años si se aplican límites estrictos, pero que la limpieza se alarga a más de diez años cuando se relajan los controles, y que con restricciones demasiado flojas nunca alcanzaría el nivel seguro.

La propuesta ofrece una guía práctica que equilibra la protección ambiental con las necesidades económicas de la sociedad, mostrando cómo la matemática puede convertirse en una herramienta clara y útil para la gestión del agua [17].

IV-J. Gestión de nutrientes mediante reciclaje de agua en arrozales

El estudio destaca que la gestión optimizada del Sistema de Reciclaje de Agua de Drenaje (DWRS) en áreas de arrozales puede reducir significativamente la pérdida de nutrientes, especialmente nitrógeno y fósforo, mejorando la calidad del agua y la eficiencia en el uso del recurso hídrico. Entre los hallazgos clave se encuentran:

- La reducción del volumen de riego y el aumento en el área de drenaje de los estanques pueden disminuir las cargas de nitrógeno y fósforo en un rango de 3.8 % a 33.9 %, con mejoras notables en la calidad del agua.
- Implementar prácticas de manejo como el Riego y Drenaje Alterno (SWD) y reducir la extracción de agua externa ayudan a reducir las pérdidas de nutrientes en aproximadamente un 45-48 %, dependiendo del escenario y condiciones hidrológicas.
- Los estanques y canales actúan como filtros naturales, promoviendo procesos como la sedimentación, la desnitrificación y la absorción por las plantas, eliminando contaminantes antes de que lleguen a cuerpos de agua receptores.

- La implementación de estas prácticas requiere mayor esfuerzo y gestión por parte de los agricultores, pero puede facilitar un desarrollo agrícola más sustentable si cuenta con apoyo político y técnico suficiente.
- Las condiciones hidrológicas, como años húmedos o secos, afectan la eficiencia de estos sistemas, y en años de alto caudal, la rapidez del flujo puede disminuir la capacidad de remoción de nutrientes.

El manejo adecuado del sistema de reciclaje de agua de drenaje (DWRS) tiene el potencial de reducir la contaminación por nutrientes en zonas de arroz, promoviendo un uso más sustentable del agua y la protección del ambiente acuático [18].

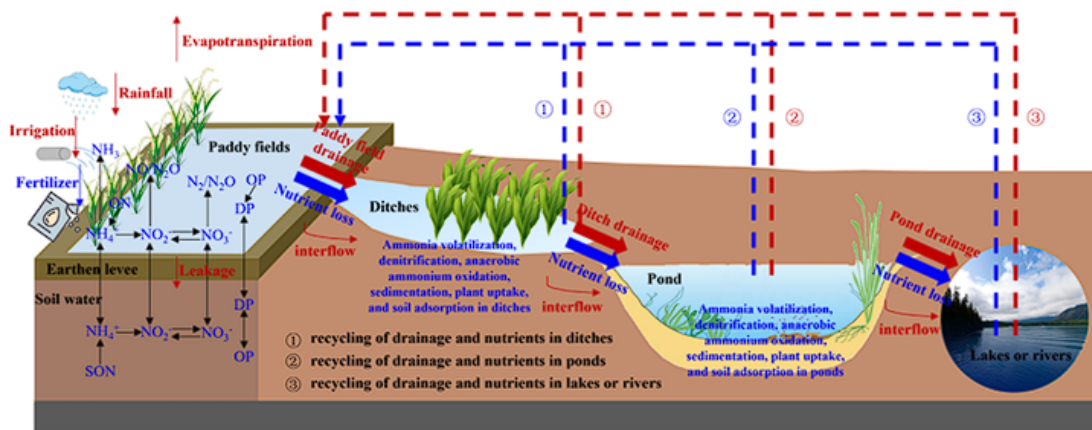


Figura 2. Sistema de reciclaje de agua de drenaje en arrozales [18]

IV-K. Recuperación de nutrientes en agua residual

La recuperación de nutrientes en las aguas residuales constituye un proceso de suma importancia para la sostenibilidad ambiental y la gestión de recursos. Este proceso se centra en la recuperación de fósforo y nitrógeno, elementos esenciales para la agricultura.

Existen diversas tecnologías para lograr esto, como la cristalización de estruvita, que se basa en la adición de magnesio para precipitar el fósforo en forma de estruvita. Además, los sistemas de eliminación biológica mejorada de fósforo han demostrado ser efectivos, ya que permiten la eliminación de contaminantes y recuperar nutrientes.

La optimización de las condiciones de pH y la gestión de metales pesados son factores críticos los cuales afectan a la eficiencia de la recuperación de nutrientes. Esto no solo contribuye a la sostenibilidad, sino que también ofrece oportunidades para la reutilización de recursos en la agricultura y contribuye a su vez a la reducción de la contaminación ambiental [19].

IV-L. Riesgo de sustancias disruptoras endocrinas en aguas del mundo

El estudio analiza la presencia y el riesgo de 41 sustancias químicas conocidas como disruptores endocrinos en aguas superficiales de todo el mundo. Estos compuestos, que incluyen pesticidas, medicamentos y productos industriales como plásticos y aditivos, tienen la capacidad de alterar el sistema hormonal de seres humanos y animales incluso en dosis muy bajas, lo que puede generar problemas de desarrollo, reproducción, crecimiento y fertilidad.

Los resultados muestran que estas sustancias ya se han detectado en ríos, lagos y embalses de diferentes regiones del planeta, con concentraciones variables según el nivel de industrialización y las regulaciones ambientales de cada país. Algunas de ellas, en especial ciertos pesticidas, fármacos y químicos industriales, superan los límites considerados seguros para la vida acuática, lo que las convierte en un riesgo importante para peces, anfibios y otros organismos que dependen de estos ecosistemas.

Para evaluar el nivel de peligro, los investigadores aplicaron un análisis multiparámetro que tuvo en cuenta la toxicidad de cada compuesto, las concentraciones registradas en el agua y la frecuencia con la que son detectados en distintos lugares. Con este método se identificó un grupo de sustancias prioritarias que requieren control y regulación urgente debido a su alto impacto potencial.

El estudio destaca que, aunque los principales afectados son los organismos acuáticos, existe también un riesgo indirecto para las personas, ya que estas aguas pueden utilizarse para consumo, riego agrícola y pesca. Por ello, los resultados ofrecen una base científica sólida para que los gobiernos desarrollen nuevas políticas de regulación ambiental, establezcan prioridades en el control de contaminantes y promuevan una gestión más segura de los recursos hídricos.

La investigación demuestra que los disruptores endocrinos representan una amenaza real y presente en las aguas superficiales a nivel mundial. Identificar las sustancias más críticas y priorizar su regulación es fundamental para garantizar agua segura, proteger la biodiversidad y reducir los riesgos para la salud humana [20].

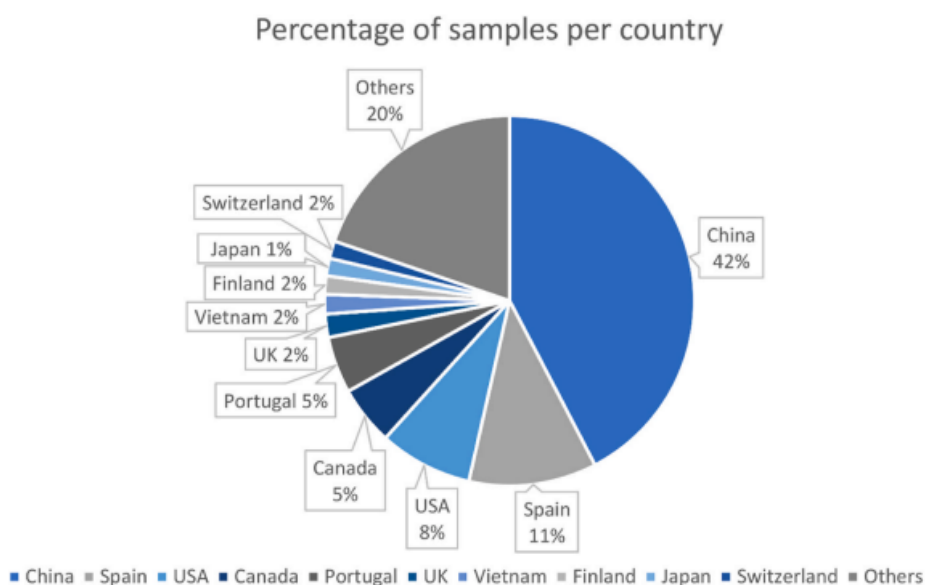


Figura 3. Porcentaje de muestras de cada país. Datos tomados de investigación realizada en Enero 2022 [20]

IV-M. Cuidado y restauración en la calidad del agua

Este estudio establece un modelo matemático que simula la eficiencia de renovación del agua y predice el efecto de las plantas en la purificación del agua. Se considera la acción de las plantas mediante la introducción de un modelo de trazadores y se desarrolla un modelo matemático bidimensional de turbulencia promedio en profundidad, el cual integra la simulación del tiempo de renovación y el efecto de purificación de las plantas. Durante el monitoreo in-situ en el estanque, se calibran los parámetros del modelo, como la tasa de purificación de plantas típicas, para

mejorar la calidad del agua [21].

IV-N. Contaminación por microfibras textiles

Se analiza un problema ambiental que ocurre en la vida cotidiana, cada vez que lavamos la ropa, las telas sueltan diminutos hilos llamados microfibras textiles, que son un tipo de microplásticos. Estas partículas son tan pequeñas que terminan en el agua, los ríos y los mares, acumulándose en los ecosistemas y llegando incluso a los alimentos y al agua que consumimos.

Se explica que la industria textil es una de las principales responsables porque las fibras se liberan en tres momentos: durante la fabricación de la ropa, cuando usamos y lavamos las prendas, y al desecharlas. Se estima que millones de microfibras son liberadas en cada ciclo de lavado y que alrededor de 0,3 millones de toneladas de estas terminan en ambientes acuáticos cada año. Aunque las plantas de tratamiento de aguas pueden retener parte de ellas hasta un 99 % en algunos casos, el problema no desaparece porque quedan atrapadas en los lodos, que a veces se usan como fertilizantes en la agricultura, reintroduciendo los contaminantes al medio ambiente.

También se señala que hay muchos factores que influyen en cuántas microfibras se desprenden el tipo de tela, la calidad de los hilos, los procesos de teñido e incluso el tipo de lavadora. Por ejemplo, las lavadoras de carga superior generan más fricción y liberan más fibras que las de carga frontal. También influyen el uso de detergentes, la temperatura y la duración del lavado que a mayor calor y tiempo, más fibras se sueltan.

Para reducir este problema. Algunas alternativas están en manos de los fabricantes, como diseñar tejidos más resistentes, usar aditivos que fijen mejor las fibras o mejorar los procesos de teñido. Otras dependen de los consumidores como lavar menos la ropa, usar programas cortos y fríos, llenar bien la lavadora, optar por detergentes líquidos y usar filtros o bolsas especiales que capturan las fibras. También se han desarrollado dispositivos comerciales como filtros externos o accesorios que atrapan entre el 30 % y el 90 % de las microfibras liberadas en un lavado. Sin embargo, aún queda pendiente qué hacer con esas fibras atrapadas, ya que si se tiran a la basura común podrían terminar igualmente en el ambiente.

Se concluye que no existe solo una solución, sino un conjunto de medidas que deben aplicarse al mismo tiempo cambios en la forma en que se fabrica la ropa, en cómo la lavamos y en cómo funcionan las plantas de tratamiento. Además, advierte que cualquier solución debe ser realmente sostenible, es decir, no puede generar un daño mayor al que pretende evitar, como el uso de químicos tóxicos o procesos que gasten demasiada energía. La clave está en combinar mejoras tecnológicas, regulaciones y cambios de hábitos para reducir la liberación de estas microfibras y proteger los ecosistemas acuáticos y la salud humana [22].

IV-N̄. Causas de la contaminación costera mundial

La investigación explica un problema mundial: los ríos transportan grandes cantidades de contaminación hacia los mares y océanos, en forma de nutrientes como nitrógeno y fósforo, plásticos micro y macro y químicos como triclosán de productos de higiene y diclofenaco, un medicamento común. Usando un modelo global que analiza más de diez mil cuencas de ríos, se estimó que en un solo año los ríos llevaron al mar unas 40.000 millones de toneladas de nitrógeno, 1.800 millones de fósforo, casi medio millón de toneladas de plásticos y cientos de toneladas de químicos.

Los resultados muestran que Asia es el continente que más contribuye a la contaminación por la alta densidad de población y la mala gestión de residuos, aunque Europa y América también destacan en plásticos y químicos debido al consumo elevado de productos y medicinas. Tres cuartas partes de toda esta contaminación terminan en el Atlántico y el Pacífico, lo que afecta gravemente a esos ecosistemas. En África, por ejemplo, gran parte del problema son los plásticos mal gestionados, mientras que en Europa y Norteamérica predominan los químicos y

microplásticos provenientes de aguas residuales.

El estudio también revela que existen zonas llamadas puntos calientes, que son regiones donde confluyen varios tipos de contaminantes a la vez. Sorprendentemente, casi la mitad de la superficie terrestre está en esta categoría y allí vive cerca del 90 % de la población mundial, lo que significa que la mayoría de la humanidad está directamente vinculada a este problema. Las fuentes de la contaminación son de dos tipos: difusas, como la agricultura intensiva que aporta fertilizantes y estiércol, o la basura plástica mal gestionada; y puntuales, como las aguas residuales que vierten químicos y microplásticos. Los nutrientes y los plásticos grandes suelen venir de fuentes difusas, mientras que los microplásticos y los químicos provienen sobre todo de las ciudades y sus sistemas de alcantarillado.

En términos simples, este trabajo muestra con cifras claras que los mares están recibiendo una enorme cantidad de contaminantes desde los ríos, principalmente por nuestras actividades diarias: cómo cultivamos los alimentos, cómo manejamos la basura y qué productos usamos en casa. El modelo desarrollado ayuda a identificar de dónde viene la contaminación y cuáles son las zonas más afectadas, con el fin de apoyar políticas que reduzcan el problema. La conclusión central es que, para proteger los océanos y la vida marina, necesitamos cambiar la manera en que producimos alimentos, tratamos las aguas residuales y gestionamos los plásticos [23].

IV-O. Influencia de la contaminación del agua y el suelo en el desarrollo agrícola nacional e internacional

La investigación trata sobre cómo la contaminación del agua y del suelo afecta directamente a la agricultura en México y en el mundo. Explica que, aunque el agua cubre gran parte del planeta, solo una pequeña fracción es dulce y disponible, y que la agricultura consume cerca del 70 % de ella. Sin embargo, muchas veces se usan aguas residuales sin tratamiento para regar cultivos, lo que introduce metales pesados, sales, pesticidas y fertilizantes en los suelos y plantas, provocando riesgos de toxicidad tanto para los cultivos como para la salud humana.

El suelo, por su parte, es un recurso vital que también está en crisis. Más de la mitad de la superficie agrícola de México presenta algún grado de degradación por erosión, deforestación, uso intensivo de químicos y malas prácticas de manejo. Los suelos no solo pierden nutrientes, sino que además acumulan contaminantes como plomo, arsénico, cadmio y pesticidas que se bioacumulan en las plantas y, finalmente, en los alimentos que consumimos. Esto afecta la fertilidad, la biodiversidad y la seguridad alimentaria.

Las principales fuentes de contaminación identificadas son los desechos industriales, la minería, el mal manejo de residuos sólidos, los fertilizantes y los pesticidas. Aunque estos últimos aumentan la producción agrícola, solo una pequeña parte llega a las plagas; el resto se dispersa en agua, suelo y aire, generando efectos negativos duraderos. Ejemplos de México y otros países muestran aguas y suelos con concentraciones de contaminantes por encima de lo permitido, lo que compromete la salud de las poblaciones y de los ecosistemas.

Se señala que la agricultura intensiva y la expansión de áreas de cultivo han contribuido a la deforestación y a la desertificación, reduciendo la capacidad de los ecosistemas para recuperarse. Frente a esto, se mencionan alternativas como el uso de cultivos transgénicos resistentes a plagas y sequías, así como técnicas de remediación como la biorremediación, la fitorremediación y la electrorremediación, que buscan limpiar suelos contaminados. Además, se destacan medidas de manejo sostenible como la rotación de cultivos, el uso reducido de químicos y la protección de la biodiversidad.

El artículo muestra que el agua y el suelo, pilares de la agricultura, están cada vez más amenazados por la contaminación y el mal manejo. Esto no solo reduce la productividad agrícola, sino que también pone en riesgo la salud humana y el equilibrio ambiental. La solución pasa por implementar políticas más estrictas, usar tecnologías de remediación y promover prácticas agrícolas sostenibles que garanticen alimentos seguros y un futuro equilibrado para los ecosistemas [24].

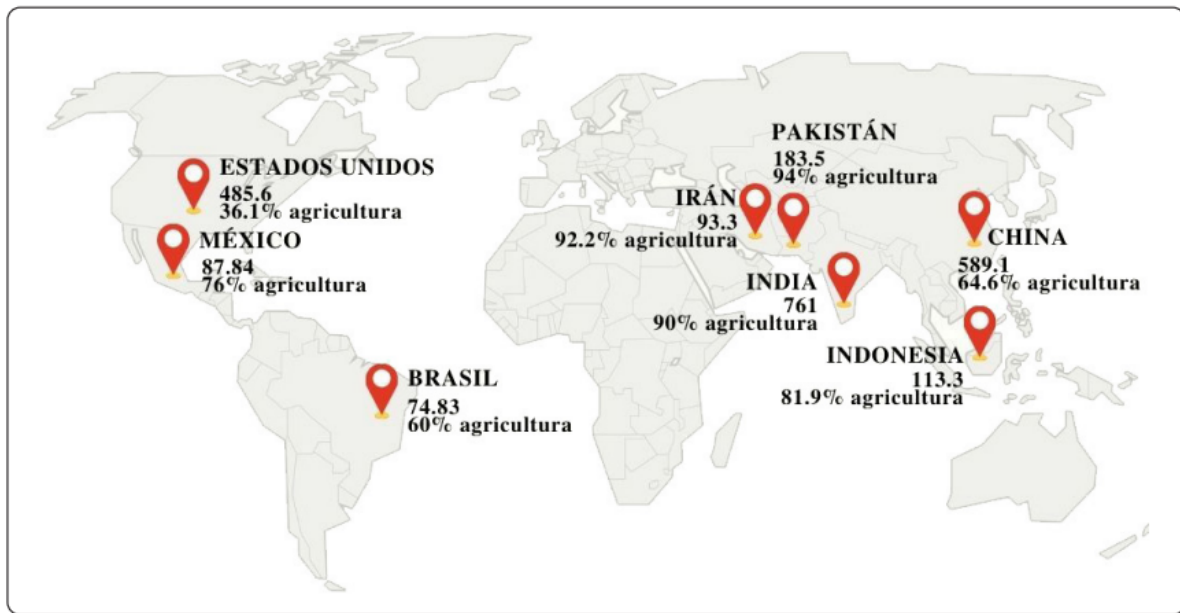


Figura 4. Países con mayor extracción de agua al año y porcentaje destinado a la actividad agrícola. Datos tomados de investigación realizada en Septiembre 2022 [24]

IV-P. Escasez y seguridad del agua en el mundo

Se expone la crisis del agua a nivel mundial, señalando que garantizar agua limpia y segura para toda la población es cada vez más difícil debido al cambio climático, las sequías prolongadas, el crecimiento demográfico, el aumento en la demanda y la deficiente gestión de los recursos hídricos. Se indica que alrededor de cuatro mil millones de personas enfrentan escasez de agua al menos un mes al año y que más de dos mil millones carecen de acceso a agua potable segura. Esta situación no solo implica un problema de cantidad, sino también de calidad, ya que cuando el suministro es irregular el agua que llega suele estar contaminada, generando un riesgo elevado de enfermedades.

Se describe las medidas que los servicios de agua y los hogares adoptan para enfrentar esta crisis. Una de ellas es el suministro intermitente, en el cual el agua se entrega únicamente durante ciertas horas del día o algunos días de la semana. Este sistema favorece la entrada de bacterias, virus y sustancias químicas en las tuberías, lo que incrementa la posibilidad de brotes de enfermedades como diarrea, cólera o hepatitis. Otra estrategia empleada es la mezcla de diferentes fuentes de agua, como la subterránea con la superficial, para satisfacer la demanda; sin embargo, esta práctica altera la química del agua, corroe las tuberías y libera metales pesados como plomo o arsénico. En casos de mayor gravedad, el agua se distribuye mediante camiones cisterna, los cuales representan un riesgo adicional si no cumplen normas sanitarias, ya que los tanques pueden convertirse en focos de contaminación bacteriana.

La investigación señala que muchos hogares almacenan agua en tanques ubicados en azoteas o interiores para enfrentar los cortes del servicio. No obstante, cuando estos tanques no reciben limpieza adecuada o están mal diseñados, el agua se estanca, pierde su contenido de desinfectante como el cloro y se convierte en un espacio propicio para la proliferación de bacterias dañinas como *Legionella* o *Pseudomonas*. Además, los materiales de los tanques pueden liberar compuestos químicos y los sedimentos acumulados sirven como base para el desarrollo microbiano, lo que compromete la seguridad del agua destinada al consumo humano.

El estudio advierte que la escasez de agua ya constituye un problema presente y no únicamente una preocupación futura. Las soluciones improvisadas que adoptan tanto las autoridades como las familias permiten disponer de agua, pero con frecuencia comprometen su calidad. Por ello, se recomienda reforzar el monitoreo y la mejora continua

de los sistemas de distribución y almacenamiento, desinfectar regularmente los tanques y camiones cisterna, y concienciar a la población sobre los riesgos y precauciones necesarias. Solo de esta forma será posible garantizar que el agua disponible no solo sea suficiente, sino también segura para la salud [25].

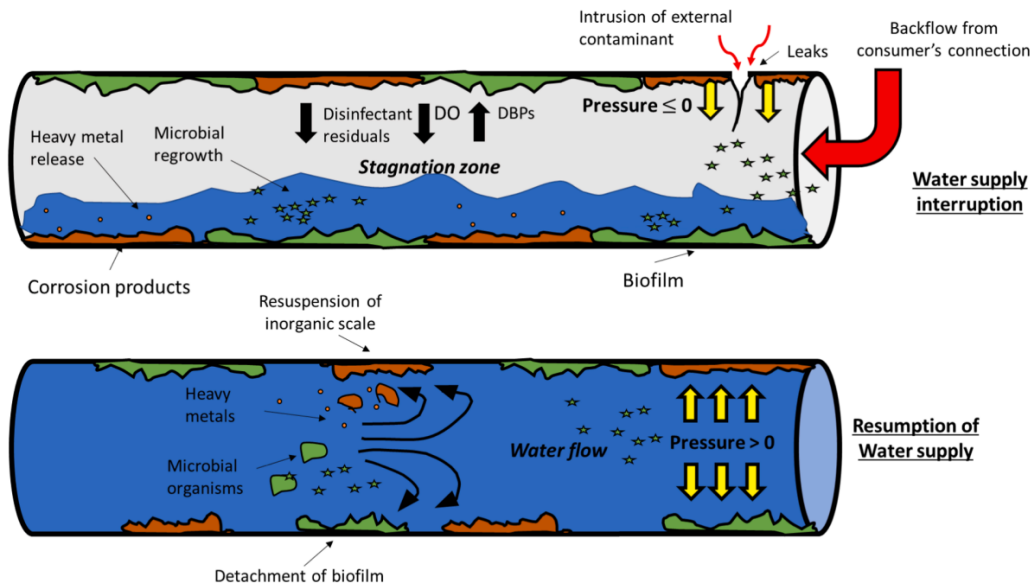


Figura 5. Principales vías de contaminación del agua suministro intermitente de agua. [25]

IV-Q. Enfermedad a causa del agua residual

El agua residual puede ser un vehículo para una variedad de enfermedades infecciosas, principalmente debido a la presencia de patógenos, los cuales contaminan el agua y los alimentos. Entre las más comunes asociadas con el agua residual se encuentran las infecciones gastrointestinales, que pueden ser causadas por bacterias como *Clostridium perfringens* y *Salmonella*. La vigilancia basada en aguas residuales se ha identificado como una herramienta importante para el monitoreo de la salud pública, permitiendo inferir la carga de enfermedades en una población. El agua residual es un medio crítico para la transmisión de enfermedades infecciosas, por lo que su vigilancia y análisis resultan esenciales para la protección de la salud y la prevención de enfermedades transmitidas por el agua y los alimentos [26].

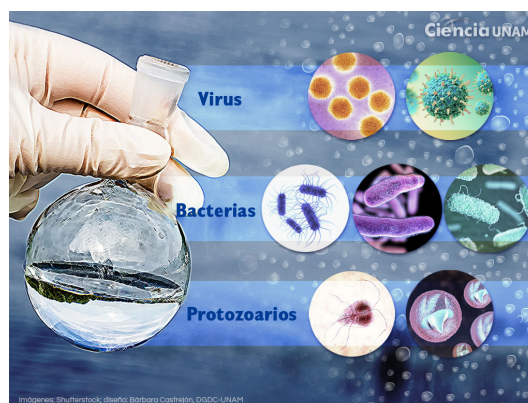


Figura 6. Enfermedades del agua residual [27]

IV-R. Tecnología y método de tratamiento

IV-R1. Sistema de ósmosis inversa de agua: Se trata de un procedimiento mediante el cual se realiza la depuración una muestra de agua al remover las partículas que se encuentran en suspensión. La ósmosis inversa es esencialmente la inversión del proceso natural de ósmosis. En dicho proceso, el agua atraviesa una membrana semipermeable con el fin de equilibrar el nivel de sustancias disueltas en el agua. Dicha membrana permite que el agua pase, pero impide que las moléculas más grandes, como minerales, sales y bacterias, pasen a través de ella. En la ósmosis inversa, el agua fluye en sentido contrario a través de la membrana, moviéndose hacia donde la concentración de solutos es más baja, hasta que se alcanza un equilibrio en ambos lados de la membrana [28].



Figura 7. Sistema ósmosis inversa [29]

IV-R2. Sistema a base de carbono: Esta investigación presenta el uso de materiales derivados de biomasa para tratar el agua residual. El estudio destaca que los residuos de biomasa son una fuente de carbono para la elaboración de materiales a base de carbono debido a su abundancia, bajo costo, fácil acceso, renovabilidad y amigable para el medio ambiente. Se analizan varios tipos de materiales a base de carbono, entre ellos el carbón activado, grafeno, nanotubos de carbono, biochar y aerogel de carbono. La adsorción se identifica como la tecnología convencional más utilizada para la eliminación de contaminantes peligrosos debido a su facilidad de uso y relativamente bajo costo a comparación de otros métodos. Por esta razón, los materiales a base de carbono se emplean principalmente en el mecanismo de adsorción para el tratamiento adecuado del agua residual. El estudio también considera los desafíos relacionados con la síntesis de materiales a base de carbono a partir de biomasa [30].

IV-R3. Filtro automático auto-limpiante: Los filtros autolimpiantes están diseñados con una configuración de bridas paralelas que facilita su instalación. Son compatibles con cualquier tubería recta, lo que permite una integración sencilla. Su proceso de filtración se compone de dos etapas: un cedazo grueso que retiene desechos y partículas grandes, y un cedazo fino que garantiza la pureza del agua según el nivel requerido.

Estos sistemas automáticos de filtración ofrecen soluciones versátiles para diversas aplicaciones en sectores industriales, municipales y de riego [31].



Figura 8. Filtro auto-limpiante [32]

IV-R4. Filtro rápido de arena: En esta investigación se evaluó el rendimiento inicial de un filtro rápido de arena (RSF por sus siglas en inglés) a pequeña escala con un proceso destinado a tratar y manejar el agua subterránea de las minas que contienen concentraciones de manganeso. El estudio demuestra que el filtro rápido de arena contribuyó a disminuir los niveles de concentración de manganeso, el porcentaje que disminuyó al ser pasada por los procesos que incluía aireación vigorosa, seguida del paso por el filtro rápido de arena, arrojó resultados con concentraciones seis veces menores a las iniciales [33].

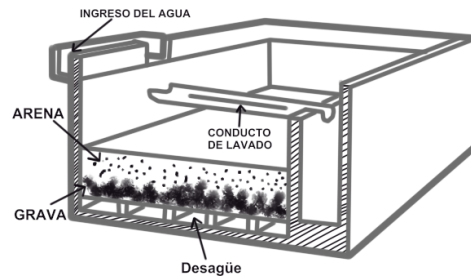


Figura 9. Filtro rápido de arena [34]

IV-R5. Filtro con membrana: Esta investigación describe un método de tratamiento de aguas mediante procesos de purificación con membranas a base de nitrato de carbono gráfico, aplicado en la ósmosis inversa. El uso de químicos para mejorar la calidad del agua resultante de las descargas de fluidos contaminados por las industrias ha ido en aumento, lo que ha impulsado el desarrollo de métodos para obtener agua limpia, llegando a la desalinización mediante membranas poliméricas, las cuales constituyen actualmente el sistema comercial más maduro y avanzado en la vanguardia de la desalinización [35].

En esta investigación se menciona que las membranas poliméricas son utilizadas en diversas áreas, como la separación de gases, películas de envasado, recubrimientos protectores y técnicas de purificación de agua, tales como la ósmosis inversa y varios métodos de filtración. El estudio analiza los procesos relacionados con membranas poliméricas naturales y sintéticas, destacando el papel crucial que estas membranas desempeñan en la purificación del agua de metales pesados y enfatizando la evolución en las tecnologías de membranas [36].

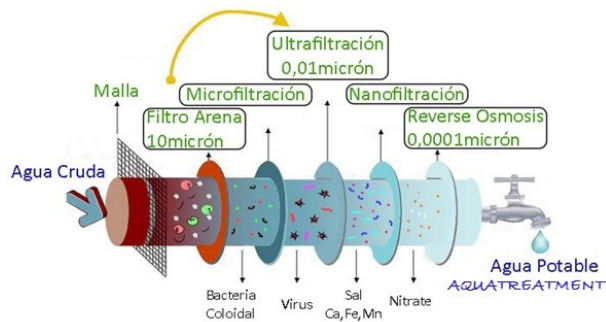


Figura 10. Filtro con membrana [37]

IV-R6. Filtro de cerámica: Estos filtros son empleados para la purificación del agua, buscando una solución de bajo costo y accesible. Están fabricados principalmente a partir de materiales naturales como el caolín y residuos agrícolas, lo que los hace tanto económicos como ambientalmente amigables. Los filtros cerámicos han demostrado ser efectivos en la reducción de patógenos y contaminantes en el agua, lo que contribuye a la disminución de enfermedades transmitidas por el agua. La porosidad de los filtros influye en su capacidad de filtración. A pesar de sus ventajas, los filtros cerámicos pueden enfrentar problemas como la obstrucción por partículas suspendidas, lo que puede disminuir su tasa de flujo con el tiempo. Sin embargo, técnicas como el cepillado pueden ayudar a mantener su eficiencia. Por estas razones, los filtros de cerámica representan una solución prometedora para el tratamiento de agua en comunidades, especialmente en países en desarrollo, al combinar efectividad, costo accesible y sostenibilidad [38].

IV-R7. Filtro de lecho profundo: Se trata de un sistema de tratamiento de aguas que utiliza un medio filtrante, como el carbón activado granular, para eliminar contaminantes de los efluentes. Este tipo de filtración se caracteriza por permitir que el agua fluya a través de un lecho de material filtrante, mediante el cual los sólidos suspendidos y otros contaminantes son retenidos. Es similar al filtro de arena, pero con capas más gruesas de material filtrante (grava, antracita, etc.). Estos sistemas son efectivos para reducir las concentraciones de sólidos suspendidos totales y fósforo en el efluente, optimizando la retención de los contaminantes y reduciendo la pérdida de carga en el sistema [39].

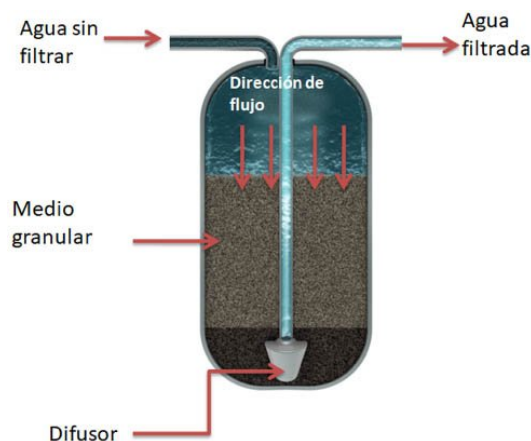


Figura 11. Filtro de lecho profundo [40]

IV-R8. Filtro de biocarbón: Se considera un material prometedor en el tratamiento de aguas residuales, utilizado principalmente en áreas normales y sensibles, cuyo diseño incluye una cama de biocarbón que ayuda en la

degradación de materia orgánica y en la nitrificación. Un sistema de tratamiento de aguas residuales con un filtro de carbono tiene una duración de aproximadamente 30 años, lo que lo hace comparable a otros sistemas de filtración, como los filtros de arena. Sin embargo, el rendimiento del filtro puede verse afectado por factores como la temperatura exterior, la variación en la tasa hidráulica o en la concentración de contaminantes en el agua residual entrante. Los resultados en laboratorios son prometedores, pero aún se requieren más datos y análisis sobre este filtro y su eficacia en sistemas operativos [41].

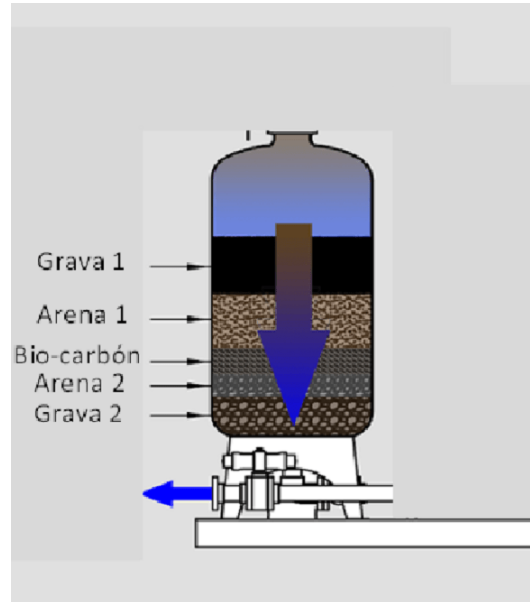


Figura 12. Filtro de biocarbón [42]

IV-R9. Filtración de Daphnia: En el estudio se evalúa la eficiencia de un tratamiento terciario innovador, basado en la filtración de *Daphnia* para eliminar sólidos suspendidos y *Escherichia coli*, combinado con vermifiltración o tratamientos secundarios convencionales. Se encontró que la NBS de filtración *Daphnia* aumenta la eliminación de partículas y la inactivación de *Escherichia coli* en diversas condiciones ambientales. Además, se desarrollaron modelos para predecir la calidad del agua tratada, considerando la eliminación de partículas y la inactivación de *Escherichia coli*. Los modelos desarrollados también proporcionan información sobre las condiciones operativas necesarias para obtener la calidad deseada del agua regenerada, cumpliendo con los propósitos de reutilización y las regulaciones de diferentes países [43].

IV-R10. Uso de floculante en el tratamiento de agua residual: Los floculantes microbianos se emplean en el tratamiento de aguas residuales debido a su capacidad para aglomerar y eliminar partículas contaminantes de manera eficiente. Estos floculantes han demostrado ser efectivos en diversas aplicaciones.

- Aguas residuales domésticas: Mediante el uso de floculantes microbianos se llega a alcanzar tasas de eliminación de hasta 89.8% y con optimización, la tasa puede llegar a aumentar hasta un 92.9%.
- Aguas residuales agrícolas: Estudios demuestran la eficacia para reducir indicadores claves como el carbono orgánico total y el nitrógeno amoniacal en efluentes de la agricultura, logrando tasas de eliminación significativas.

Estos floculantes no solo son efectivos, sino que también se consideran más sostenibles y seguros, lo que los convierte en una opción prometedora para el tratamiento de aguas residuales [44].

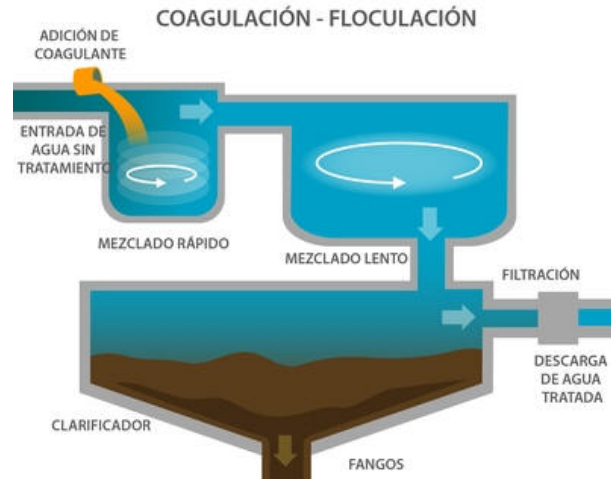


Figura 13. Uso de floculante [45]

IV-R11. Uso del Quitosano en aguas residuales: Se presentó un estudio sobre el quitosano, el cual es un derivado de la quitina y ha surgido como un material prometedor para aplicaciones en el tratamiento de aguas residuales. Posee capacidades únicas, como la biodegradabilidad, biocompatibilidad y capacidad de adsorción, lo que lo convierte en una opción atractiva para abordar los desafíos de la contaminación del agua. El documento concluye con ideas para futuras investigaciones y destaca el potencial del quitosano y sus derivados para desempeñar un papel importante en la mitigación de la contaminación del agua y la sostenibilidad de los métodos empleados para limpiar aguas residuales [46].

IV-R12. Uso de polímero compuesto: Se presenta un estudio sobre el uso de polímeros compuestos, su extracción y aplicación para tratar el agua residual. Se plantea como objetivo mejorar la pureza del agua residual, permitiendo la eliminación segura de efluentes domésticos e industriales sin causar problemas ambientales. El uso de polímeros naturales y sintéticos se justifica por su no toxicidad, viabilidad económica, disponibilidad abundante, renovabilidad, biocompatibilidad y biodegradabilidad. El estudio se enfoca en polímeros naturales, como la celulosa, la quitina, la gelatina y otros derivados del almidón, los cuales son ampliamente utilizados en el tratamiento de aguas residuales [47].

IV-R13. Tratamiento Anaeróbico de agua residual: En dicho estudio, se investigaron los efectos de la salinidad y la adición de un soluto para tratar el agua residual. Se encontró que, a medida que aumentaba la salinidad, el tamaño de las partículas de lodo disminuía y ciertos tipos de bacterias se volvían más dominantes. La adición de un soluto llamado betaína contribuyó a mantener la eficiencia del tratamiento en entornos con alta salinidad. En resumen, estos hallazgos sugieren que es posible tratar de manera eficaz las aguas residuales orgánicas en ambientes con alto contenido de sal con la ayuda de ciertos aditivos [48].

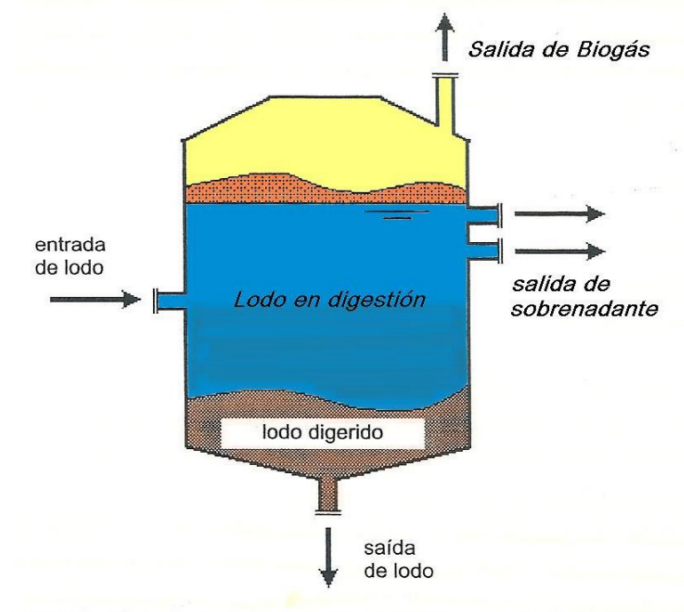


Figura 14. Tratamiento anaeróbico [49]

IV-R14. Microalga para tratar el agua residual: Se llevó a cabo una evaluación sobre el potencial del uso de microalgas como una innovación tecnológica para transformar la manera en que se trata el agua residual. El estudio indaga en diferentes escenarios de aguas residuales, entre ellos los domésticos, industriales y agroindustriales. Se analizan los elementos que afectan la eficacia del tratamiento por microalgas, la recuperación de recursos y su utilización. El estudio destaca el potencial de las microalgas como una solución prometedora para mejorar los procesos tradicionales de tratamiento de aguas residuales y abordar los desafíos ambientales asociados con la gestión del agua [50].

IV-R15. Limpieza química formada en membrana cerámica impulsada por gravedad: En China, una gran proporción de las aguas subterráneas contiene manganeso (Mn), especialmente en la región noreste, donde en muchos casos se superan los niveles seguros. Esto no solo provoca contaminación del agua, sino que también representa un riesgo para la salud humana al afectar el sistema nervioso.

El estudio se enfocó en optimizar la limpieza de las capas de purificación de agua PAC-MnOx mediante una combinación de ácido ascórbico, NaClO y NaOH. Se observó que la adición de NaClO modificó la composición del género microbiano, aunque no afectó la función biológica encargada de eliminar Mn²⁺ del MnOB. Además, los tratamientos de limpieza mejoraron la porosidad y redujeron el tamaño de las partículas, lo que incrementó la capacidad de adsorción de manganeso [51].

IV-S. Comportamiento térmico del agua para uso residencial en tinacos de concreto y polietileno en un clima cálido-subhúmedo

Este artículo presenta un estudio que compara el comportamiento térmico entre dos tinacos residenciales, uno de polietileno y otro de concreto, expuestos al sol durante un año. Para ello, se realizaron mediciones diarias de la temperatura en cuatro niveles de altura del agua de cada depósito.

Los resultados mostraron que el tinaco de polietileno retiene una mayor cantidad de energía en comparación con el de concreto, lo que se traduce en una temperatura del agua aproximadamente 4 grados más alta en la superficie. No obstante, en el fondo de los depósitos, la diferencia es menor, con variaciones de entre 1 y 2 grados a favor del polietileno durante las horas de mayor temperatura. Además, se determinó que los períodos del día en los que el agua alcanza una temperatura confortable para ducharse son limitados y que, de manera interesante, ambos sistemas

mantienen temperaturas similares en el fondo de los tanques a lo largo del año [52].

IV-T. Componentes

IV-T1. Sensor ultrasónico: Son aquellos sensores de proximidad que tienen la capacidad de detectar la presencia de objetos o señales cercanas a ellos. Estos sensores utilizan diferentes principios físicos para funcionar, ya sean detectores capacitivos, inductivos, interruptores de posición o fotoeléctricos. Se emplean en diversas aplicaciones, desde sistemas de seguridad hasta maquinaria industrial, debido a que poseen la capacidad de detectar objetos sin necesidad de contacto físico directo [53].



Figura 15. Sensor ultrasónico [54]

IV-T2. Luz piloto: Son aquellos dispositivos de señalización empleados en máquinas, herramientas y sistemas eléctricos para indicar diversos estados operativos. Estos dispositivos luminosos permiten visualizar el estado del sistema o máquina en cuestión. Principalmente se utilizan en tableros de control y paneles de mando para alertar al operador sobre condiciones específicas [55].

Tipo de luces piloto mediante el código de colores IEC 60204-1

- Rojo: Se encarga de indicar una emergencia o alguna condición la cual requiera de acción inmediata.
- Amarillo: Nos indicaría una condición anormal la cual a su vez podría derivar en una situación peligrosa.
- Blanco: Proporcionaría información general, como lo sería la presencia de tensión en la red.

Estos dispositivos son esenciales para la seguridad y el control en un entorno industrial.



Figura 16. Luz piloto [56]

IV-T3. Puente H: Un puente en H es un circuito que permite invertir la polaridad de la corriente aplicada a un motor de corriente continua (DC), facilitando cambiar su sentido de giro.

Algunos circuitos integrados, como el L298N o el L293D, incluyen dos puentes en H, lo que permite controlar hasta dos motores de manera independiente.

Estos circuitos son ampliamente utilizados en robótica, automatización y sistemas de control de movimiento, donde es necesario cambiar la dirección del giro sin modificar físicamente las conexiones del motor [57].

Básicamente, el funcionamiento de un L298N consiste en dos puentes H, uno para la salida A y otro para la salida B.

Internamente, un puente H es una formación de cuatro transistores, conectados entre Vcc y GND, con la carga a alimentar ubicada entre ellos. Dibujado en esquema, el conjunto tiene forma de “H”, de la cual recibe su nombre [57].

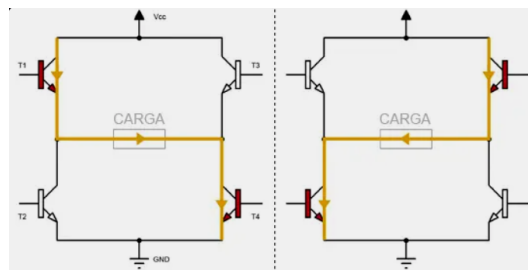


Figura 17. Puente H esquema [58]

IV-T4. Bomba sumergible: Este tipo de bombas son herramientas muy versátiles, ya que pueden funcionar completamente sumergidas en el líquido que se necesita bombear. Además, son compatibles con todo tipo de fluidos, lo que las hace muy prácticas para diferentes situaciones.

Su uso es muy amplio, tanto doméstico como en la industria. Por ejemplo, en el ámbito de la ingeniería civil, existen modelos de alto flujo que resultan ideales para esa aplicación. Por ello, no es de extrañar que sean consideradas una de las opciones más populares en el mercado hoy en día [59].



Figura 18. Bomba sumergible [60]

El funcionamiento de una bomba de agua sumergible es similar al de una bomba de superficie, con la diferencia clave de que no requiere una manguera para la absorción del agua. Estas bombas extraen el líquido a través de una rejilla ubicada en la parte inferior, que funciona como filtro, al menos en el caso de los modelos convencionales. También, el propio líquido en el que se encuentra sumergida la bomba cumple la función de refrigerarla, asegurando su correcto funcionamiento [59].



Figura 19. Funcionamiento de Bomba [60]

Estas bombas no solo son aptas para el bombeo de agua, sino que también pueden manejar otros fluidos como combustibles e incluso el bombeo de aguas residuales, dependiendo de su diseño y materiales de fabricación [59].

IV-U. Diseño y modelado

IV-U1. Software de modelado 3D: El modelado en 3D consiste en el uso de herramientas de software, como los programas de diseño asistido por computadora (CAD), para generar representaciones digitales tridimensionales de objetos. Este proceso es ampliamente utilizado en diversas industrias, como el desarrollo de productos de consumo, el diseño automotriz, la fabricación de equipos industriales, la arquitectura, el diseño, la ingeniería, el entretenimiento, los videojuegos y el sector sanitario, lo que permite su visualización, edición y simulación en distintos contextos [61].

IV-U2. Solidworks: Es un software de diseño CAD 3D utilizado para modelar piezas y ensamblajes en tres dimensiones, así como para la creación de planos en 2D. Sus herramientas permiten no solo diseñar y modelar,

sino también simular, fabricar y documentar [62].



Figura 20. Solidworks [63]

IV-U3. Autodesk Inventor: Es un software de CAD 3D que proporciona herramientas avanzadas para el diseño mecánico, la documentación y la simulación. Incluye funciones especializadas para el diseño de maquinaria, chapa metálica, estructuras, tubos y tuberías, cables y arneses, entre otras aplicaciones, facilitando así el desarrollo de proyectos de ingeniería y manufactura [64].



Figura 21. Autodesk inventor [65]

V. METODOLOGÍA

V-A. Descripción general

La investigación consiste en desarrollar un prototipo a escala de una planta para el tratamiento de aguas residuales automatizada para su reutilización en diferentes aplicaciones. El alcance del proyecto incluye la investigación, diseño, construcción, pruebas y evaluación del prototipo, con el objetivo de validar la factibilidad del tratamiento del agua residual para su uso en zonas con acceso limitado a reservas de agua.

V-B. Contexto y población

El proyecto es aplicable a comunidades rurales o áreas agrícolas remotas que enfrentan dificultades para acceder a fuentes de agua y permitir el riego en sus plantaciones. El objetivo es que la población de residentes y agricultores de estas áreas, puedan beneficiarse del uso de aguas residuales aptas para el cultivo.

V-C. Criterio de selección de equipo, método, modelo y dato

Los equipos son seleccionados en base a las necesidades del proyecto y deben cumplir con el presupuesto estimado. Los datos son obtenidos mediante mediciones directas a través del uso de sensores de pH, nivel de agua y mediante un microcontrolador para automatizar los procesos. Además, se emplearán datos de otras investigaciones ya realizadas con respecto al tema para respaldar el diseño e implementación del prototipo.

V-C1. Controlador: Selección del Microcontrolador (Arduino Uno – Arduino Mega)

Inicialmente, se consideró el uso de un Arduino UNO debido a la simplicidad que conlleva y el bajo costo de este. Sin embargo, se decidió utilizar el Arduino MEGA debido a que cuenta con una mayor capacidad de procesamiento y un mayor número de pines de entrada/salida, lo cual permite manejar múltiples sensores y actuadores de manera simultánea. Esto es de suma importancia en un sistema automatizado, el cual requiere la integración de múltiples componentes, como sensores de pH, sensores de nivel y bombas de agua.

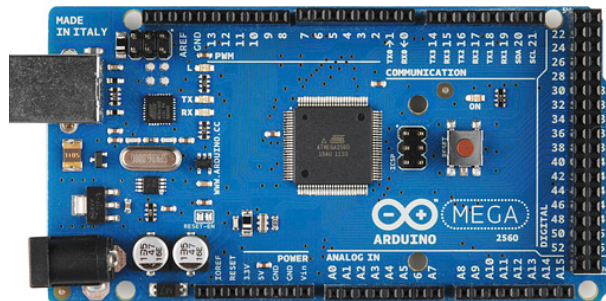


Figura 22. Arduino Mega [66]

V-C2. Bomba: Bomba Sumergible

En la implementación del sistema, las bombas desempeñan un papel de suma importancia en el proceso de recirculación del agua residual. Dichas bombas son instaladas directamente en los tanques de tratamiento. El uso de estas bombas permite garantizar un flujo constante y controlado del agua a través de las distintas etapas del proceso, contribuyendo a la eficiencia y estabilidad del sistema de tratamiento.

V-C3. *Sensor:* Acondicionamiento de Señal

Sensor de pH Arduino

Se lleva a cabo el uso de un sensor de pH con acondicionamiento de señal, el cual se encarga de medir los niveles de acidez o alcalinidad del agua. La señal procesada por el sensor permite determinar la dosificación adecuada de cloro y floculante. El rango de pH óptimo para la floculación es de 6 a 8, por lo cual el sistema ajusta automáticamente el pH en caso de ser necesario.



Figura 23. Sensor pH para Arduino [67]

Sensor ultrasónico

Se encarga de monitorear el volumen del agua, permitiendo controlar el flujo entre las etapas del tratamiento. Estos sensores envían señales al Arduino MEGA para indicar el cambio de nivel del reservorio y por ende la necesidad de activar o desactivar una bomba.



Figura 24. Sensor ultrasónico hc-sr 04 [68]

V-C4. *Alimentación:* Fuente de alimentación

Fuente conmutada 12V 10A

Se utiliza una fuente conmutada de 12V 10A en este prototipo debido a varias razones:

- Alta eficiencia energética: Las fuentes conmutadas presentan una mayor eficiencia que las lineales, ya que convierten la energía con menores pérdidas de calor. Esto resulta ideal para proyectos que requieren un suministro constante y eficiente.

- Capacidad de carga: Con una salida de 10A, esta fuente es capaz de alimentar dispositivos o sistemas que demandan una corriente considerable, como motores, controladores, sensores de alta potencia o circuitos electrónicos complejos.
- Tamaño compacto: A pesar de su alta capacidad de corriente, las fuentes conmutadas mantienen un diseño más compacto y ligero, lo cual facilita su integración en el proyecto sin ocupar mucho espacio.
- Estabilidad de voltaje: Ofrece una salida de 12V estable, fundamental para proteger los componentes sensibles del proyecto, evitando fluctuaciones que puedan dañarlos.
- Versatilidad: Puede adaptarse a diferentes condiciones de entrada (generalmente 110V-220V AC), lo que permite su aplicación en distintos entornos y condiciones.



Figura 25. Fuente conmutada. Fuente: Los Autores

V-D. Intervención, análisis estadístico y aspecto ético

La intervención consistirá en la construcción y operación del prototipo propuesto, con el objetivo de realizar el respectivo tratamiento del agua residual de forma automatizada, recopilando datos durante su funcionamiento y evaluando su eficacia en la eliminación de sedimentos, así como verificando el cumplimiento del nivel de pH establecido. En las siguientes etapas del proyecto se considerará que la selección de materiales y los métodos empleados para el tratamiento del agua cumplan con los estándares de seguridad y salud ambiental. Asimismo, se aplicarán las medidas de seguridad correspondientes para el personal participante, y se verificará el cumplimiento de los estándares de calidad del agua residual tratada .

V-E. Pretratamiento

La recepción de aguas residuales: las aguas residuales provenientes de fuentes domésticas son recolectadas a través de tanques de recolección.

El agua residual es sometida a un proceso de filtrado para remover sólidos grandes, como piedras y plásticos.

V-F. Tratamiento de sedimentación

Para lograr una correcta separación del agua y los sedimentos, se emplean floculantes, que favorecen la formación de flóculos más grandes, los cuales pueden ser removidos más fácilmente.

V-F1. Floculación: Las partículas presentes en el agua suelen tener cargas eléctricas negativas, lo que provoca que se repelan entre sí y no se agrupen de manera natural con ayuda del floculante se neutraliza las cargas de las partículas y al quitar la repulsión, las partículas pueden acercarse.

Se realizaron varias pruebas con diferentes dosis de floculante 10, 20 y 30 mg/L para determinar la dosis más efectiva. Tras las pruebas, se concluyó que la dosis adecuada para este prototipo es de 10 mg/L, recomendando disolver 10 g del floculante en 1 L de agua y permitir un tiempo de sedimentación de 20 a 30 minutos.

V-G. Tratamiento de desinfección

Para garantizar la eliminación de microorganismos y reducir el riesgo de contaminación microbiológica, se emplean técnicas de desinfección como la cloración.

V-G1. Cloración: El método de cloración se destaca por su eficacia en la desinfección de aguas residuales, especialmente aquellas provenientes de lavamanos y lavaplatos. Se recomienda diluir entre 2 a 5 gotas de cloro comercial (al 5 % de concentración) por cada litro de agua. Esta técnica es fundamental porque:

- Elimina microorganismos patógenos: El cloro es altamente efectivo para inactivar bacterias, virus y otros agentes patógenos presentes en las aguas grises, reduciendo el riesgo de enfermedades al reutilizar o descargar el agua.
- Es fácil de aplicar y controlar: La dosificación de cloro puede automatizarse fácilmente usando un sistema basado en Arduino Mega, lo que permite un control preciso de la cantidad de cloro necesaria según los niveles de pH.
- Es económico y accesible: El cloro es un desinfectante económico, de fácil obtención y manejo, convirtiéndolo en una solución viable para zonas con recursos limitados.

V-H. Automatización

Se instalan sensores de nivel y pH para monitorear continuamente la calidad del agua y el funcionamiento de los equipos.

- Sensor ultrasónico: Permite controlar la cantidad de agua en los distintos tanques del prototipo. Este sensor activa y desactiva las bombas sumergibles según sea necesario, evitando desbordamientos o déficit de agua en las etapas del proceso.
- Sensor de pH: Se encarga de monitorear de forma continua la acidez o alcalinidad del agua residual, ajustando automáticamente la inyección de los correctores químicos para mantener un equilibrio óptimo en el tratamiento.
- Control de inyección de reactivos: Mediante un sistema de dosificación automatizado, se regula la adición de productos químicos como el floculante, asegurando una eficiencia óptima en cada etapa del proceso.



Figura 26. Construcción de tablero. Fuente: Los Autores

Se muestra el interior del tablero eléctrico, el cual forma parte del sistema de automatización de la planta de tratamiento de agua residual.

Cada componente cumple un papel fundamental para el prototipo. La fuente de alimentación se encarga de suministrar la energía necesaria a los circuitos electrónicos, además de incluir un módulo convertidor DC-DC buck (reductor de voltaje) con voltímetro para la visualización de datos y ajustes en el sistema.

Los relés tienen la función de activar los dispositivos, como bombas dentro del sistema de la planta.

El tablero funciona como el módulo de control automatizado, encargado de gestionar los distintos componentes de la planta de tratamiento de agua residual en tiempo real, optimizando así su funcionamiento.

V-I. Controlador Automatizado

Mediante el desarrollo de un código en el software Arduino IDE, que posteriormente será cargado a la memoria del microcontrolador, el cual se encargará de controlar los niveles deseados de los diferentes parámetros según se vayan obteniendo lecturas de los sensores incorporados.

```
File Edit Sketch Tools Help
Arduino Mega or Mega 2560
proceso_tratamiento_liquido.ino
57 temp1.getTISP(3000);
58 temp2.defiSP(3000);
59 temp3.defiSP(3000);
60
61
62 }
63 bool procesoEnEjecucion = false;
64
65
66
67 void loop() {
68   int nivel = leerNivelAgua();
69   float ph = leerPH();
70
71   digitalWrite(LED_T1, !digitalRead(SWITCH_T1));
72   digitalWrite(LED_T2, !digitalRead(SWITCH_T2));
73   digitalWrite(LED_T3, !digitalRead(SWITCH_T3));
74
75   if (digitalRead(START_SWITCH) == 1 && !procesoEnEjecucion) {
76     // Marca que el proceso ha comenzado
77
78     digitalWrite(START_LED, LOW); // Lógica invertida
79
80
```

Figura 27. Código de inicio del proceso. Fuente: Los Autores

V-J. Proceso del tratamiento

A continuación se realiza el ingreso de una de las muestras de agua residual en el tanque para proceder a realizar el tratamiento e iniciar con la secuencia de control. Este proceso permitió simular condiciones reales de operación y evaluar la respuesta del sistema frente a los tipos de contaminantes en el agua residual.



Figura 28. Ingreso de muestra. Fuente: Los Autores

El sistema se encarga de mostrar una lectura en tiempo real de los parámetros de pH obtenidos mediante el sensor que se encuentra conectado al módulo. Esto permite tener un control constante de los niveles de pH del agua tratada.

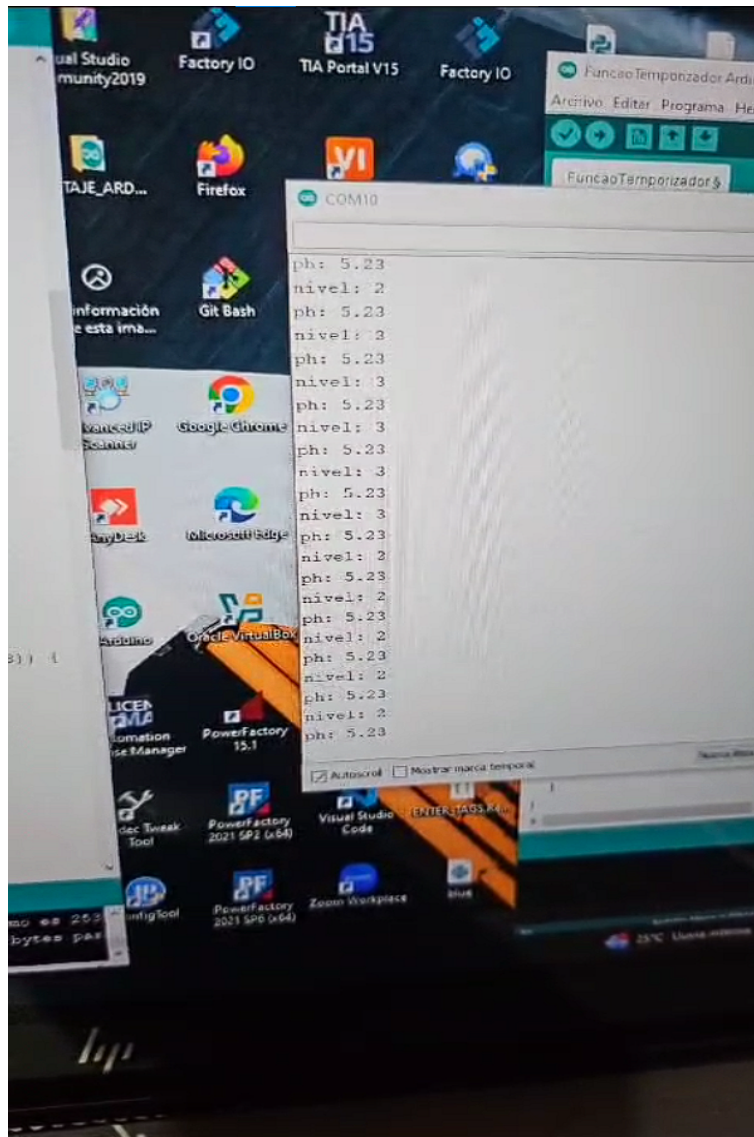


Figura 29. Lectura del sensor de pH. Fuente: Los Autores

Mediante estos procesos se permite que el prototipo cumpla con la automatización planteada, además de garantizar un monitoreo continuo y fiable de las condiciones del agua tratada.

V-K. Monitoreo y Evaluación del Sistema

Se realiza un monitoreo continuo de la calidad del agua tratada, así como de los parámetros de operación del sistema de tratamiento de aguas residuales, para verificar su eficiencia y cumplimiento de los estándares establecidos. Se lleva a cabo una evaluación periódica de los resultados obtenidos, comparando los datos de entrada y salida del sistema; así como los costos operativos, para identificar áreas de mejora y optimización.

- Pruebas de eficiencia: A lo largo del proceso se realizaron diversas pruebas para evaluar la eficiencia del sistema en la reducción de turbidez y mejorar la calidad del agua. En función de los datos que se obtengan, se realizarán ajustes en los diversos parámetros del sistema que permitan optimizar su rendimiento.

- Resultados previstos: Se espera que el prototipo reduzca significativamente la turbidez del agua tratada, logrando niveles de claridad adecuados que permitan su reutilización o descarga segura. El uso del Arduino MEGA permitirá un control más preciso y automatizado en el proceso del tratamiento, minimizando la intervención manual y optimizando el uso de los recursos.

V-L. Sistema Eléctrico

V-L1. *Datos del Prototipo:* El prototipo usa los siguientes componentes eléctricos:

- Bombas de agua sumergibles (12V, 0.3A).
- Sensores ultrasónicos (5V, 15mA)
- Sensor de pH (5V, 10mA).
- Puentes H L298 (5V, 0.8A).

V-L2. *Cálculo de Potencia Total:* La potencia se calcula con la ecuación:

$$P = V \times I \quad (1)$$

Bombas de Agua

Cada bomba consume:

$$P_{\text{bomba}} = 12V \times 0,3A = 3,6W \quad (2)$$

Como se utilizan 4 bombas:

$$P_{\text{total_bombas}} = 4 \times 3,6W = 14,4W \quad (3)$$

Sensor Ultrasónico

$$P_{\text{ultra}} = 5V \times 15mA = 0,075W \quad (4)$$

Sensor de pH

$$P_{\text{pH}} = 5V \times 10mA = 0,05W \quad (5)$$

Puentes H L298

Cada puente H consume:

$$P_{\text{puenteHL298}} = 5V \times 0,8A = 4W \quad (6)$$

Para 2 puentes:

$$P_{\text{total_puenteH}} = 2 \times 4W = 8W \quad (7)$$

Potencia Total

$$P_{\text{total}} = P_{\text{total-bombas}} + P_{\text{ultrasónicos}} + P_{\text{pH}} + P_{\text{total-puentesH}} \quad (8)$$

$$P_{\text{total}} = 14,4W + 0,075W + 0,05W + 8W = 22,53W \quad (9)$$

V-L3. *Cálculo de Corriente Requerida:* Corriente en la Línea de 12V

$$I_{12V} = \frac{P_{bombas}}{12V} = \frac{14,4W}{12V} = 1,2A \quad (10)$$

Corriente en la Línea de 5V

$$I_{5V} = \frac{P_{ultrasónicos} + P_{pH} + P_{puentesH}}{5V} \quad (11)$$

$$I_{5V} = \frac{0,075W + 0,05W + 8W}{5V} = 1,62A \quad (12)$$

Conclusión

La fuente de 12V y 10A (120W máx.) es suficiente, ya que:

El consumo total es 22.53W, menor a los 120W de la fuente.

V-M. Diagrama de conexión eléctrica

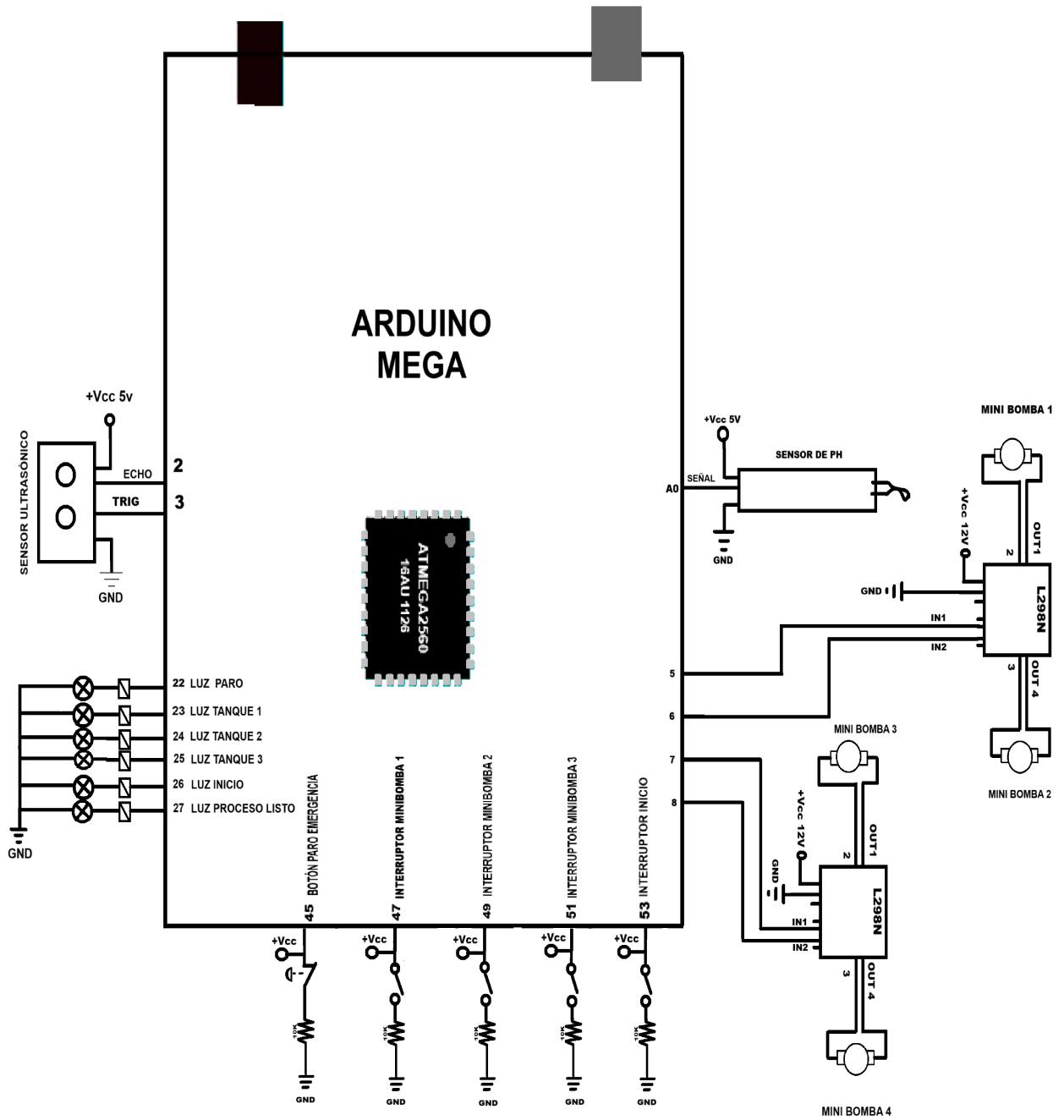


Figura 30. Diagrama de conexión eléctrica. Fuente: Los Autores

V-N. Diagrama de flujo

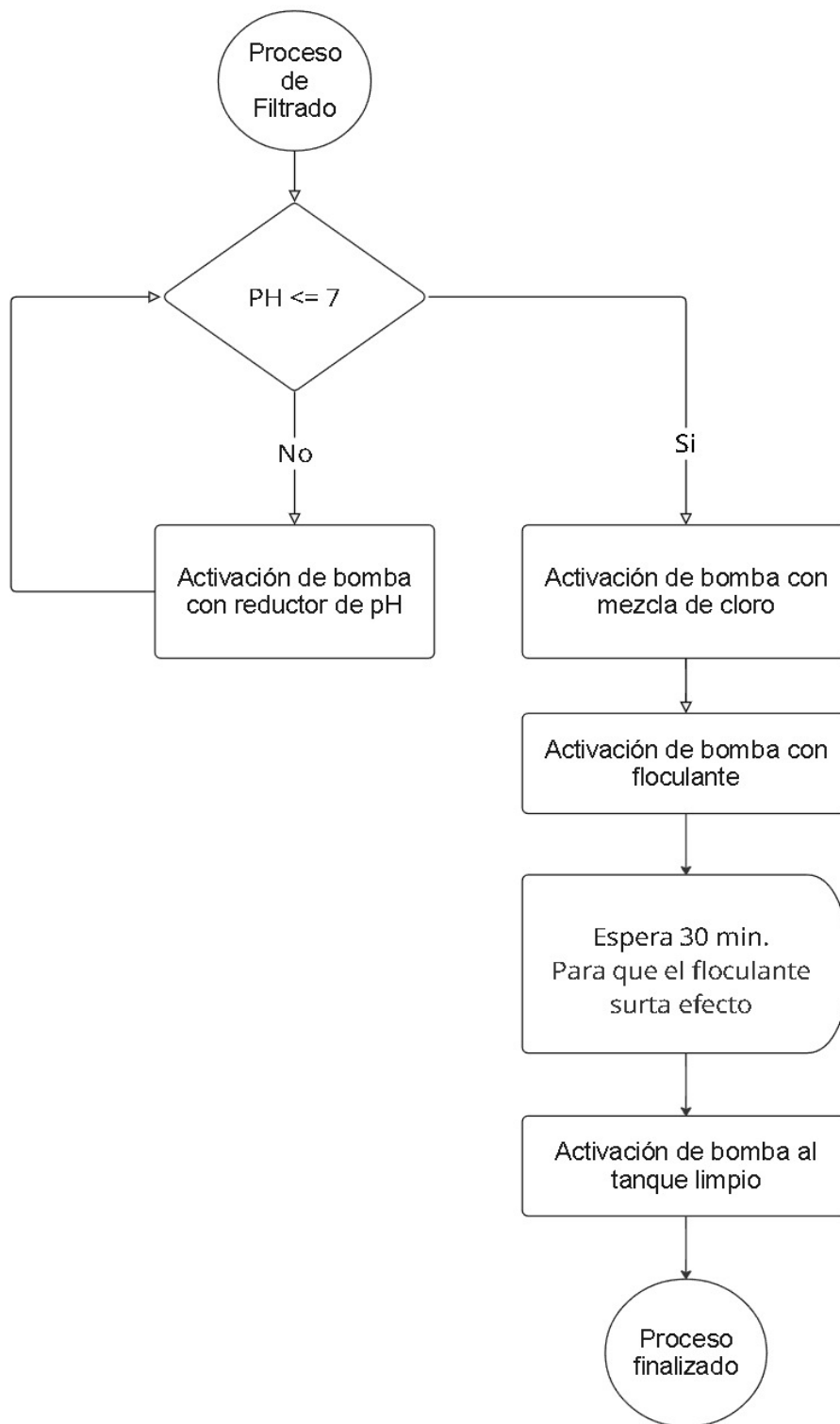


Figura 31. Diagrama de flujo. Fuente: Los Autores

VI. RESULTADOS

El prototipo a escala de la planta de tratamiento de agua residual automatizada demostró ser una solución efectiva y adaptable frente a distintos tipos de contaminantes presentes en aguas domésticas. Las pruebas realizadas con muestras que contenían jabón líquido, jabón en barra, lavaplatos y champú evidencian que el sistema fue capaz de mantener un control estable del pH, dentro de los rangos adecuados para el tratamiento posterior, gracias al ajuste automatizado mediante inyección química.

La incorporación de floculación y decantación permitió una reducción significativa de la turbidez y sólidos suspendidos, mostrando mayor efectividad en aguas con jabón en barra, donde la carga de residuos era más elevada. El desempeño del sistema reflejó un equilibrio entre precisión en el ajuste de parámetros, eficiencia en la remoción de contaminantes y optimización del consumo de reactivos, evitando desperdicios y mejorando la sostenibilidad del proceso.

Los resultados obtenidos mostraron que el prototipo no solo garantiza un mayor control y eficiencia del proceso, sino que también presenta una alternativa viable para zonas con difícil acceso a fuentes de agua, contribuyendo a la optimización del recurso hídrico y a la sostenibilidad ambiental.



Figura 32. Vista general del dispositivo. Fuente: Los Autores

El prototipo demostró tener un desempeño estable y adaptable a diferentes condiciones de agua residual. Entre los aspectos claves evaluados se tiene:

- Precisión en el ajuste del pH: La inyección automatizada para corregir los niveles de pH, permitió mantener el agua tratada dentro de los valores de nivel recomendado antes del proceso de filtrado final.
- Eficiencia en la remoción de impurezas: El combinado de floculante y la decantación permitió obtener agua con menor turbidez y carga contaminante.
- Tiempo de tratamiento: La duración total del proceso varió según el tipo de agua residual tratada, con tiempos mas largos para las soluciones con jabón en barra debido a la mayor cantidad de residuos sólidos.
- Consumo de reactivos: La automatización permitió optimizar la cantidad de productos químicos utilizados, lo cual permite evitar desperdicios y mejorar la eficiencia del sistema.

VII. CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES

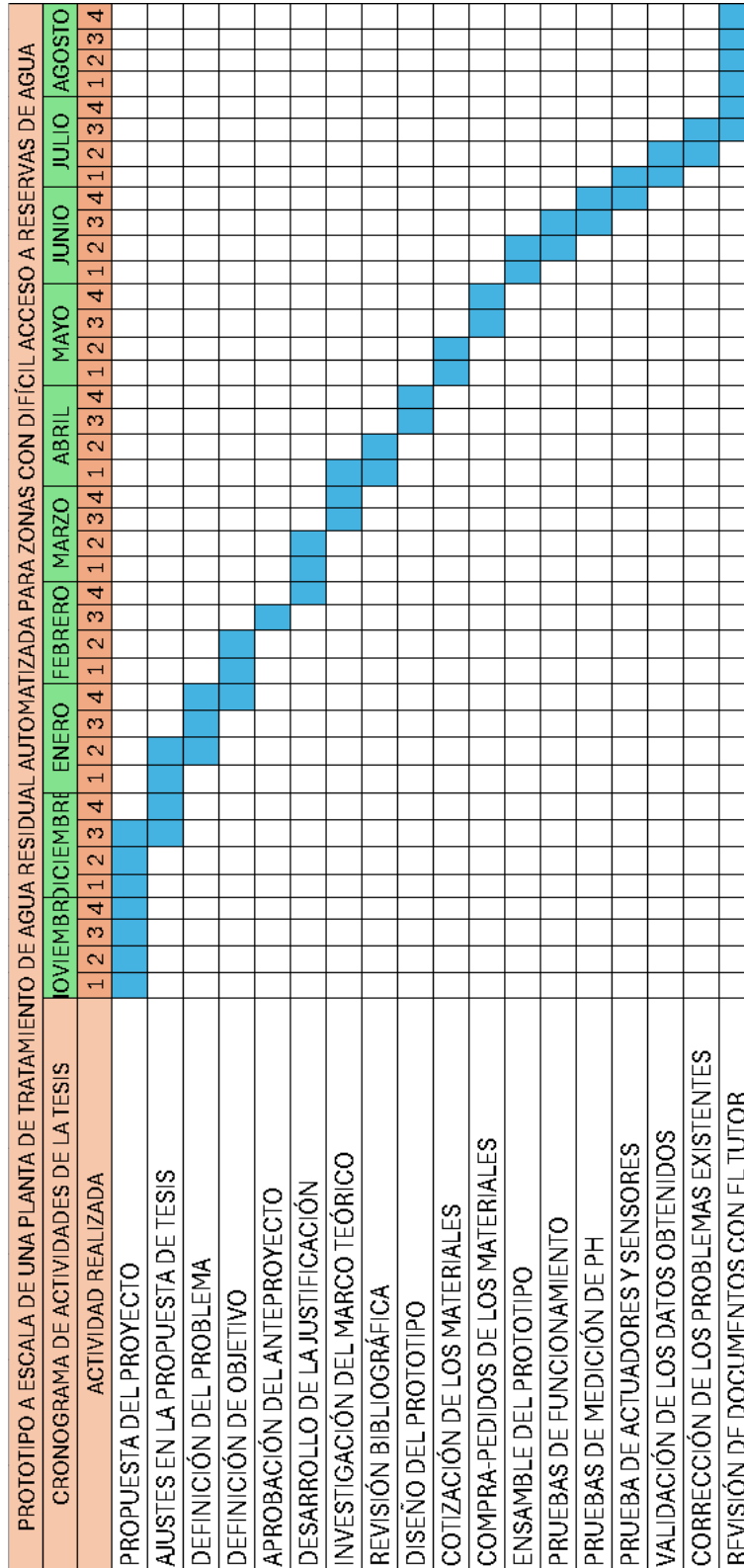


Figura 33. Cronograma de actividades. Fuente: Los Autores

VIII. PRESUPUESTO

Tabla II
PRESUPUESTO. FUENTE: LOS AUTORES

| Material | Característica | Unidad | Costo unitario | Costo final |
|-----------------------------------|---|--------|----------------|--------------|
| Microcontrolador | Arduino MEGA | 1 | \$30 | \$30 |
| Medidor de pH | Rango de medición: 0-14PH Precisión: ± 0.1 pH | 1 | \$70 | \$70 |
| Sensor Ultrasónico | Modelo: hc-sr04 | 1 | \$6 | \$6 |
| Tablero | Plastico ABS - Resistente al agua | 1 | \$100 | \$100 |
| Puentes H | L298N - 5V | 2 | \$6 | \$12 |
| Cloro | Hipoclorito de sodio - al 5% | 1 | \$18 | \$18 |
| Floculante | Flocucit - Sulfato de Aluminio | 1 | \$18 | \$18 |
| Acidet | Reductor de PH - ácido sulfúrico | 1 | \$18 | \$18 |
| Mini Bomba de Agua | Sumergible - 240L/H - 12VDC | 4 | \$12 | \$48 |
| Botonera/Interruptores | Corriente y volt: UI: 400V, Ith: 10A | 5 | \$10 | \$50 |
| Luces Pilotos | LED 22mm - 24/110/220V | 6 | \$5 | \$30 |
| Tanques | Pomo Boga - 1L | 5 | \$6 | \$30 |
| Mangueras | T10 PVC 5/16" | 5 | \$3 | \$15 |
| Kit Riel DIN/Bornera Arduino Mega | CZH-LABS (modelo D-1100 Ver 1.1) | 1 | \$28 | \$28 |
| Convertidor Voltaje | Adjustable Step Down LM2596 | 1 | \$5 | \$5 |
| Fuente Conmutada | 12V 10A | 1 | \$30 | \$30 |
| Base | Tabla de madera | 1 | \$52 | \$52 |
| TOTAL | | | | \$560 |

IX. CONCLUSIONES

La implementación de un sistema automatizado permite mejorar la eficiencia en el proceso de tratamiento del agua, optimizando el uso de los recursos y garantizando mayor calidad del agua tratada para su debida reutilización.

Se desarrollaron estrategias de control que aseguraron la estabilidad y el funcionamiento del sistema. Mediante la integración de un sensor de pH y su sistema automatizado para elevar o reducir el nivel de pH. Garantizando que el líquido se mantuviera dentro del rango requerido para su posterior uso. Se implementó el uso de floculantes, lo que mejoró la eliminación de impurezas y optimizó el proceso de tratamiento del agua.

La implementación de un control automatizado para regular factores como los niveles de pH y la eliminación de impurezas mediante el uso de floculantes, permitió optimizar la cantidad de recursos químicos empleados en el proceso, evitando desperdicios y mejorando la eficiencia del sistema.

Los resultados obtenidos demostraron que la automatización y el control continuo del pH, junto con la aplicación de floculantes, constituyen una estrategia efectiva para el tratamiento del recurso hídrico. Esta solución favorece al uso eficiente del agua y garantiza su calidad para diversas aplicaciones.

X. RECOMENDACIONES

- Es recomendable realizar una calibración periódica de los sensores en especial al sensor de pH para garantizar lecturas precisas y fiables. Además, considerar el uso de sensores de mayor sensibilidad en entornos con condiciones extremas.
- Implementar modelos de IA permitiendo predecir variaciones en la calidad del agua y ajustando automáticamente los parámetros del sistema, como el caudal de las bombas o la dosificación de los químicos en función a los datos constantemente adquiridos.
- Integrar tecnologías de Internet de las Cosas (IoT) para el monitoreo remoto de los parámetros del sistema, recibiendo alertas en tiempo real permitiendo a el operador estar al tanto de cualquier situación lo cual facilitaría la supervisión y el mantenimiento preventivo a distancia.
- Ampliar la gama de sensores para evaluar otros parámetros importantes, como la turbidez y la presencia de contaminantes específicos, asegurando una mayor calidad del agua tratada.

REFERENCIAS

- [1] G. K. Ding, «Wastewater Treatment, Reused and Recycling – A Potential Source of Water Supply,» 2023.
- [2] D. Kankanige y S. Babel, «Contamination by 6.5 m-sized microplastics and their removability in a conventional water treatment plant (WTP) in Thailand,» 2021.
- [3] D. Rich, E. Andiroglu, K. Gallo y S. Ramanathan, *A review of water reuse applications and effluent standards in response to water scarcity*, 2023.
- [4] C. Ingraio, R. Strippoli, G. Lagioia y D. Huisinigh, *Water scarcity in agriculture: An overview of causes, impacts and approaches for reducing the risks*, 2023.
- [5] T. A. Hemkemeier, F. C. Almeida, A. Sales y A. J. Klemm, «Repair mortars with water treatment plant sludge (WTPS) and sugarcane bagasse ash sand (SBAS) for more eco-efficient and durable constructions,» 2023.
- [6] Y. Xie, L. Zeng, P. Wang, X. Wu y T. Feng, «Water cost for water purification: Renewability assessment of a typical wastewater treatment plant in China,» 2022.
- [7] H. Gulhan, R. F. Dizaji, M. N. Hamidi et al., «Use of water treatment plant sludge in high-rate activated sludge systems: A techno-economic investigation,» 2023, Consultado el 13 de marzo de 2024.
- [8] S. Mehariya, P. Das, M. I. Thaher et al., «Microalgae: A potential bioagent for treatment of emerging contaminants from domestic wastewater,» 2024.
- [9] J. Fernández-García, O. García-Vallejo, A. López-Sobaler, C. Martín-Salinas, M. González-Gross y R. Urrialde, «Hidratación y aguas minerales naturales: una revisión sobre la importancia para la salud del aporte de agua y los minerales,» *Medicina de Familia. SEMERGEN*, 2025.
- [10] V. Sekar y B. Sundaram, «Investigation of microplastic pollution index in the urban surface water: A case study in west Godavari district, Andhra Pradesh, India,» dirección: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S030147972500074X>.
- [11] A. L. Villalón, J. A. Gonzalez Bronzatti, P. L. Flores et al., «El uso del agua para el reprocesamiento estéril en América Latina,» *American Journal of Infection Control*, 2024.
- [12] C. V. M. G.-V. G. A. A.-G. S. T. L.-O. C. I. C. V. T. J. Mendoza Retana Sarai Shesareli, «Uso potencial de las aguas residuales en la agricultura,» dirección: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-09342021000100115&lng=es&nrm=iso.
- [13] F. Mazzoni, S. Alvisi, M. Blokker et al., «Investigating the characteristics of residential end uses of water: A worldwide review,» dirección: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0043135422014452>.
- [14] M. S. dos Santos, J. H. Wancura, C. E. Oro et al., «Urban agriculture and water recycling: A comprehensive outlook on current panorama,» dirección: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2211464525000223>.
- [15] C. Couselo-Rodríguez, P. González-Esteban, M. Diéguez Montes y Flórez, «Impacto de los filtros ultravioleta en el entorno natural,» 2022.
- [16] Z. Li, Y. Huang, Y. Lv, L. Pan, B. Xu e Y. Tang, «Investigating water quality and predicting Algal density in subtropical reservoirs through machine learning,» *Journal of Environmental Chemical Engineering*, dirección: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2213343725026995>.
- [17] C. Hu, «A mathematical guidance on river water pollution management strategies using ordinary differential equations,» dirección: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304380025002157>.
- [18] J. Liu, D. Shao, W. Gu et al., «Effect of drainage water recycling system management on nutrient load reduction in rice-based irrigation areas,» dirección: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378377425003622>.
- [19] A. A. Werkneh y S. B. Gebru, «Development of ecological sanitation approaches for integrated recovery of biogas, nutrients and clean water from domestic wastewater,» dirección: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666916122000391>.
- [20] A. Grobin, R. Roškar y J. Trontelj, «Multi-parameter risk assessment of forty-one selected substances with endocrine disruptive properties in surface waters worldwide,» dirección: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0045653521026679>.

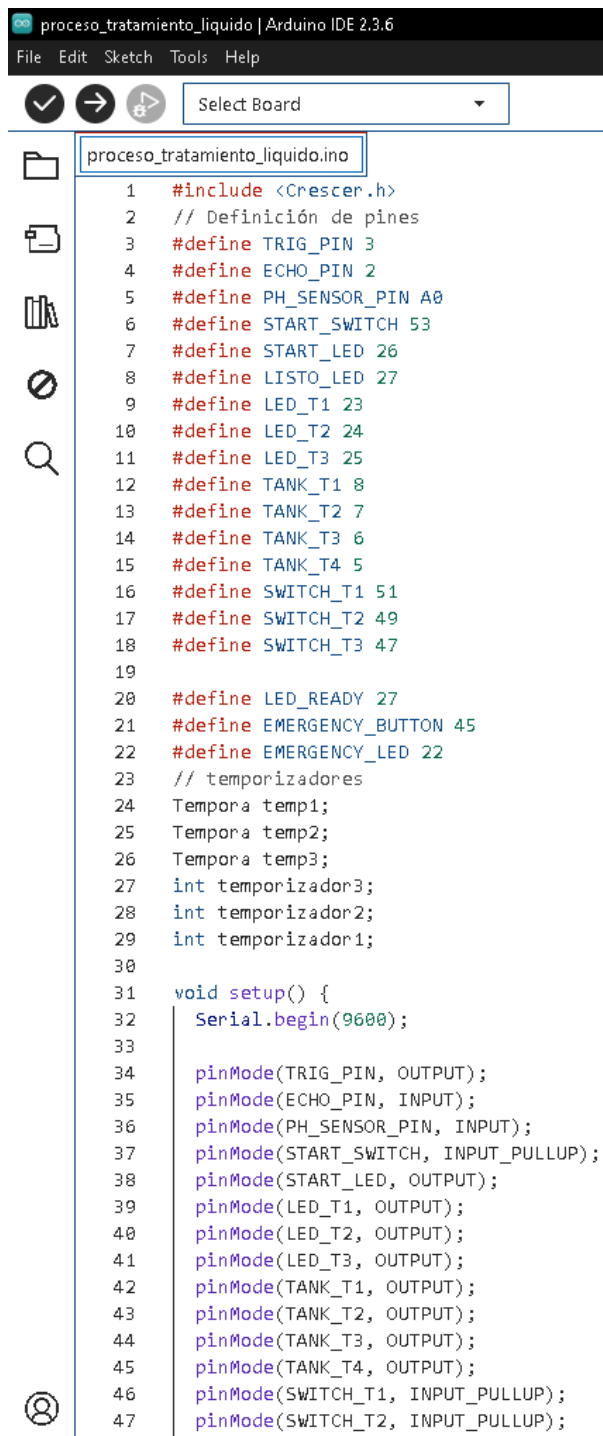
- [21] X. Pan, S. Liu, R. Li et al., «Research on the purification enhancement of ecological ponds: Integrating water cycle optimization and plants layout,» 2023.
- [22] F. Belzagui y C. Gutiérrez-Bouzán, «Review on alternatives for the reduction of textile microfibers emission to water,» dirección: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479722009203>.
- [23] I. Micella, C. Kroeze, M. P. Bak y M. Stokal, «Causes of coastal waters pollution with nutrients, chemicals and plastics worldwide,» dirección: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0025326X23013371>.
- [24] I. A. C.-S. J. A. P.-C. G. A. C.-P. A. P.-S. M. E. Leticia de Jesús Ortiz-Sánchez, «Influencia de la contaminación del agua y el suelo en el desarrollo agrícola nacional e internacional,» dirección: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-888X2022000100312&lng=es..
- [25] M. Salehi, «Global water shortage and potable water safety; Today's concern and tomorrow's crisis,» dirección: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0160412021005614>.
- [26] S. Oh, H. Byeon y J. Wijaya, «Machine learning surveillance of foodborne infectious diseases using wastewater microbiome, crowdsourced, and environmental data,» dirección: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0043135424011813>.
- [27] UNAM, *Enfermedades de agua*. dirección: <https://ciencia.unam.mx/leer/1098/microorganismos-en-el-agua-debemos-preocuparnos->
- [28] *Osmosis inversa*, Consultado el 13 de marzo de 2024. dirección: <https://www.carbotecnia.info/aprendizaje/osmosis-inversa/que-es-la-osmosis-inversa-purificador/>.
- [29] *Sistema Ósmosis Inversa*, Consultado el 28 de enero de 2025. dirección: <https://puritech.com.ec/producto/osmosis-inversa-industrial/>.
- [30] M. S. Soffian, F. Z. A. Halim, F. Aziz, M. A. Rahman, M. A. M. Amin y D. N. A. Chee, *Carbon-based material derived from biomass waste for wastewater treatment*, 2022.
- [31] *Filtros Autolimpiantes*, Consultado el 28 de enero de 2025. dirección: <https://es.forstafilters.com/filtros-serie-180/>.
- [32] *Filtro autolimpiante*, Consultado el 28 de enero de 2025. dirección: https://es.forstafilters.com/filtros-auto-limpiantes-filtros-canasta/?keyword=automatic%20water%20filter&gad_source=1&gclid=Cj0KCQIAkoe9BhDYARIsAAheptbD8T9xi7LIMOHNu--oXwSbSxvLNtkvuOPL6aZ8aAmeaEALw_wcB.
- [33] T. Inaba, H. Aizawa, T. Aoyagi et al., «Startup performance and microbial composition of a pilot-scale rapid sand filter for the treatment of manganese-containing mine water,» 2023.
- [34] *Filtro rápido de arena*, Consultado el 13 de marzo de 2024. dirección: <https://sswm.info/es/gass-perspective-es-tecnologias-de-agua-y-saneamiento-tecnologias-de-abastecimiento-de-agua/filtracion-rapida-de-arena>.
- [35] Y. Cui, X. An, S. Zhang et al., *Emerging graphitic carbon nitride-based membranes for water purification*, 2021.
- [36] A. H. Birniwa, S. Habibu, S. S. Abdullahi et al., «Membrane technologies for heavy metals removal from water and wastewater: A mini review,» 2024.
- [37] *Filtro con membrana*, Consultado el 14 de agosto de 2025. dirección: <https://www.aquatreatment.co/asesorias/filtracion-por-membrana/>.
- [38] S. Mustapha, T. J. Oladejo, N. M. Muhammed et al., «Fabrication of porous ceramic pot filters for adsorptive removal of pollutants in tannery wastewater,» dirección: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2468227621000090>.
- [39] J. Altmann, D. Rehfeld, K. Träder, A. Sperlich y M. Jekel, «Combination of granular activated carbon adsorption and deep-bed filtration as a single advanced wastewater treatment step for organic micropollutant and phosphorus removal,» dirección: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0043135416300501>.
- [40] *Filtro de lecho profundo*, Consultado el 14 de agosto de 2025. dirección: <https://www.carbotecnia.info/aprendizaje/filtracion-de-agua-liquidos/filtros-de-lecho-profundo/>.
- [41] L. Zakrisson, C. Sundberg, G. Larsson, E. S. Azzi y S. S. Dalahmeh, «Life cycle assessment of biochar filters for on-site wastewater treatment,» dirección: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479724032511>.
- [42] *Filtro de Biocarbón*, Consultado el 14 de agosto de 2025. dirección: <https://politikaucab.net/2020/03/30/ucab-diseno-sistema-ecoamigable-para-la-potabilizacion-del-agua-en-zonas-vulnerables/>.

- [43] T. Serra, A. Barcelona, N. Pous, V. Salvadó y J. Colomer, «Disinfection and particle removal by a nature-based Daphnia filtration system for wastewater treatment,» 2022.
- [44] S. Li, J. Zhang, Y. Liu et al., «Microbial flocculants for removing multiple pollutants in wastewater: A review of recent trends and perspectives,» dirección: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214714424017963>.
- [45] *Uso de floculante*, Consultado el 14 de agosto de 2025. dirección: <https://institutodelagua.es/aguas-residuales/coagulacion-y-floculacion-de-aguas-residuales-pdfaguas-residuales/>.
- [46] M. Saiyad, N. Shah, M. Joshipura, A. Dwivedi y S. Pillai, «Chitosan and its derivatives in wastewater treatment application,» 2023.
- [47] A. Saravanan, P. Thamarai, P. S. Kumar y G. Rangasamy, «Recent advances in polymer composite, extraction, and their application for wastewater treatment: A review,» 2022.
- [48] Z. Zhang, J. Wan, G. Ye, Y. Wang, Y. Bai y Z. Yan, «Effects of salinity and betaine addition on anaerobic granular sludge properties and microbial community succession patterns in organic saline wastewater,» 2023.
- [49] *Tratamiento Anaeróbico*, Consultado el 14 de agosto de 2025. dirección: <https://institutodelagua.es/aguas-residuales/tratamiento-anaerobio-de-aguas-residualesaguas-residuales/>.
- [50] H. A. Hasan, M. H. Muhamad, B. Ji et al., *Revolutionizing wastewater treatment with microalgae: Unveiling resource recovery, mechanisms, challenges, and future possibilities*, 2023.
- [51] K. Fang, W. Chen, C. Liu et al., «Chemical cleaning enhanced birnessite functional layer formed in gravity driven ceramic membrane for manganese-containing water purification,» *Separation and Purification Technology*, 2025.
- [52] D.-A. Ulises y C.-B. J. Gonzalo, «Estudio del comportamiento térmico de agua para uso residencial en tinacos de concreto y polietileno en un clima cálido-subhúmedo,» *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, 2015.
- [53] *Sensores Ultrasonicos*, Consultado el 13 de marzo de 2024. dirección: <https://www.keyence.com.mx/ss/products/sensor/sensorbasics/ultrasonic/info/#:~:text=Los%20sensores%20ultras%C3%B3nicos%20miden%20la%20distancia%20al%20objeto%20contando%20el,la%20emisi%C3%B3n%20como%20la%20recepti%C3%B3n..>
- [54] *Sensor ultrasónico*, Consultado el 31 de julio de 2025. dirección: <https://robots-argentina.com.ar/didactical/sistema-para-estacionamiento-de-un-auto-y-para-evitar-acercarse-demasiado-a-otro-vehiculo/>.
- [55] «LucesPiloto,» dirección: <https://electricoindustrial.com.ec/2021/03/15/elementos-de-control-y-senalizacion/>.
- [56] L. Autores, *Luz piloto*. dirección: <https://electricoindustrial.com.ec/producto/luz-piloto-led-siemens-sirius-act-22mm/>.
- [57] luisllamas, «PuenteHI298,» dirección: <https://www.luisllamas.es/arduino-motor-corriente-continua-1298n/#:~:text=Un%20puente%20DH%20es%20un,recibe%20su%20nombre%20su%20nombre.&text=Conectando%20simult%C3%A1neamente%20los%20transistores%20superiores,desconectando%20la%20carga%20por%20completo..>
- [58] *PuenteH*. dirección: <https://www.luisllamas.es/arduino-motor-corriente-continua-1298n/#:~:text=Un%20puente%20DH%20es%20un,recibe%20su%20nombre%20su%20nombre.&text=Conectando%20simult%C3%A1neamente%20los%20transistores%20superiores,desconectando%20la%20carga%20por%20completo..>
- [59] «bombas sumergibles,» dirección: <https://gargil.es/bomba-de-agua-sumergible-que-son-y-cuales-son-sus-funciones/#:~:text=El%20funcionamiento%20de%20una%20bomba,menos%20para%20sacarlo%20o%20moverlo..>
- [60] *Bomba sumergible*. dirección: <https://gargil.es/bomba-de-agua-sumergible-que-son-y-cuales-son-sus-funciones/#:~:text=El%20funcionamiento%20de%20una%20bomba,menos%20para%20sacarlo%20o%20moverlo..>
- [61] «Software3dcad,» dirección: <https://www.sw.siemens.com/es-ES/technology/3d-modeling/>.
- [62] «Solidworks,» dirección: <https://solid-bi.es/solidworks/?v=1888c55ef969>.
- [63] L. Autores, *Solidworks*. dirección: https://www.3ds.com/assets/3ds-navigation/Solidworks-logo_red.svg.
- [64] «Inventor,» dirección: <https://www.autodesk.com/es/products/inventor/overview?term=1-YEAR&tab=subscription>.

- [65] L. Autores, *Inventor*. dirección: <https://damassets.autodesk.net/content/dam/autodesk/www/product-imagery/lockup-610x66/inventor-lockup-610x66.png>.
- [66] amazon, *Arduino Mega*. dirección: https://www.amazon.com/-/es/ELEGOO-ATmega-compatible-Arduino-Projects/dp/B01H4ZLZLQ/ref=sr_1_3?__mk_es_US=%C3%85M%C3%85%C5%BD%C3%95%C3%91&sr=8-3.
- [67] amazon, *Sensorph*. dirección: <https://www.amazon.com/-/es/Hilitand-m%C3%B3dulo-sensor-detecci%C3%B3n-electrodo/dp/B095W2R3BS>.
- [68] mercado libre, *Ultrasonico hc-sr04*. dirección: https://articulo.mercadolibre.com.ec/MEC-516909144-sensor-ultrasonido-hc-sr04-hcsr04-_JM.

ANEXO A PROGRAMACIÓN DEL SISTEMA

Programación en Arduino IDE:



```
proceso_tratamiento_liquido | Arduino IDE 2.3.6
File Edit Sketch Tools Help

proceso_tratamiento_liquido.ino
1  #include <Crescer.h>
2  // Definición de pines
3  #define TRIG_PIN 3
4  #define ECHO_PIN 2
5  #define PH_SENSOR_PIN A0
6  #define START_SWITCH 53
7  #define START_LED 26
8  #define LISTO_LED 27
9  #define LED_T1 23
10 #define LED_T2 24
11 #define LED_T3 25
12 #define TANK_T1 8
13 #define TANK_T2 7
14 #define TANK_T3 6
15 #define TANK_T4 5
16 #define SWITCH_T1 51
17 #define SWITCH_T2 49
18 #define SWITCH_T3 47
19
20 #define LED_READY 27
21 #define EMERGENCY_BUTTON 45
22 #define EMERGENCY_LED 22
23 // temporizadores
24 Tempora temp1;
25 Tempora temp2;
26 Tempora temp3;
27 int temporizador3;
28 int temporizador2;
29 int temporizador1;
30
31 void setup() {
32   Serial.begin(9600);
33
34   pinMode(TRIG_PIN, OUTPUT);
35   pinMode(ECHO_PIN, INPUT);
36   pinMode(PH_SENSOR_PIN, INPUT);
37   pinMode(START_SWITCH, INPUT_PULLUP);
38   pinMode(START_LED, OUTPUT);
39   pinMode(LED_T1, OUTPUT);
40   pinMode(LED_T2, OUTPUT);
41   pinMode(LED_T3, OUTPUT);
42   pinMode(TANK_T1, OUTPUT);
43   pinMode(TANK_T2, OUTPUT);
44   pinMode(TANK_T3, OUTPUT);
45   pinMode(TANK_T4, OUTPUT);
46   pinMode(SWITCH_T1, INPUT_PULLUP);
47   pinMode(SWITCH_T2, INPUT_PULLUP);
```

Figura 34. Definiendo variables y pines. Fuente: Los Autores

```
proceso_tratamiento_liquido | Arduino IDE 2.3.6
File Edit Sketch Tools Help

Select Board

proceso_tratamiento_liquido.ino
48 pinMode(SWITCH_T3, INPUT_PULLUP);
49
50 pinMode(LED_READY, OUTPUT);
51 pinMode(EMERGENCY_BUTTON, INPUT_PULLUP);
52 pinMode(EMERGENCY_LED, OUTPUT);
53
54 apagarTodo(); // Asegurar que todo inicie apagado
55 Serial.println("Sistema listo");
56
57 temp1.defiSP(3000);
58 temp2.defiSP(3000);
59 temp3.defiSP(3000);
60
61
62 }
63 bool procesoEnEjecucion = false;
64
65
66
67 void loop() {
68   int nivel = leerNivelAgua();
69   float ph = leerPH();
70
71   digitalWrite(LED_T1, !digitalRead(SWITCH_T1));
72   digitalWrite(LED_T2, !digitalRead(SWITCH_T2));
73   digitalWrite(LED_T3, !digitalRead(SWITCH_T3));
74
75   if (digitalRead(START_SWITCH) == 1 && !procesoEnEjecucion) {
76     // Marca que el proceso ha comenzado
77
78
79     digitalWrite(START_LED, LOW); // Lógica invertida
80
81     if (nivel >= 2 && nivel <= 17) {
82
83       if (digitalRead(SWITCH_T1) && digitalRead(SWITCH_T2) && digitalRead(SWITCH_T3)) {
84
85         temp1.Saida(1);
86         temporizador1 = temp1.Saida(1);
87         if (temporizador1) {
88           | analogWrite(TANK_T1, 0);
89         } else {
90           | analogWrite(TANK_T1, 255);
91         }
92
93         if (temporizador1) {
94           temp2.Saida(1);
```

Figura 35. Código de control. (Parte I) Fuente: Los Autores

```
proceso_tratamiento_liquido | Arduino IDE 2.3.6
File Edit Sketch Tools Help

Select Board

proceso_tratamiento_liquido.ino
95     temporizador2 = temp2.Saida(1);
96     if (temporizador2) {
97         | analogWrite(TANK_T2, 0);
98         } else {
99         | analogWrite(TANK_T2, 255);
100        }
101
102        if (temporizador2) {
103        | temp3.Saida(1);
104        | temporizador3 = temp3.Saida(1);
105        | if (temporizador3) {
106        | | analogWrite(TANK_T3, 0);
107        | | } else {
108        | | | if (ph <= 7) {
109        | | | | analogWrite(TANK_T3, 255);
110        | | | | } else {
111        | | | | analogWrite(TANK_T3, 0);
112        | | | | }
113        | | }
114        | }
115        }
116
117        if (temporizador3) {
118        |
119        | | if (nivel > 3) {
120        | | | analogWrite(TANK_T4, 255);
121        | | |
122        | | | } else {
123        | | | analogWrite(TANK_T4, 0);
124        | | |
125        | | | temp3.Saida(0);
126        | | | procesoEnEjecucion = true;
127        | | |
128        | | | }
129        | | }
130        | }
131        }
132    }
133
134    if(procesoEnEjecucion){
135        | digitalWrite(LISTO_LED,true);
136        | delay(500);
137        | digitalWrite(LISTO_LED,false);
138        | delay(500);
139    }
140
141
```

Figura 36. Código de control. (Parte II) Fuente: Los Autores

```
proceso_tratamiento_liquido | Arduino IDE 2.3.6
File Edit Sketch Tools Help

Select Board

proceso_tratamiento_liquido.ino
142 // Espera a que START_SWITCH se apague para reiniciar el flag
143 if (digitalRead(START_SWITCH) == 0 || !digitalRead(EMERGENCY_BUTTON)) {
144     procesoEnEjecucion = false; // Permite reiniciar el proceso
145     temp1.Saida(0);
146     temp2.Saida(0);
147     temp3.Saida(0);
148     temporizador1 = 0;
149     temporizador2 = 0;
150     temporizador3 = 0;
151     analogWrite(TANK_T1, 0);
152     analogWrite(TANK_T2, 0);
153     analogWrite(TANK_T3, 0);
154     analogWrite(TANK_T4, 0);
155     digitalWrite(LISTO_LED,true);
156     digitalWrite(START_LED, HIGH);
157 }
158 if (!digitalRead(EMERGENCY_BUTTON)) {
159     digitalWrite( EMERGENCY_LED, false);
160 }else{
161     digitalWrite( EMERGENCY_LED, true);
162 }
163
164
165 Serial.print("nivel: ");
166 Serial.println(nivel);
167 Serial.print("ph: ");
168 Serial.println(ph);
169 Serial.print("CV: ");
170 Serial.println(temp1.CV);
171
172 }
173
174 // Leer nivel de agua
175 float leerNivelAgua() {
176     digitalWrite(TRIG_PIN, LOW);
177     delayMicroseconds(2);
178     digitalWrite(TRIG_PIN, HIGH);
179     delayMicroseconds(10);
180     digitalWrite(TRIG_PIN, LOW);
181
182     long duracion = pulseIn(ECHO_PIN, HIGH);
183     float distancia = duracion * 0.034 / 2;
184     return 25 - distancia; // Invirtiendo la lectura (30 cm es la altura total)
185 }
186
187
188
```

Figura 37. Código de control. (Parte III) Fuente: Los Autores

```
proceso_tratamiento_liquido | Arduino IDE 2.3.6
File Edit Sketch Tools Help

Select Board

proceso_tratamiento_liquido.ino
184 | return 25 - distancia; // Invirtiendo la lectura (30 cm es la altura total)
185 | }
186 |
187 |
188 |
189 |
190 | // Leer pH con promedio
191 | float leerPH() {
192 |     int buf[10], temp;
193 |     unsigned long int avgValue;
194 |
195 |     for (int i = 0; i < 10; i++) {
196 |         buf[i] = analogRead(PH_SENSOR_PIN);
197 |         delay(10);
198 |     }
199 |
200 |     for (int i = 0; i < 9; i++) {
201 |         for (int j = i + 1; j < 10; j++) {
202 |             if (buf[i] > buf[j]) {
203 |                 temp = buf[i];
204 |                 buf[i] = buf[j];
205 |                 buf[j] = temp;
206 |             }
207 |         }
208 |     }
209 |
210 |     avgValue = 0;
211 |     for (int i = 2; i < 8; i++) {
212 |         avgValue += buf[i];
213 |     }
214 |
215 |     float voltage = (float)avgValue * 5.0 / 1024 / 6;
216 |     return 3.5 * voltage;
217 | }
218 |
219 | // Apaga todos los dispositivos en caso de emergencia
220 | void apagarTodo() {
221 |     digitalWrite(START_LED, HIGH);
222 |     digitalWrite(LED_T1, HIGH);
223 |     digitalWrite(LED_T2, HIGH);
224 |     digitalWrite(LED_T3, HIGH);
225 |     digitalWrite(TANK_T1, LOW);
226 |     digitalWrite(TANK_T2, LOW);
227 |     digitalWrite(TANK_T3, LOW);
228 |     digitalWrite(LED_READY, HIGH);
229 | }
230 |
```

Figura 38. Código de lectura de pH. Fuente: Los Autores

ANEXO B
PRUEBAS CON SENSOR ULTRASÓNICO

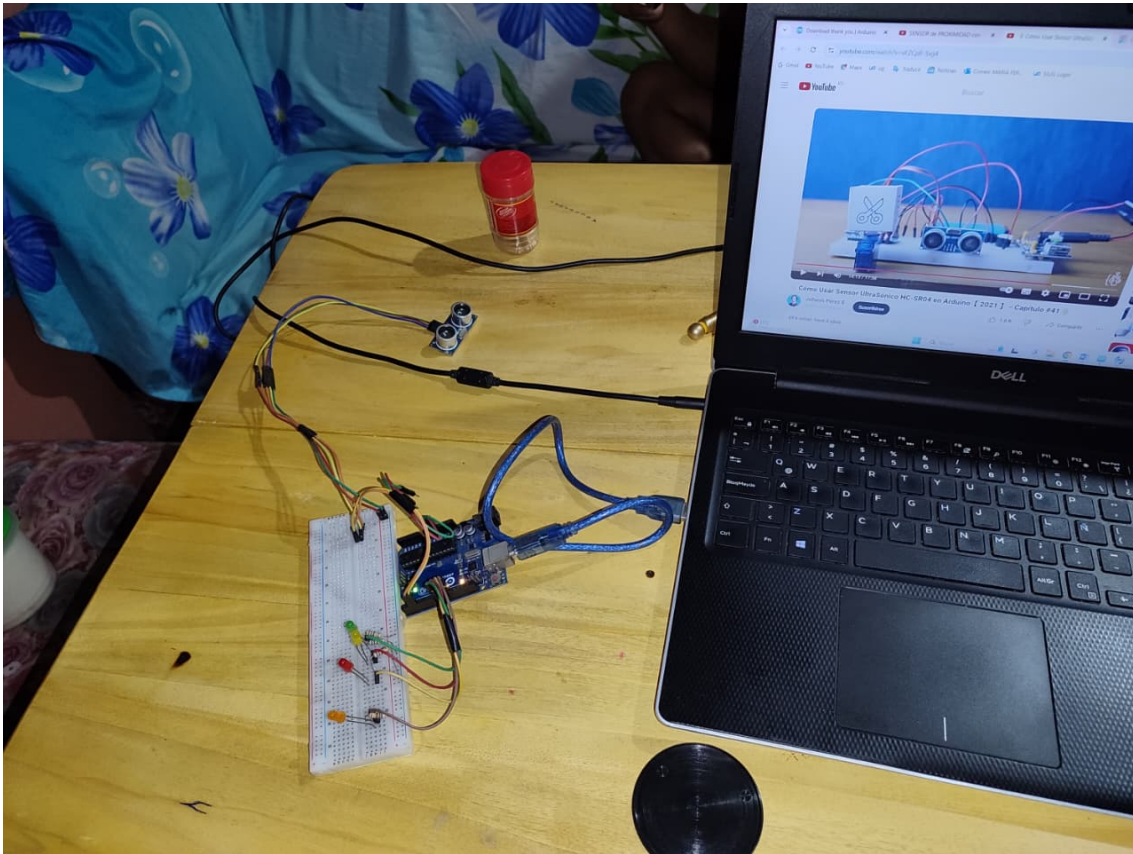


Figura 39. Programación del sensor ultrasónico. Fuente: Los Autores

ANEXO C
CONEXIONES DEL TABLERO



Figura 40. Conexión eléctrica del tablero. Fuente: Los Autores