



**UNIVERSIDAD LATINA  
DE COSTA RICA**

POWERED BY **Arizona State University**

**Universidad Latina de Costa Rica**

**Facultad de Ingenierías y Tecnologías de Información**

**Escuela de Ingeniería Civil**

**Licenciatura en Ingeniería Civil**

**Seminario de graduación**

**Proyecto de graduación en Ingeniería Civil**

**Evaluación y diseño del proceso de coagulación mezcla rápida de la  
planta potabilizadora de San Mateo de Alajuela**

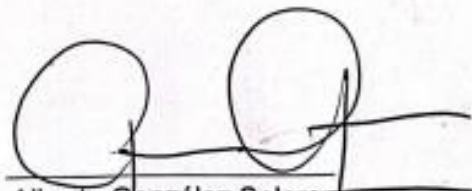
**Autor: Héctor Enrique García Fernández**

**Enero, 2023**

## TRIBUNAL EXAMINADOR

Este proyecto titulado: Evaluación y diseño del proceso de coagulación mezcla rápida de la planta potabilizadora de San Mateo de Alajuela, por el (la) estudiante: Héctor García Fernández, fue aprobado por el Tribunal Examinador de la carrera de Ingeniería Civil de la Universidad Latina, Sede Heredia, como requisito para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil:

  
Leonardo Moya González  
Tutor

  
Alberto González Solera  
Lector

  
Minor Murillo Chacón  
Representante de la Escuela

## DECLARACIÓN JURADA

Yo, Héctor Enrique García Fernández estudiante de la Universidad Latina de Costa Rica, declaro bajo la fe de juramento y consciente de las responsabilidades penales de este acto, que soy Autor Intelectual del Proyecto de Graduación titulado:

Evaluación y diseño del proceso de coagulación mezcla rápida de la planta potabilizadora de San Mateo de Alajuela.

Por lo que libero a la Universidad de cualquier responsabilidad en caso de que mi declaración sea falsa.

Firmo en Heredia, 7 de septiembre de 2023.



---

Héctor Enrique  
García Fernández

## Licencia De Distribución No Exclusiva (carta de la persona autora para uso didáctico)

### Universidad Latina de Costa Rica

<b>Yo (Nosotros):</b>	Héctor Enrique García Fernández
<b>De la Carrera / Programa:</b>	Ingeniería civil
<b>Modalidad de TFG:</b>	Proyecto de graduación
<b>Titulado:</b>	Evaluación y diseño del proceso de coagulación mezcla rápida de la planta potabilizadora de San Mateo de Alajuela

Al firmar y enviar esta licencia, usted, el autor (es) y/o propietario (en adelante el “AUTOR”), declara lo siguiente: **PRIMERO:** Ser titular de todos los derechos patrimoniales de autor, o contar con todas las autorizaciones pertinentes de los titulares de los derechos patrimoniales de autor, en su caso, necesarias para la cesión del trabajo original del presente TFG (en adelante la “OBRA”). **SEGUNDO:** El AUTOR autoriza y cede a favor de la UNIVERSIDAD U LATINA S.R.L. con cédula jurídica número 3-102-177510 (en adelante la “UNIVERSIDAD”), quien adquiere la totalidad de los derechos patrimoniales de la OBRA necesarios para usar y reusar, publicar y republicar y modificar o alterar la OBRA con el propósito de divulgar de manera digital, de forma perpetua en la comunidad universitaria. **TERCERO:** El AUTOR acepta que la cesión se realiza a título gratuito, por lo que la UNIVERSIDAD no deberá abonar al autor retribución económica y/o patrimonial de ninguna especie. **CUARTO:** El AUTOR garantiza la originalidad de la OBRA, así como el hecho de que goza de la libre disponibilidad de los derechos que cede. En caso de impugnación de los derechos autorales o reclamaciones instadas por terceros relacionadas con el contenido o la autoría de la OBRA, la responsabilidad que pudiera derivarse será exclusivamente de cargo del AUTOR y este garantiza mantener indemne a la UNIVERSIDAD ante cualquier reclamo de algún tercero. **QUINTO:** El AUTOR se compromete a guardar confidencialidad sobre los alcances de la presente cesión, incluyendo todos aquellos temas que sean de orden meramente institucional o de organización interna de la UNIVERSIDAD **SEXTO:** La presente autorización y cesión se regirá por las leyes de la República de Costa Rica. Todas las controversias, diferencias, disputas o reclamos que pudieran derivarse de la presente cesión y la materia a la que este se refiere, su ejecución, incumplimiento, liquidación, interpretación o validez, se resolverán por medio de los Tribunales de Justicia de la República de Costa Rica, a cuyas normas se someten el AUTOR y la UNIVERSIDAD, en forma voluntaria e incondicional. **SÉPTIMO:** El AUTOR acepta que la UNIVERSIDAD, no se hace responsable del uso, reproducciones, venta y distribuciones de todo tipo de fotografías, audios, imágenes, grabaciones, o cualquier otro tipo de

presentación relacionado con la **OBRA**, y el **AUTOR**, está consciente de que no recibirá ningún tipo de compensación económica por parte de la **UNIVERSIDAD**, por lo que el **AUTOR** haya realizado antes de la firma de la presente autorización y cesión. **OCTAVO:** El **AUTOR** concede a **UNIVERSIDAD**, el derecho no exclusivo de reproducción, traducción y/o distribuir su envío (incluyendo el resumen) en todo el mundo en formato impreso y electrónico y en cualquier medio, incluyendo, pero no limitado a audio o video. El **AUTOR** acepta que **UNIVERSIDAD**, puede, sin cambiar el contenido, traducir la **OBRA** a cualquier lenguaje, medio o formato con fines de conservación. **NOVENO:** El **AUTOR** acepta que **UNIVERSIDAD** puede conservar más de una copia de este envío de la **OBRA** por fines de seguridad, respaldo y preservación. El **AUTOR** declara que el envío de la **OBRA** es su trabajo original y que tiene el derecho a otorgar los derechos contenidos en esta licencia. **DÉCIMO:** El **AUTOR** manifiesta que la **OBRA** y/o trabajo original no infringe derechos de autor de cualquier persona. Si el envío de la **OBRA** contiene material del que no posee los derechos de autor, el **AUTOR** declara que ha obtenido el permiso irrestricto del propietario de los derechos de autor para otorgar a **UNIVERSIDAD** los derechos requeridos por esta licencia, y que dicho material de propiedad de terceros está claramente identificado y reconocido dentro del texto o contenido de la presentación. Asimismo, el **AUTOR** autoriza a que en caso de que no sea posible, en algunos casos la **UNIVERSIDAD** utiliza la **OBRA** sin incluir algunos o todos los derechos morales de autor de esta. **SI AL ENVÍO DE LA OBRA SE BASA EN UN TRABAJO QUE HA SIDO PATROCINADO O APOYADO POR UNA AGENCIA U ORGANIZACIÓN QUE NO SEA UNIVERSIDAD U LATINA, S.R.L., EL AUTOR DECLARA QUE HA CUMPLIDO CUALQUIER DERECHO DE REVISIÓN U OTRAS OBLIGACIONES REQUERIDAS POR DICHO CONTRATO O ACUERDO.** La presente autorización se extiende el día 7 de septiembre de 2023 a las 3:00pm

Firma del estudiante(s):





Escazú, 29 de agosto de 2023  
MRC0340

Sres.  
Miembros del Comité de Trabajos Finales de Graduación  
SD.

Estimados señores:

Leí y corregí el Trabajo Final de Graduación, denominado: "Evaluación y diseño del proceso de coagulación mezcla rápida de la planta potabilizadora de San Mateo de Alajuela", elaborado por el estudiante: Héctor Enrique García Fernández; para optar por el grado de: Licenciatura en Ingeniería Civil.

Corregí el trabajo en aspectos, tales como: construcción de párrafos, vicios del lenguaje que se trasladan a lo escrito, ortografía, puntuación, aspectos de APA y otros relacionados con el campo filológico, y desde ese punto de vista considero que está listo para ser presentado como Trabajo Final de Graduación; por cuanto cumple con los requisitos establecidos por la Universidad Latina.

Se suscribe de ustedes cordialmente,



Mga. Isaura Murillo R.

Carne: 027472

Asociación Costarricense de Filólogos  
Colegio de Licenciados y Profesores (COLYPRO)

## **Agradecimientos**

Primeramente, le agradezco a mis padres, Héctor y Jadvy; y mi abuela Jadvy, que sin importar el pronóstico me apoyan y aconsejan para siempre sacar lo mejor de mí. Por siempre impulsarme a completar lo que me proponga, por más difícil o imposible que me parezca.

A mi hermana, Catalina, por siempre acompañarme y apoyarme en los mejores y peores momentos, incluso mientras desarrollaba el trabajo.

A mis amigos, cuyas palabras de aliento y apoyo me mantuvieron firme en el desarrollo de este trabajo.

A los profesores que conocí a lo largo de la carrera, cuyas enseñanzas aportaron a la formación académica y profesional que me hacen quien soy hoy, particularmente al Ingeniero Leonardo Moya, cuyo consejo, apoyo y guía fue indispensable para culminar esta etapa de mi vida. Todos han sido testigos del enorme esfuerzo realizado por este trabajo. Les estoy eternamente agradecido.

## **Resumen**

El presente trabajo consiste en la evaluación y diseño del sistema de coagulación /mezcla rápida de la planta potabilizadora de San Mateo de Alajuela, donde se desarrolla en detalle el funcionamiento de esta unidad de mezcla y los requisitos de operación y diseño. Siendo el agua un recurso indispensable para las actividades y desarrollo diario, una fuente de abastecimiento de dicho recurso posee la prioridad en revisiones y mantenimiento. De esta forma se puede mantener el sistema en continua operación, evitando que perjudique a los poblados que se abastecen de esta planta potabilizadora.

En los siguientes capítulos se detalla el problema actual con el sistema, su importancia y el impacto que el desarrollo de este ocasionará al finalizar las evaluaciones y, como consecuente, las acciones que decidan tomar. El agua es un recurso el cual se debe trabajar con el mayor cuidado posible, puesto que las condiciones globales limitan enormemente las fuentes que se encuentran disponibles. Mantener una planta en un flujo óptimo de eficiencia es indispensable para continuar con una eficaz distribución de agua.

Para lograr estas evaluaciones se requiere realizar diversas pruebas de laboratorio en la planta, con la finalidad de determinar las deficiencias en el sistema y proveer soluciones necesarias para una operación óptima en los procesos de potabilización para el sector de San Mateo de Alajuela.



## **Summary**

The present work consists of evaluating and designing the coagulation / rapid mixing system of the San Mateo de Alajuela water treatment plant, where the operation of this mixing unit and the operation and design requirements are disclosed. As water is an essential resource for daily activities and development, a source of supply of said resource places priority on inspections and maintenance. In this way, the system can be kept in continuous operation, preventing it from harming the populations supplied by this water treatment plant.

The next chapters will detail the current problem as a system, its importance, and the impact that its development will cause at the end of the evaluations and, consequently, the actions that will be taken. Water is a resource that must be managed with the greatest care possible, as global conditions greatly limit the sources that are available. Maintaining a plant in an optimal flow of efficiency is essential to continue with an efficient distribution of water.

To obtain these evaluations, it is necessary to carry out various laboratory tests at the plant, with the aim of determining the deficiencies in the system and providing necessary solutions for optimal operation of the purification processes for the area of San Mateo de Alajuela.

# Índice

## Tabla de contenido

Agradecimientos .....	2
Resumen .....	8
Summary.....	9
Índice .....	10
Índice de figuras .....	12
Índice de tablas .....	14
Capítulo de introducción .....	15
Antecedentes.....	15
Planteamiento del problema .....	17
Objetivo general .....	19
Objetivos específicos.....	19
Justificación .....	20
Alcances y limitaciones .....	21
Impacto .....	22
Hipótesis.....	22
Capítulo 1 – Fundamentación teórica.....	23
El agua .....	23
Situación global .....	25
Situación nacional .....	26
Entidades nacionales.....	27
Características físicas del agua.....	29
Turbiedad.....	29
Color .....	29
Olor y sabor .....	30
Temperatura.....	30
Alcalinidad .....	30
Aluminio.....	31
Arsénico.....	31
Hierro.....	32
Manganeso.....	32

Valor del pH .....	32
Características biológicas del agua.....	33
Coliformes .....	35
Agua potable.....	36
Partículas coloidales .....	37
Tipos de coloides .....	37
Propiedades de los coloides.....	38
Plantas de tratamiento potabilizadoras .....	40
Proceso de potabilización .....	40
Coagulación .....	40
Floculación .....	43
Sedimentación .....	44
Filtración.....	45
Desinfección .....	46
Unidades hidráulicas de mezcla rápida .....	47
Unidades de tratamiento .....	50
Medidores de caudal.....	50
Vertederos rectangulares y triangulares .....	50
Función de los vertederos .....	52
Capítulo II – Marco metodológico .....	53
Paradigma de la investigación .....	53
Enfoque metodológico.....	53
Métodos de investigación.....	53
Categorías del análisis de la investigación .....	54
Población, muestra y técnicas de muestreo .....	55
Técnicas e instrumentos para la recolección de datos .....	55
Técnicas e instrumentación para el procesamiento y análisis de datos .....	57
Capítulo III – Análisis de resultados .....	58
Capítulo IV – Conclusiones y recomendaciones.....	100
Bibliografía.....	104

## Índice de figuras

Figura 1 - Distribución de agua en el planeta.....	23
Figura 2 - El ciclo del agua.....	24
Figura 3 - Mapa de estrés hídrico a nivel mundial para el 2019 .....	25
Figura 4 - Roles institucionales .....	29
Figura 5 - Olores característicos del agua y sus orígenes.....	30
Figura 6 - Escala de pH .....	33
Figura 7 - Agentes patógenos y organismos productores de toxinas en aguas superficiales	35
Figura 8 - Viviendas con conexiones intradomiciliares .....	36
Figura 9 - Distribución de tamaños de las partículas en el agua .....	37
Figura 10 - Partículas coloidales al disminuir su tamaño.....	39
Figura 11 - Ensayo de jarras.....	42
Figura 12 - Modelo de floculación hidráulica .....	44
Figura 13 - Clasificación de filtros de acuerdo con su velocidad.....	46
Figura 14 - Canaleta tipo Parshall .....	48
Figura 15 - Sistema con resalto hidráulico .....	49
Figura 16 - Sistema con resalto hidráulico .....	49
Figura 17 - Tipos de vertederos.....	51
Figura 18 - Vertedero triangular.....	52
Figura 19 - Dimensionamiento del módulo de coagulación (en centímetros).....	58
Figura 20 - Vista en planta de la sección superior del módulo de coagulación (en centímetros) .....	59
Figura 21 - Dimensiones de la sección triangular del vertedero (en centímetros) .....	59
Figura 22 - Punto de aplicación del agente coagulante en el módulo de coagulación de la planta potabilizadora.....	60
Figura 23 - Trazador químico soluble a utilizar en la prueba de trazadores .....	61
Figura 24 - Caudal utilizado en planta.....	62
Figura 25 - Vertedero triangular.....	63
Figura 26 - Conductímetro portátil evaluando la muestra de agua.....	65
Figura 27 - Valores de $\sqrt{(\gamma\mu)}$ .....	66
Figura 28 - Conductividad den muestras del sistema de coagulación de la planta .....	67

Figura 29 - Punto de aplicación de un difusor en un sistema de coagulación.....	98
Figura 30 - Vista 3D de la rampa y la grada en el sistema de coagulación. (cotas en centímetros) .....	99
Figura 31 - Vista perfil de la rampa y la grada en el sistema de coagulación. (cotas en centímetros) .....	99

## Índice de tablas

Tabla 1 - Categorías del análisis de la investigación.....	54
Tabla 2 - Variación del gradiente de velocidad de acuerdo con el tipo de mezclador .....	67
Tabla 3 - Comprobación de condiciones para caudal operativo.....	75
Tabla 4 - Comprobación de condiciones para caudal máximo de diseño .....	82
Tabla 5 - Comprobación de condiciones de mezcla en un canal rectangular con cambio de pendiente o mezclador tipo rampa.....	97
Tabla 6 - Resumen de evaluación de la calidad del sistema de coagulación.....	100
Tabla 7 - Mejora de gradiente de velocidad y tiempo de mezcla ante mezcla tipo rampa.	101
Tabla 8 - Dimensionamiento de la rampa y la grada.....	102
Tabla 9 - Comparación de puntos de aplicación de difusores .....	102
Tabla 10 - Velocidades para concentraciones .....	103

# Capítulo de introducción

## Antecedentes

El agua, siendo la base para el sustento humano, ha pasado a través de diversos métodos con tal de garantizar su consumo y uso para las actividades diarias con tal de promover el desarrollo humano. La constante evolución en el ser humano modificó drásticamente la capacidad de consumo, adaptando las técnicas de cocina a su modo de vida. El cambio en las funciones gástricas y la susceptibilidad a las bacterias y patógenos del medio ambiente que rondan los alimentos y el agua generan nuevas necesidades. Es por lo que, el consumo del agua siempre ha sido una necesidad.

En las civilizaciones jóvenes en Asia, comienzan los primeros sistemas de abastecimiento de agua con fines diarios al almacenarla en pozos. Posteriormente, se crea un sistema de transporte, como canales sencillos en las regiones de medio oriente. En Egipto se idea la primera represa en la historia. Estructuras que se mantienen en pie hasta la fecha, los canales romanos y sus sistemas de acueductos debido a las altas necesidades de su población.

El sistema de tratamiento de agua en la antigua Roma era mediante aireación, puesto que era lo más innovador en términos de purificación del agua. También adicionaron sistemas de tubería primitivos con materiales como roca, bronce, plata, madera y plomo, con la intención de prevenir contaminantes externos.

Con el avance en la historia humana, un problema recurrente fue deshacerse de los residuos y desechos en las fuentes de agua que se utilizaban para el consumo. Esto ocasionó enfermedades constantes e incluso, la muerte. La solución temporal fue prácticamente la importación de agua en regiones no contaminadas. Sin embargo; alrededor de los 1800, comienzan las invenciones para el tratamiento de agua para obtener un producto limpio y puro. Sistemas rudimentarios con filtros de arena y carbón se vuelven populares para el proceso de filtrado, actuando durante largos periodos para la potabilización.

Los sistemas de tratamiento no solo dependen de los módulos que tengan disponibles, también de las fuentes de donde se va a tratar el agua. Como menciona Bonilla (2022):

La planta potabilizadora ubicada en la Quebrada Piedra Bruja en la zona de Jacó requiere periódicamente de evaluaciones hidráulicas y sanitarias que deben de



realizar cada cierto tiempo para determinar sus condiciones, donde se deben de cumplir con parámetros operativos u organolépticos menores a los Valores Máximos Admisibles (VMA). El AyA propuso crear un Índice de Riesgo de la calidad del agua para Consumo Humano en Costa Rica (IRCACH) con el fin de crear un instrumento de medición que permita mostrar la gravedad que genera el incumplimiento de los parámetros de la calidad del agua.

Su trabajo en la evaluación sanitaria e hidráulica en la quebrada Piedra Bruja demuestra el impacto que presenta la fuente de agua en la planta potabilizadora de Jacó.

La constante evaluación en las plantas y sus fuentes tienen como finalidad garantizar un producto digno y puro. Como menciona Rodríguez (2022): “La importancia de realizar el proyecto es mejorar la calidad de vida de los habitantes de ocho de las comunidades de Zagala Vieja y Villa Bruselas, así como el funcionamiento de la planta sea el adecuado y económico en cada uno de los procesos”. El desarrollo de su proyecto en la evaluación y recomendaciones de las condiciones actuales, hidráulica y sanitaria de la planta potabilizadora de Zagala Vieja en Montes de Oro, Puntarenas, refuerza la importancia de la continua inspección en la operación de las plantas de tratamiento de agua.

## **Planteamiento del problema**

Un recurso tan necesario para el desarrollo humano, tanto en actividades diarias como industriales, requiere un adecuado manejo. Su distribución y preservación deben de ser manejadas de forma tal que sea suficiente para llevar a cabo las necesidades básicas con la menor cantidad de agua posible para evitar el desperdicio de un recurso tan importante.

Tomando en cuenta que, con el paso de los años y las actividades industriales, el clima cambia drásticamente al punto que afecta directamente una de las principales fuentes de agua potable. Es por lo que, con el paso de los días, este recurso se vuelve cada vez más importante y su administración debe de ser impecable.

Sucedo que, con la evolución en las tecnologías hídricas, la implementación de nuevas técnicas para el manejo del agua y el incremento en su importancia, el papel de las plantas potabilizadoras se vuelve cada vez más significante no solo en el desarrollo de la raza humana, si no en su existencia como tal.

La constante evaluación en los procesos de potabilización permite detectar el más mínimo de los cambios en la eficacia y eficiencia de los módulos de la planta, de forma tal que se logre corregir, dependiendo del origen de la falla, y lograr mantener o incluso mejorar el funcionamiento de esta. Un adecuado sistema de módulos implica la menor cantidad de impurezas en el agua, aumentando su calidad al momento del consumo. Con una población creciente, las demandas de capacidad aumentan y los diseños realizados en un principio no contaban con un disparo en la necesidad por abastecer.

La adición de módulos o de secciones complementarias a la planta lograría incrementar la capacidad a la que la planta podría operar, asimismo velando por un óptimo desarrollo en los procesos de potabilización. Dichas acciones podrán potenciar el funcionamiento de la planta, evitando hipotéticas complicaciones que impliquen el cierre temporal de la planta potabilizadora. Significaría en repercusiones hacia las zonas que se abastecen y dependen de un sistema funcional sin flujo interrumpido: regulación de agua, cortes periódicos en la línea potable.

Dichas acciones afectan tanto la moral de los consumidores como la imagen del servicio de la planta, no solo limitando las acciones diarias o higiénicas, también actividades industriales o agropecuarias, todas necesarias para que las personas puedan llevar sus vidas con normalidad.

## **Objetivo general**

Evaluar y diseñar el proceso de coagulación / mezcla rápida de la planta potabilizadora de San Mateo de Alajuela.

## **Objetivos específicos**

- I. Evaluar la calidad de producción de la planta mediante la corroboración de condiciones con respecto a la operación del sistema de coagulación, basado en los lineamientos de un vertedero triangular de noventa grados.
- II. Determinar el gradiente de velocidad de la planta.
- III. Realizar el levantamiento estructural de la planta actual.
- IV. Diseñar la nueva unidad de coagulación / mezcla rápida.
- V. Establecer los elementos estructurales que optimizarán el rendimiento de la planta potabilizadora.

## **Justificación**

Los sistemas de potabilización de la Región Pacífico Central son una de las principales fuentes de agua potable en la provincia de Puntarenas y Alajuela, su operación es indispensable para un adecuado suministro del recurso hídrico en la zona. La constante revisión de calidad en los procesos de la planta asegura no solo la satisfacción como recurso básico, si no el cumplimiento de la normativa para un recurso sano y que no impacte de forma negativa en la salud ante su consumo.

Una adecuada evaluación periódica comprende el análisis para la calidad de la planta, así como la detección de problemas o la disminución en su condición. Estos procesos son de suma importancia debido a que pueden prevenir un cierre temporal en la planta, inhabilitando la potabilización de una planta de la que depende gran parte de la zona Pacífico Central. Tomando en cuenta la importancia del agua como recurso indispensable para las actividades diarias o industriales, la disminución en su distribución limitaría considerablemente la calidad de vida de las personas al tener que racionarse debido a la inoperatividad de la planta de tratamiento.

En un mundo en constante cambio, con nuevas tecnologías y métodos donde se batalla día a día para asegurar el consumo del agua, la implementación de nuevas técnicas o sistemas para mejorar la calidad o el flujo de un proceso suma considerablemente al rendimiento y operación de un sistema, como el de una planta potabilizadora. La importancia de este sistema aumenta con el paso de los días, pues garantiza una fuente de agua ante una condición climática adversa que impacta altamente en sus reservas.

Dependiendo del tiempo que haya transcurrido desde que se efectuó el diseño, es muy probable que nuevas mejoras sean necesarias para poder mantener un adecuado funcionamiento en la planta potabilizadora de San Mateo, Alajuela. Su construcción e inauguración fueron aproximadamente hace treinta y dos años, tiempo suficiente para implementar adiciones al sistema con tal de mantener y mejorar el diseño inicial. No obstante; contemplando la mejora en los módulos de procesos de potabilización, especialmente el de coagulación – mezcla rápida y las técnicas de optimización, la intervención en el sistema compone un progreso operacional permanente para implementarlo en el futuro.

## **Alcances y limitaciones**

### **Alcances**

- Se evaluará la calidad del proceso de coagulación actual.
- Se rediseñará el proceso de coagulación con las normativas actualizadas.
- Se realizará el levantamiento del sistema de coagulación actual.

### **Limitaciones**

- Se cuenta con la información de la planta, tanto planos como detalles de los módulos del sistema potabilizador.
- La información es proporcionada en colaboración con el profesor Leonardo Moya y el Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados.
- Las visitas al sitio no están restringidas.

## **Impacto**

El proyecto de graduación consiste en la mejora del rendimiento y calidad del proceso de coagulación-mezcla rápida de la planta potabilizadora de San Mateo mediante la evaluación y el diseño del módulo de coagulación existente. Se espera garantizar que los métodos de potabilización actuales pueden mejorar al incluir módulos adicionales o elementos que optimicen el funcionamiento de la planta al potenciar la eficiencia de los procesos de coagulación / mezcla rápida.

Un punto importante es que la intervención garantizaría una opción viable para mantener el funcionamiento continuo de la planta, evitando periodos de cierre que impacten negativamente las zonas aledañas las cuales se abastecen con el producto de las operaciones en la planta de San Mateo, cuyas actividades diarias dependen de un flujo sin interrupción de las instalaciones.

Finalmente, cabe mencionar que, al implementar un nuevo diseño, incrementa la capacidad de agua disponible para el proceso de potabilización y así, una mayor eficiencia en su abastecimiento.

## **Hipótesis**

El proyecto propuesto no posee hipótesis, puesto que al desarrollar un diseño físico aumenta la eficiencia de la planta potabilizadora. Adicionalmente se considera que el proceso de coagulación / mezcla rápida no opera adecuadamente, forzando entre otras consideraciones a sacar de operación a la planta con turbiedades superiores a las 2000 UT.



# Capítulo 1 – Fundamentación teórica

## El agua

El agua es un recurso indispensable para la vida y para el desarrollo de esta. Dicho compuesto compone más del setenta por ciento (70 %) de la superficie terrestre, estando presente en masas de agua como océanos, mares, ríos, lagos, entre otros. Los océanos componen aproximadamente el noventa y siete y medio por ciento (97,5 %) del agua en el plante tierra, estableciendo casi la totalidad como agua salada. El porcentaje restante del dos y medio por ciento (2,5 %) representa el agua dulce.

Los glaciares, la nieve y los cascos polares aportan el ochenta por ciento (80 %) a las fuentes de agua dulce. Un diecinueve por ciento (19 %) viene de las aguas subterráneas y finalmente, el uno por ciento (1 %) proviene de la superficie, esto siendo lagos, humedales, ríos y vapores atmosféricos. (Fernández, 2012).

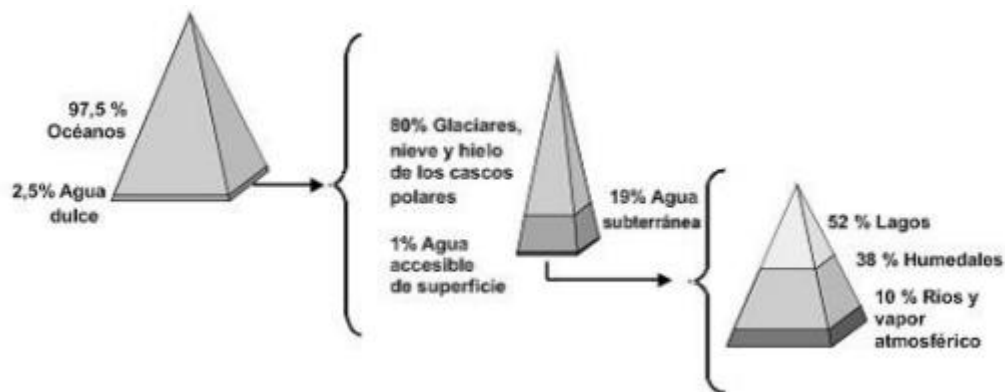


Figura 1 - Distribución de agua en el planeta

Fuente: A. Fernández, (2012), *El agua, un recurso esencial: distribución del agua* (Screenshot). Universidad de Buenos Aires, Argentina

Siendo un recurso renovable, se creía que era de carácter infinito. No obstante; con el cambio en el mundo tanto social como ambiental, se reclasificó como un recurso finito. El ciclo hidrológico establece el cambio constante por el cual este compuesto pasa por los diferentes estados de la materia, dicho proceso se compone de las diferentes partes:

- I. Evaporación: debido a la radiación térmica del sol, este calienta el agua en la superficie del planeta. El agua se evapora y el aire se carga con humedad. Adicionalmente se toma en cuenta la transpiración de los seres vivos como aporte en el proceso.
- II. Condensación: a medida que la humedad asciende en el planteo, las moléculas del agua se mezclan con las partículas sólidas en el aire, reduciendo su temperatura y formando las nubes en el cielo.
- III. Precipitación: disminuyendo la temperatura, las gotas se condensan y caen debido a su masa. Esto es lo que causa las lluvias en el medio ambiente.
- IV. Escurrimiento: el residuo de la lluvia que no se infiltra en el terreno vuelve a las masas de agua en el planeta para reiniciar el ciclo una vez más.



Figura 2 - El ciclo del agua

Fuente: United States Geological Survey. (2006). Ciclo del agua (Screenshot). Commons Wikipedia.

<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Ciclo-del-agua.jpg>

## Situación global

### Estrés hídrico

El estrés hídrico se conoce como la situación donde la demanda de agua es mayor que la cantidad disponible durante un periodo determinado o cuando su uso se ve restringido debido a la baja calidad del recurso.

Esta situación se ve en un incremento debido a las condiciones adversas causadas debido al cambio climático, disminuyendo las reservas de agua dulce. La escasez de agua es uno de los eventos más caóticos, debido a que limita considerablemente el desarrollo de actividades diarias, industriales, ganaderas y demás. Adicionalmente puede ocasionar conflictos tanto sociales como económicos, lo que podría propiciar a conflictos armados por su posesión.

Las regiones áridas de África se ven afectadas por dicha condición, asimismo como diversos países en el medio oriente y otros países considerados como potencias mundiales, ya que la demanda de sus operaciones es masiva.

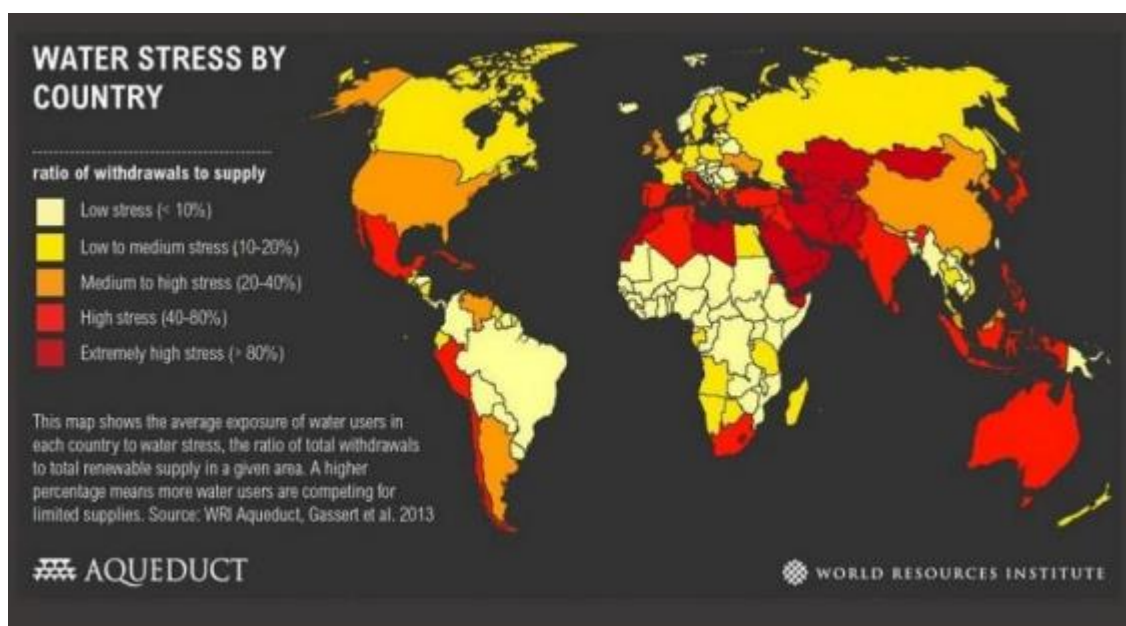


Figura 3 - Mapa de estrés hídrico en el nivel mundial para el 2019

Fuente: World resources institute. (2019). Estrés hídrico por país. (Screenshot). Visualización de datos.

<https://www.wri.org/data/water-stress-country>

## **Situación nacional**

De los múltiples países latinoamericanos con agua del grifo disponible para su uso, sólo en Costa Rica y Chile es seguro su consumo. Sucede que el país posee un alcance del noventa y uno coma dos por ciento (91,2 %) para un servicio de alta calidad y seguridad. Ciertamente la situación mundial y el constante cambio industrial afecta las fuentes del recurso hídrico, por lo que el acceso a este bien se ha vuelto invaluable. El hecho de que exista el servicio potable a casi la totalidad del país respalda el grado de desarrollo de un país, ya que es uno de los medios de subsistencia que garantiza el asentamiento humano.

De acuerdo con la Oficina de Comunicación y Mercadeo del Tecnológico de Costa Rica (2019), existen tres factores determinantes para la salud con respecto al agua:

- El acceso al agua de calidad potable
- El acceso al saneamiento
- La educación

El agua de calidad potable es fundamental para la ingesta, para la vida cotidiana, pero también es un alimento rico en minerales y el único que se consume todos los días, durante toda la vida. “Para que sea un alimento, debe cumplir con ciertas características fisicoquímicas y microbiológicas; para eso existe la vigilancia y el control de la calidad del agua”, afirma Darner Mora, director del Laboratorio Nacional de Aguas de AyA.

Alrededor del siglo veinte se impulsó la cobertura del agua y materia referente a la educación de ella, aunque se rezagó en temas de saneamiento. Una medida para hacerle frente a esta deficiencia fue el desarrollo de los tanques sépticos. Estos dispositivos de tratamiento no se consideran como malos, pero sí se les da un monitoreo particular, puesto que los desechos de dichos tanques terminan en ríos o masas de agua.

Posterior a estas acciones, en mil novecientos cincuenta y ocho (1958), la Organización Mundial de la Salud (OMS) desarrolla un programa para el establecimiento de empresas especializadas en agua y saneamiento. Con este proyecto, se crean políticas para promover el tipo de tratamiento ante el recurso hídrico, donde cada país desarrolla sus entidades responsables de este trabajo.

## **Entidades nacionales**

Actualmente, existen diversas instituciones con sus roles en la dirección, regulación, operación y control con respecto al recurso hídrico. El rol de dirección y políticas cae en tres instituciones:

- I. Ministerio de Ambiente y Energía (MINAE): actualmente el rector del recurso hídrico. Se encarga de velar por la protección del recurso natural del país mediante regulaciones, trámites y legislaciones que cubren los diversos temas que involucran su gestión, el medio ambiente, la explotación y generación de energía (MINAE, 2023).
- II. Ministerio de Salud (MINSa): es el rector con respecto a temas de salud, donde controla la calidad de agua que se suministra a la población. Es la autoridad sanitaria respetada a nivel nacional e internacional que ejerce la rectoría del sistema nacional de salud con capacidad técnica y resolutive, liderazgo y participación social (MINSa, 2023).
- III. Instituto de Acueductos y Alcantarillados (AyA): la dirección también recae en el AyA, ya que abarca la rectoría técnica, donde establece la normativa en sistemas de acueductos y alcantarillados de todo el país. Se enfoca en ser la institución pública de excelencia en rectoría y gestión de los servicios de agua potable y saneamiento para toda la población del país (AyA, 2023).

El rol de la regulación recae en cuatro entidades:

- I. Ministerio de Ambiente y Energía (MINAE): al encargarse en la protección del ambiente, promueve normas y reglamentación del uso de cuerpos de agua, incluyendo el abastecimiento de este.
- II. Autoridad Reguladora de los Servicios Públicos (ARESEP): encargado de la fiscalización y regulación económica de los servicios. Se enfoca en ser reconocida como una Autoridad Reguladora con autonomía, imparcialidad, transparencia, excelencia técnica, resiliencia y solidaridad, que contribuye a la calidad de vida y al desarrollo de la sociedad costarricense (ARESEP, 2023).

- III. Ministerio de Salud (MINSA): con la promoción de reglamentación y normas con respecto al abastecimiento de agua potable, protegiendo ampliamente la salud de la población.
- IV. Contraloría General de la República (CGR): se enfoca en la fiscalización y el control del uso de fondos públicos en materia del recurso hídrico.

El rol de control, vigilancia, protección y operación cae en cuatro entidades:

- I. Empresa de Servicios Públicos (ESPH): es la empresa que brinda servicios de calidad en el sector de agua, energía, saneamiento, telecomunicaciones y otros, que aporta valor y desarrollo a la sociedad mediante la mejora continua de su gestión (ESPH, 2023).
- II. Instituto de Acueductos y Alcantarillados (AyA): como principal entidad en rectoría técnica, se encarga de velar por el control, vigilancia y operación del recurso hídrico, tanto a nivel nacional como regional.
- III. Asociaciones administradoras de los Sistemas de Acueductos y Alcantarillados comunales (ASADAS): administran los sistemas de acueducto y alcantarillado comunales, bajo un esquema de delegación de la administración, acordado con el Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados, mediante un Convenio de Delegación de Administración (ASADAS, 2023).
- IV. Municipalidades: debido a ser los gobiernos locales, tienen como rol velar por el control y la protección del recurso hídrico que se distribuye en los cantones.

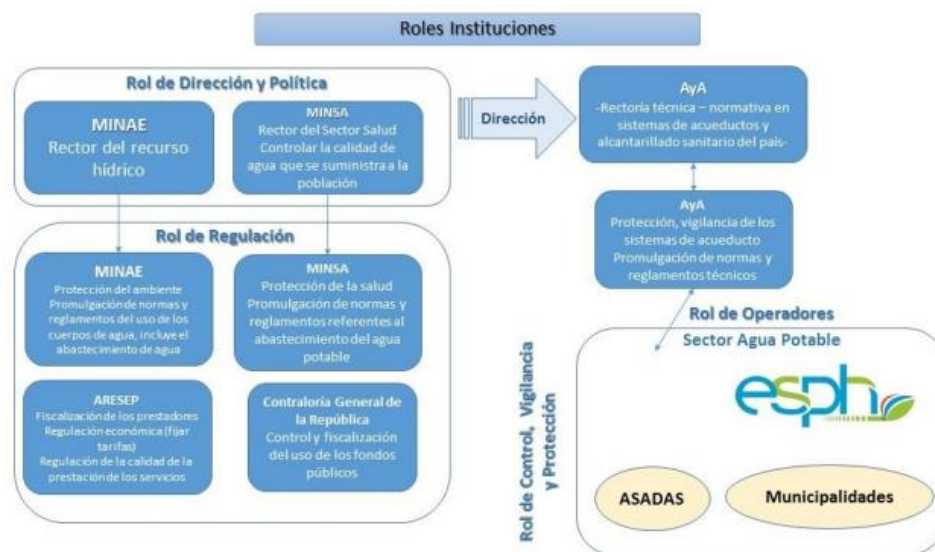


Figura 4 - Roles institucionales

Fuente: AyA. (2017). Roles institucionales (Screenshot).

[https://www.aya.go.cr/transparenciainst/acceso\\_informacion/marconormativo/pol%C3%ADtica%20nacional%20de%20agua%20potable.pdf](https://www.aya.go.cr/transparenciainst/acceso_informacion/marconormativo/pol%C3%ADtica%20nacional%20de%20agua%20potable.pdf)

## Características físicas del agua

### Turbiedad

Se origina por las partículas formadas en los sistemas coloidales, que por su tamaño se encuentran suspendidas y reducen la transparencia del agua en diferentes grados. Esta característica está directamente afectada por el tipo de las partículas y su comportamiento en el agua (Vargas, 2004).

### Color

Dicha característica puede estar ligada a la turbiedad o estar completamente desligada de ella. Esta cualidad se ve originada por los siguientes factores:

- Extracción acuosa de sustancias de origen vegetal
- Descomposición de materia
- Materia orgánica del suelo
- Presencia de elementos metálicos como Hierro o Manganeseo
- Combinación de las condiciones anteriores



Adicionalmente, factores como el nivel de pH, la temperatura, el tiempo de contacto, la materia disponible y la solubilidad de los compuestos coloreados (Vargas, 2004).

### **Olor y sabor**

Son características que constituyen el motivo principal de rechazo por parte de los consumidores. La falta de olor puede ser indicio directo de ausencia de contaminantes, mientras que el aroma a sulfuro de hidrógeno indicación séptica en el agua. El agua puede considerar cuatro sabores básicos: ácido, salado, dulce y amargo (Vargas, 2004).

<b>Naturaleza</b>	<b>Origen</b>
Olor balsámico	Flores
Dulzor	<i>Coelosphaerium</i>
Olor químico	Aguas residuales industriales
Olor a cloro	Cloro libre
Olor a hidrocarburo	Refinería de petróleo
Olor medicamentoso	Fenol, yodoformo
Olor a azufre	Ácido sulfhídrico, H <sub>2</sub> S
Olor a pescado	Pescado, mariscos
Olor séptico	Alcantarilla
Olor a tierra	Arcillas húmedas
Olor fecaloide	Retrete, alcantarilla
Olor a moho	Cueva húmeda
Olor a legumbres	Hierbas, hojas en descomposición

Figura 5 - Olores característicos del agua y sus orígenes

*Fuente: L. Vargas, 2004. Tratamiento de agua para consumo humano: plantas de filtración rápida, OPS*

### **Temperatura**

Una de las características más importantes en el agua, puesto que supone el retardo o aceleración de actividad biológica, absorción de oxígeno, precipitación de compuestos, formación de depósitos, desinfección y los procesos de mezcla, floculación, sedimentación y filtración (Vargas, 2004).

### **Alcalinidad**

La alcalinidad se refiere a la capacidad del agua para neutralizar ácidos mediante la asistencia de aniones de ácidos débiles, como carbonatos, sulfuros, silicatos y fosfatos.

Factores que influyen la alcalinidad son el pH, la composición del agua, la temperatura y la fuerza iónica.

Esta cualidad es de vital importancia en el proceso del tratamiento del agua debido a que reacciona con los agentes coagulantes durante el proceso de coagulación (como sales de hierro o aluminio). Adicionalmente, incide en la característica corrosiva o incrustante que puede tener el agua, por lo que puede afectar el sabor del agua.

### **Aluminio**

Consiste en un componente natural en el agua debido a que forma parte de la estructura de las arcillas. Está presente en sus formas solubles o en sistemas coloidales, lo cual afecta la turbiedad en el agua. Cuando el agua tiene altas concentraciones del elemento, confiere un nivel de pH bajo, provocando la formación de ácidos débiles.

Durante el proceso de tratamiento de agua es posible eliminar las sales de aluminio solubles mediante la formación de hidróxido de aluminio. Aunque es necesario mantener el control en el nivel de pH debido a que puede formar aluminatos si este sube en exceso. Por ello, la coagulación se realiza mediante polímeros orgánicos.

Si el elemento se encuentra en el agua cruda, es recomendado utilizar coagulantes como sales de hierro o polímeros sintéticos. De acuerdo con la Organización Mundial de la Salud (OMS), el valor guía para el consumo humano se estableció como 0,2 mg/L de aluminio.

### **Arsénico**

Es un elemento altamente tóxico para el ser humano que puede estar presente en el agua en su estado natural. Dicha toxicidad depende de la forma de exposición, de su estado de valencia y de si su forma química es orgánica o inorgánica. La mayoría de los casos de intoxicación tienen orígenes inorgánicos.

Se sospecha que este elemento posee efectos cancerígenos debido a la correlación entre la incidencia de hiperquetosis y el cáncer de piel y la ingesta de aguas con más de 0,3 mg/L de arsénico. El metabolismo del elemento se realiza principalmente en el hígado (Vargas, 2004). La forma en la que se remueve el arsénico es mediante su oxidación a su forma pentavalente antes de la coagulación, que se realiza con sulfato férrico con pH de 6-8,

con alumbre a pH de 6-7 o ablandamiento con cal a pH 11. Experimentalmente remueve el noventa por ciento (90 %) del elemento. La Organización Mundial de la Salud establece una guía de ingesta de 0,01 mg/L.

### **Hierro**

El hierro es un elemento normal en el ser humano, por lo que sus sales no son tóxicas en las cantidades encontradas en la naturaleza. Puede afectar el sabor del agua, producir alteraciones en la turbiedad y el color de esta. Se encuentra en dos formas en la naturaleza: de forma asimilable y no asimilable.

La presencia del hierro en el agua puede fomentar el desarrollo de microorganismos que podrían formar depósitos de óxido férrico en la red de distribución. La remoción de hierro en el agua resulta sencilla, ya que se puede realizar con los procesos de remoción para la turbiedad, bajando su concentración hasta 0,3 mg/L, que es lo recomendado por la Organización Mundial de la Salud para el consumo humano.

### **Manganeso**

El manganeso es un elemento esencial para la vida animal debido a que funciona como un activador enzimático, aunque altas dosis de este elemento pueden ocasionar daños en el sistema nervioso. Su presencia en el agua es muy poco usual pero cuando se encuentra presente, se asocia con la presencia del hierro.

De acuerdo con Vargas (2004): “La presencia de manganeso en el agua provoca el desarrollo de ciertas bacterias que forman depósitos insolubles de estas sales, debido a que se convierte, por oxidación, de manganeso en solución al estado mangánico en el precipitado. Esta acción es similar en el hierro”. La Organización Mundial de la Salud recomienda una concentración de 0,05 mg/L por consideraciones de sabor y olor en el agua.

### **Valor del pH**

El potencial de Hidrógeno consiste en una medida para establecer el nivel de acidez o alcalinidad de una disolución. A pesar de no tener efectos directos en la salud, influyen directamente en los procesos de tratamiento de agua como en la coagulación y desinfección. Las aguas no contaminadas generalmente exhiben un pH entre cinco (5) y nueve (9) (Vargas, 2004).



Figura 6 - Escala de pH

Fuente: Enciclopedia concepto (2021). pH (Screenshot). Concepto. <https://concepto.de/ph/>

### Características biológicas del agua

Existen millones de organismos presentes en las aguas superficiales, puesto que, en la naturaleza, es una fuente de acceso a cientos de criaturas, tanto visibles como invisibles ante la percepción humana. Dependiendo de las condiciones del medio, estos organismos permiten el desarrollo de diversos ciclos biológicos o químicos en las masas de agua y podrían producir efectos adversos ante la salud, puesto que un agua no tratada puede verse visiblemente limpia, se desconoce la presencia de organismos como bacterias, parásitos o incluso virus presentes.

Los organismos que se encuentran usualmente en las fuentes de agua superficiales son las siguientes:

- I. Algas: plantas fotosintéticas de organización sencilla. Existen en diversas formas: unicelulares, coloniales y pluricelulares. La reproducción de este elemento del reino planta mantiene una inmensa relación con el medio, independientemente del hábitat, puesto que aporta enormemente a los diversos factores ecológicos. Su descontrolada presencia puede presentar dificultades tanto para los demás miembros del medio como para el tratamiento del agua, como los siguientes:
  - a. Sabor y olor: pueden asimilar olores a pescado, tierra y pasto.
  - b. Color: principalmente ocasiona una tonalidad verde, aunque dependiendo del tipo de alga puede generar un color rojizo.

- c. Toxicidad: las algas azul-verdes, denominadas como cianobacterias, generan males gastrointestinales.
  - d. Corrosión: algunas algas pueden producir desgaste en las piezas de tubería debido a la modificación química que aportan al agua.
  - e. Obstrucción de filtros: cuando no se interviene en el proceso de la decantación, pueden transportarse hasta el módulo de filtrado y obstruirlo.
  - f. Dificultad en la decantación química: las cianobacterias almacenan aire en su citoplasma, afectando los flóculos de hidrógeno y aluminio en el proceso de decantación.
  - g. Alteración del pH: aumenta su nivel debido al consumo de  $CO_2$ . (Vargas, 2004).
- II. Bacterias: seres unicelulares de organización simple, distribuidos en diversos sustratos orgánicos (suelo, agua, polvo). Una gran parte de las bacterias es beneficiosa para los ecosistemas acuáticos, puesto que son responsables de la mayoría de las transformaciones orgánicas.
- III. Protozoarios: son organismos unicelulares con una inmensa distribución en los ecosistemas acuáticos. La mayoría de la presencia de los protozoarios es benéfica, puesto que aportan enormemente a la preservación del equilibrio biológico en el agua. Sin embargo, un porcentaje de los organismos son de naturaleza parasítica.
- IV. Rotíferos, copépodos y crustáceos: constituyen los grupos mayoritarios de las aguas superficiales, de igual forma elementales en la cadena alimenticia de dichos ecosistemas.
- V. Insectos: muchas especies desarrollan su ciclo evolutivo en ecosistemas acuáticos, dependiendo de las necesidades que tengan, se involucran en los diferentes estratos de las masas de agua. (Vargas, 2004).

### **Patógenos activos en las aguas superficiales**

Existen diversos agentes en las fuentes de agua superficial cuya presencia desconocemos. El consumo de dichas fuentes puede ocasionar enfermedades de naturaleza hídrica. Esto producto de la contaminación de cualquier forma en las aguas superficiales. Uno de los principales problemas con respecto a las fuentes contaminantes en las fuentes de

agua superficial son los desechos fecales, cuya vía de salida es hacia los ríos, sea de origen humano, ovino u bovino.

El principal problema radica en los medios de tratamiento en ciudades con alta densidad poblacional, mientras que en las zonas rurales se da meramente por el manejo de desechos en campo abierto. Adicionalmente, la infiltración o vertimiento de aguas residuales no tratadas tiene el mismo impacto, puesto el producto de eventos como la escorrentía superficial o las inundaciones potencian su efecto en el medio.

<b>Bacterias</b>	<i>Escherichia coli, Salmonella, Shigella, Vibrio cholerae, Yersinia enterocolitica, Campylobacter jejuni.</i>
<b>Virus</b>	<i>Enterovirus, Rotavirus, Adenovirus.</i>
<b>Protozoos</b>	<i>Giardia, Cryptosporidium, Entamoeba histolytica, Balantidium coli.</i>
<b>Helminos</b>	<i>Ascaris, Trichuris, Taenia.</i>
<b>Cyanobacterias</b>	<i>Anabaena, Microcystis.</i>

Figura 7 - Agentes patógenos y organismos productores de toxinas en aguas superficiales

Fuente: L. Vargas, 2004. *Tratamiento de agua para consumo humano: plantas de filtración rápida*, OPS

## Coliformes

Los coliformes consisten en seres bacterianos que habitan en el intestino de los mamíferos y también se presentan como saprofitos en el ambiente, con excepción de la *Escherichia coli* (es una bacteria que abunda en el tracto gastrointestinal, responsable para el adecuado funcionamiento del proceso digestivo) cuyo origen es intestinal. Los coliformes poseen varias características requeridas para indicar un alto nivel de contaminación. Existen dos grupos de coliformes:

- Coliformes termo tolerantes / fecales: presentes mediante la contaminación fecal, se requiere de métodos sensibles para medir el grado de su contaminación. Debido a que su temperatura de incubación es de cuarenta y cuatro coma cinco grados Celsius (44,5 °C), les resulta imposible multiplicarse en ambientes acuáticos.
- Coliformes totales: se caracterizan por su capacidad de fermentar la lactosa a treinta y cinco a treinta y siete grados Celsius (35-37 °C) en veinticuatro a cuarenta y ocho

(24-48 h) horas y producir ácido y gas. Se reproducen en el ambiente, proporcionan información sobre el proceso de tratamiento y acerca de la calidad sanitaria del agua que ingresa al sistema y de la que circula en el sistema de distribución (Vargas, 2004).

### Agua potable

De acuerdo con el Instituto de Acueductos y Alcantarillados (2017), “*el concepto de agua potable está definido en el Reglamento para la Calidad del Agua Potable, el cual indica una serie de valores y características que debe cumplir para que no cause daño a la salud.*”. La potabilidad se atribuye como una característica del agua en la que puede ser consumida sin restricciones, ya que, gracias a su calidad, no presenta riesgo alguno para la salud.

El X Censo Nacional de Población y Vivienda (2011) estableció que el noventa y dos coma cinco por ciento (92,5 %) de las viviendas en el país obtienen el agua para consumo mediante conexiones intradomiciliarias de un acueducto. Aunque no es particularmente potable, denota un alto porcentaje de la población con riesgos mínimos para la salud.

Provincia	Viviendas	% viviendas con agua intradomiciliar
San José	400 961	96.6
Alajuela	236 927	94.8
Cartago	130 464	96.7
Heredía	122 410	93.8
Guanacaste	92 584	88.7
Puntarenas	119 302	85.1
Limón	109 316	77.3
<b>Total nacional viviendas</b>	<b>1 211 964</b>	
<b>Viviendas con conexión intradomiciliar</b>	<b>1 121 064</b>	
<b>Viviendas sin conexión</b>	<b>90 100</b>	

Figura 8 - Viviendas con conexiones intradomiciliares

Fuente: AyA (2017)

## Partículas coloidales

Las partículas coloidales presentes en el agua usualmente poseen un diámetro entre uno y mil micromilímetros y su comportamiento se rige dependiendo de su origen y naturaleza. Son la causa principal de la turbiedad en el agua. Cabe mencionar que, evaluando sus dimensiones, es posible determinar el origen y naturaleza de estas.

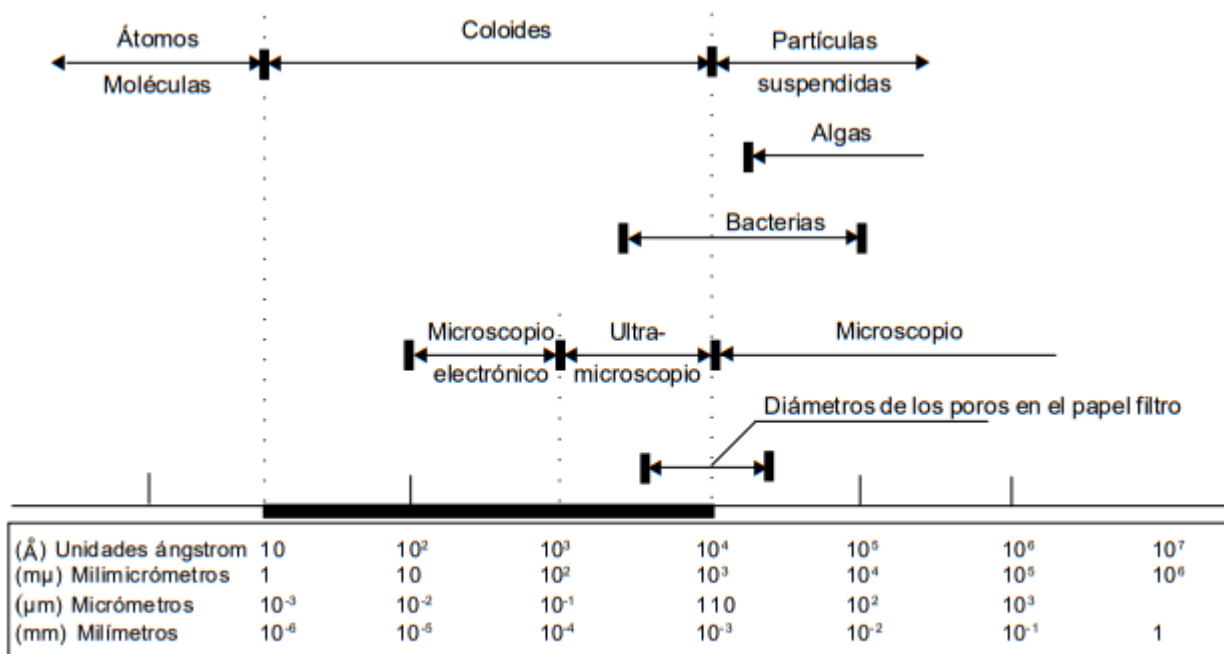


Figura 4-1. Distribución de tamaños de las partículas en el agua

Figura 9 - Distribución de tamaños de las partículas en el agua

Fuente: L. Vargas, 2004. *Tratamiento de agua para consumo humano: plantas de filtración rápida*, capítulo 4, OPS

## Tipos de coloides

Los sistemas coloidales se pueden referir como hidrófobos o suspensores cuando estos repelen el agua. En caso de presentar una afinidad hacia el agua, se llamarían hidrófilos. Dicha condición resulta en la absorción del agua.

La arcilla y algunos óxidos metálicos son altamente importantes en el tratamiento del agua debido a que son parte de los coloides hidrófobos. Son termodinámicamente inestables debido a la formación de grandes cristales no coloidales.



De acuerdo con Vargas (2004):

Los coloides hidrofílicos comprenden soluciones verdaderas, ya sea de moléculas grandes o de agregados de moléculas pequeñas (llamados micelas), cuyas dimensiones están dentro de los límites coloidales. Abarcan varios polímeros tanto sintéticos como naturales y numerosas sustancias de significación biológica como proteínas, ácidos nucleicos, almidones y otras macromoléculas. Las diferencias de opinión entre los investigadores sobre la naturaleza del color orgánico en el agua — solución verdadera o coloide— pueden resolverse si consideramos que el color orgánico es un coloide hidrofílico compuesto de moléculas grandes en solución. Las soluciones de coloides hidrofílicos y las de moléculas más pequeñas difieren únicamente en que, por su tamaño, las moléculas pequeñas o micelas tienen diferentes propiedades y suponen distintas técnicas de estudio.”

### **Propiedades de los coloides**

Desde un punto de vista físico, la mayoría de los coloides se pueden caracterizar dependiendo de su estructura química. Las principales propiedades que determinan el comportamiento son las siguientes:

- **Propiedades cinéticas:** las propiedades cinéticas definen principalmente el movimiento de las partículas en el agua.
  - ❖ **Movimiento browniano:** establecido por el botánico escocés Robert Brown, determinó que las partículas presentan un movimiento constante e irregular dentro de la fase líquida. La teoría cinética explica dicho movimiento como el producto de un bombardeo desigual y casual de las partículas en suspensión por las mismas moléculas del agua.
  - ❖ **Difusión:** debido al continuo movimiento de las moléculas, establecido según el movimiento browniano, las partículas coloidales tienen una tendencia a la dispersión en todo el sistema hídrico.
  - ❖ **Presión osmótica:** Vargas (2004) lo define como el flujo espontáneo que se produce cuando un disolvente atraviesa una membrana que la separa de un sistema coloidal. La membrana es permeable al solvente, pero no a los

coloides, por lo tanto, la disolución sólo puede ocurrir con el movimiento del solvente hacia el sistema coloidal a través de la membrana.

- **Propiedades ópticas:** este fenómeno se conoce como el efecto Tyndall-Faraday, el cual consiste en la dispersión de luz cuando pasa a través de una suspensión coloidal. Adicionalmente se utiliza para la determinar la turbiedad. No obstante; no tiene que ver con las causas de la turbiedad en el agua.
- **Propiedades superficiales:** las partículas se caracterizan por tener una superficie específica la cual se define como una relación entre su área superficial y su masa. La disminución en el tamaño de las partículas se debe al tiempo de sedimentación. Debido a la capacidad de adsorción que adquieren las partículas al aumentar su área superficial, resulta poco práctico sedimentarlas sin un tratamiento químico previamente.

Diámetro de la partícula (mm)	Escala de tamaños	Área superficial total <sup>a</sup>	Tiempo requerido para sedimentar <sup>b</sup>
10	Grava	3,15 cm <sup>2</sup>	0,3 s
1	Arena gruesa	31,50 cm <sup>2</sup>	3,0 m/s
0,1	Arena fina	315,00 cm <sup>2</sup>	38,0 s
0,01	Sedimento	3.150,00 cm <sup>2</sup>	33,0 min
0,001	Bacteria	3,15 m <sup>2</sup>	55,0 horas
0,0001	Partícula coloidal	31,50 m <sup>2</sup>	230,0 días
0,00001	Partícula coloidal	0,283 ha	6,3 años
0,000001	Partícula coloidal	2,83 ha	63,0 años

Figura 10 - Partículas coloidales al disminuir su tamaño

Fuente: L. Vargas, 2004. *Tratamiento de agua para consumo humano: plantas de filtración rápida*, capítulo 4, OPS

- **Propiedades electrocinéticas:** la electroforesis es un fenómeno que consiste en la separación de moléculas según su movilidad en un campo eléctrico. Esta técnica evidencia que las partículas coloidales tienen una carga eléctrica. El proceso consiste en pasar una corriente eléctrica a través de una solución coloidal, de esta forma siendo atraídas por polos positivos y negativos. Generalmente los coloides tienen carga negativa.

## **Plantas de tratamiento potabilizadoras**

Una planta de tratamiento potabilizadora consiste en un sistema modular donde el agua, dependiendo de su origen sea una fuente superficial o subterránea, se procese mediante diferentes procedimientos con la finalidad de garantizar las condiciones óptimas para su consumo y uso en las actividades diarias de la sociedad.

La planta de tratamiento de San Mateo de Alajuela es de tipo modular, comenzando operaciones en mil novecientos noventa y uno (1991). Posteriormente en el dos mil dieciocho, se le adicionan tres (3) módulos compuestos de floculación-sedimentación y dos (2) tanques de lavado para operar con una capacidad de quince litros por segundo (15 L/s). Adicionalmente se suman dos (2) módulos y un tanque de lavado, aumentando la capacidad total de operación a veinticinco litros por segundo (25 L/s). Es decir, cada módulo tiene una capacidad de cinco litros (5L).

## **Proceso de potabilización**

### **Coagulación**

La coagulación consiste en la desestabilización de las partículas coloidales, eliminando las fuerzas que las mantienen en suspensión mediante la neutralización de las cargas superficiales por la adición de coagulantes. Con ello, las partículas tienden a la aglomeración y a la formación de elementos de mayor peso, facilitando su posterior decantación. Algunos coagulantes conocidos son:

- Cal ( $Ca(OH)_2$ ).
- Sulfato de Aluminio ( $Al_2(SO_4)_3$ ).
- Cloruro férrico ( $FeCl_3$ ).
- Polímeros aniónicos y catiónicos.

Un coagulante debe de ser suministrado de forma rápida, puesto que la reacción que tienen con el agua es veloz y se debe de lograr una mezcla homogénea en un periodo muy corto. Es por lo que existen dos factores vitales en el proceso de coagulación: el gradiente de velocidad y el tiempo de retención o tiempo de mezcla. Ambos factores afectan en la eficacia de la desestabilización de partículas durante la mezcla.

Los tiempos en los que se dan dichas reacciones son inferiores a un segundo. La mezcla del coagulante con toda la masa de agua debe darse de forma rápida y eficiente. Dicha mezcla puede tardar hasta un minuto. Es por lo que es ideal que la adición del coagulante se de en zonas de mayor turbulencia o bien, con el apoyo de piezas mecánicas que faciliten la mezcla (Koutoudjian, 2019).

Los valores establecidos como parámetros para un proceso de coagulación eficiente son el gradiente de velocidad (GV) y el tiempo de retención (TR), los cuales deben encontrarse entre 700 y 5000  $s^{-1}$  para el GV y de 0,10 a 7 segundos para el TR. Esto se debe a que existen diversas unidades de mezcla y de acuerdo con su diseño, ambos valores establecen un rango apto para los sistemas.

Sin embargo; existen diversos factores que afectan el proceso de coagulación y, como consecuente, perjudicarán los procesos posteriores como el de floculación y decantación. Los principales factores perjudiciales son:

- Temperatura del agua.
- Contenido y tipo de partículas del agua.
- Alcalinidad del agua.
- Nivel de pH del agua.
- Concentración y características de la materia orgánica disuelta.
- Dosis y tipo de coagulante.
- Intensidad de la mezcla rápida.

Una metodología conocida para el ajuste de la dosis del coagulante es el ensayo de jarras. Consiste en la aplicación de diferentes cantidades de coagulante en muestras de agua con tal de obtener el mejor resultado, contemplando que facilite la decantación y obtenga la menor turbiedad posible.



Figura 11 - Ensayo de jarras

*Fuente: Koutoudjian, Juan M (2019). Operación de plantas potabilizadoras, capítulo 3, página 7*

La evaluación de los mezcladores consta de verificar la eficiencia del proceso de mezcla rápida, lo cual depende de:

- Variables químicas relacionadas con el tipo y la dosis de coagulantes, así como de su concentración, y con características de las aguas.
- Variables físicas, tales como el tiempo e intensidad de la mezcla provocada por la energía disipada, ya sea por medios mecánicos o hidráulicos. (Vargas, 2004).

La metodología para la evaluación de los mezcladores se simplifica con tal de obtener parámetros reales, lo cual somete el sistema a varios ensayos para determinar el comportamiento de esta unidad de mezcla rápida.

Dependiendo de la alcalinidad del agua o del valor del pH que presente, se aplica el coagulante de acuerdo con la medida calculada para que su efecto en el agua modifique el valor del pH en el fluido.

Debido a las impurezas en el agua, destacan particularmente las partículas coloidales, sustancias de naturaleza húmica y los microorganismos. Dichos elementos presentan una carga superficial negativa que impide que las partículas se acerquen entre sí y produce un medio estable para ellas. Con la clara necesidad de que estas impurezas sean eliminadas, se lleva a cabo este y los demás procesos en un sistema de potabilización para la alteración de las características del agua.

De igual forma el proceso es sumamente veloz, ya que puede tomar desde fracciones de segundo hasta casi un minuto y medio. Este proceso se da en una unidad de tratamiento denominada como mezcla rápida. La remoción de las partículas coloidales está enlazada directamente con una correcta coagulación, puesto que de este punto depende la eficiencia de las etapas posteriores.

Debido a que el proceso de coagulación depende completamente de la mezcla, se utilizan mecanismos de mezcladores para la dispersión casi instantánea del coagulante en el agua por tratar. Es por lo que la dosificación suministrada impacta la eficiencia del sistema, ya que debe distribuirse de manera uniforme y constante en la masa de agua. esta mezcla puede obtenerse de mejor forma con la asistencia de dispositivos hidráulicos o elementos mecánicos que incrementen la turbulencia del agua.

### **Floculación**

El proceso de floculación comienza una vez finalizado el proceso de coagulación, cuando las partículas ya desestabilizadas se aglomeran para formar flóculos de mayor tamaño y peso, así siendo capaces de decantar. El propósito es que las partículas coloidales se sedimenten rápidamente en la próxima etapa. El tiempo en dicho proceso es de aproximadamente treinta (30) minutos. Se utilizan polímeros orgánicos para ayudar en el proceso, con tal de formar flóculos más grandes y pesados. Tales como:

- Poliamina
- Poliacrilamidas
- Sílice activada  $SiO_2$  (aunque sea un polímero inorgánico)

De igual forma se pueden tomar en cuenta diferentes actuantes químicos mientras brinden un adecuado rendimiento al sistema. (Koutoudjian, 2019). Existen dos tipos de métodos de floculación: el método natural (floculación hidráulica) y el método asistido (floculación mecánica)

La floculación hidráulica consiste en una cámara con varios cambios de dirección a través del módulo, esto obliga al agua a tener un flujo laminar (dicho flujo puede ser vertical u horizontal). La ventaja de dicho método es que carece de consumo eléctrico, actuando

completamente con el movimiento del fluido. No obstante; está contemplado para un caudal determinado, lo que lo hace poco viable ante estas condiciones.

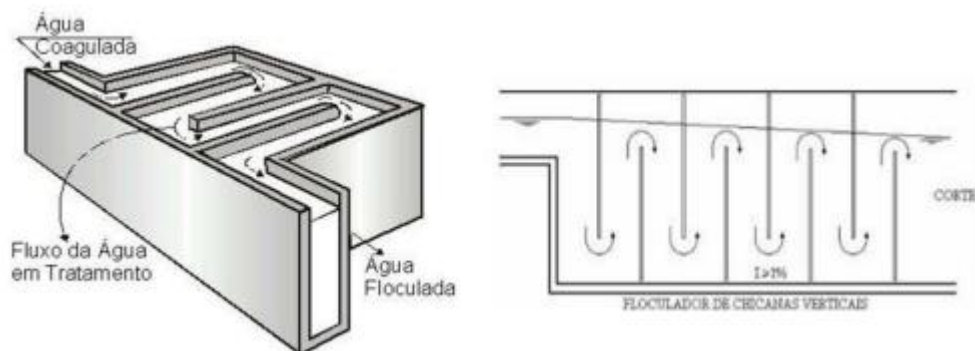


Figura 12 - Modelo de floculación hidráulica

Fuente: Koutoudjian, Juan M (2019). *Operación de plantas potabilizadoras*, capítulo 3, página 8

Además, el sistema de floculación mecánica está equipada con piezas mecánicas para facilitar el proceso. Dichos elementos se adaptan al flujo y al caudal del fluido, siendo típicamente utilizados en el tratamiento de aguas de origen superficial. Para ambos casos, es ideal mantener un flujo semi laminar, con la finalidad de preservar los flóculos formados en el proceso de coagulación.

### Sedimentación

Este proceso es la remoción gravitacional de las partículas que se encuentran en suspensión en el agua a tratar, dichas partículas deben tener un peso mayor al del fluido para que se pueda hacer la remoción de la mejor forma. Este proceso se dice que se parece mucho al proceso de filtración porque ambas remueven partículas, la diferencia entre ambos es que en la filtración la remoción de las partículas se hace a aquellas a las que su densidad se encuentra similar a la del agua y que no pudieron ser removidas en la sedimentación. Además, dicho proceso es utilizado para la clarificación en el tratamiento del agua (Bonilla, 2022, página 38).

### Tipos de sedimentación

- Sedimentación de partículas discretas: se conoce de esta forma debido a que las partículas no cambian sus características durante su caída. Está presente de los

desarenadores, sedimentadores y presedimentadores previos a la coagulación en una planta de mezcla rápida y en los sedimentadores en una planta de mezcla lenta.

- Sedimentación de partículas floculantes: este tipo de sedimentación se debe debido a la aglomeración de partículas desestabilizadoras como consecuente de las partículas químicas. Sus características cambian durante la caída. Adicionalmente, se conoce alternamente como decantación.
- Sedimentación de partículas por caída libre: cuando existen gran cantidad de partículas, colisionan entre sí y esto propicia un depósito de mayor magnitud en lugar de pequeños depósitos singulares en el sistema.
- Sedimentación por compresión: las partículas forman una masa compacta, completamente consolidado. Presentan mayores concentraciones de lodo en la decantación de dichos elementos. Alternamente se conoce como zona de compresión.

## **Filtración**

El proceso de filtrado consiste en eliminar las partículas que no logran sedimentarse al hacer pasar el agua a través de un material poroso. Debido a su alto porcentaje de porosidad, la arena y la grava son unos de los materiales mayormente utilizados en el sistema de filtración, aunque también se utiliza la antracita y el carbón activado.

De acuerdo con Koutoudjian (2019), el proceso de filtrado consiste en: “La retención de las partículas suspendidas y coloidales presentes en una suspensión acuosa que escurre a través de un medio poroso”. Estas partículas son removidas periódicamente mediante dos métodos: el lavado contra corriente que se emplea en los filtros rápidos y el raspado, comúnmente utilizado en los filtros lentos. Los materiales por remover pueden ser muy variados, puesto que abarcan diversos tipos de objetos:

- Partículas de arcillas o limos
- Microorganismo
- Sustancias húmicas precipitadas o coloidales
- Precipitados de Hierro o aluminio empleados en la coagulación
- Precipitados de carbonato de calcio e hidróxido de magnesio provenientes de ablandamiento con cal
- Precipitados de hierro y manganeso



Adicionalmente, los filtros se clasifican de acuerdo con la velocidad de estos:

<b>Según la Velocidad de Filtración</b>	<b>Según el Sentido del Flujo</b>	<b>Según la Carga sobre el Lecho o Manto</b>
Rápidos: 5 a 16 m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> -hora	Ascendentes Descendentes Flujo Mixto	Por gravedad Por presión
Lentos: 0,12 a 0,6 m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> -hora	Descendentes	Por gravedad

Figura 13 - Clasificación de filtros de acuerdo con su velocidad

*Fuente: Koutoudjian, Juan M (2019). Operación de plantas potabilizadoras*

El filtrado lento se utiliza mayoritariamente en poblaciones pequeñas como su única barrera de retención de materiales sólidos. Su baja velocidad permite el desarrollo de una capa biológica, donde es capaz de retener partículas de materia orgánica. Esta debe de reemplazarse periódicamente, puesto que el uso reduce su efecto ante la materia orgánica.

El filtrado rápido se utiliza con partículas de mayor tamaño a los intersticios de la arena del manto filtrante, tomando en cuenta que el agua ya pasó por los procesos previos de potabilización (coagulación, floculación y sedimentación), por lo que la mayoría de las partículas coloidales ya fueron eliminadas antes de llegar al filtro.

### **Mecanismos de filtración**

Existen dos mecanismos complementarios en tanto al proceso de filtrado: la adherencia y el transporte. Esto sucede de forma tal que las partículas removidas en los procesos previos son transportadas hacia la superficie de los granos del medio filtrante (arena o grava) y se adhieren a dicha área.

### **Desinfección**

El módulo de desinfección consiste en eliminar los microorganismos existentes después de los procesos previos con la finalidad de garantizar la seguridad del consumo, evitando cualquier tipo de enfermedad hídrica una vez distribuida. Mediante el uso de agentes químicos o físicos, se selecciona cuales agentes deben ser eliminados puesto que no todos

están presentes en el agua, puesto que los módulos anteriores se encargan de eliminar la mayoría como barrera de primera entrada, facilitando este último proceso. (Bonilla, 2022).

Existen diferentes métodos en los cuales se da la desinfección en este módulo:

- Desinfección por cloración: se puede realizar de forma gaseosa o líquida, ya que de esta forma se mantiene un suministro de cloro al agua. De acuerdo con Rodríguez (2022):

Es el sistema de desinfección más utilizado para la desinfección de agua potable, la función de este es eliminar las bacterias, virus y microorganismos patógenos que se encuentren en el agua luego de terminar el proceso de filtración, estos pueden afectar la salud de la población causando enfermedades, para que la cloración funcione adecuadamente se debe de dejar en un tanque por un tiempo estimado para que se desinfecte en su totalidad y luego pueda ser distribuida a la población de forma segura.

- Desinfección por radiación ultravioleta: este proceso físico se encarga de inhabilitar microorganismos mediante la radiación, aunque su uso se restringe a comunidades pequeñas. De esta forma, se afecta el material genético de estos organismos, eliminándolos en periodos muy cortos.
- Desinfección por ozono: consiste en la adición de ozono periódicamente para descomponer los microorganismos de forma rápida al variar drásticamente la temperatura y la presión en el agua.
- Desinfección solar: es uno de los métodos más sencillos y de bajo costo, puesto que almacena la radiación solar y esto aumenta la temperatura en el agua, eliminando de forma sencilla los microorganismos.
- Desinfección por filtración lenta: siendo uno de los métodos más antiguos, el filtrado sobre estratos terrestres remueve efectivamente factores que alteren el color o la turbiedad del agua, de forma que retiene los microorganismos que afectan la calidad del agua para luego retirarlos. (Rodríguez, 2022).

### **Unidades hidráulicas de mezcla rápida**

De acuerdo con la simplicidad y eficiencia de los mezcladores, existen los siguientes:

- Canales con cambio de pendiente o rampas

- Canaletas tipo Parshall
- Vertederos triangulares o rectangulares
- Difusores
- Inyectores

Los primeros tres tipos de mezcladores cuentan con la generación del resalto hidráulico, lo que ocasiona la turbulencia en la mezcla. Usualmente poseen un gradiente de velocidad alrededor de  $1000 \text{ s}^{-1}$ . Adicionalmente cuentan con el beneficio de involucrar la medición de caudal de ingreso a la planta. Este tipo de unidades son aptos para cualquier tipo de aguas, refiriéndose a que tanto para las que coagulan por el mecanismo de absorción o neutralización de carga como para las de barrido.

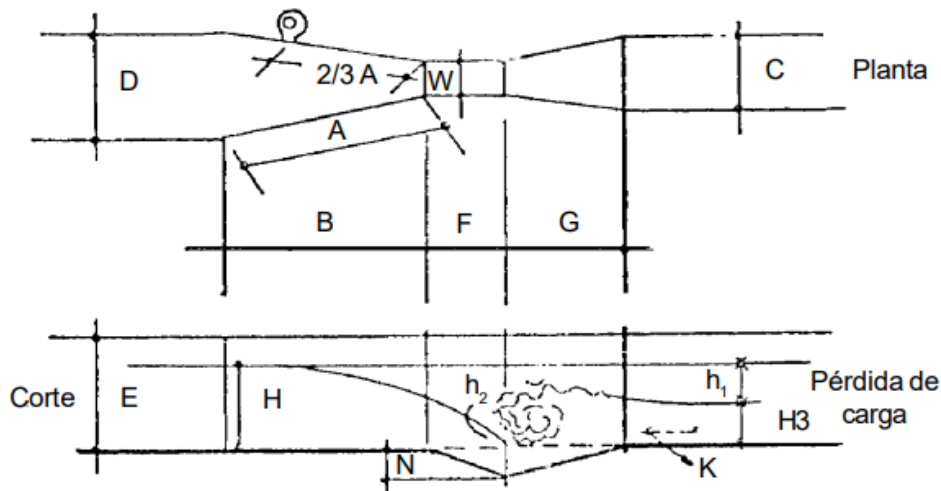


Figura 14 - Canaleta tipo Parshall

*Fuente: L. Vargas, 2004. Tratamiento de agua para consumo humano: plantas de filtración rápida, OPS*

Los difusores y los inyectores poseen una eficiencia similar a la que producen las unidades de resalto hidráulico pero el gradiente de velocidad es menor. Esto se debe a la disipación de energía durante el proceso. La causa directa de este efecto es la homogeneización entre el coagulante y la masa de agua en las unidades, esto como consecuencia de la enorme cantidad de puntos de aplicación del agente coagulante antes de la agitación del agua.

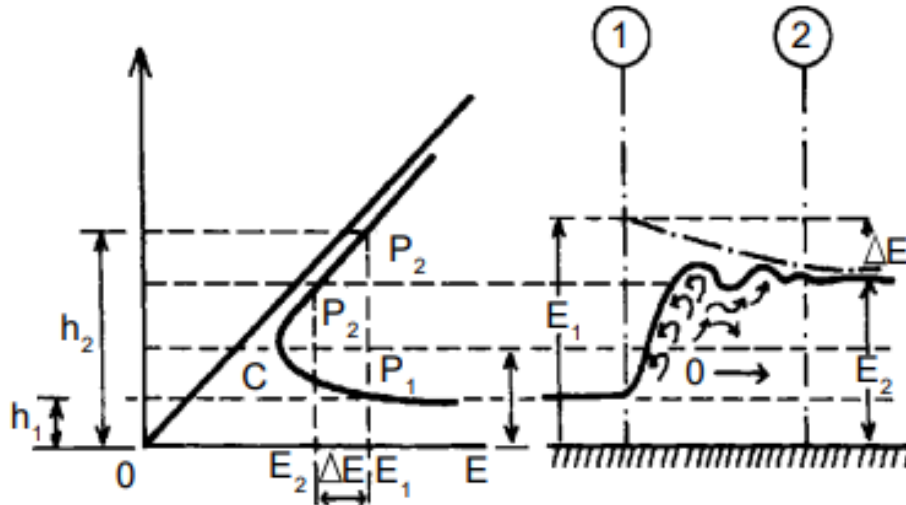


Figura 15 - Sistema con resalto hidráulico

Fuente: L. Vargas, 2004. Tratamiento de agua para consumo humano: plantas de filtración rápida, OPS

Existen otro tipo de mezcladores conocidos como unidades de mezcla en línea que necesitan gradientes de velocidad mayores, alrededor de los tres mil y cinco mil ( $3000-5000 \text{ s}^{-1}$ ). Dependiendo de la magnitud de las plantas, se establece el tipo de unidad de mezcla. Por ejemplo, para las plantas medianas a grandes, la canaleta tipo Parshall es la más adecuada mientras esta planta trabaje con caudales superiores a los quinientos litros por segundo (500 L/s). Los canales con cambio de pendiente se adaptan a cualquier rango de caudal, mientras que los vertederos trabajan con caudales menores, como los vertederos triangulares que trabajan usualmente a los treinta litros por segundo (30 L/s).

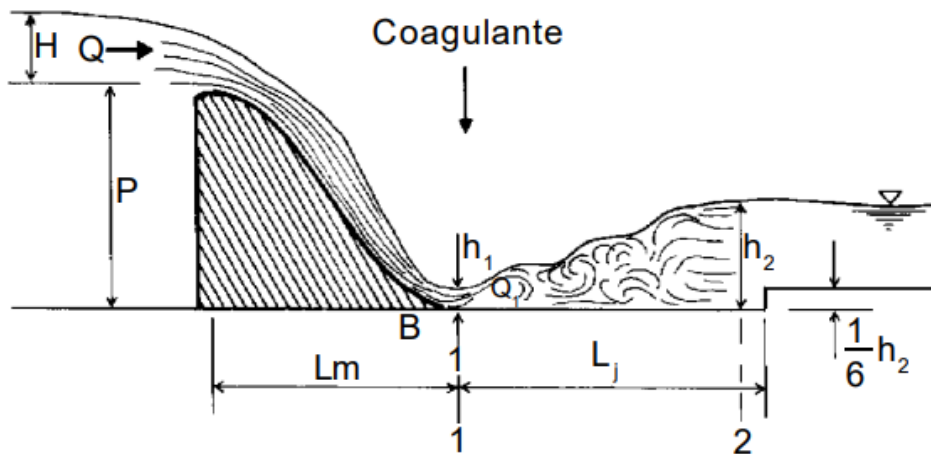


Figura 16 - Sistema con cambio de pendiente

## **Unidades de tratamiento**

### **Medidores de caudal**

Para que las unidades de tratamiento y los procesos que conllevan se desarrollen de manera adecuada y tomando en cuenta las condiciones de entrada con las que se proyectó el sistema, es indispensable ajustar la operación de la planta de tratamiento al caudal presente. Es por lo que el comportamiento de este elemento es vital para el correcto funcionamiento de la planta.

### **Vertederos rectangulares y triangulares**

De acuerdo con López (2003), un vertedero se define como *“una simple abertura sobre la cuál fluye un líquido.”* Aunque se pueden clasificar mediante diferentes parámetros. Debido a su facilidad de construcción y de calibración, los más comunes son los vertederos rectangulares y triangulares. Estas unidades pueden estar conformados por paredes gruesas o delgadas, dependiendo del tipo de corriente que maneje. Las paredes delgadas son utilizadas comúnmente para mediciones en corrientes superficiales. Pueden operar con descargas libres o parcialmente sumergidas, pero es preferible que trabajen con la primera condición.

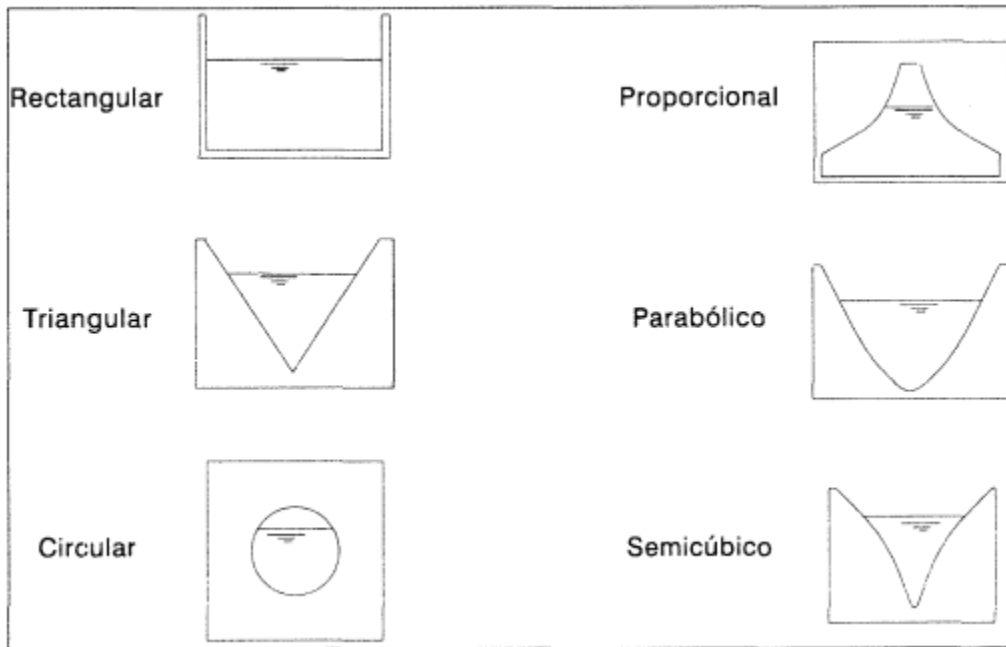


Figura 17 - Tipos de vertederos

Fuente: López, R (2003). *Elementos de diseño para acueductos y alcantarillados*

Un vertedero rectangular puede trabajar con caudales entre los doscientos y mil seiscientos litros por segundo (200 – 1600 L/s). Mientras que un vertedero triangular opera a menor capacidad, a caudales menores a los treinta litros por segundo (30 L/s). (López, 2003).

De acuerdo con Almeida (2009):

Una de las principales funciones que cumplen los vertederos es lograr que el nivel en una obra de toma alcance el nivel requerido para el funcionamiento de la obra de conducción. Mantener un nivel casi constante de aguas arriba de una obra de toma, para permitir que el flujo sobre el vertedero se desarrolle con una lámina líquida de espesor limitado. Cuando existen eventos de altas crecidas, el vertedero evacúa las aguas en exceso.



Figura 18 - Vertedero triangular

*Fuente: propia*

### **Función de los vertederos**

Las funciones de los vertederos se derivan desde aplicaciones prácticas hasta científicas, según Riojas (2018):

- Finalidades científicas: pueden utilizarse como dispositivos de aforo o elementos de calibración de aforadores en laboratorios hidráulicos.
- Finalidades prácticas: se emplea en la medición de caudales de pequeños cursos de agua (canales de pequeñas dimensiones) y conductos libres, así como en obras de control o de excedencias en presas de embalse y también aforo en grandes canales.

## **Capítulo II – Marco metodológico**

### **Paradigma de la investigación**

Un recurso indispensable como lo es el agua sostiene el desarrollo y la misma existencia de prácticamente todos los seres vivos. Contando con un porcentaje bajo en tanto a las fuentes de agua dulce, siendo este el dos puntos cinco por ciento (2,5 %) en el planeta, el consumo humano significa un gran impacto en tanto a estas reservas.

El cambio climático, consecuencia directa del incremento en las actividades humanas, genera un declive en la disponibilidad de estas fuentes. Es por lo que, con la limitada cantidad que existe, debe de ser impecable en tanto a sus condiciones y calidad para el consumo, como lo es con el agua potable.

El control de estos parámetros deriva de la operación en las plantas de tratamiento. Después de años de desarrollo en procesos de purificación y potabilización, todo depende de los sistemas designados para este tipo de actividades. Es de fundamental que estos procesos sean impecables para garantizar un apto servicio de potabilización.

### **Enfoque metodológico**

El enfoque de este proyecto se compone de diversos conceptos aplicados de manera práctica con la finalidad de desarrollar y diseñar un sistema que cumpla con las especificaciones, tanto estructurales como hidráulicas, y sea un módulo apto para las demandas de operación de la planta.

La naturaleza de la metodología es cualitativa debido al procedimiento que se debe de utilizar para completar los objetivos, estableciendo correlación entre la información obtenida con la información de diseño.

### **Métodos de investigación**

Para este proyecto, se contempla una modalidad experimental debido a las pruebas necesarias para determinar parámetros e información relevante para el trabajo. La prueba principal consiste en la prueba de trazadores para establecer información necesaria para evaluar y desarrollar los cálculos de diseño.



### Categorías del análisis de la investigación

<b>Variable</b>	<b>Variable independiente</b>	<b>Herramientas para utilizar</b>	<b>Variable dependiente</b>
Diseño del sistema de coagulación / mezcla rápida que cumpla con las condiciones de planta.	Condiciones del sistema, comportamiento y cualidades del agua.	Cálculos matemáticos que definan las características que un sistema modular debe de tener.	El diseño de un módulo completamente nuevo o la adición de elementos que apoyen su funcionamiento.
Determinar el tiempo de retardo en el sistema.	Caudal del sistema, volumen del módulo.	Mediciones del módulo de coagulación	El tiempo de mezcla, junto con el valor para la temperatura del agua define el gradiente de velocidad.
Estimación del gradiente de velocidad en el sistema.	Temperatura del agua, tiempo de retención y pérdida de carga.	Muestras del agua cruda.	Se logra verificar el cumplimiento para el sistema modular.
Realizar el levantamiento del módulo actual.	Dimensiones reales del módulo.	Mediciones del módulo de coagulación.	El dimensionamiento del sistema logra corroborar la información con las demás condiciones del módulo.
Determinar la temperatura del agua en la muestra.	Temperatura en las muestras de agua.	Termómetro.	Determinante de datos para el cálculo del gradiente de velocidad

Tabla 1 - Categorías del análisis de la investigación

*Fuente: propia*

## **Población, muestra y técnicas de muestreo**

La naturaleza del presente proyecto limita los parámetros poblacionales, muestreos informativos y las técnicas propias de dicha información, debido a que no es necesaria para el desarrollo del trabajo.

## **Técnicas e instrumentos para la recolección de datos**

Para el desarrollo de este proyecto es necesario tomar en cuenta cinco pruebas en sitio para obtener una referencia del funcionamiento del módulo actual, para evaluarlo con respecto a los criterios adecuados de operación y, en caso de, modificaciones o adiciones que mejoren este módulo de coagulación.

### **Primera prueba - dimensionamiento del módulo actual**

Para el desarrollo del proceso, es necesario realizar un levantamiento del módulo de coagulación actual. Esto con la finalidad de establecer las dimensiones actuales del sistema. Consiste en determinar si la unidad fue proyectada de manera satisfactoria. Se comprueba que la geometría de la unidad de mezclador, dependiendo del tipo (en este caso una unidad de mezclador tipo vertedero triangular), contenga los elementos necesarios para una cámara de coagulación y con ella, determinar que se presente un resalto hidráulico.

### **Segunda prueba – Punto de aplicación del agente coagulante**

Un aspecto vital al momento de la evaluación consiste en velar por que el agente coagulante caiga en el fluido en el punto de mayor actividad o el punto de agitación máxima. El punto de aplicación ideal es donde se da el resalto hidráulico, lo cual permite que el coagulante se distribuya de forma uniforme a lo ancho de la cámara donde la turbulencia sea máxima. Esto permitirá que el agente se mezcle de forma instantánea y homogénea con el agua cruda.

### **Tercera prueba – Tiempo de retención en el sistema**

Para determinar el tiempo de retención ideal en el sistema, se debe de llevar a cabo la prueba de trazadores. Mediante su aplicación, se puede determinar información necesaria como el gradiente de velocidad y el tiempo de retención real.

**Prueba de trazadores:** la prueba de trazadores consiste en adicionar una sustancia en el espacio que se quiere analizar, de forma tal que se distribuya en el fluido en un tiempo determinado y poder evaluarlo en diferentes periodos. Es altamente funcional para valorar las condiciones hidráulicas. Adicionalmente y como parte de este proyecto, tiene como función determinar los tiempos de retención reales.

Existen varios tipos de trazadores, tales como:

- Trazadores sólidos en suspensión: son aplicables preferiblemente en fuentes de agua subterránea. El propósito es que se mantenga en suspensión y se adapte a la velocidad del flujo.
- Trazadores químicos solubles: se adiciona al fluido con tal de evaluar las condiciones químicas de una muestra.
- Trazadores químicos colorantes: la ventaja de este tipo de trazador es que se puede utilizar en bajas cantidades y facilita enormemente su detección.
- Trazadores radioactivos: resulta altamente ventajoso debido a que su rango de detección es sumamente alto, se utiliza en muy escasas cantidades y tiene baja afectación en el fluido. Sin embargo, el costo de detección es sumamente alto y requiere personal especializado para su manejo.
- Trazadores isotópicos: consiste en el uso de isótopos para revisar la diferencia de neutrones en una muestra. Este tipo es poco común puesto que supone un alto costo de operación.

Para la selección de un trazador, debe contener las siguientes características de acuerdo con la Comisión Federal de Electricidad (2018):

- Que no esté presente en el agua.
- Que no se separe del agua.
- Que sea química y biológicamente estable.
- Que no cause alteraciones físicas.
- Que no altere la permeabilidad y porosidad del suelo.
- Que no sea contaminante.
- Que tenga alta solubilidad o miscibilidad.
- Que sea detectable incluso en bajas concentraciones.

- Que sea económico y de fácil acceso.

Existen diversas sustancias que cumplen con el papel de un trazador, tales como:

- Aserrín, almidón, esporas.
- Colorantes.
- Uranio, plutonio.
- Cloruros, fluoruros, nitratos.

#### **Cuarta prueba – Intensidad de la mezcla**

Para determinar la intensidad de la mezcla, la información se puede obtener de la misma prueba de trazadores y la aplicación de fórmulas, al medir la conductividad de las muestras mediante un conductímetro portátil. Adicionalmente calcula la temperatura de la muestra, siendo necesario para cálculos complementarios.

#### **Quinta prueba – Condiciones hidráulicas en el módulo de coagulación**

Consiste en determinar las condiciones hidráulicas en la estructura de interconexión entre las unidades de mezcla rápida y los floculadores, es decir, que el modelo actual cumpla con las condiciones de diseño.

#### **Técnicas e instrumentación para el procesamiento y análisis de datos**

Para el procesamiento y el análisis de la información recopilada se desarrolla con el cuadro 2-7: comprobación de las condiciones de mezcla rápida en un vertedero triangular de 90° del documento de Tratamiento de agua para consumo humano: plantas de filtración rápida del Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS). De esta forma se puede corroborar el adecuado funcionamiento del sistema actual al determinar si los valores de operación se encuentran en los parámetros establecidos. Todo esto se desarrolla mediante una hoja programada en Microsoft Excel.

## Capítulo III – Análisis de resultados

### Primera prueba - dimensionamiento del módulo actual

Luego de procesar el dimensionamiento tomado en sitio, se presenta como un modelo isométrico en la herramienta de AutoCAD de las siguientes formas, teniendo sus dimensiones reales disponibles. La siguiente se presenta como un modelo tridimensional de la cámara de coagulación:

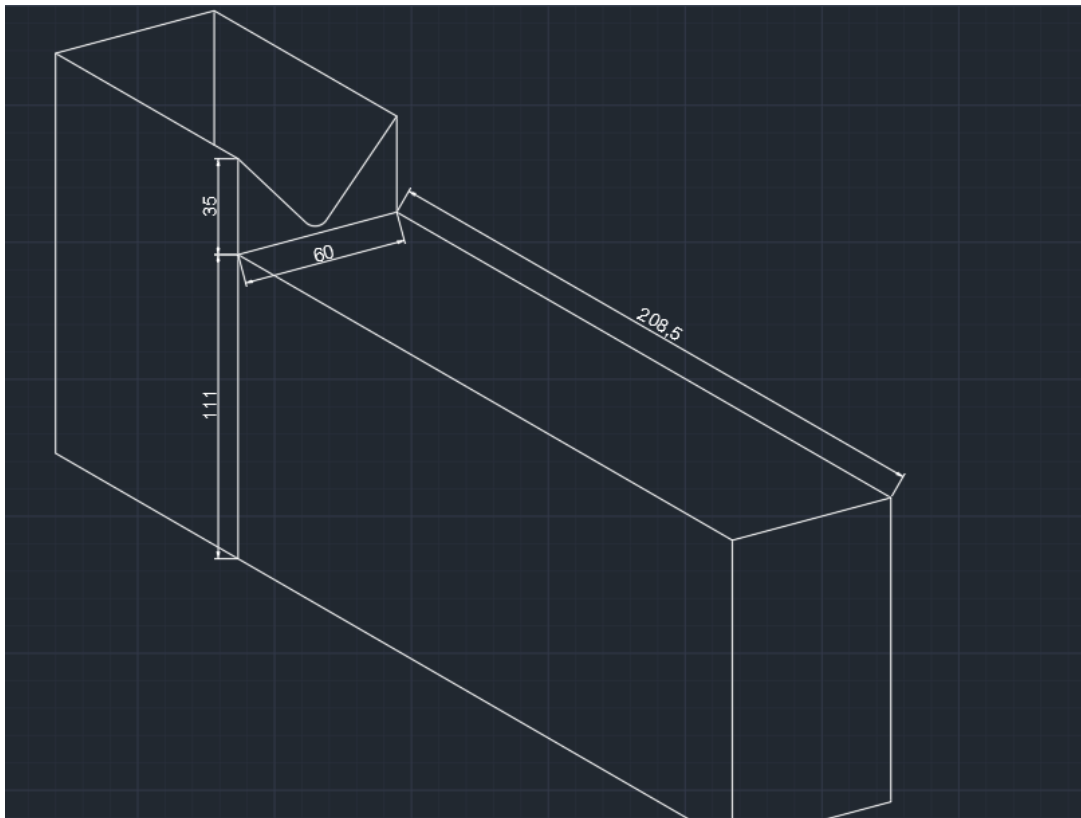


Figura 19 - Dimensionamiento del módulo de coagulación (en centímetros)

*Fuente: propia*

Se tiene la vista en planta de la cámara previa al vertedero tipo triangular, donde se vierte el agua cruda antes de aplicársele el coagulante en el punto de agitación máxima:

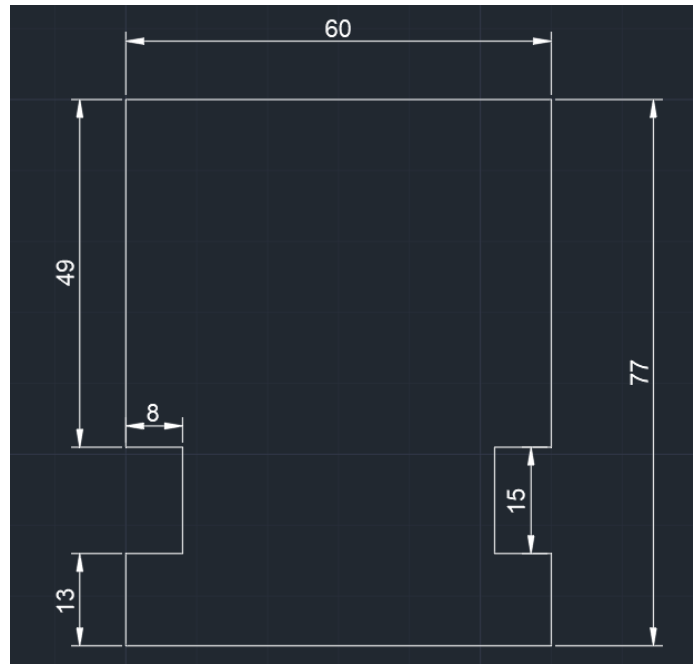


Figura 20 - Vista en planta de la sección superior del módulo de coagulación (en centímetros)

*Fuente: propia*

Finalmente, las dimensiones del vertedero triangular:

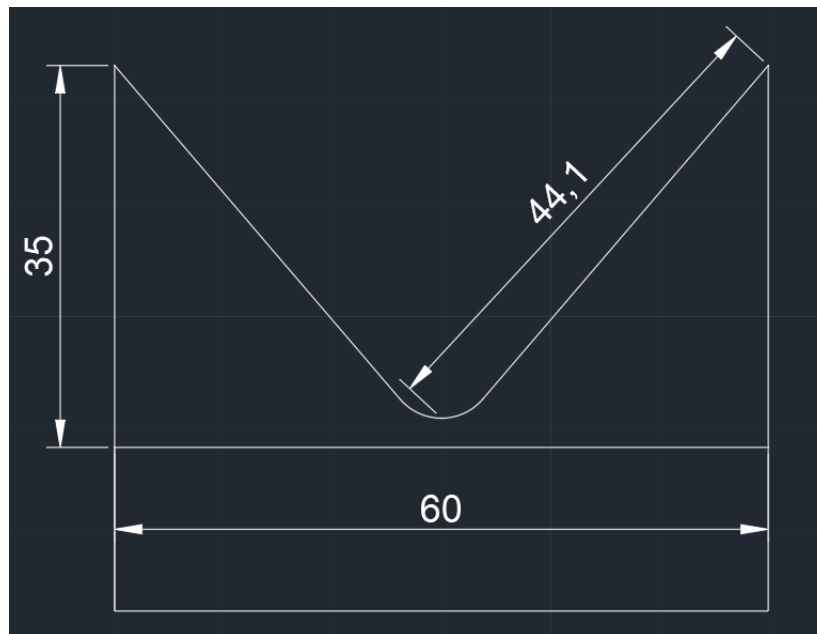


Figura 21 - Dimensiones de la sección triangular del vertedero (en centímetros)

*Fuente: propia*

## Segunda prueba – Punto de aplicación del agente coagulante

Evaluando el punto de aplicación del módulo, se tiene que la tubería por donde ingresa el agente coagulante está colocada directamente encima del punto de mayor agitación, donde idealmente comienza el salto hidráulico en un sistema como tal. No obstante; el coagulante se aplica de forma puntual, no de forma distribuida.



Figura 22 - Punto de aplicación del agente coagulante en el módulo de coagulación de la planta potabilizadora

*Fuente: propia*

### Tercera prueba – Tiempo de retención en el sistema

Para determinar el tiempo real del sistema, se desarrolló la prueba de trazadores utilizando la sal común como trazador, siendo un agente químico soluble. Para la mezcla se adicionaron cinco gramos (5 g) a la muestra de agua. Esto con la finalidad de aplicarse directamente en la fuente de agua, siendo vertida en la cámara de entrada, previa a la coagulación y tomando la muestra posteriormente en periodos determinados. Las muestras se tomaron en diferentes periodos, a los segundos de aplicación en el fluido para uno, dos, tres y cuatro segundos.



Figura 23 - Trazador químico soluble a utilizar en la prueba de trazadores

*Fuente: propia*



Para determinar el tiempo de retención real, se tiene la siguiente fórmula dependiente del volumen del agua en el tanque y del caudal a utilizar, donde:

$$\text{Tiempo de retención: } \frac{V}{Q}$$

V: Volumen de agua en el tanque de coagulación (en  $m^3$ )

Q: Caudal con el que opera la planta (en  $m^3/s$ )

Inicialmente, la planta se encuentra operando con un caudal de dieciséis litros por segundo (16 L/s), o sea  $0,016 m^3/s$



Figura 24 - Caudal utilizado en planta

*Fuente: propia*

Para determinar el volumen, se dimensiona de la siguiente forma para vertederos rectangulares o triangulares:



Figura 25 - Vertedero triangular

Fuente: Hidráulica fácil. (Screenshot) <https://www.hidraulicafacil.com/p/aplicacion-android-vertedor-triangular.html>

Debido a los componentes y estructura del sistema de coagulación, carece de alguna rampa o elemento complementario que pueda determinar una altura para la columna de agua en el punto de agitación máxima, lo que cambia las condiciones con las cuales se evalúa en el nivel matemático.

Para el volumen del tanque, se tiene que:

$$\text{Volumen: } L \cdot B \cdot H$$

Donde Longitud de agitación L: 0,60 m

B: 0,18 m

Altura de agitación H: 0,23 m

Haciendo que el volumen sea:

$$\text{Volumen: } 0,60 \text{ m} \cdot 0,18 \text{ m} \cdot 0,23 \text{ m}$$

$$\text{Volumen: } 0,025 \text{ m}^3$$

Lo que lleva a determinar el tiempo de retención actual en el sistema:

$$\text{Tiempo de retención: } \frac{V}{Q}$$

Donde

$$\text{Volumen: } 0,025 \text{ m}^3$$

$$\text{Caudal } Q = 0,016 \text{ m}^3/\text{s}$$

Haciendo el tiempo de retención sea:

$$TR = V/Q$$

$$TR = \frac{0,025 \text{ m}^3}{0,016 \text{ m}^3/\text{s}}$$

$$TR = 1,65 \text{ s}$$

#### **Cuarta prueba – Intensidad de la mezcla**

Para determinar la intensidad de la mezcla, se requiere calcular el gradiente de velocidad de la mezcla. Esto mediante la medición de la temperatura del agua cruda con un conductímetro que provee tanto la temperatura como la conductividad en las muestras.



Figura 26 - Conductímetro portátil evaluando la muestra de agua

*Fuente: propia*

Como se evidencia en la figura anterior, el agua con la que opera la planta posee una temperatura de 24,6 °C (grados Celsius). Para efectos de este proyecto, se redondea y se trabaja con 25 °C.

Dicho valor permite establecer el valor de  $\sqrt{\gamma/\mu}$  para desarrollar la fórmula del gradiente de velocidad. Para este valor, se tiene de forma tal:

Temperatura (°C)	$\sqrt{\gamma/\mu}$
0	2.336,94
4	2.501,56
10	2.736,53
15	2.920,01
20	3.114,64
25	3.266,96

Figura 27 - Valores de  $\sqrt{\gamma/\mu}$

Fuente: L. Vargas, 2004. Tratamiento de agua para consumo humano: plantas de filtración rápida, OPS

Para una temperatura de veinticinco grados Celsius (25 °C), se trabaja con  $\sqrt{\gamma/\mu}$  : 3266,96

Finalmente, teniendo la fórmula para determinar el gradiente de velocidad:

$$G: \sqrt{\gamma/\mu} \cdot \sqrt{H/TR}$$

Donde  $\sqrt{\gamma/\mu}$  : 3266,96

H: 0,18

TR: 1,6 s

Haciendo que el gradiente de velocidad sea:

$$G: \sqrt{\gamma/\mu} \cdot \sqrt{H/TR}$$

$$G: 3267 \times \sqrt{0,18 \times 1,6}$$

$$G: 3267 \times 0,335$$

$$G: 1100 \text{ s}^{-1}$$

Tipo de mezclador	$G s^{-1}$
Retromezcladores	500-1.000
Resalto hidráulico	700-1.200
Difusores	700-1.000
Mezcladores en línea	3.000-5.000

Tabla 2 - Variación del gradiente de velocidad de acuerdo con el tipo de mezclador

Fuente: L. Vargas, 2004. Tratamiento de agua para consumo humano: plantas de filtración rápida, OPS

Adicionalmente se toma en cuenta la conductividad de las muestras con las que se tomó el tiempo de retención, para un pico casi instantáneo al momento de su aplicación y el declive al paso de los segundos, descrito de la siguiente forma:

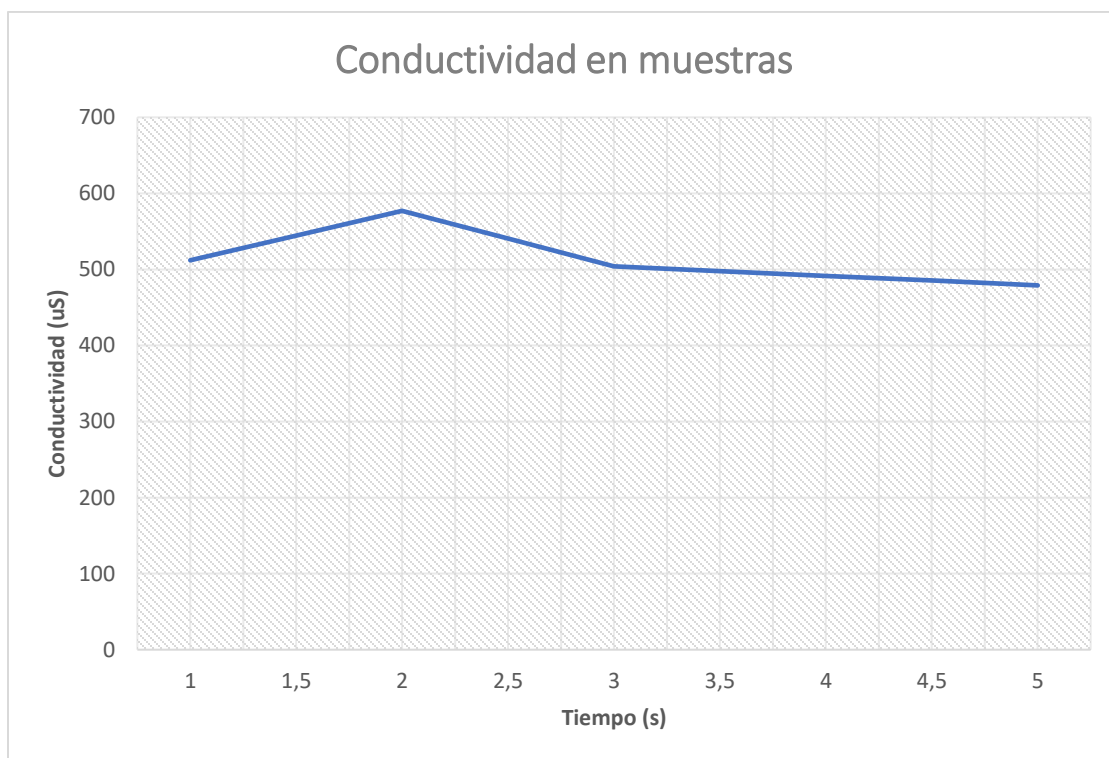


Figura 28 - Conductividad den muestras del sistema de coagulación de la planta

Fuente: propia

## Quinta prueba – Condiciones hidráulicas en el módulo de coagulación

Para la evaluación de condiciones hidráulicas del sistema, es necesaria la realización de la matriz de comprobación de acuerdo con los parámetros de entrada necesarios para los diversos cálculos. Dicha evaluación se realiza mediante el cuadro 2.7 del capítulo 2 del libro de Tratamiento de agua para consumo humano: plantas de filtración rápida: comprobación de condiciones de mezcla rápida en un vertedero triangular de 90°.

Se requiere realizar los cálculos para diferentes caudales: el caudal de operación de  $Q = 16 \text{ L/s}$  y el caudal de capacidad máxima del sistema  $Q = 25 \text{ L/s}$ . Adicionalmente, para el gradiente de velocidad se utilizan dos temperaturas: temperatura diurna de  $T = 25 \text{ °C}$  y temperatura nocturna de  $T = 20 \text{ °C}$ .

### Desarrollo de cálculos con caudal de 16 L / s

**Primer punto:** determinar la altura de la lámina de agua sobre el vertedero.

Tomando el caudal de operación como  $Q = 16 \text{ L/s}$

Pasando las unidades a metros cúbicos  $Q = 0,016 \text{ m}^3/\text{s}$

Se tiene la fórmula para la altura de la lámina de agua sobre el vertedero como:

$$h = (Q/1,4)^{0,4}$$

Sustituyendo en fórmula:

$$h = (0,016\text{m}^3/\text{s}/1,4)^{0,4}$$

$$h = 0,167 \text{ m}$$

**Segundo punto:** determinar el ancho de la lámina vertiente y el ancho del canal.

Se tiene la fórmula para el ancho de la lámina y del canal como:

$$L = 2h$$

Sustituyendo, se tiene que:

$$L = 2 * 0,167\text{m}$$

$$L = 0,334 \text{ m}$$

**Tercer punto:** cálculo del caudal promedio unitario.

Tomando el ancho  $B = L$ ,

La fórmula para el cálculo del caudal promedio unitario es:

$$q = Q/B$$

Sustituyendo en la fórmula:

$$q = 0,016 \text{ m}^3/\text{s}/0,334 \text{ m}$$

$$q = 0,048 \text{ m}^3/\text{sXm}$$

**Cuarto punto:** cálculo de la altura crítica con la aceleración gravitacional.

Se tiene la fórmula para la altura crítica como:

$$h_c = \sqrt[3]{q^2/g}$$

Sustituyendo en fórmula:

$$h_c = \sqrt[3]{0,048 \text{ m}^3/\text{sXm}^2/9,81\text{m}/\text{s}^2}$$

$$h_c = 0,062 \text{ m}$$

**Quinto punto:** cálculo de la altura desde el vértice del vertedero hasta el fondo del canal aguas abajo.

Tomando el valor  $P$  del sistema de coagulación,  $P = 1,11 \text{ m}$

Se tiene la fórmula para la altura al inicio del resalto hidráulico como:

$$h_1 = 1,41 * h_c / \sqrt{2,56 + P / h_c}$$

Sustituyendo en la fórmula, se tiene que:

$$h_1 = 1,41 * 0,062 \text{ m} / \sqrt{2,56 + 1,11 \text{ m} / 0,062 \text{ m}}$$

$$h_1 = 0,019 \text{ m}$$



**Sexto punto:** cálculo de la velocidad al inicio del resalto.

Se tiene la fórmula de la velocidad al inicio del resalto como:

$$V_1 = q/h_1$$

Sustituyendo en fórmula:

$$V_1 = 0,048 \text{ m}^3/\text{s} / 0,019 \text{ m}$$

$$V_1 = 2,501 \text{ m/s}$$

**Séptimo punto:** cálculo del número de Froude.

Para el cálculo del número de Froude, se tiene la fórmula:

$$F_1 = V_1 / \sqrt{g * h_1}$$

Sustituyendo, se tiene que:

$$F_1 = 2,501 \text{ m/s} / \sqrt{9,81 \text{ m/s}^2 * 0,019 \text{ m}}$$

$$F_1 = 5,773$$

**Octavo punto:** cálculo de la altura de agua después del resalto.

Se tiene la fórmula para la altura después del resalto como:

$$h_2 = \left( \frac{h_1}{2} \right) * (\sqrt{1 + 8F_1^2} - 1)$$

Sustituyendo en la fórmula:

$$h_2 = \left( \frac{0,019 \text{ m}}{2} \right) * (\sqrt{1 + 8 * 5,773^2} - 1)$$

$$h_2 = 0,056 \text{ m}$$

**Noveno punto:** cálculo de la velocidad al final del resalto hidráulico.

Se tiene la fórmula para la velocidad final como:

$$V_2 = q/h_2$$

Sustituyendo los valores:

$$V_2 = 0,048 \text{ m}^3/\text{s} \times \text{m} / 0,056 \text{ m}$$

$$V_2 = 0,852 \text{ m/s}$$

**Décimo punto:** cálculo de la energía disipada en el resalto hidráulico.

Para la fórmula de la energía disipada en el resalto hidráulico, se tiene lo siguiente:

$$h_p = (h_2 - h_1)^3 / (4 * h_1 * h_2)$$

Sustituyendo en la fórmula:

$$h_p = (0,056 \text{ m} - 0,019 \text{ m})^3 / (4 * 0,019 \text{ m} * 0,056 \text{ m})$$

$$h_p = 0,012 \text{ m}$$

**Undécimo punto:** cálculo de la longitud del resalto hidráulico.

Para la longitud del resalto hidráulico, se tiene la siguiente fórmula:

$$L_m = (6 * h_2 - h_1)$$

Sustituyendo en la fórmula:

$$L_m = (6 * 0,056 \text{ m} - 0,019 \text{ m})$$

$$L_m = 0,222 \text{ m}$$

**Duodécimo punto:** cálculo de la distancia del vertedero a la sección 1.

Para la distancia del vertedero a la sección 1, es decir, el fondo del canal es la siguiente:

$$L' = 4,3 * P * (h_c/P)^{0,9}$$

Sustituyendo en la ecuación:

$$L' = 4,3 * 1,11 \text{ m} * (0,062 \text{ m} / 1,11 \text{ m})^{0,9}$$

$$L' = 0,354 \text{ m}$$

**Décimo tercer punto:** cálculo de la velocidad promedio en el resalto.

Para el cálculo de la velocidad promedio en el punto del resalto, se tiene:

$$V_m = (V_2 + V_1) / 2$$

Sustituyendo en la ecuación:

$$V_m = (0,852 \text{ m/s} + 2,501 \text{ m/s}) / 2$$

$$V_m = 1,677 \text{ m/s}$$

**Décimo cuarto punto:** cálculo del tiempo de mezcla.

Para el cálculo del tiempo de mezcla, se tiene que:

$$T = L_m / V_m$$

Sustituyendo en la fórmula:

$$T = 0,222 \text{ m} / 1,677 \text{ m/s}$$

$$T = 0,132 \text{ s}$$

**Décimo quinta prueba:** cálculo del gradiente de velocidad.

Se establece la temperatura diurna como  $T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ , por lo que  $\sqrt{\gamma/\mu} = 3266,960$

Entonces, se tiene para el cálculo del gradiente de velocidad como:

$$G = \sqrt{\gamma/\mu} * \sqrt{h_c/T}$$

Sustituyendo en la fórmula:

$$G = 3266,960 * \sqrt{0,062 \text{ m} / 0,132 \text{ s}}$$

$$G = 975,108 \text{ s}^{-1}$$

Ahora estableciendo la temperatura nocturna como  $T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ , por lo que  $\sqrt{\gamma/\mu} = 3114,640$

Entonces, se tiene para el cálculo del gradiente de velocidad como:

$$G = \sqrt{\gamma/\mu} * \sqrt{h_c/T}$$

Sustituyendo en la fórmula:

$$G = 3114,640 * \sqrt{0,042 \text{ m} / 0,132 \text{ s}}$$

$$G = 929,644 \text{ s}^{-1}$$

Finalmente, los cálculos se pueden visualizar de la siguiente forma:

Datos	Cálculos	Resultado
$Q = 16 \text{ L/s}$ $Q$ $= 0,016 \text{ m}^3/\text{s}$	$h = (Q/1,4)^{0,4}$ $h = (0,016 \text{ m}^3/\text{s} / 1,4)^{0,4}$ $h = 0,167 \text{ m}$	Altura de la lámina de agua sobre el vertedero
$L = 2h$	$L = 2 * 0,167 \text{ m}$ $L = 0,334 \text{ m}$	Ancho de la lámina vertiente y el ancho del canal.
$B = L$	$q = Q/B$ $= 0,016 \text{ m}^3/\text{s} / 0,334 \text{ m}$ $q = 0,048 \text{ m}^3/\text{sXm}$	Caudal promedio unitario
	$h_c = \sqrt[3]{q^2/g}$ $h_c = \sqrt[3]{0,048 \text{ m}^3/\text{sXm}^2 / 9,81 \text{ m/s}^2}$ $h_c = 0,062 \text{ m}$	Altura crítica con la aceleración gravitacional.
$P = 1,11 \text{ m}$	$h_1 = 1,41 * h_c / \sqrt{2,56 + P / h_c}$ $h_1 = 1,41 * 0,062 \text{ m} / \sqrt{2,56 + 1,11 \text{ m} / 0,062 \text{ m}}$ $h_1 = 0,019 \text{ m}$	Altura desde el vértice del vertedero hasta el fondo del canal aguas abajo.

	$V_1 = q/h_1$ $V_1 = 0,048 \text{ m}^3/\text{sXm}/0,019 \text{ m}$ $V_1 = 2,501 \text{ m/s}$	Velocidad al inicio del resalto.
	$F_1 = V_1/\sqrt{g * h_1}$ $F_1 = 2,501 \text{ m/s}/\sqrt{9,81\text{m/s}^2 * 0,019 \text{ m}}$ $F_1 = 5,773$	Número de Froude
	$h_2 = \left(\frac{h_1}{2}\right) * (\sqrt{1 + 8F_1} - 1)$ $h_2 = \left(0,019 \text{ m}/2\right) * (\sqrt{1 + 8 * 5,773} - 1)$ $h_2 = 0,056 \text{ m}$	Altura de agua después del resalto.
	$V_2 = q/h_2$ $V_2 = 0,048 \text{ m}^3/\text{sXm}/0,056 \text{ m}$ $V_2 = 0,852 \text{ m/s}$	Velocidad al final del resalto hidráulico.
	$h_p = (h_2 - h_1)^3/(4 * h_1 * h_2)$ $h_p = (0,056 \text{ m} - 0,019 \text{ m})^3/(4 * 0,019 \text{ m} * 0,056 \text{ m})$ $h_p = 0,012 \text{ m}$	Energía disipada en el resalto hidráulico.
	$L_m = (6 * h_2 - h_1)$ $L_m = (6 * 0,056 \text{ m} - 0,019 \text{ m})$ $L_m = 0,222 \text{ m}$	Longitud del resalto hidráulico.
	$L' = 4,3 * P * (h_c/P)^{0,9}$ $L' = 4,3 * 1,11 \text{ m} * (0,062 \text{ m}/1,11 \text{ m})^{0,9}$ $L' = 0,354 \text{ m}$	Distancia del vertedero a la sección 1.

	$V_m = (V_2 + V_1) / 2$ $V_m = (0,852 \text{ m/s} + 2,501 \text{ m/s}) / 2$ $V_m = 1,677 \text{ m/s}$	Velocidad promedio en el resalto.
	$T = L_m / V_m$ $T = 0,222 \text{ m} / 1,677 \text{ m/s}$ $T = 0,132 \text{ s}$	Tiempo de mezcla.
$T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ $\sqrt{\gamma/\mu}$ $= 3266,960$	$G = \sqrt{\gamma/\mu} * \sqrt{h_c/T}$ $G = 3266,960 * \sqrt{0,062 \text{ m}/0,132 \text{ s}}$ $G = 975,108 \text{ s}^{-1}$	Gradiente de velocidad.
$T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ $\sqrt{\gamma/\mu}$ $= 3114,640$	$G = \sqrt{\gamma/\mu} * \sqrt{h_c/T}$ $G = 3114,640 * \sqrt{0,042 \text{ m}/0,132 \text{ s}}$ $G = 929,644 \text{ s}^{-1}$	Gradiente de velocidad.

Tabla 3 - Comprobación de condiciones para caudal operativo

*Fuente: propia*

### Desarrollo de cálculos con caudal de 25 L / s

**Primer punto:** determinar la altura de la lámina de agua sobre el vertedero.

Tomando el caudal de operación como  $Q = 25 \text{ L/s}$

Pasando las unidades a metros cúbicos  $Q = 0,025 \text{ m}^3/\text{s}$

Se tiene la fórmula para la altura de la lámina de agua sobre el vertedero como:

$$h = (Q/1,4)^{0,4}$$

Sustituyendo en fórmula:

$$h = (0,025\text{m}^3/\text{s}/1,4)^{0,4}$$

$$h = 0,200 \text{ m}$$

**Segundo punto:** determinar el ancho de la lámina vertiente y el ancho del canal.

Se tiene la fórmula para el ancho de la lámina y del canal como:

$$L = 2h$$

Sustituyendo, se tiene que:

$$L = 2 * 0,200\text{m}$$

$$L = 0,400 \text{ m}$$

**Tercer punto:** cálculo del caudal promedio unitario.

Tomando el ancho  $B = L$ ,

La fórmula para el cálculo del caudal promedio unitario es:

$$q = Q/B$$

Sustituyendo en la fórmula:

$$q = 0,025 \text{ m}^3/\text{s}/0,400 \text{ m}$$

$$q = 0,063 \text{ m}^3/\text{sXm}$$

**Cuarto punto:** cálculo de la altura crítica con la aceleración gravitacional.

Se tiene la fórmula para la altura crítica como:

$$h_c = \sqrt[3]{q^2/g}$$

Sustituyendo en fórmula:

$$h_c = \sqrt[3]{0,063 \text{ m}^3/\text{sXm}^2/9,81\text{m}/\text{s}^2}$$

$$h_c = 0,074 \text{ m}$$

**Quinto punto:** cálculo de la altura desde el vértice del vertedero hasta el fondo del canal aguas abajo.

Tomando el valor P del sistema de coagulación,  $P = 1,11 \text{ m}$

Se tiene la fórmula para la altura al inicio del resalto hidráulico como:

$$h_1 = 1,41 * h_c / \sqrt{2,56 + P / h_c}$$

Sustituyendo en la fórmula, se tiene que:

$$h_1 = 1,41 * 0,074 \text{ m} / \sqrt{2,56 + 1,11 \text{ m} / 0,074 \text{ m}}$$

$$h_1 = 0,025 \text{ m}$$

**Sexto punto:** cálculo de la velocidad al inicio del resalto.

Se tiene la fórmula de la velocidad al inicio del resalto como:

$$V_1 = q/h_1$$

Sustituyendo en fórmula:

$$V_1 = 0,074 \text{ m}^3/\text{s} / 0,025 \text{ m}$$

$$V_1 = 2,531 \text{ m/s}$$

**Séptimo punto:** cálculo del número de Froude.

Para el cálculo del número de Froude, se tiene la fórmula:

$$F_1 = V_1 / \sqrt{g * h_1}$$

Sustituyendo, se tiene que:

$$F_1 = 2,531 \text{ m/s} / \sqrt{9,81 \text{ m/s}^2 * 0,025 \text{ m}}$$

$$F_1 = 5,141$$

**Octavo punto:** cálculo de la altura de agua después del resalto.

Se tiene la fórmula para la altura después del resalto como:

$$h_2 = \left( \frac{h_1}{2} \right) * (\sqrt{1 + 8F_1} - 1)$$

Sustituyendo en la fórmula:



$$h_2 = \left(0,025 \text{ m}/2\right) * \left(\sqrt{1 + 8 * 5,141} - 1\right)$$

$$h_2 = 0,068 \text{ m}$$

**Noveno punto:** cálculo de la velocidad al final del resalto hidráulico.

Se tiene la fórmula para la velocidad final como:

$$V_2 = q/h_2$$

Sustituyendo los valores:

$$V_2 = 0,074 \text{ m}^3/\text{sXm}/0,068 \text{ m}$$

$$V_2 = 0,922 \text{ m/s}$$

**Décimo punto:** cálculo de la energía disipada en el resalto hidráulico.

Para la fórmula de la energía disipada en el resalto hidráulico, se tiene lo siguiente:

$$h_p = (h_2 - h_1)^3 / (4 * h_1 * h_2)$$

Sustituyendo en la fórmula:

$$h_p = (0,068 \text{ m} - 0,025 \text{ m})^3 / (4 * 0,025 \text{ m} * 0,068 \text{ m})$$

$$h_p = 0,012 \text{ m}$$

**Undécimo punto:** cálculo de la longitud del resalto hidráulico.

Para la longitud del resalto hidráulico, se tiene la siguiente fórmula:

$$L_m = (6 * h_2 - h_1)$$

Sustituyendo en la fórmula:

$$L_m = (6 * 0,068 \text{ m} - 0,025 \text{ m})$$

$$L_m = 0,259 \text{ m}$$

**Duodécimo punto:** cálculo de la distancia del vertedero a la sección 1.

Para la distancia del vertedero a la sección 1, es decir, el fondo del canal es la siguiente:

$$L' = 4,3 * P * (h_c/P)^{0,9}$$

Sustituyendo en la ecuación:

$$L' = 4,3 * 1,11 \text{ m} * (0,074 \text{ m}/1,11 \text{ m})^{0,9}$$

$$L' = 0,415 \text{ m}$$

**Décimo tercer punto:** cálculo de la velocidad promedio en el resalto.

Para el cálculo de la velocidad promedio en el punto del resalto, se tiene:

$$V_m = (V_2 + V_1) / 2$$

Sustituyendo en la ecuación:

$$V_m = (0,922 \text{ m/s} + 2,531 \text{ m/s}) / 2$$

$$V_m = 1,727 \text{ m/s}$$

**Décimo cuarto punto:** cálculo del tiempo de mezcla.

Para el cálculo del tiempo de mezcla, se tiene que:

$$T = L_m / V_m$$

Sustituyendo en la fórmula:

$$T = 0,259 \text{ m} / 1,727 \text{ m/s}$$

$$T = 0,150 \text{ s}$$

**Décimo quinta prueba:** cálculo del gradiente de velocidad.

Se establece la temperatura diurna como  $T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ , por lo que  $\sqrt{\gamma/\mu} = 3266,960$

Entonces, se tiene para el cálculo del gradiente de velocidad como:

$$G = \sqrt{\gamma/\mu} * \sqrt{h_c/T}$$

Sustituyendo en la fórmula:

$$G = 3266,960 * \sqrt{0,074 \text{ m}/0,150 \text{ s}}$$

$$G = 923,029 \text{ s}^{-1}$$

Ahora estableciendo la temperatura nocturna como  $T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ , por lo que  $\sqrt{\gamma/\mu} = 3114,640$

Entonces, se tiene para el cálculo del gradiente de velocidad como:

$$G = \sqrt{\gamma/\mu} * \sqrt{h_c/T}$$

Sustituyendo en la fórmula:

$$G = 3114,640 * \sqrt{0,074 \text{ m}/0,150 \text{ s}}$$

$$G = 879,994 \text{ s}^{-1}$$

De forma tal que los cálculos anteriores se pueden visualizar de la siguiente forma:

Datos	Cálculos	Resultado
$Q = 25 \text{ L/s}$ $Q = 0,025 \text{ m}^3/\text{s}$	$h = (Q/1,4)^{0,4}$ $h = (0,025 \text{ m}^3/\text{s} / 1,4)^{0,4}$ $h = 0,200 \text{ m}$	Altura de la lámina de agua sobre el vertedero
$L = 2h$	$L = 2 * 0,200 \text{ m}$ $L = 0,400 \text{ m}$	Ancho de la lámina vertiente y el ancho del canal.
$B = L$	$q = Q/B$ $q = 0,025 \text{ m}^3/\text{s} / 0,400 \text{ m}$ $q = 0,063 \text{ m}^3/\text{sXm}$	Caudal promedio unitario
	$h_c = \sqrt[3]{q^2/g}$	Altura crítica con la

	$h_c = \sqrt[3]{0,063 \text{ m}^3/\text{sXm}^2 / 9,81\text{m/s}^2}$ $h_c = 0,074 \text{ m}$	aceleración gravitacional.
$P = 1,11 \text{ m}$	$h_1 = 1,41 * h_c / \sqrt{2,56 + P / h_c}$ $h_1 = 1,41 * 0,074 \text{ m} / \sqrt{2,56 + 1,11 \text{ m} / 0,074 \text{ m}}$ $h_1 = 0,025 \text{ m}$	Altura desde el vértice del vertedero hasta el fondo del canal aguas abajo.
	$V_1 = q/h_1$ $V_1 = 0,074 \text{ m}^3/\text{sXm}/0,025 \text{ m}$ $V_1 = 2,531 \text{ m/s}$	Velocidad al inicio del resalto.
	$F_1 = V_1/\sqrt{g * h_1}$ $F_1 = 2,531 \text{ m/s}/\sqrt{9,81\text{m/s}^2 * 0,025 \text{ m}}$ $F_1 = 5,141$	Número de Froude
	$h_2 = \left(\frac{h_1}{2}\right) * (\sqrt{1 + 8F_1} - 1)$ $h_2 = \left(\frac{0,025 \text{ m}}{2}\right) * (\sqrt{1 + 8 * 5,141} - 1)$ $h_2 = 0,068 \text{ m}$	Altura de agua después del resalto.
	$V_2 = q/h_2$ $V_2 = 0,074 \text{ m}^3/\text{sXm}/0,068 \text{ m}$ $V_2 = 0,922 \text{ m/s}$	Velocidad al final del resalto hidráulico.
	$h_p = (h_2 - h_1)^3 / (4 * h_1 * h_2)$ $h_p = (0,068 \text{ m} - 0,025 \text{ m})^3 / (4 * 0,025 \text{ m} * 0,068 \text{ m})$ $h_p = 0,012 \text{ m}$	Energía disipada en el resalto hidráulico.

	$L_m = (6 * h_2 - h_1)$ $L_m = (6 * 0,068 \text{ m} - 0,025 \text{ m})$ $L_m = 0,259 \text{ m}$	Longitud del resalto hidráulico.
	$L' = 4,3 * P * (h_c/P)^{0,9}$ $L' = 4,3 * 1,11 \text{ m} * (0,074 \text{ m}/1,11 \text{ m})^{0,9}$ $L' = 0,415 \text{ m}$	Distancia del vertedero a la sección 1.
	$V_m = (V_2 + V_1) / 2$ $V_m = (0,922 \text{ m/s} + 2,531 \text{ m/s}) / 2$ $V_m = 1,727 \text{ m/s}$	Velocidad promedio en el resalto.
	$T = L_m / V_m$ $T = 0,259 \text{ m} / 1,727 \text{ m/s}$ $T = 0,150 \text{ s}$	Tiempo de mezcla.
$T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ $\sqrt{\gamma/\mu}$ $= 3266,960$	$G = \sqrt{\gamma/\mu} * \sqrt{h_c/T}$ $G = 3266,960 * \sqrt{0,074 \text{ m}/0,150 \text{ s}}$ $G = 923,029 \text{ s}^{-1}$	Gradiente de velocidad.
$T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ $\sqrt{\gamma/\mu}$ $= 3114,640$	$G = \sqrt{\gamma/\mu} * \sqrt{h_c/T}$ $G = 3114,640 * \sqrt{0,074 \text{ m}/0,150 \text{ s}}$ $G = 879,994 \text{ s}^{-1}$	Gradiente de velocidad.

Tabla 4 - Comprobación de condiciones para caudal máximo de diseño

Fuente: propia

Debido a que las condiciones del sistema de coagulación se encuentran dentro de los parámetros aceptados, se opta por desarrollar la adición de un sistema de rampa con un difusor para aumentar el gradiente de velocidad y con ello, la eficiencia del proceso, y, por lo tanto, la calidad del agua.

Para el diseño de la rampa, se trabaja con el capítulo dos del libro de Tratamiento de agua para consumo humano: plantas de filtración rápida, con la comprobación de las condiciones de mezcla de un canal rectangular con cambio de pendiente o mezclador de tipo rampa.

Primer punto: cálculo de caudal unitario.

Para el primer punto, se trabaja con la capacidad máxima del caudal  $Q$  en el sistema, que sería de veinticinco litros por segundo ( $25 \text{ L/s}$ ) y se utiliza el ancho del canal  $B$ , o sea sesenta centímetros (60 cm).

Se tiene la fórmula:

$$q = Q/B$$

Sustituyendo los valores y trabajando en unidades estándares de metro cúbico sobre segundo y metros:

$$q = (0,025 \text{ m}^3/\text{s}) / 0,60 \text{ m}$$

$$q = 0,042 \text{ m}^3/\text{s/m}$$

Segundo punto: cálculo de la inclinación de la rampa.

Para el cálculo de la inclinación de la rampa se proponen las siguientes dimensiones: para la longitud de la rampa en el eje  $X$  se propone dos metros de largo (1,30 m) y para la altura  $E_o$  de la rampa se propone cero coma tres metros (0,3 m). Por lo que se tiene la siguiente fórmula:

$$\theta = \text{TAN}^{-1}(E_o/X)$$

Sustituyendo en la fórmula, se tiene que:

$$\theta = \text{TAN}^{-1}(0,30 \text{ m}/1,30 \text{ m})$$

$$\theta = 12,56^\circ$$

Tercer punto: cálculo del factor K

Se establece el número de Froude como una constante de 5,5, lo que se utiliza en la ecuación del cálculo de K:

$$K = \text{COS } \theta (F + (\text{COS } \frac{\theta}{2} F))$$

Sustituyendo en la fórmula, se tiene que:

$$K = \text{COS } 12,56^\circ (5,5 + (\text{COS } \frac{12,56^\circ}{2} * 5,5))$$

$$K = 5,455$$

Cuarto punto: cálculo de factor de ecuación.

Para el cálculo del factor de ecuación  $\Theta$ , se tiene la fórmula:

$$\Theta = \text{COS}^{-1}(F^2 / (\frac{2}{3} F K)^{3/2})$$

Sustituyendo en la fórmula, se tiene que:

$$\Theta = \text{COS}^{-1}(5,5^2 / (\frac{2}{3} * 5,5 * 5,455)^{3/2})$$

$$\Theta = 70,235^\circ$$

Quinto punto: relación de alturas antes y después del resalto.

Para el cálculo de la relación a de alturas antes y después del resalto, se tiene la fórmula:

$$a = \left(8F \frac{K}{3}\right)^{0,5} (\text{COS } \Theta/3)$$

Sustituyendo en fórmula, se tiene que:

$$a = \left(8 * 5,5 * \frac{5,455}{3}\right)^{0,5} (\text{COS } 70,235/3)$$

$$a = 8,208$$

Sexto punto: cálculo de altura antes del resalto.

Para el cálculo de la altura  $d_1$  antes del resalto, se tiene la fórmula:

$$d_1 = \sqrt[3]{q^2 / (F^2 g)}$$

Sustituyendo en la fórmula, donde la gravedad es  $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ :

$$d_1 = \sqrt[3]{0,042^2 / (5,5^2 * 9,81)}$$

$$d_1 = 0,018 \text{ m}$$

Séptimo punto: cálculo de la profundidad antes del resalto.

Para el cálculo de la profundidad  $h_1$  antes del resalto, se tiene la fórmula:

$$h_1 = d_1 / \cos \theta$$

Sustituyendo en la fórmula, se tiene que:

$$h_1 = 0,018 \text{ m} / \cos 8,48$$

$$h_1 = 0,018 \text{ m}$$

Octavo punto: cálculo de la velocidad al inicio del resalto.

Para el cálculo de la velocidad  $V_1$  al inicio del resalto, se tiene la fórmula:

$$V_1 = q / h_1$$

Sustituyendo en la fórmula:

$$V_1 = 0,042 \text{ m}^3 / \text{s} / \text{m} / 0,018 \text{ m}$$

$$V_1 = 2,257 \text{ m/s}$$

Noveno punto: comprobación del número de Froude.



Para la comprobación del número de Froude, el valor debe de mantenerse entre 4,5 y 9,0 para conseguir un salto estable, a excepción de la canaleta Parshall, cuyo rango es inferior. Se tiene la fórmula:

$$F = \frac{V_1}{\sqrt{g h_1}}$$

Sustituyendo en la fórmula:

$$F = \frac{2,257 \text{ m/s}}{\sqrt{9,81 \text{ m/s}^2 * 0,018 \text{ m}}}$$

$$F = 5,304$$

Por lo que el número de Froude se encuentra en el rango óptimo para el desarrollo de una rampa en el sistema de coagulación.

Décimo punto: cálculo de la profundidad después del resalto.

Para el cálculo de la profundidad  $h_2$  después del resalto, se tiene la fórmula:

$$h_2 = a d_1$$

Por lo que al sustituir en la fórmula:

$$h_2 = 8,208 * 0,018 \text{ m}$$

$$h_2 = 0,148 \text{ m}$$

Undécimo punto: cálculo de la longitud del resalto.

Para el cálculo de la longitud  $L$  del resalto se tiene la fórmula:

$$L = 6 (h_2 - h_1)$$

Al sustituir en la fórmula, se tiene que:

$$L = 6 (0,148 \text{ m} - 0,018 \text{ m})$$

$$L = 0,777 \text{ m}$$

Duodécimo punto: cálculo de la pérdida de carga.

Para el cálculo de la pérdida de carga  $h_p$  se tiene la fórmula:

$$h_p = (h_1 + h_2)^3 / 4 h_1 h_2$$

Sustituyendo en la fórmula:

$$h_p = (0,018 \text{ m} + 0,148 \text{ m})^3 / 4 * 0,018 \text{ m} * 0,148 \text{ m}$$

$$h_p = 0,199 \text{ m}$$

Décimo tercer punto: cálculo del volumen del resalto.

Para el cálculo del volumen del resalto, se tiene la fórmula:

$$V = \left( (h_1 + h_2) / 2 \right) L B$$

Por lo que al sustituir en la fórmula:

$$V = \left( (0,018 \text{ m} + 0,148 \text{ m}) / 2 \right) * 0,777 \text{ m} * 0,60 \text{ m}$$

$$V = 0,039 \text{ m}^3$$

Décimo cuarto punto: cálculo del gradiente de velocidad.

Se realiza el cálculo del gradiente de velocidad para evidenciar la mejor ante la adición de la rampa, con la finalidad de que sea superior al gradiente de velocidad actual con la variación en las temperaturas:

$$G = 923,029 \text{ s}^{-1} \text{ para temperatura de } 25 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$G = 879,994 \text{ s}^{-1} \text{ para temperatura de } 20 \text{ }^\circ\text{C}$$

Para este cálculo, se tiene la fórmula:

$$G = \sqrt{\gamma / \mu} \sqrt{Q h_p V}$$

Haciendo para una temperatura de 25 °C, donde  $\sqrt{\gamma / \mu} = 3266,960$ , se tiene que:

$$G = 3266,960 * \sqrt{0,025 \frac{L}{s} * 0,199 m * 0,039 m^3}$$

$$G = 1169,172 s^{-1}$$

Haciendo para una temperatura de 20 °C, donde  $\sqrt{\gamma/\mu} = 3114,640$ , se tiene que:

$$G = 3114,640 * \sqrt{0,025 \frac{L}{s} * 0,199 m * 0,039 m^3}$$

$$G = 1114,660 s^{-1}$$

Décimo quinto punto: cálculo del tiempo de mezcla.

Para el cálculo del tiempo de mezcla, se tiene la fórmula:

$$T = V / Q$$

Por lo que al sustituir en la fórmula:

$$T = 0,039 m^3 / 0,025 \frac{m^3}{s}$$

$$T = 1,550 s$$

Décimo sexto punto: cálculo de la grada al final del resalto.

Para el cálculo de la grada al final de resalto, se tiene la fórmula:

$$h = 1/6 h_2$$

Entonces al sustituir en la fórmula:

$$h = 1/6 * 0,148 m$$

$$h = 0,025 m = 2,5 cm$$

Décimo séptimo punto: cálculo de la altura de agua en el vertedero.

Para el cálculo de la altura de agua en el vertedero, se tiene la fórmula:

$$h_3 = (Q/1,84 B)^{2/3}$$

Por lo que se sustituye, de forma que:

$$h_3 = \left( \frac{0,025 \frac{m^3}{s}}{1,84 * 0,60 m} \right)^{2/3}$$

$$h_3 = 0,057 m$$

Diseño del difusor

Décimo octavo punto: cálculo de número de orificios en el difusor.

Para el cálculo del número de orificios en el difusor, se utiliza  $e = 0,1 m$  como constante, por lo que se tiene la fórmula:

$$N = B / e$$

Al sustituir en la fórmula, se tiene que:

$$N = 0,60 m / 0,1m$$

$$N = 6$$

Décimo noveno punto: cálculo de la sección de los orificios.

Para el cálculo de la sección en los orificios,  $d_o$  se utiliza como  $0,5 \text{ in} = 0,0127 m^2$ , por lo que se tiene la fórmula:

$$A_o = \pi d_o^2 / 4$$

Por lo que, al sustituir la fórmula, se tiene que:

$$A_o = \pi 0,0127 m^2 / 4$$

$$A_o = 0,000127 m^2$$

Vigésimo punto: cálculo del caudal promedio de solución por aplicar.

Para la dosis óptima D, se trabaja con 20 mg/L, mientras que la concentración C se trabaja con cinco por ciento (5 %) y diez por ciento (10 %). Esto genera dos tipos de análisis.

En este caso el caudal se trabaja en metros cúbicos sobre segundo ( $m^3 / s$ ). Entonces se tiene la fórmula:

$$q = Q D / C$$

Para el caso de  $C = 5 \%$ , se tiene que:

$$q = 0,025 \frac{m^3}{s} * 20 / 5\%$$

$$q = 0,000010 m^3/s$$

Para el caso de  $C = 10 \%$ , se tiene que:

$$q = 0,025 \frac{m^3}{s} * 20 / 10 \%$$

$$q = 0,000005 m^3/s$$

Vigésimo primer punto: cálculo de la velocidad en los orificios.

Para el cálculo de la velocidad en los orificios, se tiene la fórmula:

$$V_o = q / A_o N$$

Para el caso de  $C = 5 \%$ , se tiene que:

$$V_o = 0,000010 m^3/s / 0,000127 m^2 * 6$$

$$V_o = 0,0131 m/s$$

Para el caso de  $C = 10 \%$ , se tiene que:

$$V_o = 0,000005 m^3/s / 0,000127 m^2 * 6$$

$$V_o = 0,0065 m/s$$

Vigésimo segundo punto: cálculo de velocidad en la tubería.

Para el cálculo de la velocidad en la tubería, se asume  $R = 0,41$  como constante, por lo que se tiene la fórmula:

$$V_t = V_o R$$

Para el caso de  $C = 5 \%$ , se tiene que:

$$V_t = 0,0131 \text{ m/s} * 0,040$$

$$V_t = 0,005 \text{ m/s}$$

Para el caso de  $C = 10 \%$ , se tiene que:

$$V_t = 0,0065 \text{ m/s} * 0,040$$

$$V_t = 0,0027 \text{ m/s}$$

Vigésimo tercer punto: cálculo de la sección del difusor.

Para el cálculo de la sección del difusor, se tiene la fórmula:

$$A_t = q/V_t$$

Para el caso de  $C = 5 \%$ , se tiene que:

$$A_t = 0,000010 \text{ m}^3/\text{s} / 0,005 \text{ m/s}$$

$$A_t = 0,00185 \text{ m}^2$$

Para el caso de  $C = 10 \%$ , se tiene que:

$$A_t = 0,000005 \text{ m}^3/\text{s} / 0,0027 \text{ m/s}$$

$$A_t = 0,001853 \text{ m}^2$$

Vigésimo cuarto punto: cálculo del diámetro del difusor.

Para el cálculo del diámetro del difusor, se tiene la fórmula:

$$D_t = \sqrt{4 A_t / \pi} / 0,0254$$

Para el caso de  $C = 5 \%$ , se tiene que:

$$D_t = \sqrt{4 * 0,00185 \text{ m}^2 / \pi} / 0,0254$$

$$D_t = 1,91 \text{ pulg}$$

Para el caso de C = 10 %, se tiene que:

$$D_t = \sqrt{4 * 0,001853 \text{ m}^2 / \pi} / 0,0254$$

$$D_t = 1,91 \text{ pulg}$$

Vigésimo quinto punto: comprobación de igualdad en los cálculos.

Se tiene la comprobación de la igualdad en los cálculos para corroborar que el diseño sea satisfactorio de acuerdo con las necesidades del sistema, por lo que se tiene la fórmula:

$$E_o + h_3 = h_p + h_2$$

Entonces se tiene que:

$$E_o + h_3 - h_p - h_2 = 0$$

$$0,30 + 0,057 = 0,199 + 0,148$$

$$0,30 + 0,057 - 0,199 - 0,148 = 0,0001$$

Puesto que la comprobación tiende hacia cero, se garantiza que el diseño es satisfactorio para mejorar las condiciones hidráulicas del sistema de coagulación.

De forma que los cálculos de la comprobación de condiciones se pueden visualizar de la siguiente forma:

Datos	Cálculos	Resultados
$Q$ $= 0,025 \text{ m}^3/\text{s}$ $B = 0,60 \text{ m}$	$q = Q/B$ $q = (0,025 \text{ m}^3/\text{s}) / 0,60 \text{ m}$	Cálculo de caudal unitario.

	$q = 0,042 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$	
$E_o = 0,30 \text{ m}$ Longitud X = 2,0 m	$\theta = \text{TAN}^{-1}(E_o/X)$ $\theta = \text{TAN}^{-1}(0,30 \text{ m}/1,30 \text{ m})$ $\theta = 12,56^\circ$	Inclinación de la rampa.
Número de Froude = 5,5	$K = \text{COS } \theta (F + (\text{COS } \frac{\theta}{2} F))$ $K = \text{COS } 12,56^\circ (5,5 + (\text{COS } \frac{12,56^\circ}{2} * 5,5))$ $K = 5,544$	Factor K
	$\theta = \text{COS}^{-1}(F^2 / (\frac{2}{3} F K)^{3/2})$ $\theta = \text{COS}^{-1}(5,5^2 / (\frac{2}{3} * 5,5 * 5,455)^{3/2})$ $\theta = 70,235^\circ$	Factor de ecuación
	$a = \left(8F \frac{K}{3}\right)^{0,5} (\text{COS } \theta/3)$ $a = \left(8 * 5,5 * \frac{5,455}{3}\right)^{0,5} (\text{COS } 70,235/3)$ $a = 8,208$	Relación de alturas antes y después del resalto.
$g = 9,81 \text{ m}/\text{s}^2$	$d_1 = \sqrt[3]{q^2 / (F^2 g)}$ $d_1 = \sqrt[3]{0,042^2 / (5,5^2 * 9,81)}$ $d_1 = 0,018 \text{ m}$	Altura antes del resalto.
	$h_1 = d_1 / \text{COS } \theta$ $h_1 = 0,018 \text{ m} / \text{COS } 8,48$ $h_1 = 0,018 \text{ m}$	Profundidad antes del resalto.
	$V_1 = q / h_1$ $V_1 = 0,042 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m} / 0,018 \text{ m}$	Velocidad al inicio del resalto.



	$V_1 = 2,257 \text{ m/s}$	
Valor debe mantenerse entre 4,5 – 9,0	$F = \frac{V_1}{\sqrt{g h_1}}$ $F = \frac{2,257 \text{ m/s}}{\sqrt{9,81 \text{ m/s}^2 * 0,018 \text{ m}}}$ $F = 5,304$	Comprobación del número de Froude.
	$h_2 = a d_1$ $h_2 = 8,208 * 0,018 \text{ m}$ $h_2 = 0,148 \text{ m}$	Profundidad después del resalto.
	$L = 6 (h_2 - h_1)$ $L = 6 (0,148 \text{ m} - 0,018 \text{ m})$ $L = 0,777 \text{ m}$	Longitud del resalto.
	$h_p = (h_1 + h_2)^3 / 4 h_1 h_2$ $h_p = (0,018 \text{ m} + 0,148 \text{ m})^3 / 4 * 0,018 \text{ m}$ $* 0,148 \text{ m}$ $h_p = 0,199 \text{ m}$	Pérdida de carga.
	$\forall = \left( \frac{h_1 + h_2}{2} \right) L B$ $\forall = \left( \frac{0,018 \text{ m} + 0,148 \text{ m}}{2} \right) * 0,777 \text{ m} * 0,60 \text{ m}$ $\forall = 0,039 \text{ m}^3$	Volumen del resalto.
Haciendo para una temperatura de 25 °C, donde $\sqrt{\gamma/\mu} = 3266,960$	$G = \sqrt{\gamma/\mu} \sqrt{Q h_p \forall}$ $G = 3266,960 * \sqrt{0,025 \frac{L}{s} * 0,199 \text{ m} * 0,039 \text{ m}^3}$ $G = 1169,172 \text{ s}^{-1}$	Gradiente de velocidad.
Haciendo para una temperatura de 20 °C, donde $\sqrt{\gamma/\mu} = 3114,640$	$G = \sqrt{\gamma/\mu} \sqrt{Q h_p \forall}$ $G = 3114,640 * \sqrt{0,025 \frac{L}{s} * 0,199 \text{ m} * 0,039 \text{ m}^3}$ $G = 1114,660 \text{ s}^{-1}$	Gradiente de velocidad.

	$T = \forall / Q$ $T = 0,039 \text{ m}^3 / 0,025 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$ $T = 1,550 \text{ s}$	Tiempo de mezcla.
	$h = 1/6 h_2$ $h = 1/6 * 0,149 \text{ m}$ $h = 0,025 \text{ m} = 2,5 \text{ cm}$	Grada al final del resalto.
	$h_3 = (Q / 1,84 B)^{2/3}$ $h_3 = (0,025 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} / 1,84 * 0,60 \text{ m})^{2/3}$ $h_3 = 0,057 \text{ m}$	Altura de agua en el vertedero.
E = 0,1 m	$N = B / e$ $N = 0,60 \text{ m} / 0,1 \text{ m}$ $N = 6$	Número de orificios en el difusor.
$d_o = 0,5 \text{ in}$ $= 0,0127 \text{ m}^2$	$A_o = \pi d_o^2 / 4$ $A_o = \pi 0,0127 \text{ m}^2 / 4$ $A_o = 0,000127 \text{ m}^2$	Sección de los orificios.
D = 20 mg / L Caso C = 5 %	$q = Q D / C$ $q = 0,025 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} * 20 / 5\%$ $q = 0,000010 \text{ m}^3/\text{s}$	Caudal promedio de solución por aplicar.
D = 20 mg / L Caso C = 10 %	$q = Q D / C$ $q = 0,025 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} * 20 - 10 \%$ $q = 0,000005 \text{ m}^3/\text{s}$	Caudal promedio de solución por aplicar.
Caso C = 5 %	$V_o = q / A_o N$ $V_o = 0,000010 \text{ m}^3/\text{s} / 0,000127 \text{ m}^2 * 6$ $V_o = 0,0131 \text{ m/s}$	Velocidad en los orificios.

Caso C = 10 %	$V_o = q/A_o N$ $V_o = 0,000005 \text{ m}^3/\text{s} / 0,000127 \text{ m}^2 * 6$ $V_o = 0,0065 \text{ m/s}$	Velocidad en los orificios.
R = 0,41 Caso C = 5 %	$V_t = V_o R$ $V_t = 0,0131 \text{ m/s} * 0,041$ $V_t = 0,005 \text{ m/s}$	Velocidad en la tubería.
Caso C = 10 %	$V_t = V_o R$ $V_t = 0,0065 \text{ m/s} * 0,040$ $V_t = 0,0027 \text{ m/s}$	Velocidad en la tubería.
Caso C = 5 %	$A_t = q/V_t$ $A_t = 0,000010 \text{ m}^3/\text{s} / 0,005 \text{ m/s}$ $A_t = 0,00185 \text{ m}^2$	Sección del difusor.
Caso C = 10 %	$A_t = q/V_t$ $A_t = 0,000010 \text{ m}^3/\text{s} / 0,0027 \text{ m/s}$ $A_t = 0,001853 \text{ m}^2$	Sección del difusor.
Caso C = 5 %	$D_t = \sqrt{4 A_t / \pi} / 0,0254$ $D_t = \sqrt{4 * 0,00185 \text{ m}^2 / \pi} / 0,0254$ $D_t = 1,91 \text{ pulg}$	Diámetro del difusor.
Caso C = 10 %	$D_t = \sqrt{4 A_t / \pi} / 0,0254$ $D_t = \sqrt{4 * 0,001853 \text{ m}^2 / \pi} / 0,0254$ $D_t = 1,91 \text{ pulg}$	Diámetro del difusor.
$E_o = 0,30 \text{ m}$ $h_3 = 0,057 \text{ m}$	$E_o + h_3 = h_p + h_2$ $E_o + h_3 - h_p - h_2 = 0$	Comprobación de igualdad en los cálculos.

$h_p = 0,199 \text{ m}$	$0,30 + 0,057 = 0,199 + 0,148$	
$h_2 = 0,148 \text{ m}$	$0,30 + 0,057 - 0,199 - 0,148 = 0,0001$	

Tabla 5 - Comprobación de condiciones de mezcla en un canal rectangular con cambio de pendiente o mezclador tipo rampa

*Fuente: propia*

Con la comprobación de condiciones se nota la mejora en el gradiente de velocidad, ya que sus valores actuales se mantienen en el rango de mezcladores de resalto hidráulico, cuyo rango está entre  $900 \text{ s}^{-1} - 1200 \text{ s}^{-1}$ . Sus valores actuales son:

$$G = 923,029 \text{ s}^{-1} \text{ para temperatura de } 25 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$G = 879,994 \text{ s}^{-1} \text{ para temperatura de } 20 \text{ }^\circ\text{C}$$

Con la adición del sistema de cambio de pendiente o mezclador tipo rampa, tendría los valores de:

$$G = 1169,172 \text{ s}^{-1} \text{ para temperatura de } 25 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$G = 1114,660 \text{ s}^{-1} \text{ para temperatura de } 20 \text{ }^\circ\text{C}$$

De forma que se mantiene en el rango de gradiente de velocidad para mezcladores con este tipo de sistema, siendo el rango entre los  $900 \text{ s}^{-1} - 1300 \text{ s}^{-1}$ .

El tiempo de mezcla se encuentra en el rango establecido, siendo este entre 1 s – 7 s. Siendo un único punto de aplicación, se puede optar por adicionar tres difusores al sistema, con tal de reducir el tiempo de mezcla de 1,550 s a 0,388 s, reduciendo el tiempo de mezcla en un cuarto del tiempo original.

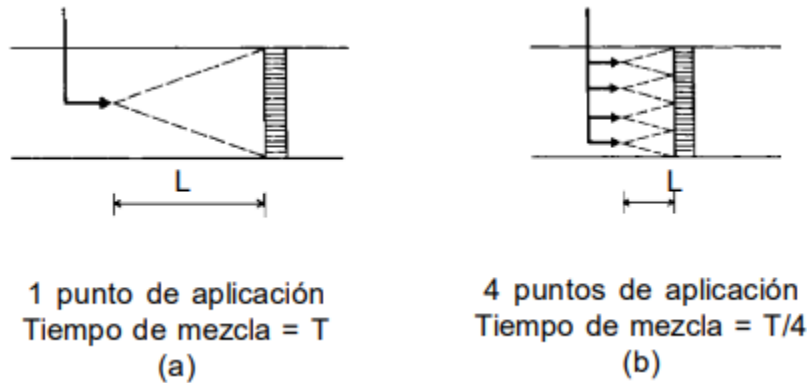


Figura 29 - Punto de aplicación de un difusor en un sistema de coagulación

Fuente: L. Vargas, 2004. *Tratamiento de agua para consumo humano: plantas de filtración rápida*, OPS

Debido a las diferencias en la concentración de la mezcla, las dimensiones tanto de la tubería como el difusor no cambian, mientras que la velocidad en la tubería y en los orificios del difusor varían. Ante esta situación, se opta por la que tenga mayor velocidad, es decir, por la que la concentración va a fluir con mayor rapidez. O sea, la concentración del cinco por ciento (5 %) con una velocidad en orificios de  $V_o = 0,0131 \text{ m/s}$  y una velocidad en tubería de  $V_t = 0,005 \text{ m/s}$ .

Finalmente, tomando en cuenta que las dimensiones de la rampa requieren un ajuste estructural, es recomendado un relleno de material ligero impermeable, puesto que es necesario un relleno de ochenta y un centímetros de alto por doscientos ocho coma cinco centímetros de largo, que sería un área rectangular dieciséis mil ochocientos ochenta y ocho coma cinco centímetros cuadrados ( $16.888,5 \text{ cm}^2$ ), que sería de uno coma sesenta y ocho metros cuadrados ( $1,68 \text{ m}^2$ ).

A continuación, se muestra el diseño de la rampa y la grada desarrollado en AutoCAD, de acuerdo con las dimensiones propuestas para el sistema:

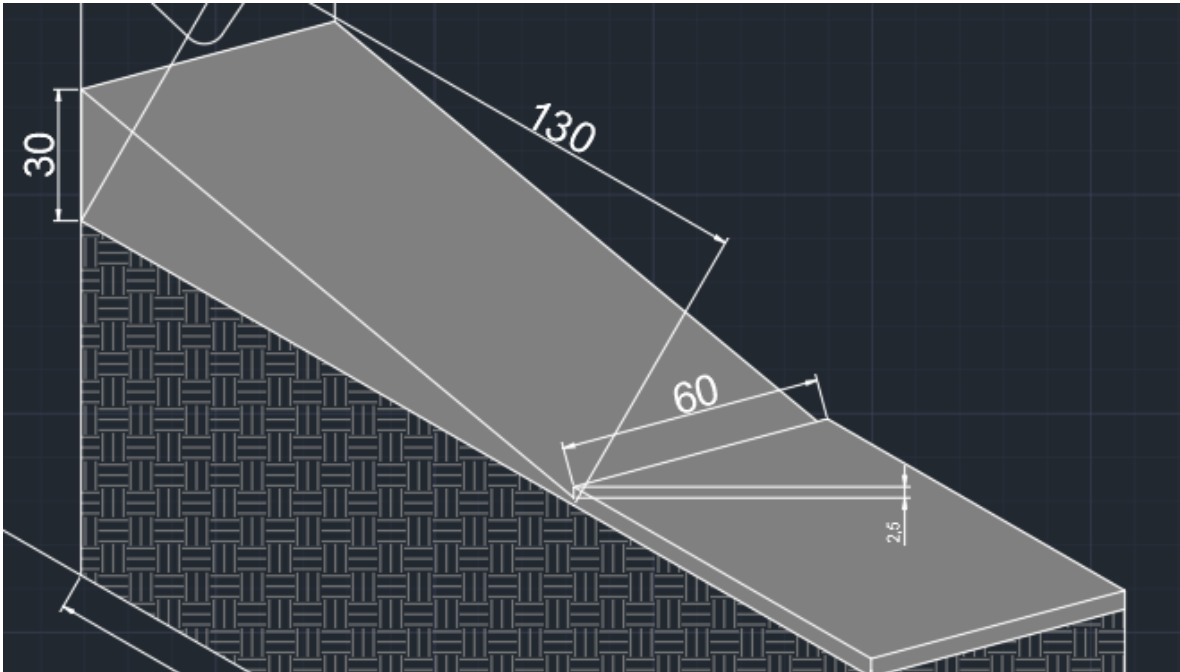


Figura 30 - Vista 3D de la rampa y la grada en el sistema de coagulación. (cotas en centímetros)

Fuente: propia

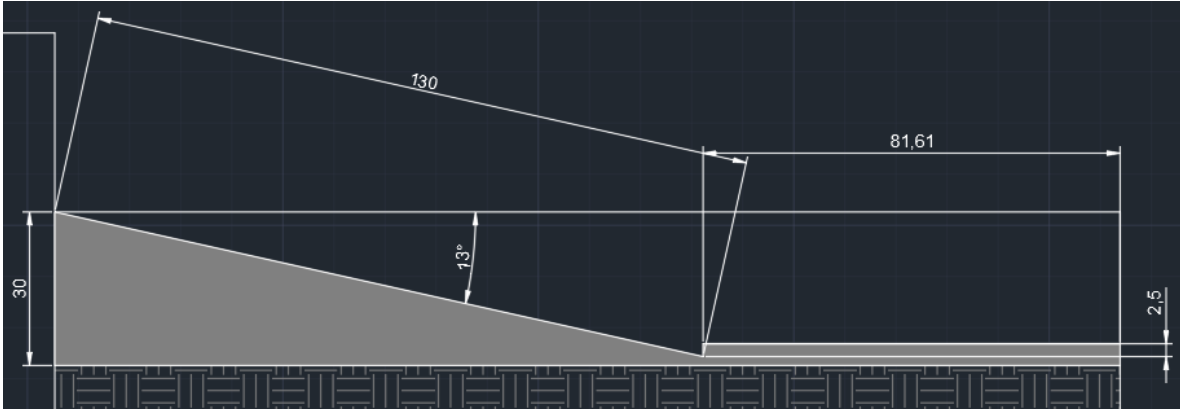


Figura 31 - Vista perfil de la rampa y la grada en el sistema de coagulación. (cotas en centímetros)

Fuente: propia

## Capítulo IV – Conclusiones y recomendaciones

De acuerdo con los objetivos del proyecto, se tienen las siguientes conclusiones:

- I. La evaluación de la calidad de producción de la planta mediante la corroboración de condiciones con respecto a la operación del sistema de coagulación, basado en los lineamientos de un vertedero triangular de noventa grados se realizó mediante la tabla 2.7 del capítulo dos del libro de Tratamiento de agua para consumo humano: plantas de filtración rápida, donde de acuerdo con las condiciones de la planta, se encuentra en un excelente nivel de operación debido a que el gradiente de velocidad en ambos escenarios (variando la temperatura del agua y con ambos caudales, de operación y de diseño) se mantiene en el rango establecido para un sistema de resalto hidráulico, de la misma forma que el tiempo de mezcla.
- II. Determinar el gradiente de velocidad de la planta se desarrolla de forma alterna con la evaluación de la calidad de producción de la planta mediante la corroboración de condiciones con respecto a la operación del sistema de coagulación, basado en los lineamientos de un vertedero triangular de noventa grados. Ambos puntos se notan en la siguiente tabla:

Caudal del cálculo	Temperatura	Gradiente de velocidad	Tiempo de mezcla
$Q = 16 \text{ L/s}$	$T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$	$G = 929,644 \text{ s}^{-1}$	$T = 0,132 \text{ s}$
	$T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$	$G = 975,108 \text{ s}^{-1}$	
$Q = 25 \text{ L/s}$	$T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$	$G = 879,994 \text{ s}^{-1}$	$T = 0,150 \text{ s}$
	$T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$	$G = 923,029 \text{ s}^{-1}$	

Tabla 6 - Resumen de evaluación de la calidad del sistema de coagulación

*Fuente: propia*

- III. El levantamiento estructural de la planta actual se completó de forma satisfactoria, puesto que el conocer las dimensiones de la planta era vital para el desarrollo de los cálculos evaluativos, como se evidencia en la primera prueba del dimensionamiento del módulo actual.
- IV. El diseño de la nueva unidad de coagulación / mezcla rápida consiste en la transición de un sistema de mezcla con resalto hidráulico hacia un sistema de mezclado de tipo rampa, con la finalidad de mejorar el gradiente de velocidad y como consecuente, la eficiencia del proceso y la calidad del agua. Adicionalmente se incorpora un difusor de coagulante para mejorar el proceso en general, ya que posee mayor cobertura de dispersión. La mejora con respecto al gradiente de velocidad es la siguiente:

Caudal del cálculo	Temperatura	Gradiente de velocidad	Tiempo de mezcla
$Q = 25 \text{ L/s}$	$T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$	$G = 1114,660 \text{ s}^{-1}$	Con un punto de aplicación $T = 1,550 \text{ s}$
	$T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$	$G = 1169,172 \text{ s}^{-1}$	

Tabla 7 - Mejora de gradiente de velocidad y tiempo de mezcla ante mezcla tipo rampa

*Fuente: propia*

- V. Se establece como elemento estructural que optimizará el rendimiento de la planta potabilizadora el sistema de mezcla tipo rampa, puesto que requiere un relleno en el módulo actual para poder incorporar la rampa y la grada. Las dimensiones de la rampa y la grada son:

Dato	Valor	Unidad
Longitud de rampa X	1,30	m
Altura de rampa Eo	0,30	m
Inclinación de Rampa	12,563	°
Ancho de la rampa y de la grada	0,6	m



Altura de la grada	0,025	m
Longitud de la grada	0,81	m

Tabla 8 - Dimensionamiento de la rampa y la grada

*Fuente: propia*

Como recomendaciones / consideraciones de este proyecto se tiene lo siguiente:

- I. Es recomendado cambiar el sistema de mezcla por resalto hidráulico por un sistema de mezcla de tipo rampa para aumentar el gradiente de velocidad en el módulo de coagulación. Esto mejoraría considerablemente la eficacia y eficiencia de la planta actualmente, preparando de mejor forma el agua para el resto de los procesos de potabilización.
- II. Es importante mejorar el método de difusión del coagulante, debido a que actualmente tiene un sistema de aplicación puntual en el punto de mayor agitación. Aunque está colocado en el mejor punto del módulo, una aplicación puntual no tiene la cobertura óptima, como sería una dispersión distribuida. Adicionalmente, se podría considerar un solo difusor con un gran rango de cobertura o alternamente, cuatro difusores con rangos menores que aceleran el tiempo de mezcla, como se evidencia en la siguiente tabla:

Punto de aplicación de difusores	Tiempo de mezcla
Un punto de aplicación	$T = 1,550 \text{ s}$
Cuatro puntos de aplicación	$T = 0,388 \text{ s}$

Tabla 9 - Comparación de puntos de aplicación de difusores

*Fuente: propia*

- III. Debe de considerarse que la concentración del coagulante y la dosificación tienen un impacto en la velocidad en la que se va a distribuir en el sistema de coagulación y, por ende, en qué tan rápido se va a mezclar con el agua. De acuerdo con las dimensiones del difusor, sería la siguiente:

Concentración	Velocidad en orificios del difusor	Velocidad en la tubería del difusor
5 %	$V_o = 0,0131 \text{ m/s}$	$V_t = 0,005 \text{ m/s}$
10 %	$V_o = 0,0065 \text{ m/s}$	$V_t = 0,0027 \text{ m/s}$

Tabla 10 - Velocidades para concentraciones

*Fuente: propia*

## Bibliografía

Bonilla. R. (2022) *Evaluación sanitaria e hidráulica de la Quebrada Piedra Bruja y su efecto en la planta potabilizadora de Jacó*. Tesis de licenciatura. Universidad Latina de Costa Rica.

Rodríguez. A. (2022) *EVALUACIÓN Y RECOMENDACIONES DE LAS CONDICIONES ACTUALES, HIDRÁULICA Y SANITARIA DE LA PLANTA POTABILIZADORA DE ZAGALA VIEJA, MONTES DE ORO, PUNTARENAS*. Tesis de licenciatura. Universidad Latina de Costa Rica.

Ordinola. E. (2019) *Diseño de la Planta de Tratamiento de Agua Potable para tres centros poblados del distrito de Ignacio Escudero*. Tesis de grado. Universidad de Piura, Perú.

Vargas. L (2004) *Tratamiento de agua para consumo humano, plantas de filtración rápida*. CEPIS.

Fernández. A (2012) *El agua: un recurso esencial*. Química viva, volumen 11, número 3, páginas 157-170. [El agua: un recurso esencial \(redalyc.org\)](http://redalyc.org)

López, R (2003) *Elementos de diseño para acueductos y alcantarillados*. Escuela Colombiana de Ingeniería.

Almeida, S (2009) *Desarrollo de un modelo hidráulico a escala de un canal para implantar un laboratorio en la Universidad San Francisco de Quito*. Universidad San Francisco de Quito.

Riojas, C (2018) *Análisis del coeficiente de descarga para diferente carga hidráulica en dos vertederos de pared gruesa tipo cimacio del río Chonta Cajamarca*. Universidad nacional del norte.

iAgua (2017). *Los pioneros del agua en la historia*. <https://www.iagua.es/noticias/locken/17/02/08/pioneros-agua-historia>

Condorchem envitech (2023). *Historia sobre tratamientos del agua potable*. <https://condorchem.com/es/blog/historia-sobre-el-tratamiento-del-agua-potable/>

World Resources Institute (2013). *Water stress by country*. <https://www.wri.org/data/water-stress-country>

Comisión Federal de Electricidad (2018). *Aplicación de trazadores en estudios geohidrológicos*. <https://lapem.cfe.gob.mx/normas/pdfs/d/10100-72.pdf>

Oficina de Comunicación y Mercadeo del Tecnológico de Costa Rica (2019). *Agua, un tesoro invaluable*. <https://www.tec.ac.cr/pensis/articulos/agua-tesoro-invaluable>

Política Nacional para el Subsector de Agua Potable de Costa Rica. Acuerdo de Junta Directiva N ° 2017-244, Sesión ordinaria N ° 2017-034. (2017). Costa Rica. [https://www.aya.go.cr/transparenciainst/acceso\\_informacion/marconormativo/pol%C3%A4Dtica%20nacional%20de%20agua%20potable.pdf](https://www.aya.go.cr/transparenciainst/acceso_informacion/marconormativo/pol%C3%A4Dtica%20nacional%20de%20agua%20potable.pdf)

Koutoudjian, J. (2019). *Operación de plantas potabilizadoras, curso AIDIS*.

Lenntech. (2023). *Historia del tratamiento de agua potable*. <https://www.lenntech.es/procesos/desinfeccion/historia/historia-tratamiento-agua-potable.htm>