UNIVERSIDAD NACIONAL DE COSTA RICA

Facultad de Ciencias de la Tierra y el Mar

Escuela de Ciencias Ambientales

# *Diseño de un sistema para el reuso del agua residual de la planta de tratamiento de la Universidad Nacional campus Omar Dengo en el período 2020-2023.*

Modalidad

Proyecto de graduación para optar al grado de Licenciatura Ingeniería en Gestión Ambiental

Autores:

Fabricio Collado Herrera

María Daniela Zúñiga Salas

Comité asesor:

Tutor: M.Sc. Ligia Dina Solís Torres

Lector: M.Sc. María Álvarez Jiménez

Lector: Dr. Mohammad Jihad Sasa Marín

Heredia, abril , 2024

**Trabajo de graduación aprobado por el Tribunal Examinador de la Escuela de Ciencias Ambientales de la Universidad Nacional de Costa Rica, para optar al grado de Licenciatura en Ingeniería en Gestión Ambiental**

**MIEMBROS DEL TRIBUNAL EXAMINADOR**

**…….**

**Dr. Pablo Ramírez Granados**

**Representante del decanato de la Facultad de Ciencias de la Tierra y el Mar**

**..……..**

**M.Sc. Alina Aguilar Arguedas**

**Representante Dirección de EDECA**

**……..……**

**M.Sc. Ligia Dina Solís Torr**

**Tutora**

**…….**

**M.Sc. María Álvarez Jiménez**

**Lectora**

**……**

**Dr. Mohammad Jihad Sasa Marín**

**Lector**

**..…….....**

**Fabricio Collado Herrera**

**Postulante del trabajo**

**..…….....**

**María Daniela Zúñiga Salas**

**Postulante del trabajo**

**Resumen**

La escasez de agua afecta a más del 40 por ciento de la población mundial, una cifra alarmante que probablemente crecerá con el aumento de las temperaturas globales producto del cambio climático por lo tanto el aprovechamiento del agua residual como subproducto del saneamiento puede contribuir a la escasez del recurso. Sin embargo, solamente el 84% de las de las aguas ordinarias tratadas son vertidas a un cuerpo receptor y solo el 35% de las aguas industriales utilizan su agua por este motivo. El agua residual se puede reusar en distintas aplicaciones según la Legislación Nacional, entre las cuales se encuentra el riego de zonas verdes con acceso al público o restringido, para el riego agrícola y recreativo, por ejemplo, los cuerpos de agua artificial y el paisajístico.

En el presente proyecto se tiene como finalidad proponer un diseño piloto para el reuso de aguas residuales con el fin de abastecer el edificio de la Escuela de Ciencias Ambientales, mediante un sistema de tratamiento terciario, para que se aproveche y contribuya a la disminución del desabastecimiento del recurso hídrico de la Universidad Nacional. A partir de la aplicación de la metodología la cual consistió en la caracterización de la planta de tratamiento, pruebas piloto y evaluación teórica mediante una matriz de selección del método de desinfección, se estableció que este sistema propuesto se centra en un proceso de filtrado y desinfección mediante cloración. Dicho sistema de cloración (piloto) debe de tener dosis de 24,40 mg/l en el cual se extrapola los datos al sitio de estudio y se necesitará una dosis de 580,80 mg/l. Para el diseño de la bomba, se definió el rango de operación de la bomba en la estación de bombeo entre 56 a 66 l/s rango que cubre el caudal de diseño (63 l/s) para estás condiciones se obtuvo una eficiencia de 85%.

**Índice**

Agradecimientos 4

1. Introducción 5

1.1. Antecedentes 5

1.2. Problema 8

1.3. Justificación 9

2. Objetivos 11

2.1. Objetivo general 11

2.2. Objetivos específicos 11

3.3. Reuso del agua residual 21

4. Metodología 31

5. Resultados y discusión 42

6. Conclusiones 69

7. Recomendaciones 70

8. Anexos 79

**Agradecimientos**

Antes que a nadie me agradezco a mí por ser fuerte y valiente para conseguir una de las tantas metas que me queda por delante. Te agradezco Fabricio, porque no pude tener mejor compañero en este proyecto que fue como un viaje. Agradezco a mi tutora, Ligia Dina por el apoyo y por confiar en nosotros plenamente para la realización de este proyecto.

A nuestros lectores, Jihad Said y María Álvarez por aceptar formar parte de este grupo y toda la ayuda. Al laboratorio de Hidrogeología y Manejo de Recurso Hídrico por brindarnos un espacio físico para la realización de pruebas a escala. Agradezco especialmente a Paula Altamirano y Gilberto por la ardua labor que realizan para el saneamiento del agua residual de la Universidad Nacional y el apoyo para la realización del proyecto.

A las personas profesionales que nos ayudaron en consultas y demás para llegar a finalizar este proyecto. A mi familia, por apoyarme en todo de manera incondicional, sin ellos nada sería posible. Sparky, por ser mi compañerito. A mis amigas, por ser también mi familia, colegas y apoyo.

**María Daniela Zúñiga Salas.**

Primeramente, a la persona que me gustaría agradecer es a Daniela, mi colega, compañera y amiga por aceptar llevar este proyecto con mi persona, a pesar de presentar situaciones complicadas en el mismo, siempre estaba sacando las cosas buenas y positivas. Además, agradezco a nuestra tutora, M.Sc Ligia Dina Solís Torres por estar apoyándonos y guiándonos en todo el proyecto. A los lectores, M.Sc María Álvarez Jiménez y el Dr. Mohammad por fueron una base fundamental para la realización del proyecto. A la encargada de la Planta de Tratamiento, Paula Brenes Altamirano y al encargado de mantenimiento, el señor Gilberto por toda la colaboración, información y todos los equipos que nos brindaron. Finalmente, a mis padres y hermano, así como amigas de la Universidad que fueron un apoyo fundamental en todos los aspectos posibles.

**Fabricio Collado Herrera.**

# 1. Introducción

## 1.1. Antecedentes

A nivel internacional, en el Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos (2017) *Aguas residuales, el recurso desaprovechado*; en los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) se establece la meta de 6.3 de mejoramiento de tratamiento de aguas residuales y el aumento de la reutilización del agua.

Asimismo, se mencionan las aguas residuales tratadas a través de tratamiento terciario que se suman a las fuentes subterráneas o superficiales y se transforman en agua potable. Este modelo se ha implementado en grandes ciudades como San Diego en Estados Unidos donde se consume agua reciclada, debido a que la ciudad importa el 85% de su agua de California del Norte y del Río Colorado, las comunidades aguas arriba, tales como Las Vegas vierten aguas residuales en el río que son luego tratadas para transformarse en agua para el consumo.

Otro ejemplo del sistema de gestión de agua donde se aplica el reuso es Uganda, donde el 41% del agua residual proveniente de servicios sanitarios o instalaciones *in situ* se reutilizan (PNUD, 2017).

Sin embargo, el crecimiento demográfico y la urbanización cada vez más acelerada están cambiando los hábitos de consumo y como consecuencia, la demanda de agua crece rápido, mientras que los recursos hídricos disponibles están disminuyendo, lo que está provocando problemas locales de escasez hídrica particularmente en América Latina y el Caribe (FAO, 2017).

De igual forma, el saneamiento y tratamiento de aguas residuales, también está creciendo, pero no se desarrolla al mismo ritmo y, por lo tanto, la mayoría de los efluentes se vierten a los cuerpos receptores sin ningún tratamiento (FAO, 2017).

Los cuerpos de agua de esta región (ALC) están siendo contaminados, pero las ciudades son las que mayormente contribuyen. Se estima entre 261 000 y 327 000 km de ríos, lo que equivale a un 25% de los cursos de agua, los cuales están severamente contaminados, debido a su concentración de coliformes fecales se estima superior a 1 000 NMP/100 ml. Lo anterior, se encuentra relacionado con la falta de tratamiento de aguas residuales y la ausencia de políticas efectivas sobre el control de la contaminación (FAO, 2017).

Asimismo, según la FAO, 2017, en el Caribe son vertidas entre un 80% al 90% de las aguas residuales sin tratamiento a los cuerpos receptores. En el Pacífico Nordeste en países como Colombia, Panamá, El Salvador, Costa Rica, Nicaragua, Honduras, Guatemala y México, el volumen total en carga contaminante de DBO es mayor de 3 millones t/año. La Demanda Química de Oxígeno (DQO) se reporta en el orden de 760 009 t/año y la de sólidos suspendidos (SS), 365 728 t/año. Incluyendo 6 239.5 t/año de Nitrógeno y 51 476 t/año de fósforo (FAO, 2017).

Asimismo, a nivel nacional también se ha realizado un esfuerzo reduciendo la proporción de aguas no tratadas y promoviendo el reuso como la valorización de subproductos del saneamiento de las aguas residuales, desde la creación del Reglamento de Vertido y Reuso de Aguas Residuales en 2007, donde se menciona que la contaminación de agua es uno de los problemas de mayor incidencia negativa en el país y se deben de adoptar medidas de control en los vertidos, incluyendo el aprovechamiento de los efluentes de agua residual para diferentes usos (Centeno y Murillo, 2019).

Además, a nivel país se están realizando esfuerzos para un adecuado saneamiento del agua residual y el reuso de la misma, específicamente en Puerto Viejo, Limón donde se elabora un sistema de tratamiento terciario (cloración), evitando que el agua residual sea vertida en el mar generando afectación a la vida marina y salud de las personas (ONOPS, 2021).

El proyecto de reuso del agua residual de Puerto Viejo, tiene previsto que en el futuro el agua residual sea utilizada en servicios sanitarios, entre otros, mediante la construcción del sistema de alcantarillado y tratamiento de aguas residuales. Asimismo, establece tres componentes principales (ONOPS, 2021):

- Red de recolección de aguas residuales (alcantarillado), la cual incluye una estación de bombeo de aguas negras para llevar el agua hasta la planta de tratamiento.
- Planta de tratamiento de aguas residuales que incluye tratamiento terciario de desinfección.
- Tubería de descarga del agua tratada al mar.

Es importante mencionar que, las investigaciones e implementación del reuso de agua residual a nivel país no son muy comunes. Sin embargo, se presentan diferentes propuestas en diferentes sectores del país, por ejemplo, Zaraté (2014) propone un dimensionamiento y costeo de un sistema de tratamiento terciario que permita el reuso del efluente de una empresa procesadora de carnes de aves.

En esta investigación, el autor evalúa los parámetros fisicoquímicos del efluente y propone un método de desinfección, a partir de hipoclorito de sodio realizando un diseño de una caja de registro impulsado por una bomba.

Asimismo, a nivel país existen empresas que han realizado esfuerzos por hacer reuso de agua residual, el Hotel Le Cabanon ubicado en una zona con períodos de sequía prolongada y escasez o racionamiento de agua, cuenta con una PTAR equipada con un sistema de filtración y cloración del agua tratada, la cual se destina para el riego de los jardines del hotel (Tebag, 2018). Por lo tanto, la investigación de proyectos relacionados al saneamiento y reuso del agua residual funciona como referencia para indagar sobre los sistemas de tratamiento y aprovechamiento del agua residual a nivel país.

El sitio de estudio, la planta de tratamiento del campus Omar Dengo fue construida en 2005 en cumplimiento de los requisitos estipulados en la Ley Orgánica del Ambiente de 1995. Dicha ley

establece la responsabilidad de gestionar y aprovechar de manera adecuada el agua, con el fin de evitar sanciones parciales de los permisos, las patentes, los locales o las empresas que provocan la denuncia, el acto o el hecho contaminante o destructivo.

Además, este proyecto responde a la responsabilidad ambiental presente y futura, junto con su compromiso de contribuir en el desarrollo integral, autónomo y sostenible en un marco de solidaridad y de armonía entre el ser humano y la naturaleza de la institución. El proyecto se concretó en *La Gaceta Universitaria 7-2003*, en la cual se menciona en la política ambiental el compromiso de la institución de cumplir gradualmente con la legislación ambiental nacional pertinente en vertido y reuso de aguas residuales, desechos peligrosos, uso de agroquímicos, entre otros (UNA, 2003).

Actualmente, en la planta de tratamientos del campus Omar Dengo se trata el agua generada en los baños, lavatorios, comedores, sodas y laboratorios de todos los edificios. Por lo que, se considera que son aguas residuales de tipo especial (Decreto N° 33601, 2007). También, a la planta ingresa el agua proveniente de los laboratorios de investigación, venta de servicios, extensión y docencia de todas las facultades de la Universidad Nacional de la Sede Omar Dengo de que manipulan residuos peligrosos (radiactivos, biológicos, microbiológicos, patológicos, infectocontagiosos, u otro tipo de producto químico) que tiene potencial para generar un daño a la salud, propiedad y ambiente (UNA, s.f.).

Se debe destacar que, la Universidad Nacional para la gestión correcta de los residuos líquidos peligrosos de los laboratorios aplica el protocolo denominado: *Disposición final de desechos peligrosos en la Universidad Nacional*. Por lo que, la presencia de estos residuos en el agua residual que llega a la planta de tratamientos debería ser mínima.

En la planta de tratamiento de la Universidad Nacional, actualmente se utiliza un sistema aeróbico con lodos activados. A pesar de los esfuerzos iniciales realizados durante la construcción de la planta para implementar la desinfección del agua mediante cloración y su posterior reutilización, lamentablemente, esta medida no se ha llevado a cabo.

De igual forma, la planta de tratamiento de las Sedes Regionales Brunca (Campus Coto y Pérez Zeledón) hay tanques de contacto de cloración, pero estos presentan deficiencias en el funcionamiento lo que no permite su reutilización en el sistema de riego (UNA-Campus Sostenible, 2018).

## 1.2. Problema

En Costa Rica, el AyA, MINAE y MINSA (2016) elaboraron una Política Nacional de Saneamiento en Agua Residual, la cual tiene como objetivo lograr el manejo seguro del total de las

aguas residuales generadas en el país, garantizando que estas no afecten al ambiente ni la salud, implementando sistemas de tratamiento individuales o colectivos.

La política mencionada anteriormente, nace para contrarrestar la problemática que se tiene en saneamiento de agua residual a nivel país. Esto se refleja, debido que en el período 2007 al 2015 se han construido 1 466 plantas y a partir de los reportes operacionales de aguas residuales entregados al Ministerio de Salud del 2014-2015, existe un total proyectado de 912 plantas de tratamiento en condominios y urbanizaciones privadas y 29 plantas de tratamiento de operadores como AyA, ESPH y las Municipalidades (AyA, MINAE y MINSA, 2016).

Solamente el 84% de las de las aguas ordinarias tratadas son vertidas a un cuerpo receptor y solo el 35% de las aguas industriales utilizan su agua. Lo anterior, se observa de igual forma con los siguientes datos del AyA, MINAE y MINSA (2016):

En el 2016, según datos del AyA, MINAE y MINSA en los reportes operacionales presentados al Ministerio de Salud en el lapso del 2014-2015 se destinaron para reutilización 81,85 millones de metros cúbicos de agua tratada, lo que sugiere que se está reutilizando al menos un 4,94% de las aguas que se extraen.

Además, según Centeno y Murillo (2019), la reutilización del agua residual posee requerimientos técnicos y tecnológicos, donde existen una diversidad de métodos de tratamiento disponibles para alcanzar los límites máximos permitidos de la Legislación Nacional. Sin embargo, en Costa Rica, de las 305 plantas de tratamiento inspeccionadas por el AyA, solo 55 han implementado el reuso del agua tratada. Esto se debe en gran medida a la falta de convicción en la eficiencia de este proceso, así como a los temores relacionados con riesgos biológicos y químicos, además de los costos asociados con la construcción y operación de sistemas de tratamiento terciario.

La Universidad Nacional no evade esta problemática, actualmente la planta de tratamiento no cuenta con un sistema de tratamiento avanzado que permita el aprovechamiento del efluente de las aguas residuales para el reuso de esta agua y de esta manera, se evite la descarga total al río Pirro. Cabe mencionar que, si se le da un tratamiento adecuado a este recurso se puede utilizar según el reglamento de vertido y reuso (2007) en reuso urbano (tipo 1) que se implementa para el riego de zonas verdes, inodoros, combate de incendios y otros usos similares de acceso o exposición al agua.

Esto se evidencia en el año 2018, en los meses de marzo y abril, donde se reportó un desabastecimiento de agua potable que, causó suspensión en diferentes días y en las actividades administrativas y académicas, también en los servicios de comedor donde se redujeron sus horas abiertas.

Además, provocó la suspensión de exámenes parciales, debido a que no se puede poner en riesgo la salud de los estudiantes y funcionarios por la falta del recurso en los servicios sanitarios o en los lavamanos (Reyes, comunicación personal, 26 de abril de 2019). En los laboratorios, se

acumuló la cristalería (algunos con agentes contaminantes nocivos) sin poderse lavar y destacar la importancia de este líquido para diferentes proyectos de investigación (peces, algas, Biotecnología, entre otros).

Por lo tanto, es de suma importancia que la universidad implemente un sistema que permita el aprovechamiento del agua residual y eventualmente, contribuya con el problema de desabastecimiento de agua potable. Disminuyendo la demanda de agua potable para propósitos que no lo requieren.

### 1.3. Justificación

Según Camacho (2016) se conoce que uno de los mayores retos que se afronta actualmente en la gestión del agua es la escasez hídrica, que se entiende como la carencia del volumen necesario de recursos hídricos para satisfacer las necesidades. Por lo tanto, el aprovechamiento de un efluente de agua residual contribuye con la demanda existente del recurso hídrico.

Costa Rica es un país rico en agua, con una disponibilidad per cápita superior a los 31 300 $m^3$ /persona por año y con la tasa de extracción hídrica per cápita más elevada de Centroamérica. Sin embargo, esta disponibilidad se ha visto afectada por el cambio climático afectando la disponibilidad de agua potable por en el régimen de precipitaciones y en las temperaturas, sequías más intensas y prolongadas de manera decisiva en la disponibilidad presente y futura del agua (Valverde, 2013).

El agua residual se puede reusar en distintas aplicaciones según la Legislación Nacional, entre las cuales se encuentra el riego de zonas verdes con acceso al público o restringido, para el riego agrícola y recreativo, por ejemplo, los cuerpos de agua artificial y el paisajístico.

En el presente proyecto se tiene como finalidad proponer un diseño piloto para el reuso de aguas residuales con el fin de abastecer el edificio de la Escuela de Ciencias Ambientales, dada su proximidad a la planta de tratamiento. Esto se lleva a cabo con el objetivo de que la Facultad de Ciencias de la Tierra y el Mar pueda destacar como un ejemplo en materia de saneamiento y, al mismo tiempo, aprovechar los subproductos para contribuir al ahorro del recurso hídrico.

El reuso será utilizado para los inodoros del EDECA, contribuyendo con el aprovechamiento del recurso en la universidad y promoviendo las aguas residuales como un subproducto del saneamiento, haciendo frente al desabastecimiento que presentó los años anteriores.

Asimismo, se reducirá el uso de agua potable utilizado en servicios sanitarios. Las aguas residuales no se deben considerar un ‘residuo’, sino más bien un recurso. Este es un principio fundamental de la economía circular, un sistema económico que tiene como objetivo minimizar los residuos y aprovechar al máximo los recursos (Rodríguez et al., 2020).

Considerando lo anterior, es necesario dimensionar un sistema de reuso de las aguas residuales de la planta de tratamiento del Campus Omar Dengo, que cumpla con los parámetros establecidos en el Reglamento de Vertido y Reuso de Aguas Residuales y las leyes vigentes relacionadas. De esta forma se contribuirá a mitigar los impactos que trae la escasez de este recurso.

Además, del aprovechamiento del recurso hídrico, el reuso de agua residual presenta otros beneficios como la reducción de la carga orgánica y microbiológica que se agrega al cuerpo receptor, disminuyendo la contaminación en ríos y aguas superficiales. Es un método económico para el tratamiento de aguas residuales ordinarias (Arab Water Council, 2017, p.13).

Es importante mencionar que, en el sitio de estudio se vierten los efluentes de la planta de tratamiento en el Río Pirro, donde esta microcuenca presenta una problemática, debido a que el 64% de la zona de protección del río se encuentra en usos no adecuados entre las viviendas y comercios (Villalobos et al., 2013).

Asimismo, implementar un proyecto de esta naturaleza en la Universidad Nacional aumentaría el prestigio de la institución y sería muy beneficioso para el Programa de Gestión Ambiental Institucional y una línea base para otras sedes o instituciones educativas que quieran implementar sistemas de reuso de agua residual.

A nivel financiero, a pesar del gasto que implica el tratamiento terciario en la planta de tratamiento y la conexión de efluente a los servicios sanitarios, esta propuesta tiene un impacto directo en las finanzas de la universidad que actualmente, paga en promedio 10 000 000 colones mensuales por el consumo de agua en el 2019.

## 2. Objetivos

### 2.1. Objetivo general

Elaborar una propuesta de sistema de tratamiento del agua residual proveniente de la planta del Campus Omar Dengo, mediante un sistema de tratamiento terciario, para que se aproveche y contribuya a la disminución del desabastecimiento del recurso hídrico de la Universidad Nacional.

### 2.2. Objetivos específicos

1. Caracterizar el funcionamiento y parámetros fisicoquímicos del afluente y efluente mediante análisis de la entrada y salida de la planta de tratamiento para el establecimiento de los parámetros de diseño del sistema.
2. Desarrollar un diseño de remoción de contaminantes mediante pruebas a escala de laboratorio para el aprovechamiento del recurso hídrico.
3. Establecer una propuesta de reutilización del agua tratada mediante la conexión a servicios sanitarios para un manejo eficiente del agua residual, contribuyendo a la disminución de la escasez del recurso en la institución.

## 3. Marco Teórico

### 3.1. Contaminación de agua

La contaminación del agua se define como la incorporación de cualquier sustancia que conlleve la alteración de su composición física, química o biológica. Asimismo, está asociado con grandes impactos negativos como la proliferación de enfermedades de transmisión hídrica, reducción del número de fuentes disponibles, eleva los costos para el reuso de agua residual y pone en peligro de extinción a muchas especies de nuestra flora y fauna (Programa Estado de la Nación, 2019).

Además, en el Programa del Estado de la Nación (2018) se menciona que, a pesar de que las actividades productivas favorecen la economía y desarrollo del país, el uso de los cuerpos de agua para el depósito de residuos genera daños negativos en la sostenibilidad ambiental.

Por lo anterior, es de gran importancia tomar medidas de control para los vertidos de agentes contaminantes en los cuerpos de agua, siendo el tema de las aguas residuales una parte fundamental para el saneamiento en Costa Rica, donde el tratamiento de estas favorece a la salud de los habitantes y contribuye al desarrollo sostenible.

### 3.2. Agua residual

#### 3.2.1. Generalidades

En el Decreto de vertido y reuso de agua residual (2007) se define el agua residual como el agua que ha recibido un uso y cuya calidad ha sido modificada por la incorporación de agentes contaminantes. Además, se reconocen dos tipos:

- **Agua residual de tipo ordinario:** Agua residual generada por las actividades domésticas del hombre (uso de inodoros, duchas, lavatorios, fregaderos, lavado de ropa, etc.)
- **Agua residual de tipo especial:** Agua residual de tipo diferente al ordinario. Es decir, se refieren a las aguas residuales generadas por fuentes distintas a las actividades domésticas o sanitarias. Estas provienen de instalaciones industriales, comerciales, agrícolas, institucionales y otras fuentes no residenciales (AyA, MINAE y MINSA, 2016).

Ambas se deben someter a sistemas de tratamiento que se entienden como un conjunto de procesos físicos, químicos o biológicos (Cuadro 1), cuya finalidad es mejorar la calidad del agua residual a la que se aplican (Decreto Ejecutivo N° 33601, 2007).

Sin embargo, una inadecuada caracterización de las aguas residuales impide la correcta depuración de estas, por lo que, se deben aplicar criterios adecuados para el diseño, como, por ejemplo, la DBO, la presencia de nutrientes y metales pesados.

**Cuadro 1.** *Límites máximos permisibles para los parámetros obligatorios de las aguas residuales especiales vertidas en un cuerpo receptor.*

| Parámetro | Unidades | Límite máximo permisible |
|---|---|---|
| $DBO_5$ | $mgO_2/l$ | 50 |
| DQO | $mgO_2/l$ | 150 |
| Sólidos suspendidos totales (SST) | mg/l | 50 |
| Sólidos sedimentables (S. Sed) | ml/l | 1 |
| Grasas/aceites (GyA) | mg/l | 30 |
| Potencial hidrógeno (pH) | ------- | 5 a 9 |
| Temperatura (T) | °C | $15°C \leq T \leq 40°C$ |
| Sustancias activas al azul de metileno (SAAM) | mg/l | 5 |

**Fuente:** Elaboración propia (2023) con base al Decreto Ejecutivo: 33601 (2007).

Asimismo, en el país existe un modelo de gestión de aguas residuales compuesto de herramientas legales, en el cual se involucra al Ministerio de Salud (MINSA), Ministerio de Ambiente y Energía (MINAE) e instituciones encargadas de su control, verificación y cumplimiento.

### 3.2.2. Legislación Nacional

En Costa Rica existen un conjunto de leyes y reglamentos ligados al tratamiento, diseño y disposición de las aguas residuales. Sin embargo, estos dependen del tipo de actividad que desarrolle la institución y donde son vertidos sus efluentes (cuerpo receptor o alcantarillado).

Primero, se menciona la Constitución Política de la República de Costa Rica (1949) que en su artículo 50 señala que: "Toda persona tiene derecho a un ambiente sano y ecológicamente equilibrado", del cual se vinculan todas las leyes y reglamentos para alcanzar este derecho.

A partir del principio, se crea la Ley Orgánica del Ambiente donde se señalan todas las medidas e instrumentos necesarios que se deben seguir para alcanzar el artículo 50 de la Constitución Política.

En los artículos 65 y 66 mencionan que, toda agua residual debe recibir tratamiento antes de ser vertida a un cuerpo de agua cumpliendo con la calidad establecida y la responsabilidad del tratamiento del efluente que corresponde a quienes produzcan la contaminación.

Para brindar las herramientas y protocolos necesarios para el debido tratamiento del agua residual se elabora el Decreto Ejecutivo: 33601 Reglamento de Vertido y Reuso de Aguas Residuales, en el cual se establecen las normas en relación con el manejo de las aguas residuales que sean vendidas o utilizadas y su aplicación es obligatoria en todo el territorio nacional. Asimismo, se establecen los parámetros obligatorios que el vertido de los efluentes debe cumplir, según el tipo de agua residual (ordinaria o especial) y los límites máximos permisibles para su reuso.

Asimismo, el Decreto Ejecutivo: 34431 Reglamento del Canon Ambiental por Vertidos es un instrumento económico de regulación ambiental que, se fundamenta en el principio de: "quien contamina paga" que pretende contribuir con lo establecido en el artículo 50 de la Constitución Política, a través de cobro de una tarifa a quienes usen el servicio ambiental de los cuerpos de agua".

Por último, la Ley general de salud N° 5395 en búsqueda de un ambiente sano para los y las habitantes menciona la importancia de una correcta gestión de las excretas, las aguas residuales, entre otras. Estas deben de ser tratadas con el fin de evitar la contaminación del suelo y de las fuentes naturales de agua para el uso y consumo humano. Asimismo, las instalaciones que apliquen deben de tener un sistema de tratamiento en buen funcionamiento aprobado por el Ministerio de Salud.

### 3.2.3. Caracterización de las aguas residuales

Como se mencionó anteriormente, una cuidadosa y completa caracterización de las aguas residuales que pretenden ser tratadas, es fundamental para asegurar el éxito de la depuración relacionado con las actividades en el sitio de estudio. Estos constituyentes de las aguas residuales pueden ser clasificados como físicos, químicos y biológicos (Lozano-Rivas, 2012).

#### 3.2.3.1. Físicos

- **Sólidos:** Son la característica más importante en el agua residual y están compuestos por material flotante, en suspensión, disueltos y sólidos sedimentables. Estos son de diferente tamaño, densidad, composición y deben ser removidos en el pretratamiento, tratamiento primario y secundario.
- **Turbiedad:** Es una medida de las propiedades de dispersión de la luz en las aguas y es un parámetro utilizado para indicar su calidad con relación al material residual en suspensión coloidal.
- **Color:** Es la forma cualitativa usada para estimar la condición general del agua residual. Esto se debe a la presencia de materia orgánica natural, como son las sustancias húmicas procedentes de los ácidos húmicos y fúlvicos, así como por la presencia de ciertos metales como hierro, manganeso y cobre que se encuentran disueltos o en suspensión.
- **Temperatura:** Este parámetro es importante, porque afecta directamente las reacciones químicas y las velocidades de reacción, la vida acuática y la adecuación del agua para fines benéficos. De igual forma, el oxígeno es menos soluble a mayor temperatura.

#### 3.2.3.2. Químicos

- **Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO):** es una medida de la cantidad de materia orgánica contenida en una muestra de agua, determinada por el consumo de oxígeno que hacen los microorganismos para degradar los compuestos biodegradables.
- **Demanda Química de oxígeno (DQO):** Cantidad de oxígeno (medido en $mgO_2/l$) que es consumido en la oxidación de materia orgánica, ya sea biodegradable o no bajo condiciones de una prueba estandarizada. Es usado para medir la cantidad total de contaminantes orgánicos presentes en aguas residuales (Noyola, Morgan-Sagastumbre, Guereca, 2013).
- **Potencial de Hidrógeno (pH):** es un indicador de la acidez de una sustancia y está determinado por el número de iones libres de hidrógeno ($H^+$) en el agua. El pH puede variar entre 0 y 14, pero cuando el pH de una sustancia es mayor de 7 es una sustancia básica. De lo contrario, si un pH de una sustancia está por debajo de 7 es una sustancia en condiciones ácidas. Es decir, cuanto más se aleje el pH por encima o por debajo de 7 más básica o ácida será la solución.

- **Grasas y aceites:** son compuestos orgánicos constituidos principalmente por ácidos grasos de origen animal y vegetal, así como hidrocarburos derivados del petróleo. Su efecto en las aguas naturales se debe a que interfiere con el intercambio de gases entre el agua y la atmósfera, no permiten el libre paso de oxígeno hacia el agua.
- **Sustancias Activas al Azul de Metileno (SAAM):** son aquellas que poseen moléculas de gran tamaño y que son ligeramente solubles en solución acuosa. Los contaminantes que se pueden determinar mediante el análisis de esta variable son los surfactantes iónicos y otros materiales sintéticos (como detergentes caseros).
- **Nitrógeno:** La presencia de compuestos nitrogenados en el agua residual no afectan únicamente la calidad de un lugar puntual del cuerpo receptor sino de toda la cuenca hidrográfica. Asimismo, se deben de evaluar por tres factores principales, el aumento de la acidez, el desarrollo de eutroficación y el aumento de las concentraciones hasta niveles tóxicos debido a que la acumulación de nitrógeno orgánico puede impedir el reuso del agua residual (Cárdenas y Sánchez, 2012). Asimismo, un exceso de ($NH_3$) por ende, de nitritos y nitratos, las plantas no pueden absorber este exceso y los suelos no son capaces de retenerlo, por lo cual, se pueden ir filtrando a aguas subterráneas, que en muchas ocasiones son de consumo humano. El amonio es un ion cargado ($NH_4^+$) y proviene de la disolución en agua del amoniaco y su presencia puede causar condiciones anóxicas en el agua residual (López, Boluda, 2014).

#### 3.2.3.3. Biológicas

El vertido de aguas residuales aporta una gran cantidad de materia orgánica que sirve de alimento para microorganismos (bacterias, hongos, protozoos). Estos son los principales responsables de la degradación y estabilización de la materia orgánica contenida en las aguas residuales. Según Lozano-Rivas (2012) se puede encontrar:

- **Bacterias:** organismos procarióticos unicelulares y son lo más importantes en la descomposición y estabilización de la materia orgánica. Su crecimiento óptimo ocurre en intervalos de pH entre 6,5 a 7,5.
- **Hongos:** protistas aerobios, multicelulares y la mayoría se alimentan de materia orgánica muerta y contribuyen junto con las bacterias a los organismos responsables de la descomposición de carbono y soportan medios ácidos de pH.
- **Protozoos:** protistas unicelulares y se alimentan de bacterias y otros organismos, por lo que, mejoran la calidad del efluente.

Los parámetros mencionados anteriormente se analizan en el agua residual para construir la caracterización de estas. Seguidamente, en el Cuadro 2 se presenta el análisis principal, el contaminante considerado y el efecto que puede tener en el agua residual.

**Cuadro 2.** *Parámetros considerados para la caracterización del agua residual.*

| Análisis principal | Contaminante considerado | Efecto |
|---|---|---|
| Demanda bioquímica de oxígeno (DBO) | Materia orgánica biodegradable. | Abatimiento del oxígeno disuelto en el cuerpo receptor. Crecimiento de microorganismos. |
| Demanda química de oxígeno (DQO) o Carbón orgánico total (COT) | Materia orgánica total | Mismos que DBO. Acumulación en el cuerpo receptor. Riesgos de toxicidad. |
| Sólidos suspendidos totales (SST) Volátiles (SSV) y fijos (SSF) | Materia en suspensión sedimentable y no sedimentable (coloidal) | Sedimentación y aislamiento en cuerpos receptores. Digestión y liberación de materia orgánica e inorgánica. Descomposición anaerobia y liberación de gases. |
| Grasas y aceites | Grasas y aceites | Acumulación en drenajes y cuerpos de agua. Reducen la transferencia de oxígeno a los cuerpos de agua. Flotación de lodos. Contaminación visual. |
| Coliformes fecales, huevos de helmintos y nematodos | *Escherichia, Aerobacter, Ascaris Lumbriocoides, Enterobius vermicularis, Fasciola hepática* | Transmisión de enfermedades gastrointestinales. |
| Nutrientes | El fósforo se asimila en forma de fosfatos, mientras que el nitrógeno puede ser asimilado tanto en forma de | El nitrógeno y el fósforo son los compuestos inorgánicos más importantes para el control de la calidad de las |

| Análisis principal | Contaminante considerado | Efecto |
|---|---|---|
| | amoniaco como de nitrato | aguas residuales. La presencia en el agua residual puede tener efectos negativos, generando el crecimiento de algas, propiciando normalmente su eutrofización y una proliferación de algas indeseables. |
| Microorganismos patógenos | Bacterias (*Vibrio, Mycobacterium, Clostridium*)<br>Virus (estas sobreviven mejor en aguas residuales debido a que pueden interactuar con partículas sólidas suspendidas).<br>Protozoos | Estos podrían provocar enfermedades, causando daños en la salud. Asimismo, contaminar aguas superficiales o subterráneas. |

**Fuente:** Elaboración propia (2023) con datos de Noyola et al. (2013) y Knobelsdorf (2005).

### 3.2.4. Principios del diseño de sistema de tratamiento de agua residual

En el diseño de un sistema de tratamiento de agua residual es necesario considerar los siguientes principios de diseño de sistemas de tratamiento de agua residual:

- Técnicos: según Romero (2010) se debe de caracterizar el agua residual cruda y definición de normas de vertido. Así como la contextualización de los sistemas propuestos considerando los parámetros de diseño y costos que implicaba cada sistema. Además, según Lozano-Rivas (2012) se requiere realizar un diagnóstico para la evaluación del impacto ambiental y establecer los objetivos de calidad y planteamiento de metas alcanzables del proyecto.
- Económicos: Es necesario evaluar la propuesta y estudio de las soluciones técnicas verificando las comparaciones técnicas y económicas. Seleccionando la mejor combinación de procesos y conveniencia tecnológica.

### 3.2.5. Factores de selección de procesos y operación del sistema de tratamiento de agua residual

Asimismo, según Romero (2010) para la selección de los procesos y operaciones de tratamiento se debe tener en consideración, una serie de factores que contemplan las características físicas, sociales y económicas del área de estudio (Cuadro 3). Entre los cuales se encuentra:

**Cuadro 3.** *Factores de selección técnicos, sociales y económicos.*

| Características | Factores |
|---|---|
| Físicas | Aplicabilidad, el método que se seleccione debe cumplir con lo solicitado y que el efluente tenga la calidad deseada. |
| | Características del efluente, con la determinación de esto se establecen las condiciones de diseño. |
| Sociales | Requerimiento de personal, se recomienda procesos sencillos que involucren poco personal. |
| | Confiabilidad, el sistema debe brindar la confianza y que su funcionamiento sea estable en caso de cambios en el caudal y soporte de cargas. |
| Económicas | El proceso debe ser factible, considerando la disponibilidad de dinero y terreno. |
| | Costos, el sistema tiene que implicar un costo de inversión aceptable, así como costos de operación reducidos para el funcionamiento de este. |

**Fuente:** Elaboración propia (2023) con información Romero (2010).

### 3.2.6. Procesos para el tratamiento de aguas residuales

El retorno de las aguas residuales a los cuerpos receptores los convierte en usuarios directos o indirectos de las mismas y a medida que aumenta la población crece la necesidad de proveer sistemas de tratamiento para reducir los riesgos para la salud y minimizar los daños al ambiente (Romero, 2010).

Se encuentran divididas en operaciones unitarias que tienen como fin reducir los contaminantes físicos, químicos y biológicos. Estos últimos pueden ser aerobios, anaerobios, anóxicos o procesos combinados entre estos. En el lugar de estudio existe un proceso de tratamiento aerobio en el cual, se efectúa con presencia de oxígeno, es decir, es un proceso donde el oxígeno es

reducido y el carbono es oxidado por los organismos (usualmente bacterias), debido a que estos son excelentes oxidantes de la materia orgánica y bajo condiciones que favorezcan su reproducción en las aguas residuales (González, 2014).

#### 3.2.6.1. Pretratamiento

El agua residual debe ser sometida a este proceso antes del tratamiento primario, secundario y consiste en la eliminación o reducción de sólidos gruesos, grasas, arenas y partículas discretas como objetivo de proteger los otros dispositivos, como las bombas de aireación y válvulas.

Algunas de estas operaciones son: desbaste, desarenador, neutralización, homogeneización, separación de grasas y aceites (Chavarría, 2014). Además, con este tratamiento se alcanzan eficiencias del orden de 25% de reducción de la carga contaminante, por lo cual, generalmente no se puede alcanzar los niveles de calidad exigidos en la legislación Nacional (Ramírez, 2007).

#### 3.2.6.2. Tratamiento primario

Según Castillo y Laurent (2016) este es un tratamiento de tipo físico que tiene como objetivo, remover los sólidos de menor tamaño que no se retuvieron en el pretratamiento por medio de la sedimentación, removiendo por gravedad las partículas sólidas sedimentables.

Esto basándose en la diferencia del peso específico entre las partículas sólidas y el líquido, por lo tanto, cuanto mayor sea el tamaño y la densidad de las partículas por separar del agua, mayor será su velocidad de sedimentación.

Asimismo, según García (2014) un sistema de tratamiento primario es utilizado para retirar la mayoría de los sólidos suspendidos que no fueron eliminados en el tratamiento preliminar.

#### 3.2.6.3. Tratamiento secundario

Se fundamenta por un proceso biológico que transforma, estabiliza o elimina la materia orgánica soluble presente en el agua que no fue sedimentada mediante microorganismos aerobios, anaerobios y/o facultativas (Chávez, 2017).

Existen diferentes tipos de estos para la remoción; sin embargo, dependerá de las características del agua a tratar, caudal, costos, espacio geográfico y utilización del recurso tratado.

En el sitio de estudio se presenta el tratamiento secundario de lodos activados, el cual es un proceso caracterizado por ser una masa floculante activa de microorganismos, materiales inorgánicos y materia orgánica, tiene como propiedad una superficie altamente activa para la adsorción de materiales suspendidos y coloidales (González y Gómez, 2016).

La remoción se debe casi completamente a la adsorción, puesto que el material sintetizado es proporcional a la oxidación biológica. La porción de materia orgánica adsorbida inicialmente, no

oxidada ni utilizada, en síntesis, es almacenada en el floc biológico. Una vez la capacidad de almacenamiento se agota, deja de ser activado en el sentido de adsorbido.

Seguidamente, se da un proceso conocido como "estabilización del lodo" que es cuando el material orgánico se emplea por oxidación y síntesis en un proceso de aireación (Romero, 2010).

#### 3.2.6.4. Tratamiento terciario o avanzado

Este tratamiento se aplica en la salida del agua tratada del tratamiento secundario y consiste en lograr una mayor depuración de la conseguida en los tratamientos anteriores, aumentando la calidad para ser vertida o reutilizada. Es decir, mejora el efluente para reducir aún más la carga contaminante vertida o reutilizar el agua (Fernández y Leitón, 2007).

Un adecuado tratamiento terciario permite un desarrollo microbiano considerable. Estos procesos son de naturaleza biológica o fisicoquímica, siendo el proceso unitario más empleado el tratamiento fisicoquímico. Según Brádan (2016) los sistemas de tratamiento terciarios se basan en la combinación de las siguientes tecnologías:

- Tratamiento físico-químicos: Es un proceso de regeneración de aguas depuradas es la reducción de sólidos en suspensión. Los sistemas de coagulación, floculación y sedimentación buscan reducir los sólidos en suspensión (SS), compuestos orgánicos biodegradables y nutrientes en el agua afluente.
- Filtración profunda: Este proceso permite la eliminación adicional de sólidos suspendidos de los efluentes provenientes de procesos de tratamiento biológicos o químicos, se puede utilizar como tratamiento previo a una filtración por membranas. Es especialmente importante para lograr un acondicionamiento previo a una desinfección efectiva.
- Desinfección: Proceso el cual busca la desactivación o destrucción de los organismos patógenos (bacterias entéricas, los virus y los quistes de protozoarios).

## 3.3. Reuso del agua residual

### 3.3.1. Generalidades

Las industrias han venido incorporando tecnologías para el reuso a un paso lento, a pesar de la compleja problemática ambiental provocada por el aporte de las aguas residuales semi tratadas o

no tratadas vertidas en los cuerpos receptores. Por lo que, es necesario plantear estrategias para el control y prevención de la contaminación del agua superficial (AyA, MINAE y MINSA, 2016).

A partir de lo mencionado anteriormente, el Reglamento de Vertido y Reuso de Aguas Residuales Nº 33601 (2007) define el reuso como el aprovechamiento de un efluente de agua residual ordinaria o especial para diversos fines. Asimismo, el uso del agua residual se clasifica en ocho tipos (cuadro 4), según el fin para el cual se puede utilizar asimismo en el reglamento se establecen los límites máximos para el reuso(anexo 10)

**Cuadro 4.** *Clasificación de los tipos de tipos de Reuso el reglamento de vertido y reuso de aguas residuales.*

| | Tipo de reúso | Descripción |
|---|---|---|
| **1** | Reuso urbano | Riego de zonas en donde haya acceso del público. Entiéndase como zonas verdes, campos de golf, plazas públicas deportivas, cementerio, uso de agua para lavado de carros, inodoros, uso de combate contra incendio y otros usos similares o exposición al agua. |
| **2** | Riego con acceso restringido | El agua se utiliza en el riego de césped de cultivo, silvicultura y otras áreas donde el acceso del público no es permitido. |
| **3** | Reuso agrícola en cultivos de alimentos que no se procesan previo a su venta | Riego superficial o por aspersión, de cualquier cultivo comestible que no se procese previo a su venta, incluyendo aquellos que se consumen crudos. |
| **4** | Reuso agrícola en cultivos de alimentos que se procesan previo a su venta | Riego de cultivos que reciben un proceso de desinfección físico o químico para la destrucción de patógenos previo a su venta. |
| **5** | Reuso agrícola en cultivos no alimenticios | Riego de pastos de piso, forrajes, cultivos de fibras y semillas, y otros cultivos no alimenticios. |
| **6** | Reuso recreativo | Reúso en cuerpos de agua artificiales donde pueda existir un contacto ocasional (por ejemplo: pesca, canotaje y navegación). |

| | Tipo de reúso | Descripción |
|---|---|---|
| **7** | Reuso paisajístico | Aprovechamientos estéticos donde el contacto con el público no es permitido, y dicha prohibición está claramente rotulada. |
| **8** | Reuso en la construcción | Compactación de suelos, control del polvo, lavado de materiales, producción de concreto. |

**Fuente:** Elaboración propia (2023) con base al Decreto Ejecutivo: 33601 (2007).

Asimismo, en el Reglamento se establecen los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos de análisis obligatorio. Para este tipo de reuso, los límites máximos permisibles para nematodos intestinales son de 1 N.º de huevos por litro y para coliformes fecales, el máximo permisible es 1 000 NMP/100 ml.

### 3.3.2. Desinfección de agua residual

Según Zárate (2016), la desinfección, el cual corresponde a un sistema de tratamiento terciario, consiste en eliminar o inactivar patógenos del agua residual, debido a que el agua es el principal medio por el cual se transmiten. Estos pueden ser hongos, virus, protozoos y bacterias presentes en el agua residual.

Asimismo, Reyes (2016) define la "desinfección" como la eliminación de todo microorganismo capaz de causar una enfermedad. Los procesos de desinfección del agua implican un tratamiento especializado en el cual, se eliminan organismos perjudiciales, teniendo en cuenta que, la supervivencia de los organismos puede existir en el agua, por lo que, depende de factores ambientales, fisiológicos y morfológicos (Velázquez, Linares, Jiménez, Islas y Lucero, 2018, p.142)

De igual forma, en el proceso de desinfección con reactivos químicos influyen factores, los cuales según Velázquez et al. (2018, p.145) son:

1. **Concentración y tipo de agente químico:** Entre mayor potencial de oxido reductor tiene mayor capacidad de dañar las paredes celulares del patógeno. Además, se considera la resistencia de los microorganismos a los procesos de desinfección.
2. **Temperatura:** A mayor temperatura se reduce el tiempo de contacto. Lo anterior, debido a que la mayoría de las reacciones químicas ocurren más rápido en temperaturas elevadas. Esto incluye la actividad de los agentes desinfectantes. A temperaturas más elevadas, los productos químicos desinfectantes pueden actuar de manera más efectiva y destruir los microorganismos más rápidamente (Soto, 2016).

3. **Potencial de hidrógeno:** Influye en la repartición de las diferentes especies oxidantes y la cinética de degradación de la molécula.
4. **Tiempo de contacto (Factor ct):** Está definido como el producto de la concentración (C) del desinfectante en mg/L y el tiempo de contacto (t), en minutos, requerido para inactivar cierto porcentaje de la población de microorganismos presentes en el agua, bajo condiciones específicas de pH, temperatura.
5. **Parámetros fisicoquímicos:** debido a su relación con la solubilidad de gases y sales, cinética de las reacciones químicas y bioquímicas, desplazamientos de equilibrios químicos y tensión superficial.

### 3.3.3. Métodos de desinfección

Según Velázquez *et al.* (2018), los sistemas de desinfección química del agua residual son rápidos y eficientes generando efectos que contribuyen a la prevención de futuras proliferaciones de microorganismos. Entre los métodos de desinfección convencionales más utilizados se encuentran la cloración, ozonización, la radiación ultravioleta y las membranas.

#### 3.3.3.1. Radiación ultravioleta

La luz ultravioleta es una radiación electromagnética que está presente en el espectro natural de la radiación solar, este se encuentra entre los rayos X (longitud de onda de 100 nm) y la luz visible (400 nm). Mientras menor es la longitud de onda mayor es la energía contenida, por lo que, la radiación ultravioleta tiene una energía inferior a la de los rayos X, pero mayor que la de la luz visible. Asimismo, las longitudes de onda más efectivas para la acción germicida siendo la longitud óptima la de 254 nm (Comisión Nacional del Agua, s.f.).

Además, el funcionamiento se basa en los cambios fitoquímicos introducidos por la radiación ultravioleta en el material genético de los organismos, los cuales dañan al ácido ribonucleico (ARN, ordena el funcionamiento de la célula de acuerdo las instrucciones del ADN, este se encuentra en el citoplasma celular) y al ácido desoxirribonucleico (ADN, encuentra principalmente el núcleo de la célula y contiene la información del código genético del organismo). Debido a que el ADN y ARN transportan y procesan la información genética para la reproducción y el funcionamiento del organismo, su daño inactivo efectivamente afecta a la célula.

Una célula que no se puede duplicar o reproducir se considera muerta; sin embargo, se considera “inactiva”, debido a que es incapaz de multiplicarse e infectar al huésped (Comisión Nacional del Agua, s.f.).

Sin embargo, tiene el inconveniente de haber foto reactivación, es decir, la célula sane y como no hay un efecto desinfectante residual puede haber recrecimiento. Asimismo, este método

no genera subproductos de la desinfección y es capaz de desactivar la mayoría de los virus, esporas y quistes, debido a que estos no tienen la capacidad de regenerarse.

El éxito de la desinfección con luz UV, depende de las características del agua a desinfectar, debido a que la luz UV debe ser absorbida por los microorganismos, para que los inactive, cualquier cosa que evite su contacto afecta el grado de desinfección, es decir que, su efectividad decrece en aguas turbias, requiriendo algún proceso complementario (Comisión Nacional del Agua, s.f.).

#### 3.3.3.2. Filtración

La filtración es una separación física, en lo cual, se hace pasar una mezcla sólido-líquida a través de un medio poroso que permite la retención de los sólidos y el paso de los líquidos, remueve las partículas y materia coloidal no sedimentables. Sin embargo, la eficiencia depende sólo del tamaño de los poros del medio filtrante (Comisión Nacional del Agua, s.f.).

Su funcionamiento se basa en el efecto de tamizado, donde los sólidos no logran penetrar el medio filtrante, debido a que son retenidos en su superficie. Lo anterior, sucederá sólo si el tamaño de los poros del medio filtrante es menor al tamaño de las partículas sólidas. La gran desventaja con la que se cuenta es el mantenimiento de las membranas por la obstrucción de poros según Zárate (2016).

#### 3.3.3.3. Ozonación

Actualmente, la ozonización es una técnica de oxidación química con una gran variedad de aplicaciones que incluye: desinfección, oxidación de micro contaminantes orgánicos recalcitrantes. Este sistema radica en el alto poder oxidante del ozono.

El ozono es un compuesto formado por tres átomos, el ozono es un biocida capaz de desactivar la mayoría de los microorganismos, incluyendo patógenos resistentes, tales como ciertas cepas de *Staphylococcus aureus* o *Clostridium difficile,* así como quistes y virus en muchos casos con más eficacia que el cloro (Monge, Silva y Bengoa, s.f.).

Según Belzona (2010), la rápida acción y tiempos de contacto menores para una correcta desinfección permite que la desinfección mediante ozono se realice en tanques de contacto muy reducidos, debido a que únicamente tres minutos de tiempo de contacto pueden asegurar la desinfección.

Los mecanismos de funcionamiento que se incluyen durante la oxidación con ozono dependen en la mayoría de los casos del pH de la disolución. La reacción del ozono en el medio acuoso puede ejercer dos mecanismos de acción para la oxidación de este (Saénz, 2019):

1. Oxidación molecular mediante ozono molecular**:** Este mecanismo sucede comúnmente, cuando se encuentra pH en condiciones ácidas.

2. Oxidación de compuestos mediante radicales hidroxilos libres producidos durante la descomposición de ozono: Al aumentar el pH en el proceso de ozonización, la velocidad de reacción y generación de radicales aumenta. De modo que la degradación de la materia orgánica presente en las aguas a tratar se da mediante la acción del ozono y los radicales producidos en el medio alcalino.

En la ozonización, la eficacia depende de la contaminación (química y biológica) del agua a ser tratada, del tiempo de contacto y de la concentración de ozono. Los componentes de un sistema de ozonización (Monge et al., s.f.)

1. Preparación del gas de alimentación.
2. Generación del ozono.
3. Contacto del ozono que suele realizarse bien por difusores de burbuja o mediante inyectores del tipo Venturi.
4. Destrucción del ozono que se realiza por destrucción térmica o bien, por destrucción catalítica con catalizadores de paladio, óxido de níquel o manganeso.

#### 3.3.3.4. Cloración

El cloro es un desinfectante que elimina, reduce o inactiva los organismos, debido a su fuerte capacidad de oxidación del material celular, destruyendo o inhibiendo el crecimiento de bacterias y algas. Este método es altamente conocido por la capacidad de desinfección y el precio (Zaraté, 2016).

Para lograr la desinfección se dosifica a niveles de concentraciones fijas establecidas de cloro activo, en cualquiera de sus diferentes formas (cloro gas, hipoclorito de sodio, hipoclorito granular), los cuales decrecen después de un periodo de contacto.

Cabe mencionar que, para producir el efecto desinfectante el cloro dosificado sólo debe de ser consumido parcialmente. El modo de acción del cloro en los microorganismos se lleva a cabo por medio de dos tipos. Por un lado, afectación directa sobre la membrana y ocluye la permeabilidad y por otro, altera las funciones celulares (Velázquez et al., 2018).

Los principales con derivados del cloro que se emplean para llevar a cabo la desinfección se diversifican en la siguiente clasificación:

1. **Cloro gaseoso ($Cl_2$):** Es un gas irritante, tóxico, más denso que el aire y de color verde amarillento. Al estar en contacto con el agua se hidroliza rápidamente, formando ácido hipocloroso y ácido clorhídrico; su aplicación aumenta la eficacia de la desinfección

2. **Hipoclorito de sodio:** Es un buen desinfectante. A nivel industrial se obtiene por reacción del cloro gas con una solución de hidróxido de sodio que, al ser incorporado en el agua genera especies hidroxilo que promueven el rendimiento de desinfección.
3. **Hipoclorito granular:** Para su aplicación debe ser disuelto, pues contiene de un 20-70% de cloro activo, lo que lo hace un agente altamente germicida.

**3.3.3.4. 1. Demanda de cloro:**

La cantidad de cloro que consumen las sustancias reductoras y la materia orgánica se define como demanda de cloro. Cuantitativamente representa la cantidad que se agrega menos la que se conserva al término de la reacción (cloro residual) y se mide en partes por millón (ppm o mg/l). El tiempo de reacción generalmente es de 15 a 30 minutos para agua residual (Comisión Nacional del Agua México, 2019). Según la cantidad de cloro que se agregue al agua se debe de considerar los siguientes términos:

- Cloro libre: Es la cantidad de cloro disponible para la desinfección del agua (GIZ,2017).
- Cloro residual libre: Cloro que permanece después de la reacción sin formar cloro combinado. Es la suma del HOCl y del OCl, No se presenta en la cloración del agua residual (Comisión Nacional del Agua, 2019).
- Cloro Residual Combinado: Cloro que permanece después de la reacción asociado con derivados de amoniaco y de materia orgánica (Comisión Nacional del Agua, 2019).
- Tiempo de Contacto. Tiempo que debe transcurrir entre la dosificación del cloro y la eliminación de las bacterias patógenas. Varía en función de la calidad del agua y la dosis aplicada (Comisión Nacional del Agua, 2019).

La curva de cloro (figura 1), se describe la reacción con la curva de cloro. Conforme el cloro es añadido, reacciona con la materia oxidable y así todo se reduce a ion cloro (punto A). Del punto A de la gráfica al punto B se forman los compuestos orgánicos de cloro y cloraminas. Del punto B al punto de quiebre se da la destrucción de cloraminas y los compuestos orgánicos de cloro. A partir del punto de quiebre se forma el cloro libre que se encontrará disponible en el agua para su desinfección(Tchobanoglous, 2012).

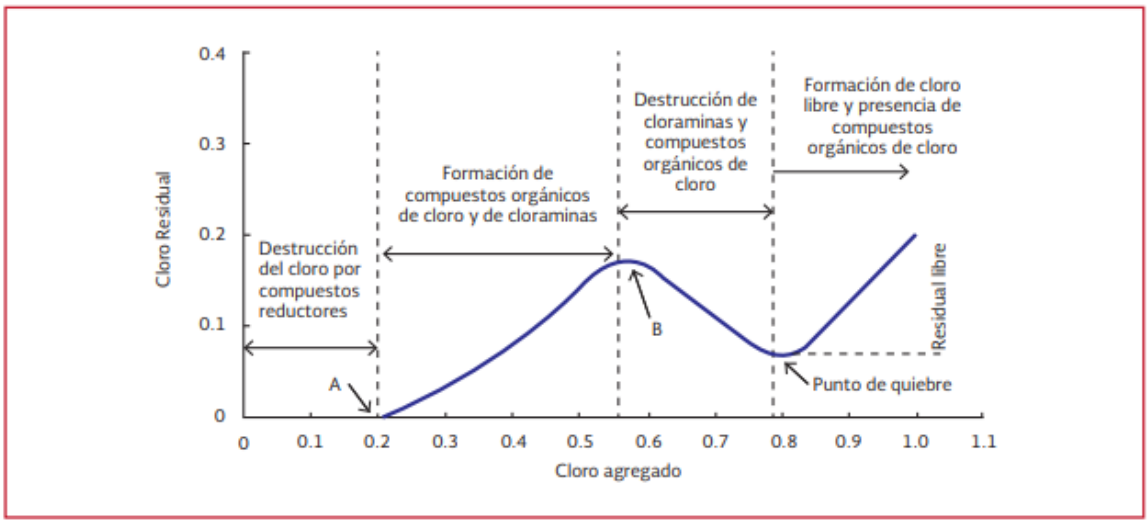


Figura 1. Curva obtenida en la cloración a punto de quiebre (Tchobanoglous, 2012)

### 3.4 Comparación de métodos de desinfección

De igual forma se deben de utilizar análisis fisicoquímicos del agua, con el fin de determinar si la misma se reutiliza cumpliendo con la legislación pertinente y el método de desinfección que se adecua mejor al fluido a tratar.

Es de gran importancia ubicar un medidor de caudal para conocer la cantidad de agua que ingresa al tanque de contacto y a partir de aquí se distribuirá al lugar donde se reutilizara (si es necesario una zona de bombeo). Una vez instalado el tratamiento terciario se seguirá monitoreando la calidad de las aguas para evitar cualquier riesgo biológico, químico o físico (Castillo y Laurent, 2016).

Los criterios anteriormente mencionados se pueden comparar y observar en el siguiente cuadro:

**Cuadro 5**. *Alternativas para la desinfección de los efluentes del tratamiento secundario.*

| **Característica** | **Métodos de desinfección** | | | |
|---|---|---|---|---|
| | **Cloración** | **Ozonización** | **Radiación Ultravioleta** | **Membranas** |
| Toxicidad a microorganismos | Alto | Alto | Alto | Bajo-Alto |
| Subproducto de desinfección | Alto | Alto | No aplica | No aplica |
| Corrosión | Alto | Alto | No aplica | No aplica |

| Característica | Métodos de desinfección | | | |
|---|---|---|---|---|
| | **Cloración** | **Ozonización** | **Radiación Ultravioleta** | **Membranas** |
| Disponibilidad (costo) | Bajo | Moderado-Alto | Moderado-Alto | Moderado-Alto |

**Fuente:** Elaboración propia (2023) con base en la Comisión Nacional del Agua (s.f.).

### 3.4. Estación de bombeo para el reuso

Para la implementación de un sistema de reuso de agua residual se sigue la Legislación Nacional mencionada anteriormente, asimismo se debe de evaluar la topografía del sitio de estudio en caso de contar con una pendiente que no permite la llegada del agua al lugar por gravedad donde se desea realizar el reuso, se necesita la instalación de una estación de bombeo.

Se considera que los sistemas en los cuales se quiere utilizar el agua tratada en el tratamiento terciario en ocasiones no se encuentran al mismo nivel de planta de tratamientos, por lo tanto, se debe bombear (Sabogal, Palacios y Pantoja, 2013). Este es un conjunto de estructuras civiles, tuberías y accesorios que toman el agua de la fuente de abastecimiento y la impulsan a un reservorio de almacenamiento o directamente a una red de distribución.

Una bomba es una máquina hidráulica capaz de transformar, absorbiendo un tipo de energía y restituyendo en otra, es decir, suministra energía mecánica al líquido para ser impulsada (López, 2005), donde la vida útil y el período de diseño de los elementos electromecánicos es menor que en otras obras civiles.

Para estaciones de bombeo con caudales pequeños como por ejemplo en zonas rurales puede optarse un periodo de diseño en quince años y para proyectos de grandes comunidades en el orden de treinta años. Además, para el caudal de diseño se debe tomar en cuenta, el número de horas de bombeo al día:

- **Bombeo de 24 horas al día:** se utilizará el caudal máximo diario.
- **Bombeo menor de 24 horas al día:** es el caudal máximo diario dividido por el porcentaje de tiempo que se bombea al día.

#### Elementos de la estación de bombeo

Se pueden distinguir tres elementos principalmente según López (2005):

- **La tubería de succión y accesorios (anterior a la bomba):** Es la etapa más crítica en el bombeo, debido que cualquier entrada de aire ocasionará problemas en la cámara de bombeo. Asimismo, esta no debe ser inferior al diámetro de la tubería de impulsión ni tampoco menor al orificio de entrada de la bomba. Se debe de buscar que la tubería sea la más recta y corta posible y evitar accesorios como los codos, uniones para evitar las pérdidas de energía.
- **La bomba (generalmente centrífuga, porque su movimiento es siempre rotativo):** Al seleccionarla no solo hay que tomar los criterios del caudal y altura, sino también otras características como las de costo de electricidad, el tiempo de bombeo y tipo de agua.
- **La tubería de impulsión y sus respectivos accesorios:** Esta conducción puede ser lo bastante larga y con diferentes accesorios se recomienda mantener dentro de valores normales, la sobrepresión por golpe de ariete, la velocidad este en el rango de 1,0 m/s a 3,0 m/s.

**Diseño del Bombeo**

Un diseño hidráulico del bombeo debe tener en cuenta un esquema de bombeo, debido que las ecuaciones planteadas dependen de si las succiones son positivas o negativas y si se descarga al aire libre o no (Cuadro 6).

**Cuadro 6.** *Ecuaciones para el diseño de la estación de bombeo*

| Ecuación | Definición |
|---|---|
| $Q_{Promedio}= \frac{Consumo\ total*Población}{86{,}400}$ | El caudal promedio se refiere a la cantidad promedio de fluido que fluye a través de un punto específico en un período de tiempo determinado. El consumo total es el volumen de agua utilizado por persona en un día y población es la cantidad de personas en un área determinada. |
| $Q_{máx\ diario}= (K_1)*Q_{Promedio}$ | El caudal máximo diario es la demanda máxima que se presenta en un día del año. Es decir, representa el día de mayor consumo en el año. Y donde $K_1$ es el coeficiente de variación del máximo diario con respecto al caudal promedio. |
| $Q_{diseño}= \frac{Q_{máx\ diario}}{X}$ | El caudal de diseño es el que combina las necesidades de la población de diseño y los costos de la construcción de un acueducto. Y donde "X" es el porcentaje de utilización de la bomba en el día. |
| $D_i = 1{,}3 * (x)^{1/4} * \sqrt{Q_{diseño}}$ | El diámetro de impulsión es el que se utiliza para garantizar que la tubería pueda transportar la cantidad adecuada de |

| Ecuación | Definición |
|---|---|
| | fluido a la velocidad y presión necesarias del tanque de captación a la bomba. |
| $V_i = \frac{Q_{diseño}}{Área\ (\pi * (r)^2)}$ | La velocidad de impulsión es la necesaria para que fluido o sustancia fluya a través de la tubería y tiene un impacto significativo en el rendimiento y la eficiencia del sistema. |
| $J = \left(\frac{Q_{diseño}}{(0{,}2785 * 150 * (D)^{2{,}63}}\right)^{\frac{1}{0{,}54}}$ | Pérdida de carga total es la disminución de presión o energía en un sistema de tuberías debido a la fricción y otros factores que actúan sobre el fluido que fluye a través de ellas. Y "D" es el diámetro de la tubería. |
| $(V_{descarga}) = \frac{(V_i)^2}{2g}$ | La velocidad de descarga representa la energía cinética del fluido en cualquier punto del sistema. |

Fuente: *López, 2005.*

Además, en términos generales, se deben considerar los siguientes términos:

**Altura estática de succión:** Es la distancia que existe entre el nivel del agua en el tanque y el eje de la bomba. Cuando el nivel del agua se encuentra por debajo de la bomba se llama "succión negativa", por el contrario, si el nivel de agua está por encima de la bomba se denomina "succión positiva".

**Altura estática de impulsión:** Es la diferencia entre el nivel de descarga de la bomba y el eje del rotor.

**Alturas estáticas total:** Es la diferencia entre los niveles del agua del tanque y la descarga, en otros términos, es la suma de la altura estática de succión e impulsión.

**Altura de fricción:** Es la altura que se debe asumir para vencer las pérdidas por fricción en las tuberías (impulsión y de succión) y se calculan con las ecuaciones de Darcy-Weisbach o Hazen-Williams.

**Altura de velocidad:** Representa la energía cinética del fluido en cualquier punto del sistema.

**Altura de pérdidas menores:** Es la altura adicional para vencer las pérdidas relacionadas a los accesorios, tales como codos, válvulas, entre otros.

**Altura dinámica total:** Es la altura total que debe vencer la bomba teniendo en cuenta, los factores anteriormente mencionados.

Todo lo anterior, es la base necesaria para dimensionar un sistema de reuso de las aguas residuales de la planta de tratamiento del Campus Omar Dengo que cumpla con los parámetros establecidos en el Reglamento de Vertido y Reuso de Aguas Residuales y las leyes vigentes relacionadas y de esta manera, mitigar los impactos que traen la escasez de este recurso en la institución y reducir la carga contaminante que vierte al río Pirro.

## 4. Metodología

### 4.1. Fase 1. Caracterización del funcionamiento y parámetros fisicoquímicos del afluente y efluente de la planta de tratamiento.

En la primera fase del proyecto de investigación se recopiló información de fuentes primarias y secundarias. Se inició con tres inspecciones a la planta de tratamiento de la Universidad Nacional junto con la coordinadora de la planta para obtener una descripción y visión de todos los procesos implicados desde la entrada de las aguas residuales hasta su salida.

Asimismo, se obtuvieron los reportes operacionales de los últimos dos años de la planta (2019-2020), planos y dimensionamiento de los procesos unitarios de la planta, dicha información fue brindada por la coordinadora con la cual se caracterizó el efluente.

Además, se realizó una entrevista estructurada a la encargada de la planta (Anexo 3) con un formulario previamente preparado para conocer con mayor detalle, las características de la planta de tratamiento.

En este trabajo final de graduación se utilizó una muestra de tipo no probabilística o dirigida, debido a que la elección depende de las razones relacionadas con las características o criterios de la investigación y no en términos de probabilidad (Hernández, 2014).

En esta investigación, las muestras se tomaron para realizar la caracterización del efluente y afluente agua residual de la actual planta de tratamiento, así como de las pruebas piloto (Cuadro 7).

**Cuadro 7.** *Número de muestras tomadas para el análisis de los parámetros básicos.*

| Parámetro | Análisis en el afluente | Análisis en el efluente | Tipo de análisis |
|---|---|---|---|
| $DBO_5$ | 2 | 3 | Simple |
| DQO | 2 | 3 | Simple |
| Sólidos Suspendidos Totales | 2 | 3 | Simple |
| Sólidos Sedimentables | 2 | 3 | Simple |
| G y A | 2 | 3 | Simple |
| SAAM | 2 | 3 | Simple |
| pH | 2 | 3 | Simple |
| Temperatura | 2 | 3 | Simple |
| Metales pesados | 1 | 3 | Simple |

| Parámetro | Análisis en el afluente | Análisis en el efluente | Tipo de análisis |
|---|---|---|---|
| Coliformes fecal | - | 1 | Simple |
| Nematodos intestinales | - | 1 | Simple |
| Nitrato y nitrito | 3 | 3 | Simple |
| Turbiedad | 2 | 2 | Simple |
| Fenoles | 1 | 3 | Simple |
| Sulfitos | 1 | 3 | Simple |

**Fuente:** *Elaboración propia (2023).*

El muestreo y análisis anteriormente mencionado se realizó en el mes de octubre del 2020 y en el mes de abril del 2021 a las 9:30 am para la caracterización del afluente y efluente (Figura 2). Para el análisis de las muestras se solicitó la colaboración del Laboratorio de Análisis Ambiental de la Escuela de Ciencias Ambientales de la Universidad Nacional para ser examinadas las diferentes variables establecidas en el Reglamento de vertido y reuso de aguas.

En la misma fecha del muestreo, el laboratorio San Martín realizó el análisis trimestral para el reporte operativo de la planta de esta manera se obtuvo un análisis cruzado de los datos proporcionados por ambos laboratorios.

Asimismo, las muestras del efluente se complementaron con un muestreo microbiológico para el análisis de coliformes fecales y nematodos intestinales en el agua residual realizados por el laboratorio anteriormente mencionado.

**Figura 2.** *Muestreo del afluente de la planta de tratamiento de la Universidad Nacional.*

Primeramente, para la toma de la muestra de ambos muestreos se utilizó el equipo de protección necesario (guantes, gabacha, entre otros). En el afluente y efluente se tomó una muestra simple, utilizando recipientes limpios sin rastros de agua y debidamente etiquetado.

Para el análisis de grasas y aceites junto con fenoles se utilizó botellas de vidrio ámbar de 1 l (*Figura 3* y *4*), para estos no se realizaron enjuagues, debido a que este se encuentra condicionado para la toma de esta muestra.

**Figura 3.** *Envase para recolección de muestra para grasas y aceite*

**Figura 4.** *Envase para recolección de muestra para fenoles.*

En la toma para los demás análisis se utilizaron galones de plástico polipropileno de 4 litros, realizando tres enjuagues con la fuente del agua que se va a muestrear (Figura 5) y seguidamente, se procedió a recoger la muestra del agua en el galón.

**Figura 5**. *Enjuague a los envases de muestreo.*

Asimismo, para la recolección de la muestra de metales pesados se utiliza un envase plástico de 250 ml (Figura 6), estos se encuentran debidamente acondicionados para la toma de la muestra. Por último, en la recolección de la muestra de sulfitos se utilizó un envase plástico de 500 ml (Figura 7) y para la recolección de nitrógeno amoniacal se utilizó un reciente estéril de 100 ml.

**Figura 6.** *Envase para recolección de muestra para metales pesados.*

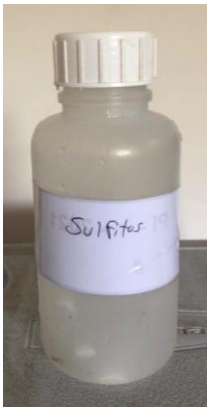


**Figura 7.** *Envase para recolección de muestra para sulfitos.*

Inmediatamente después de cada muestreo, cada recipiente fue almacenado en una hielera (Figura 8) para finalmente, entregarlas al Laboratorio de Análisis Ambiental.

**Figura 8**. *Almacenamiento de las muestras.*

En el campo se midió el pH y temperatura del agua residual de la entrada y salida, utilizando un instrumento para ambos parámetros: HQ40D Multimedidor digital de dos canales brindado por la coordinadora de la planta de tratamiento (Figura 9). Para su medición se agitó el instrumento para homogeneizar la muestra y se procedió a su lectura.

**Figura 9.** *Multimedidor digital HQ40D utilizado.*

Además, se midió la turbidez (Figura 10) con ayuda de un Turbidímetro modelo OAKLON T- 100, iniciando con la calibración pulsando CAL y colocando frascos de muestras de 100, 20, 0,2 NTU (Figura 11).

**Figura 10**. *Medición de la turbiedad*

**Figura 11.** *Calibración del equipo de turbiedad.*

Además, en el campo se determinaron los sólidos sedimentables del afluente y efluente, realizando tres lavados con pequeñas porciones de agua residual al cono de Imhoff, el cual se colocó en la base y se llenó con un litro de agua residual (Figura 12).

Posteriormente, se dejó sedimentar la muestra durante 45 minutos y transcurrido este tiempo se realizaron raspados en las paredes del cono con un agitador de vidrio y se mantuvo en reposo durante 15 minutos más. Finalmente, se registró el volumen de sólidos sedimentables de ambas (Figura 13).

**Figura 12.** *Preparación para la lectura de los sólidos sedimentables.*

**Figura 13.** *Lectura de la cantidad de sólidos sedimentables en el afluente*

Finalmente, para la determinación de nitrato y nitrito se utilizó una prueba de tiras de la marca HACH 2745425, la cual se introduce en el agua residual y se comparó con el cuadro de concentraciones que se encuentra en el envase de la prueba y de esta manera, se determina la concentración en ppm (mg/l) de los mismos (Figura 14). Lo anterior, se hizo de igual forma con el parámetro de amonio.

**Figura 14.** *Prueba de nitratos y nitritos.*

Posteriormente, con la información recopilada en los reportes operacionales y los análisis de laboratorio de los parámetros establecidos por el Reglamento de vertido y Reuso de agua residual se realizó el diagnóstico de la eficiencia de la planta de tratamiento con relación a la reducción de los contaminantes.

Además, se estableció cuáles son los parámetros con los que se diseña el sistema de tratamiento terciario. Para el análisis de la información se realizó la tabulación de datos y creación de gráficos mediante la herramienta de Excel y de esta manera, se evidenciaron los resultados de forma clara.

### 4.4.2. Fase 2. Desarrollo de un diseño de un sistema de remoción de contaminantes mediante pruebas a escala de laboratorio para el aprovechamiento del efluente.

Inicialmente, para establecer el sistema de tratamiento terciario que se utilizó para el diseño del reuso de las aguas residuales, se realizaron pruebas piloto en el laboratorio de Hidrogeología y Manejo del Recursos Hídrico de la Escuela de Ciencias Ambientales en función de la remoción de la carga contaminante, con base en la caracterización del agua residual en la fase anterior.

Se elaboró una matriz de decisión (Cuadro 8), a partir de los factores de selección de procesos y operación del sistema de tratamiento de agua residual de Romero (2010). Teóricamente, se evaluaron los métodos de desinfección, considerando la viabilidad asociada a los costos, disponibilidad de espacio, eficacia y criterios de operación (requerimiento de personal, reactivos y recursos) del método de desinfección.

Se puntuó con una escala de uno al cinco cada factor, donde cinco indican el mayor grado de cumplimiento y uno el menor grado. Esta puntuación se otorgó, a partir de la revisión bibliográfica y la caracterización del efluente de la planta de tratamiento de la Universidad Nacional.

En el sistema de puntuación, el valor de 1 se asigna cuando la implementación no cumple con los estándares requeridos en el área de estudio, siendo considerada inaceptable. Por su parte, el puntaje 2 se reserva para situaciones en las que la implementación es incompatible, lo que significa que no son adecuadas o favorables.

El puntaje 3 se otorga cuando la implementación es considerada aceptable, lo que indica que cumple con los estándares mínimos, pero no destaca de manera significativa. El puntaje 4 se asigna cuando la implementación es sólida y confiable, demostrando un alto nivel de cumplimiento de estándares y requisitos. Finalmente, el puntaje 5 se otorga cuando la implementación se considera adecuada en el área de estudio, representando un alto nivel de eficacia y cumplimiento.

**Cuadro 8.** *Matriz de selección del método de desinfección para el reuso de las aguas residuales de la planta de tratamiento de la UNA.*

| Método de desinfección | Costo | Disponibilidad de espacio | Eficacia | Criterios de operación requerido |
|---|---|---|---|---|
| Cloración | | | | |
| Radiación ultravioleta | | | | |
| Ozonación | | | | |
| Filtración por membrana | | | | |

**Fuente:** *Elaboración propia (2023), con información de Romero (2010).*

**Remoción de contaminantes por medio de filtración**

En el Laboratorio de Hidrogeología y Manejo de Recurso Hídrico se inició la etapa de las pruebas a escala de laboratorio para la remoción de los contaminantes mediante un prototipo que simuló las condiciones del reactor de la planta de tratamientos de agua residual del Campus Omar Dengo.

Primeramente, se tomaron 6 galones de efluente del agua residual proveniente de la planta de tratamiento, dicho efluente será el afluente del prototipo. En esta prueba se construyeron 3 réplicas con distintos materiales filtrantes en los recipientes plásticos con capacidad de 4,3 litros.

Para la construcción de la prueba de filtración se colocó inicialmente una base de piedra cuarta y algodón para evitar que el medio filtrante se depositara en el fondo del recipiente plástico. Además, en el envase A (Figura 15) se colocó el material el carbón activado, en el envase B (Figura 16) piedrilla y por último en el envase C de arena (Figura 17).

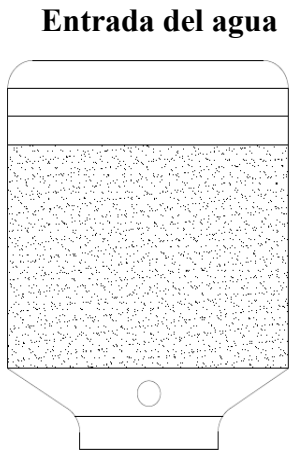


**Figura 15.** *Filtro de piedra*

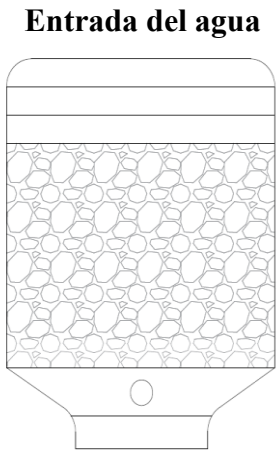


**Figura 16.** *Filtro carbón activado*

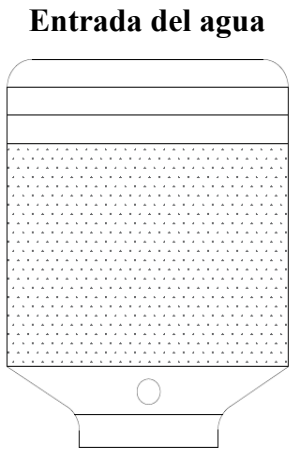


**Figura 17.** *Filtro arena.*

En las pruebas se midió el pH, temperatura, turbiedad, nitratos y nitritos, tanto en la entrada como en la salida del efluente. Además, se tomó el agua de la salida de cada uno de los envases y fue llevada al Laboratorio de Análisis Ambiental (LAA) de la EDECA para el análisis de los parámetros básicos y de esta forma, se comparó con los datos obtenidos en la etapa de caracterización. A partir de los datos recolectados en campo y de los análisis del LAA de las pruebas a escala laboratorio se tomó la decisión de cuál es el medio filtrante más adecuado para la planta de tratamiento.

**Desinfección**

A partir de la matriz de selección se decidió que el método de desinfección adecuado para el agua residual de la planta de tratamiento Campus Omar Dengo es la cloración tomando en cuenta, todos los criterios evaluados.

Seguidamente, se realizaron las pruebas a escala laboratorio del diseño para el sistema de remoción de los contaminantes en el laboratorio de Hidrogeología y Manejo del Recursos Hídrico de la Escuela de Ciencias Ambientales. Se tomaron tres muestras del efluente de la planta de tratamiento en un recipiente donde se realizaron tres enjuagues antes de la toma del agua residual (Figura 18) y la misma se transportó al laboratorio anteriormente mencionado.

**Figura 18.** *Toma de muestra para las pruebas de remoción*

Para la determinación de la curva de demanda de cloro se inició con la medición del pH y temperatura de la muestra en el laboratorio. Se debe mencionar que se realizaron dos curvas de demanda de cloro. Para obtener la primera, se realizó con una solución madre de hipoclorito de sodio, iniciando con una alícuota de 1,4 mg/l del mismo cloro comercial con una concentración de 3,5% m/v y se aforó con agua destilada en un balón aforado de 630 ml. La segunda se construyó con una solución madre de 7,14 mg/l de $Cl_2$, en un balón de aforado de 500 ml (Zarate, 2016).

De la solución madre se calculó y vertió en los beaker de 250 ml las distintas dosis de la solución madre de cloro utilizando la ecuación 3. En la primera curva, se calcularon 6 alícuotas, mientras que en la segunda 14.

Se realizó agitación en cada vertido y tratando de protegerlos de la luz directa del sol, envolviendo con papel aluminio (Figura 19). Se esperó un tiempo de contacto de 20 minutos.

**Figura 19.** *Ensayo de cloración*

(Ecuación 3): C1*V1=C2*V2

**Donde:**

C1= Concentración de la solución inicial.

V1= Volumen de la solución inicial.

C2= Concentración de la disolución final.

V2= Volumen de la dilución final.

Para la determinación del cloro residual se realizó mediante el método colorimétrico (DPD) utilizando Kit "Checker" de Hanna Instruments. El mismo consiste en medir la cantidad de luz absorbida por una sustancia química en función de la longitud de onda de la luz. Esta absorbancia de una solución es directamente proporcional a la concentración de la sustancia absorbente y a la longitud de la trayectoria que recorre la luz a través de la muestra (Hanna, sf).

Seguidamente, en una superficie plana y fuera de la luz directa del sol se colocó el medidor y se encendió el equipo presionando el botón principal, presentando en la pantalla la indicación de "C.1", "Add" "Press".

Se realizó un enjuague en la cubeta con agua destilada y después, tres enjuagues con la muestra de agua residual. Se llenó con cada una de las muestras y se secó una toalla. Posteriormente, se introdujo la cubeta dentro del medidor y se cerró la tapa. Se presionó el botón principal y se mostró en la pantalla "Add", "C.2" y la palabra "Press" parpadeando y demostrando que realizó el autocero blanco de Hanna Instruments que sirve para hacer la calibración del espectrofotómetro, desechando la absorbancia de todos los componentes diferentes de la sustancia de estudio, donde se retiró la cubeta.

En otra cubeta de igual forma enjuagada tres veces con la misma muestra de agua residual con la cual se realizó el autocero, se añadió un sobre del reactivo de color para el cloro residual, tapando la cubeta y secando nuevamente con una toalla e introduciendo en el medidor. Finalmente, el instrumento desplegó directamente la concentración de cloro residual en mg/l.

Para calcular la concentración necesaria de cloro residual y el punto quiebre se utilizó la ecuación lineal de la gráfica del cloro residual y se tomó como base, el valor de concentración máximo establecido en el Reglamento de Vertido y Reuso de Aguas Residuales N. º33601-MINAE-S (1.00 mg/l).

### 4.4.3. Fase 3. Propuesta de reutilización del agua tratada para un manejo eficiente del agua residual mediante la conexión a servicios sanitarios.

Se utilizaron criterios y fórmulas para dimensionar el tratamiento terciario, siendo esta cloración (Anexo 4). Asimismo, se determinó el costo aproximado del sistema, junto con un análisis de viabilidad, considerando factores técnicos, sociales, económicos y ambientales que la implementación del reuso tendría para la universidad.

La propuesta de reutilización depende del método de desinfección a utilizar; sin embargo, para todos se necesitará una cámara de bombeo, debido a la geografía, la planta y los edificios a conectar (Escuela de Ciencias Ambientales) que presentan cierta pendiente que imposibilita el reuso por gravedad. Esto ayudará a impulsar el agua del tanque de contacto hasta la tubería de los servicios sanitarios de los edificios mencionados.

Para la determinación de las dimensiones de la cámara de bombeo se utilizaron diferentes ecuaciones (Zárate, 2016), la potencia teórica, potencia real, carga total de trabajo, pérdida de carga por el recorrido del agua en la tubería y número de Reynolds (Anexo 5).

Asimismo, en esta etapa se realizaron los cálculos para la estación de bombeo y la tubería necesaria. Para tener una base de lo anterior, se realizaron entrevistas con expertos en el tema que fueron de gran ayuda para tomar la decisión de la forma de establecer esta conexión.

Para el análisis de la información se utilizó el paquete de Microsoft, Excel. En este programa se hizo uso de las ecuaciones mencionadas anteriormente, de esta manera se obtuvieron resultados más precisos. Por último, el documento con los resultados se reportó de manera digital a los encargados de la planta de tratamiento

## 5. Resultados y discusión

### 5.1. Caracterización teórica y físico química de la planta de tratamientos

La planta de tratamiento se localiza en la Universidad Nacional de Costa Rica, en el Campus Omar Dengo tratando las aguas residuales de la institución. Asimismo, el área de la zona de estudio desde el punto político-administrativo se ubica, en el distrito central del cantón de Heredia de la provincia de Heredia (Figura 20).

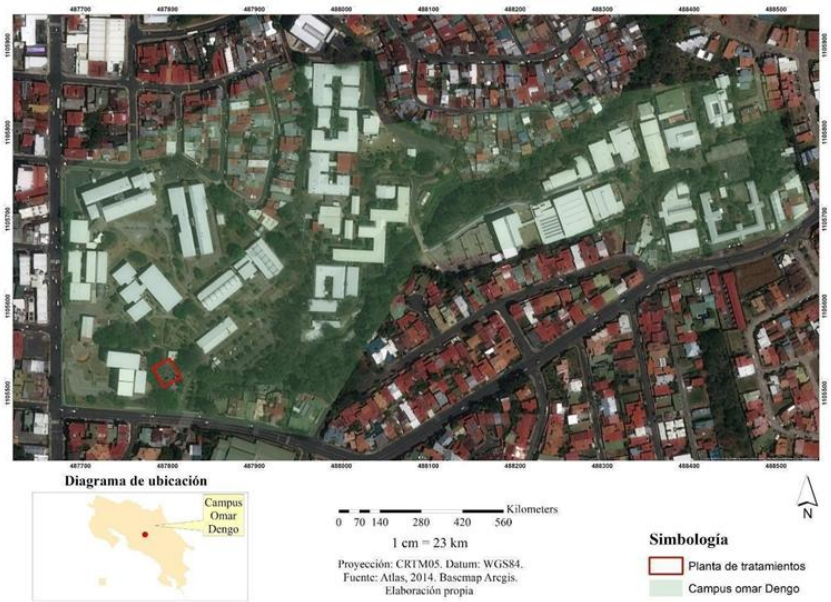


**Figura 20.** *Sitio de estudio*

Esta fue construida en el año 2005-2006, la cual posee diferentes procesos unitarios para la depuración de las aguas residuales generadas en la Universidad. En la planta de tratamiento se maneja un caudal aproximado de 648 $m^3$/día. Cabe destacar que, este dato es prepandemia y está diseñado para tratar 750 $m^3$/día y estas aguas son generadas en todos los diferentes baños, lavatorios, comedores, sodas, bibliotecas y edificios que pertenecen a la institución conformada aproximadamente por 17 277 colaboradores y 230 608 estudiantes.

La planta de tratamientos del Campus Omar Dengo presenta un sistema de tratamiento de lodos activados (aerobio). Igualmente, posee pretratamiento, sistemas de tratamiento primario, sistemas de tratamiento secundario y lecho de secado de lodos activados (Figura 21).

Inicialmente, como parte del pretratamiento del agua residual cruda, esta ingresa por dos tuberías principales, las cuales funcionan por gravedad y bombeo, la misma pasa por un tamizado (caja por rejillas con un espacio de 10 cm) con dimensiones de 1,7m x 0,85m , donde se van a separar los sólidos grueso no biodegradables y llega a un tanque de igualamiento (ecualización) con

medidas de 13,14m x 2,2m, el cual cuenta con un sistema que controla la salida del caudal, permitiendo el control de picos de caudal con un tiempo de retención de 3 horas. Además, realiza un mezclado previo de los lodos activados. Este cuenta con equipos de aireación para evitar las condiciones anaerobias y anóxicas. Además, dichos equipos transfieren oxígeno al agua para eliminar la remoción de DBO, SST, Nitrógeno y Fósforo.

Posteriormente, se transporta a dos reactores aerobios con medias de 7,97m x 4,1m ambos cuentan con bombas sumergibles, en cada uno donde se realiza el tratamiento microbiano utilizando las bacterias que existen en la misma agua residual. En estos se mantienen las condiciones de oxigenación apropiadas por medio de difusores de aire necesarias para descomponer la materia orgánica y evitar las condiciones anaeróbicas.

Luego, pasan a tres sedimentadores con dimensiones 7,97m x 4,1 m cada uno para la separación del agua tratada y los lodos, basándose en la diferencia del peso específico entre estos. En el sedimentador, los lodos precipitados se recirculan para mantener estable el sistema de la planta de tratamientos.

Por otra parte, una proporción de los lodos es enviada al lecho de secado con medidas de 15,16m x 9,07m, el cual consta de cuatro módulos techados con un sistema de desagüe para acelerar el secado. Finalmente, el agua residual tratada en los procesos anteriormente mencionados se vierte en el cuerpo receptor del río Pirro.

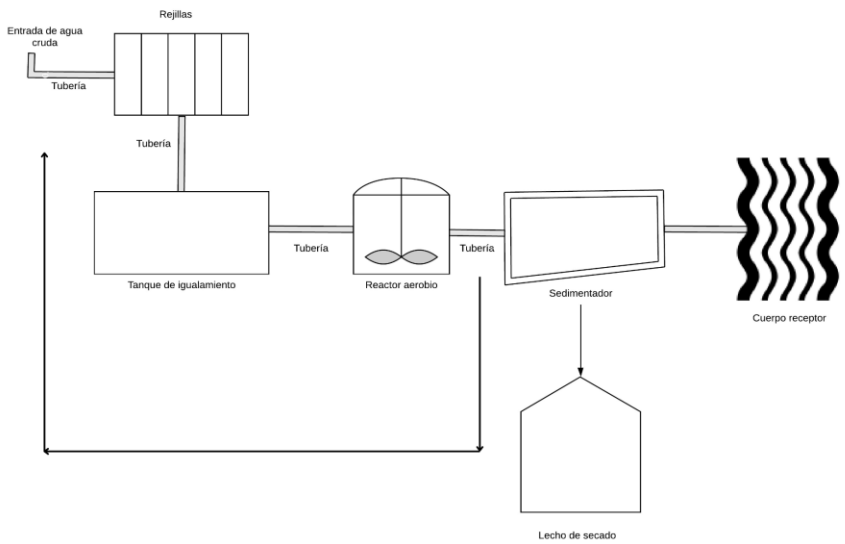


**Figura 21.** *Procesos unitarios de la planta de tratamientos del Campus Omar Dengo*

**Fuente:** Elaboración propia (2023).

**Características fisicoquímicas del afluente y efluente de la planta de tratamientos**

En los análisis fisicoquímicos realizados entre el cuarto trimestre del 2018 y a lo largo de todo el 2019 en la planta de tratamientos de la Universidad Nacional (anexo 6), se observan los resultados presentes en el agua residual los cuales cumplen con los límites máximos admisibles según Reglamento de Vertido y Reuso de Aguas Residuales Nº 33601.

Asimismo, en dicho período se analizaron los metales pesados (Anexo 6) presentes en el efluente. Estos se realizan cada tres meses en el efluente, según la Legislación Nacional. Además, se realizan al menos una vez a la semana mediciones de pH, sólidos sedimentables y temperatura, dichos datos son relativos para tener una línea base del funcionamiento y comportamiento de la planta de tratamiento.

Los flujos de las aguas residuales en cuanto al caudal y en su composición pueden variar, debido a que está muy relacionado a diferencias en el clima y el consumo del agua. Se puede observar que, los efluentes tratados cumplen con los límites permisibles del Reglamento de Vertido y Reuso de aguas residuales, a excepción de los Sólidos Suspendidos Totales del III Reporte operacional del 2019 (Datos marcados en rojo, Anexo 8), esto fue a causa de problemas relacionados con los aireadores y SAAM en el II Reporte operacional del 2019.

Por lo tanto, se puede mencionar que, en promedio (Cuadro 10) en el efluente se encuentra una DBO de 21,20 mg/l, DQO de 56,20 mg/l, SST tiene un valor de 37,60 mg/l, SSED de 0,28 ml/l/h, el valor reportado de grasas y aceites es de 6,40 mg/l, SAAM es de 1,85 mg/l, pH de 6,70 y una temperatura de 23,60 °C.

Asimismo, en el cuadro 9 se observa que el máximo de los sólidos suspendidos totales es de 121 mg/l, este valor es mayor al límite máximo permisible de 50 mg/l. Este valor corresponde al análisis realizado para el reporte operacional del III trimestre del 2019 y el máximo de SAAM es de 7,60 mg/l este valor está por encima del máximo permisible de 5, este valor responde al reporte operacional del I trimestre del 2019 (Anexo 6).

**Cuadro 9.** *Promedio de los análisis básicos del agua residual de la planta de tratamientos en el periodo del 2018-2019.*

| Parámetros | Parámetros Promedio | Incertidumbre Promedio | Desviación estándar | Máximo | Mínimo | Límites máximos permisibles |
|---|---|---|---|---|---|---|
| DBO ($mgO_2/l$) | 21,20 | ±1,60 | 10,04 | 34,00 | 13,00 | 50,00 |
| DQO ($mgO_2/l$) | 56,20 | ±3,80 | 21,45 | 90,00 | 36,00 | 150,00 |
| Sólidos suspendidos totales (mg/l) | 37,60 | ±1,95 | 47,27 | **121,00** | 5,00 | 50,00 |
| Sólidos Sedimentables (ml/l/h) | 0,28 | ±0,05 | 0,41 | 1,00 | 0,00 | 1,00 |
| G y A (mg/l) | 6,40 | ±1,50 | 3,36 | 11,00 | 4,00 | 30,00 |
| SAAM (mg/l) | 1,85 | ±0,34 | 3,22 | **7,60** | 0,20 | 5,00 |
| pH | 6,84 | ±0,05 | 0,53 | 7,39 | 6,29 | 5,00-9,00 |
| Temperatura (ºC) | 23,60 | ±3,60 | 0,55 | 24,00 | 23,00 | 15,00°C ≤ T ≤ 40,00°C |
| Caudal ($m^3$ /día) | 178,40 | ±5,00 | 137,53 | 422,00 | 97,00 | ---------- |

**Fuente:** *Elaborado con datos de los reportes operacionales código CA18-1214R01-1, CA19-0480-R01-1, CA19-0798-R01-1, CA19-1094-R01-1, U006-250220-01.*

En el cual, tener datos superiores de SST, podría llevar eficiencia en diferentes sistemas de desinfección, debido que pueden proteger a los microorganismos presentes en el agua al encapsularlos, lo que dificulta la penetración y acción del método de desinfección. Es decir, que la podría ser menos efectiva para desinfectar el agua, aumentando el riesgo de que los microorganismos sobrevivan y se mantengan activos (Romero, 2010).

En el efluente se observa la presencia de varios metales pesados entre los cuales se encuentran aluminio, boro, plata, plomo, estaño, mercurio, entre otros (Anexo 7). Asimismo, cabe

destacar que, la cantidad (mg/l) en el agua residual que se encuentra es mucho menor al límite máximo permitido en el reglamento de Vertido y Reuso de agua residual.

Estos se deben monitorear, debido a que la presencia de algunos metales pesados, como el hierro y el manganeso, pueden reaccionar con el cloro y formar complejos químicos (cloruro férrico y cloruro de magnesio). Estos complejos pueden reducir la disponibilidad de cloro libre en el agua para la desinfección, lo que significa que una parte del cloro se consume en reacciones químicas con los metales en lugar de estar disponible para desinfectar el agua. Y la presencia de estos, puede agravar problemas de corrosión en sistemas de distribución (tuberías). Además, si la institución decide posteriormente el reuso para las zonas, es posible que deban ser removidos para su reuso, donde las altas concentraciones, son tóxicas y perjudiciales para la vegetación, fauna y seres humanos (Romero, 2010).

El ente generador mide la temperatura, caudal, pH y sólidos sedimentables del efluente una vez por semana y dichos datos se registran en una bitácora de manejo de aguas residuales (Cuadro 10). Con base a lo anterior, se observa que el caudal promedio se encuentra entre 230,00 $m^3/d$ y 512,00 $m^3/d$. La temperatura oscila entre 22,70°C y 23,50°C. No se reporta presencia de sólidos sedimentables (ml/l) y el pH del efluente está entre 6,30 y 7,01. Cabe mencionar que, todos los parámetros analizados se encuentran dentro de los límites máximos permisibles.

**Cuadro 10.** *Promedio de las mediciones de parámetros por parte del ente generador*

| **Descripción** | **2018** | | **2019** | | | **Límites máximos permisibles** |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | **IV Trimestre** | **I Trimestre** | **II Trimestre** | **III Trimestre** | **IV Trimestre** | |
| Temperatura °C | 23,50± 1,00 | 23,00± 1,00 | 23,10± 1,00 | 22,70± 1,00 | 22,80± 1,00 | 15,00°C ≤ T ≤ 40,00°C |
| Caudal ($m^3/d$) | 422,00 ±6,00 | 452,00 ±5,00 | 512,00 ±5,00 | 258,00 ±7,00 | 230,00 ±6,00 | ---- |
| pH | 6,30± 0,04 | 6,70± 0,04 | 7,00± 0,04 | 7,01± 0,06 | 7,00± 0,06 | 5,00- 9,00 |

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Sólidos sedimentables (ml/l) | 0,10± 0,050 | 0,00± 0,050 | 0,10± 0,050 | 0,20± 0,050 | 1,00± 0,05 | 1,00 |

**Fuente:** *Elaborado con datos de los reportes operacionales código CA18-1214R01-1, CA19-0480-R01-1, CA19-0798-R01-1, CA19-1094-R01-1, U006-250220-01.*

De igual forma, como parte de una caracterización de la planta de tratamientos y el correcto funcionamiento de la planta de tratamientos se analizan los datos diarios medidos por el encargado de la planta de tratamientos entre enero y septiembre del 2020. El caudal promedio en el año 2020 es de 18,29 $m^3$/d, observando un máximo de 164,34 $m^3$/d en el mes de febrero, esto debido a una mayor presencia de estudiantes (Figura 22). Sin embargo, estos datos se encuentran atípicos con respecto a los años anteriores, debido a la poca presencialidad de estudiantes y colaboradores en la institución relacionados a la situación de la pandemia.

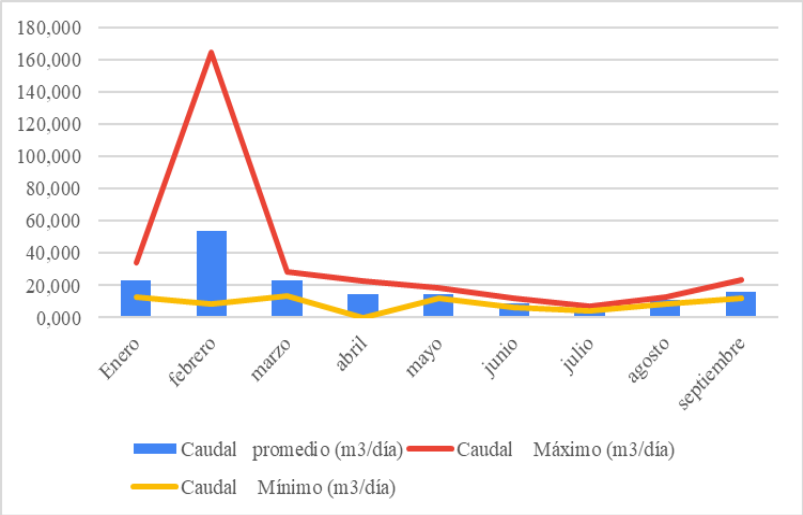


**Figura 22.** *Caudal promedio, máximo y mínimo mensual en el 2020 en la planta de tratamientos del campus Omar Dengo.*

En la Figura 23 se expone la temperatura del efluente de la planta de tratamiento, donde todos los meses del año 2020 cumplen con el rango de temperatura establecido en la regulación costarricense para su vertido en cuerpos de agua receptores, el cual va desde los 15,00 °C a los 40,00 °C. Presentando una mayor temperatura en el mes de abril (27,20 °C) y una menor en el mes de septiembre (21,60 °C). Además, estos valores, propician las condiciones óptimas para el desarrollo de vida acuática y sus procesos biológicos.

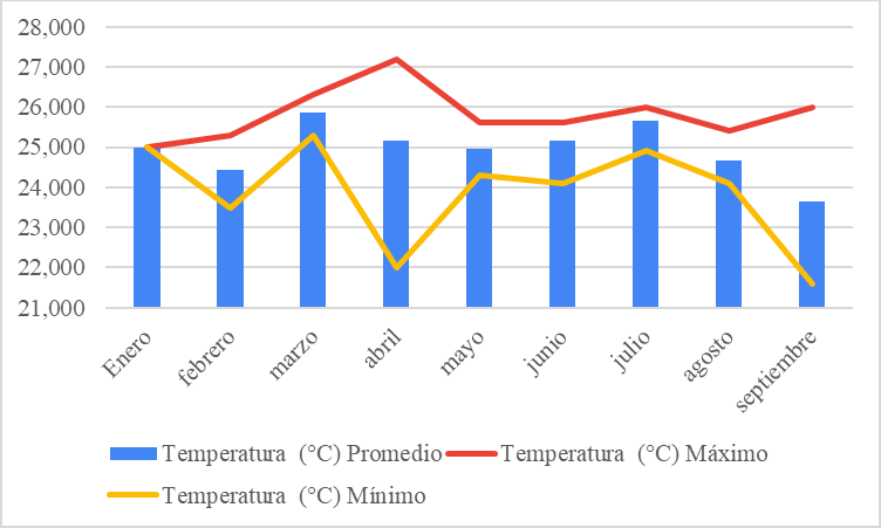


**Figura 23.** *Temperatura promedio, máximo y mínimo mensual en el 2020 en la planta de tratamientos del campus Omar Dengo.*

Se observa que en las mediciones de pH (*Figura 24*) del efluente en el año 2020 es de 6,6 cumpliendo con los límites permisibles en el reglamento de vertido y reuso de agua residual. Asimismo, el mínimo reportado es de 5,5 en el mes de marzo y un máximo de 8,1 en julio.

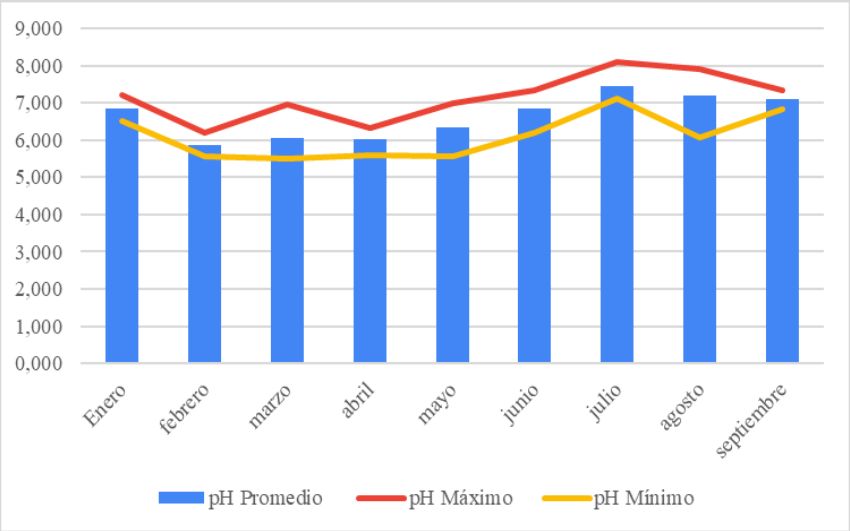


**Figura 24**. *pH promedio, máximo y mínimo mensual en el 2020 en la planta de tratamientos del campus Omar Dengo.*

En la figura 25 se observa una presencia promedio de sólidos sedimentables en el efluente de 0,100 ml/l en septiembre y 6,05 ml/l en enero con un máximo de 10,00 ml/l dicho mes. Asimismo, en mayo se reporta 1,33 ml/l con un máximo de 3,00 ml/l. Cabe destacar que, los valores reportados el mes de enero y mayo se encuentran por encima de los límites máximos permisibles en Reglamento de Vertido y Reuso de agua residual. Este dato, es de gran importancia tenerlo en consideración

debido que estos pueden envolver a diferentes microorganismos que podría implicar riesgos para la salud y causar daños en equipos.

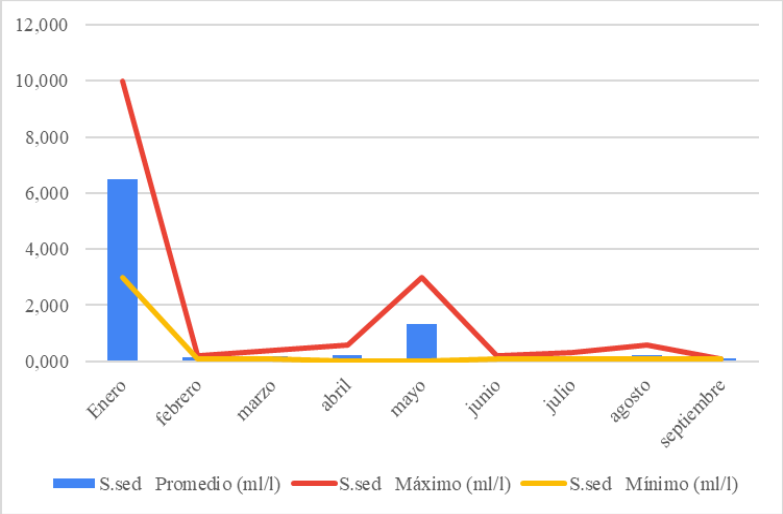


**Figura 25**. *Sólidos sedimentables promedio, máximo y mínimo mensual en el 2020 en la planta de tratamientos del campus Omar Dengo.*

Adicionalmente, los resultados del Laboratorio de Análisis Ambiental (Cuadro 11) de los parámetros analizados en el afluente y efluente realizados en octubre del 2020 demuestran que, los valores de la salida están por debajo de los límites máximos permisibles de la legislación nacional.

De igual forma, los resultados del efluente son menores a los valores promedios y mínimos de los años 2018 y 2019, debido a que la planta de tratamiento en el lapso del muestreo se encontraba en condiciones atípicas (Contexto de una Pandemia).

Con base a lo anterior, se obtuvo eficiencias de remoción de 96,66 % a 99,58% demostrando resultados efectivos y significativos en el proceso del tratamiento de las aguas residuales vertidas por la planta de tratamiento.

**Cuadro 11.** *Parámetros fisicoquímicos muestreados en el 2020.*

| Parámetro | Afluente | Efluente | Límite máximo permisible | Eficiencia de remoción (%) |
|---|---|---|---|---|
| DBO ($mgO_2/l$) | 290 ±3,70 | 7,90 ±0,70 | 50,00 | 97,28 |
| DQO ($mgO_2/l$) | 867,40 ±7,70 | 28,99 ±0,17 | 150,00 | 96,66 |
| Sólidos Suspendidos Totales (mg/l) | 604,56 ±0,65 | 10,75 ±0,21 | 50,00 | 98,22 |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Sólidos Sedimentables (ml/l) | 24,000 ±0,060 | <0,05 ml/l | 1,00 | 99,58 |
| G y A (mg/l) | 96,2 ±2,3 | <2,9 mg/l | 30,00 | 97,92 |
| SAAM (mg/l) | 32,48 ±0,99 | 0,189 ±0,060 | 5,00 | 99,4 |
| pH | 8,380 ±0,036 | 7,650 ±0,036 | 5,00 - 9,00 | --------- |

**Fuente:** *Muestreo realizado y datos reportados por el LAA. Nd: no detectado*

Además, los resultados de los parámetros analizados en el afluente y efluente realizados en octubre del 2020 por el Laboratorio de Análisis Ambiental se compararon con los resultados del Laboratorio San Martín en el cual, se puede observar que los parámetros son semejantes a diferencia de la DQO y los sólidos suspendidos totales; sin embargo, todos se encuentran dentro del límite máximo permisible (Cuadro 12). Lo anterior, podría estar relacionado a una variación en la recolección de muestras, es decir, la forma en que se recolectan y manipulan las muestras o utilización de **equipos** diferentes de análisis, que tienen sensibilidades, precisiones y límites de detección distintos. También, al realizar la toma en momento distintos podrían variar estos resultados.

**Cuadro 12**. *Comparación de datos reportados por los laboratorios.*

| **Parámetro** | **Efluente** | | **Límite máximo permisible** |
|---|---|---|---|
| | **Laboratorio San Martin** | **Laboratorio Análisis ambiental** | |
| DBO ($mgO_2/l$) | 7,2±0,8 | 7,90 ±0,70 | 50 |
| DQO ($mgO_2/l$) | 36±2 | 28,99 ±0,17 | 150 |
| Sólidos Suspendidos Totales (mg/l) | 29±2 | 10,75 ±0,21 | 50 |
| Sólidos Sedimentables (ml/l) | <0,1 | <1 | 1 |

| Parámetro | Efluente | | Límite máximo permisible |
|---|---|---|---|
| | Laboratorio San Martin | Laboratorio Análisis ambiental | |
| G y A (mg/l) | <4 | <3,40 | 30 |
| SAAM (mg/l) | 0,21 ±0,03 | 0,189 ±0,060 | 5 |
| pH | 7,16±0,06 | 7,650 ±0,036 | 5,00 - 9,00 |
| Temperatura | 22±1 | 22±1 | 15,00°C ≤ T ≤ 40,00°C |

**Fuente:** *Datos reportados por el LAA y el laboratorio San Martín.*

Al realizar el análisis en el primer muestreo en campo de los parámetros de pH, temperatura y sólidos sedimentables (Cuadro 13) se obtiene, un pH de 8,16 en el afluente que es adecuado para procesos de tratamiento (generalmente es de 6,50 a 8,50), según Lozano-Rivas (2012).

En el efluente se obtuvo un valor de pH de 7,73 encontrándose ambos valores dentro del límite máximo, el cual se encuentra entre 5,00 - 9,00. En cuanto a la temperatura reportada en el afluente es de 23,90°C y en el efluente es de 23,30°C siendo este un valor aceptado por el reglamento de vertido y reuso, además la temperatura de entrada se encuentra en rangos óptimos para la actividad microbiana en el tratamiento secundario (Lozano-Rivas, 2012).

En el segundo muestreo en el campo se obtienen como resultados un pH de 7,30 en el afluente y de 6,58 en el efluente. En el parámetro de temperatura se reporta 25,40 °C y 32,50 °C en el afluente y efluente respectivamente en el cual, se puede observar un incremento, debido a la época seca del año (diciembre a mayo).

**Cuadro 13.** *Análisis de turbiedad, pH, temperatura, sólidos sedimentables*

| Muestreo | Muestra | pH | Temperatura (°C) | Turbiedad (NTU) | Sólidos sedimentables (ml/l) |
|---|---|---|---|---|---|
| Octubre | Afluente | 8,16 | 23,90 | 450,00 | 74,00 |
| | Efluente | 7,73 | 23,30 | 14,36 | <1,00 |
| Abril | Afluente | 7,30 | 25,40 | 234,00 | 51,00 |
| | Efluente | 6,58 | 32,50 | 183,00 | <1,00 |

**Fuente:** *Elaboración propia (2023).*

Finalmente, el valor de sólidos sedimentables en el primer muestreo de la entrada de la planta de tratamientos es de 74,00 mg/l, dicho parámetro se encuentra por fuera de los límites permisibles, el cual es de 1 ml/l. El valor del efluente es de menos de 1 mg/l teniendo una eficacia de remoción de 99,32%.

En el parámetro de las Grasas y Aceites junto con las sustancias activas al azul de metileno, se presento remociones de 97,92% y 98,40% respectivamente. Lo anterior, puede estar relacionado a la combinación de procesos físicos, químicos y biológicos de la planta de tratamiento.

En el muestreo del mes de abril se observa en el afluente de la planta de tratamientos 51 mg/l de sólidos sedimentables siendo este 33 por ciento menor que el valor reportado en el anterior muestreo (octubre), asimismo, este parámetro se encuentra por encima del límite máximo permisible del reglamento de reuso de agua residual. En la salida de la planta de tratamientos se encuentra una cantidad insignificante de sólidos sedimentables, el cual es de >1,00 mg/l.

Al realizar la comparación de la eficiencia de remoción se obtiene que el muestreo del mes de octubre es de 99,32% y en el muestreo del mes de abril es de 98,04%, siendo la planta de tratamientos más eficiente con el muestreo realizado en época lluviosa.

Por último, en el mes de octubre se observa que la turbiedad del afluente es de 450 NTU y el efluente 14,36 NTU. Por otra parte, en el mes de abril, la turbiedad 234 NTU en la entrada y 183 NTU en la salida de la planta de tratamientos. Generalmente, las aguas residuales crudas son mayoritariamente turbias y posterior a su tratamiento hay una reducción y suele ser un factor de control de calidad (Romero, 2010). Estas dos últimas están relacionadas, debido a que la presencia de sólidos sedimentables presenta generalmente una mayor turbiedad en el agua, observándose en los datos obtenidos.

**Cuadro 14.** *Valores reportados de nitratos, nitritos y amonio*

| Muestreo | Muestra | Nitratos (mg/l) | Nitritos (mg/l) | Amonio (mg/l) |
|---|---|---|---|---|
| Octubre | Afluente | 2,00 | 0,30 | 10,00 |
| | Efluente | 2,00 | 0,00 | 5,00 |
| Abril | Afluente | 1,00 | 0,00 | 5,00 |
| | Efluente | 20,00 | 0,00 | 0,00 |

**Fuente:** *Elaboración propia (2023).*

El valor reportado en el mes de octubre en el afluente de nitratos, nitritos y amonio es de 2,00 mg/l, 0,30 mg/l y 10 mg/l respectivamente. En el efluente se encuentran 2,00 mg/l de nitrato, menos de 1 mg/l de nitritos y 5,00 mg/l de amonio. Asimismo, en el muestreo de abril en el afluente se presenta una concentración de 1,00 mg/l de nitratos, 0,00 de nitritos y 5,00 mg/l de amonio. En el efluente de nitratos, nitritos y amonios está presente una concentración de 20,00 mg/l, 0,00 mg/l, 0,00 mg/l (Cuadro 15).

Según Romero (2010) entre las formas de interés del nitrógeno en el agua se encuentran los mencionados anteriormente, el nitrógeno se utiliza para evaluar la trazabilidad de las aguas residuales por tratamiento biológico. Cabe destacar que, altos contenidos de nutrientes pueden generar eutrofización en el cuerpo receptores. Asimismo, la concentración de nitrógeno indica la presencia de excretas en forma de Urea y nitrógeno orgánico (Tchobanoglous et al., 2014).

La concentración normal en agua residual tratada de nitratos puede ser de 30 mg/l y el amonio es de 1,60 mg/l, debido a que si se encuentra en exceso se considera inhibitoria para muchos microorganismos existentes en el proceso de lodos activados.

Asimismo, cabe mencionar que el muestreo microbiológico (Anexo 9) realizado en el efluente de la planta de tratamientos del Campus Omar Dengo para la determinación de coliformes fecales y nemátodos se observa la presencia de 23,00 NMP/100ml de coliformes fecales y la ausencia de huevecillos/L de nemátodos.

Cabe destacar que en el muestreo microbiológico (Anexo 9) realizado en el efluente de la planta de tratamiento del Campus Omar Dengo, se detectó la presencia de 23,00 NMP/100 ml de coliformes fecales y la ausencia de huevecillos de nemátodos por litro. Estos datos son de gran relevancia para el proyecto, ya que corresponden a los parámetros exigidos por la legislación para el reuso de agua residual. El nivel de coliformes fecales se encuentra muy por debajo del límite permitido (1000 NMP/100 ml), y no se detectó presencia de nemátodos. Esto indica que, incluso con solo los tratamientos primario y secundario, se está cumpliendo con las normativas, y con el tratamiento terciario se mejorará aún más la calidad biológica del agua.

Los parámetros de metales pesados en aguas residuales son una preocupación importante debido a su toxicidad, persistencia en el medio ambiente y capacidad de bioacumulación en organismos vivos. Como parte de los reportes operaciones de la planta, estos se deben muestrear y todos se encuentran muy por debajo por lo permitido en la legislación.

## 5.2. Fase 2. Desarrollo de un diseño de un sistema de remoción de contaminantes mediante pruebas a escala de laboratorio para el aprovechamiento del efluente

### 5.2.1. Parámetros para la matriz de selección

Para la determinación del método de desinfección se utilizó una matriz de decisión, evaluando diferentes criterios de selección con respecto al grado de cumplimiento de cada uno de estos, permitiendo la comparación de los tipos de tratamiento avanzado. Lo anterior, basado en el uso de información bibliográfica relacionada a las características físicas, químicas y biológicas del efluente.

#### 5.2.1.1. Costos

En este criterio, se evaluaron aspectos teóricos de inversión inicial, costos relacionados al mantenimiento y operación para cada uno de los métodos de desinfección necesarios para la implementación de estos. Sin embargo, el costo de los sistemas de desinfección dependerá del fabricante, de la ubicación de la planta y su capacidad, y de las características del agua residual a ser desinfectada. A nivel país existen muchas empresas que brindan el servicio de la instalación de estos sistemas terciarios. Sin embargo, en Costa Rica, de las 305 plantas de tratamiento inspeccionadas por el AyA, solo 55 han incorporado la práctica de reutilizar el agua tratada. Este fenómeno se atribuye principalmente a la falta de confianza en la eficacia de este proceso, así como a las preocupaciones relacionadas con riesgos biológicos y químicos. Además, los costos asociados con la construcción y operación de sistemas de tratamiento terciario también han contribuido a esta limitada adopción (Centeno y Murillo, 2019).

Para los UV, se deben considerar el consumo de energía; los productos químicos y de limpieza; las reparaciones de equipos (2.5% de costo total del equipo); el reemplazo de lámparas, de balastros y de mangas; y los requerimientos del personal. En EPA (2015), se menciona que los costos relacionados con la inversión del capital son de aproximadamente $2440 (dólares americanos) donde se incluye los equipos, modificaciones estructurales, instalaciones eléctricas y mano de obra. Para su mantenimiento, representa un 2,5% del costo total del equipo. Y en los imprevistos es el 10% del mismo.

En ozonización, el costo total de un sistema de ozonización es determinado en gran parte por el costo de inversión, los costos de operación y mantenimiento. Los iniciales según EPA (2015) son de $5500 (Gas de alimentación y compresor de oxígeno, Cámara de contacto). De mantenimiento de $1000. Sin embargo, la generación de ozono utiliza una cantidad significativa de energía eléctrica ($ 15000). Y de imprevistos $ 2150.

En cloración, sus costos para la desinfección con cloro, los compuestos químicos y materiales de limpieza, la reparación de equipos misceláneos y los costos de personal. Siendo para los costos iniciales un valor de $ 2050, de mantenimiento 527 y finalmente un 10% de imprevistos ($250)

Para este método de desinfección de los filtros los principales factores que determinan el costo son el terreno y el medio de filtración, los cuales son muy específicos para cada localidad. En los costos iniciales según la EPA (2015) es de aproximadamente de $1700 (incluye tuberías de elevación, sellos, el revestimiento, un juego de tuberías laterales, protectores de orificios), en mantenimiento un valor de $750 y $266 (10% de los costos totales) para imprevistos (Cuadro 15).

**Cuadro 15.** *Costos relacionados con los métodos de desinfección.*

| **Tipo de costo** | **Rubro** | **Costo ($)** | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | **Cloración** | **Filtros** | **Ozonación** | **UV** |
| **Directos** | Compra de equipo | 2050 | 1700 | 5500 | 2440 |
| **Indirectos** | Mantenimiento | 527 | 750 | 1000 | 1440 |
| **Variables** | Electricidad | - | 213 | 15000 | 3300 |
| | Imprevistos | 258 | 266 | 2150 | 718 |
| **Total ($)** | | 2835 | 2930 | 23650 | 7898 |
| **Proyección 2023** | | 3500 | 2595 | 24315 | 8563 |

**Fuente:** *EPA (2015).*

Con base a los datos mencionados, se le realizó una extrapolación lineal proyectando los costos para año 2023 utilizando la siguiente fórmula (Ángulo, 2021):

Costo proyectado 2023: Costo 2015 + (años transcurrido*tasa promedio de cambio)

Donde la tasa promedio es 83,125.

Con los resultados obtenidos se puede analizar que, el tratamiento de cloración corresponde a los costos más bajos, seguidos de las membranas, radiación ultravioleta y ozonización siendo este último, el método de mayor costo.

Lo anterior, concuerda con lo mencionado por la Comisión Nacional del Agua (s.f.) donde el método de cloración es el más utilizado por sus bajos costos en comparación con los demás. Siendo el sistema más usado a nivel global en sistemas de agua potable como residual.

#### 5.2.1.2. Disponibilidad del terreno

Para la implementación de un sistema de desinfección se considera la disponibilidad de espacio al que se tiene acceso y las dimensiones del sistema que se pretende implementar. En el sitio de estudio, la planta de tratamientos del Campus Omar Dengo cuenta con una disposición de 240m$^2$ espacio con un tanque de cloración de 24,50 m$^3$

Según Zárate (2016) en un sistema de cloración se requiere la instalación de un tanque de contacto de 1,32 m de altura con un diámetro externo de 1,2 m. Así como la instalación de una caja de registro de 0,128 m$^{3.}$ El reducido espacio que ocupa este sistema puede ser considerado una ventaja, debido a la cantidad de metros cuadrados disponibles que tiene el sitio de estudio. Cabe destacar que, estas dimensiones pueden ser variantes, según el caudal a tratar.

Según Suarez, (2016) para la implementación de un sistema de desinfección con membrana, en el sistema de ultrafiltración se requiere la instalación de un Módulo de aproximadamente 6 m$^2$ de área activa de la membrana, con una longitud y diámetro exterior de 40 pulgadas.

Asimismo, según CTE (2008) en un sistema de desinfección con rayos ultravioleta se requiere la construcción de canales en el cual, se encuentran las lámparas y equipo necesario para llevar a cabo la desinfección del agua residual que se encuentra en contacto con el sistema. Dichos canales son aproximadamente de 2,69 metros de ancho basándose en el número de módulos UV, una longitud mínima de 12,19 metros para la utilización del flujo de agua y una profundidad máxima requerida de 4,37 metros para acceder a los módulos UV.

Por último, un sistema de ozonización implementa un sistema modular con dimensiones de 183 x 121 x 60 metros, además de la instalación de generadores de ozono, los cuales son ideales para la desinfección y oxidación de agua de proceso en aplicaciones industriales, de laboratorio y plantas piloto (Xylem, 2021).

Por lo tanto, el espacio disponible en el sitio de estudio puede significar un impedimento para implementar este sistema de desinfección.

#### 5.2.1.3. Eficacia

En este criterio se evalúa su capacidad de desinfección donde los cuatro métodos propuestos son altamente eficaces, debido a que poseen un gran poder desinfectante sobre bacterias y virus; sin embargo, su aplicabilidad varía con cada uno.

La radiación ultravioleta tiene un campo de aplicación muy interesante al adaptarse por su simplicidad de operación. Es importante conocer factores como el tamaño, composición, número y distribución de las partículas, asimismo, se requiere cierto número de lámpara que se debe de reemplazar cada cierto tiempo.

Un aspecto importante es que la aplicación de la luz UV se puede utilizar para controlar los coliformes fecales y no los huevos de los nematodos quienes tienen que ser removidos por otro tratamiento, según la Comisión Nacional del Agua (s.f.).

Asimismo, el ozono es un buen desinfectante, desodorante y decolorante. Es poco soluble en agua y muy volátil, se mantiene en solución durante algunos minutos después de su aplicación por esta razón se recomienda, incluso con aguas altamente contaminadas y se puede introducir en diferentes etapas del proceso. No obstante, su inversión es elevada, especialmente en el consumo de energía eléctrica junto con una instalación compleja.

La aplicación del cloro es el tratamiento más utilizado, lo anterior se debe a que es confiable y económico por el efecto residual. Este método es muy efectivo en las bacterias del grupo coliforme y las del género *Salmonella*, debido que su respiración se realiza en la superficie de la célula y su membrana por ello es muy poco resistente.

Finalmente, las membranas tienen diferentes tipos de aplicaciones dependiendo del tamaño del poro que está relacionado a lo que se busca remover. Su aplicación en aguas residuales se basa en una barrera para filtrar o eliminar partículas. Sin embargo, funcionan en tasas de flujo pequeñas y tiempo de vida útil limitado (EPA, 2015).

#### 5.2.1.4. Operatividad

En este criterio se refiere a todos los aspectos relacionados con la seguridad y mantenimiento de cada método de desinfección. Para el caso de los UV se debe asegurar que, la superficie de radiación sea transmitida a los microorganismos para una mayor eficacia, es decir, las superficies deben estar limpias y los balastros, las lámparas y el reactor deben estar funcionando con una eficiencia máxima.

La limpieza inadecuada es una de las causas más comunes de la ineficiencia de los sistemas de desinfección con luz UV (EPA, 2015). Asimismo, hay que considerar que la vida promedio útil

de las lámparas varía entre 8 760 a 14 000 horas de funcionamiento y generalmente, las lámparas se reemplazan después de 12 000 horas de uso. El balastro debe ser compatible con las lámparas y se debe ventilar para protegerlo del calor excesivo, lo cual puede reducir su vida útil u provocar un incendio.

La ozonización utiliza una cantidad significativa de energía eléctrica. Por esto se debe dar una atención constante al sistema para asegurar que el uso de la energía sea optimizado para un rendimiento controlado de la desinfección. Además, el operador debe verificar constantemente que no existan escapes o fugas, debido a que puede causar concentraciones inaceptables de ozono en el ambiente, limpiar regularmente el ozonizador, el suministro de aire y los ensamblajes dieléctricos, y monitorear regularmente la temperatura del generador de ozono (EPA, 2015). De igual forma, se debe tener presente que el ozono es altamente corrosivo, por lo cual se deben tener medidas de seguridad estrictas para conservar la vida útil de los equipos.

La cloración no implica gastos excesivos de electricidad en comparación con la ozonización y radiación UV. Este sistema consume energía eléctrica en la bomba que impulsa el agua residual al sistema. En este se debe de contar con personal altamente calificado que verifique las dosis de cloro que se suministra, así como supervisar si existen fugas o daños en las tuberías.

Además, el operario debe limpiar el tanque de contacto una vez cada dos meses para evitar la acumulación de sedimentos y la bomba una vez cada seis meses. Por otra parte, se debe de contar con un control operativo en el cual se toman mediciones diarias de pH, caudal y temperatura y semestralmente, un muestreo compuesto de los parámetros básicos, esto para conocer si el sistema de desinfección es altamente efectivo (Zárate, 2015).

Las membranas requieren un mantenimiento rutinario del equipo, principalmente en la superficie de los poros. Lo anterior, si no se realiza adecuadamente genera malos olores y por esto, se necesita un mayor cuidado en las membranas que se ven reflejados en las horas del operario de la planta (EPA, 2015).

#### 5.2.1.5. Matriz de selección

Considerando los criterios mencionados en los apartados de factibilidad, aplicabilidad, disponibilidad del terreno, operatividad y mantenimiento se completa la matriz de selección del método de desinfección para el reuso del agua residual (Cuadro 16) en dicha matriz se da un valor de 5 a 1, siendo 5 el valor más aceptable y 1 indica que el sistema no es el más adecuado en el parámetro que se está evaluando.

**Cuadro 16.** *Matriz de selección del método de desinfección para el reuso de las aguas residuales de la planta de tratamiento de la UNA.*

| Método de desinfección | Costos | Eficacia | Disponibilidad del terreno | Operatividad y mantenimiento | Total |
|---|---|---|---|---|---|
| Cloración | 5 | 5 | 5 | 3 | 18 |
| Radiación ultravioleta | 1 | 4 | 2 | 4 | 11 |
| Ozonación | 3 | 4 | 2 | 4 | 13 |
| Filtración por membrana | 3 | 5 | 4 | 2 | 14 |

**Fuente:** *Elaboración propia, con información de Romero (2010) y Zárate (2016)*

La matriz de selección indica que, el sistema que se adapta según los parámetros evaluados es la cloración, el total de puntaje obtenido en este método de desinfección fue de 18 pts. Siendo este un sistema altamente factible, aplicable y con un requerimiento de espacio limitado para las condiciones con las cuales se cuenta en la planta de tratamientos de campus Omar Dengo y el agua residual que se genera del tratamiento secundario.

**5.3. Pruebas Piloto** de remoción de contaminantes

Mediante las pruebas a escala de laboratorio se construyeron diversos prototipos con los siguientes medios filtrantes para determinar la efectividad (Figura 26). Con el siguiente orden filtración con carbón activado, filtración con piedra cuarta y arena. Cabe destacar que se evalúan estos dos métodos de desinfección debido a que según la matriz de selección son los más adecuados para las condiciones del área de estudio.

Se construyeron varios prototipos a escala de laboratorio utilizando los siguientes medios filtrantes para evaluar su efectividad (Figura 26) filtración con carbón activado, filtración con piedra cuarta y filtración con arena.

**Figura 26.** *Réplicas de medio filtrante construidos.*

En colaboración con el Laboratorio de Análisis Ambiental, se realizaron análisis de los parámetros básicos. Los resultados indicaron que el medio más adecuado es el carbón activado. Sin embargo, es importante mencionar que no se pudo muestrear el prototipo de arena debido a que no filtró el agua residual. Esto podría estar relacionado con la acumulación de materiales como arcilla o materia orgánica en el efluente del prototipo, lo que redujo el flujo de agua a través del filtro y causó obstrucciones.

**Cuadro 17.** *Resultados reportados de los análisis de los filtros comparados con el efluente.*

| Descripción | Efluente PTAR Omar Dengo | Filtro Piedra | Filtro carbón activado |
|---|---|---|---|
| DBO ($mgO_2/l$) | 16,4 ± 1,6 | 39,0 ± 3,6 | 157 ± 14 |
| DQO total ($mgO_2/l$) | 53,80 ± 0,95 | 112,8 ± 7,0 | 257,2 ± 6,8 |
| Sólidos sedimentables (ml/l) | Nd | 0,20 ± 0,06 | Nd |
| Sólidos Suspendidos Totales (mg/l) | 46,3 ± 6,1 | 73,0 ± 9,6 | 54,3 ± 7,1 |
| Sustancias Activas al Azul de Metileno (mg/l) | <0,2 | 2,260 ± 0,051 | 0,624 ± 0,050 |
| Grasas y Aceites (mg/l) | <2,9 | <2,9 | < 2,9 |
| turbiedad (NTU) | 29,40 ± 0,72 | 29,00 ± 0,71 | 28,60 ± 0,70 |
| Nitritos (µg/l) | 244,22 ± 0,95 | 379,8 ± 1,2 | 383,7 ± 1,2 |
| amonio (µg/l) | 3 607 ± 179 | 2 808 ± 179 | 3 398 ± 176 |

| Descripción | Efluente PTAR Omar Dengo | Filtro Piedra | Filtro carbón activado |
|---|---|---|---|
| Fenol (mg/l) | <0,03 | <0,03 | 0,193 ± 0,019 |
| Color (U-Pt-Co) | 40,6 ± 1,1 | 55,5 ± 1,2 | 51,4 ± 1,2 |
| Nitrato (mg/l) | 102,2 ± 2,6 | 91,6 ± 2,6 | 53,5 ± 2,5 |

**Fuente:** *Laboratorio de Análisis Ambiental (2021).*

Sin embargo, con los datos anteriores se observa que, las características fisicoquímicas del agua residual, después de ser transportada en los filtros de carbón activado y piedrilla; estos acrecentaron los valores del afluente. Esto podría estar relacionado con la cantidad de sólidos suspendidos totales.

Donde los datos de la DBO y DQO fueron los que mayormente aumentaron. Este suceso podría estar relacionado, debido a que los materiales filtrantes fueron lavados y enjuagados con agua residual antes de enviar las muestras al laboratorio, alterados de alguna manera.

Los resultados para la determinación de la curva de demanda de cloro del efluente de la primera corrida se utilizó las siguientes dosis aplicando la ecuación 3 (Cuadro 18).

**Cuadro 18.** *Diferentes dosis de la solución madre agregadas a la muestra corrida 1.*

| Alícuota (mg/l) | Cloro residual (mg/l) |
|---|---|
| 0,50 | 0,04 |
| 1,00 | 0,08 |
| 1,50 | 0,185 |
| 2,00 | 0,448 |
| 2,50 | 0,41 |
| 3,00 | 0,465 |

**Fuente:** *elaboración propia*

Con base en lo anterior se construyó el siguiente gráfico (Figura 27).

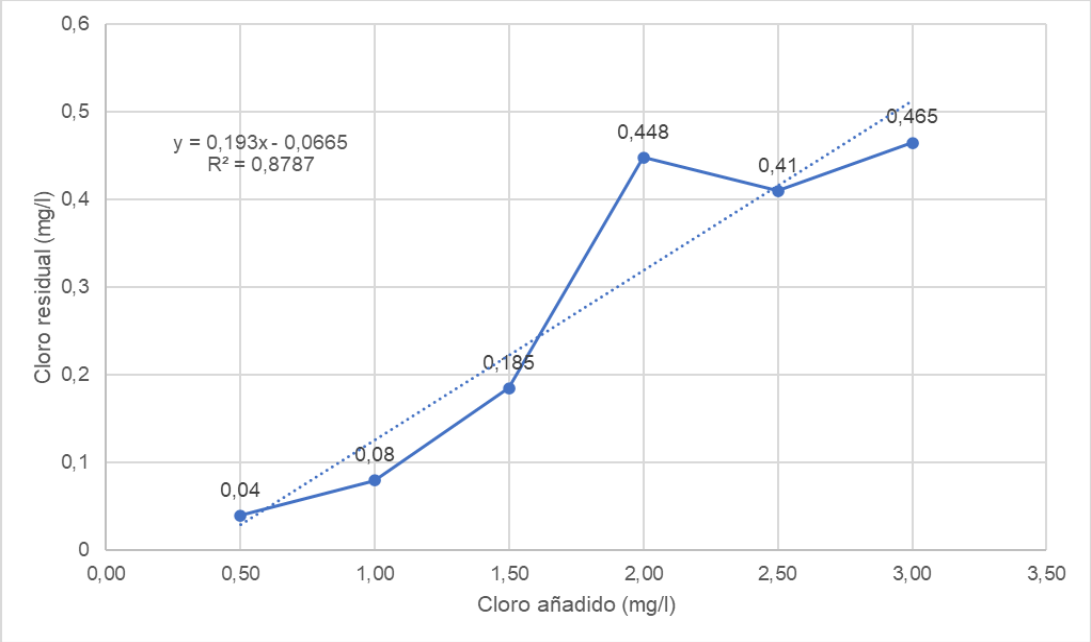


**Figura 27.** *Primera corrida.*

Además, se realizó una segunda corrida con las siguientes alícuotas (cuadro 19):

**Cuadro 19.** *Diferentes dosis de la solución madre agregadas a la muestra corrida 2.*

| Alícuota (mg/l) | Cloro residual (mg/l) |
|---|---|
| 0,075 | 0 |
| 0,113 | 0 |
| 0,151 | 0 |
| 1,188 | 0,03 |
| 0,376 | 0,03 |
| 0,566 | 0,03 |
| 0,754 | 0,32 |
| 0,942 | 0,21 |
| 1,15 | 0,35 |
| 1,50 | 0,59 |
| 1,70 | 0,72 |
| 1,90 | 0,83 |

Con respecto a la segunda corrida se construyó el siguiente gráfico (Figura 28):

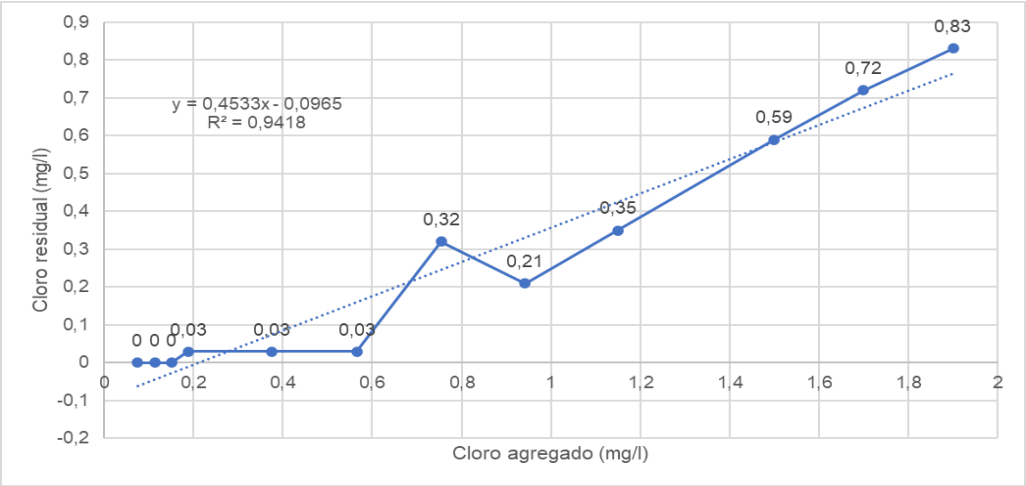


**Figura 28.** *Segunda corrida.*

En la figura 27 el coeficiente de variación está en R (0,8787), es decir, los datos o las variables no están asociados. Sin embargo, utilizando la ecuación lineal y tomando como referencia el valor de cloro residual de la legislación (1 mg/l ) se obtuvo una dosis 5,69 mg/l de hipoclorito de sodio al 3,5% en el cual se encuentra dentro de los intervalos de dosis de hipoclorito de sodio en el punto de ruptura de 0,41 mg/l en efluentes de un sistema de tratamiento de aguas residuales con lodos activados que van de intervalos de 2-10 mg/l (Zarate, 2016).

Teniendo así, en el punto quiebre una dosis de 0,45 mg/L. Uno de los motivos de estos resultados se debe a que, en esta primera corrida, el efluente de la planta de tratamiento presentaba problemas de operación.

En la figura 28 se observa una R de 0,942, por lo tanto, los datos se encuentran asociados. El punto de quiebre de la curva de cloración se encuentra en 0,42 mg/l. Teniendo una dosis de 2,42 mg/L de NaClO al 3,5%.

Con base a las gráficas, se utilizó la segunda corrida para el diseño del sistema de cloración, debido a que los datos se encuentran mejor asociados con respecto al primero. En el cual, extrapolando los datos dosis a utilizar para la cámara de cloración que tiene una capacidad de 24,50 $m^3$ (24000 litros) se necesitan 580,80 mg/l de NaClO al 3,5% de con un tiempo de contacto de 30 mins para tener un margen de seguridad, el autor Hernández (2001), Cheremisinoff (2002), Zaraté (2016) recomiendan tiempo de contacto entre 20 a 30 minutos para asegurar la desinfección.

Se debe mencionar que, la cloración se debe realizar en la caja de registro existente en la planta de tratamiento (Figuras 29 y 30*)* para garantizar el mezclado del agua residual con el cloro y donde inicia la desinfección y después, será impulsada por la bomba a los servicios sanitarios de la Escuela de Ambientales. El cloro se va a aplicar directamente en la cámara de cloración mediante dispositivos por gravedad o mediante bombas dosificadoras. Los dosificadores por gravedad son factibles de ser usados en sistemas de agua potable de caudales pequeños (hasta 10l/s) sin necesidad de recursos humanos especializados (GIZ, 2017).

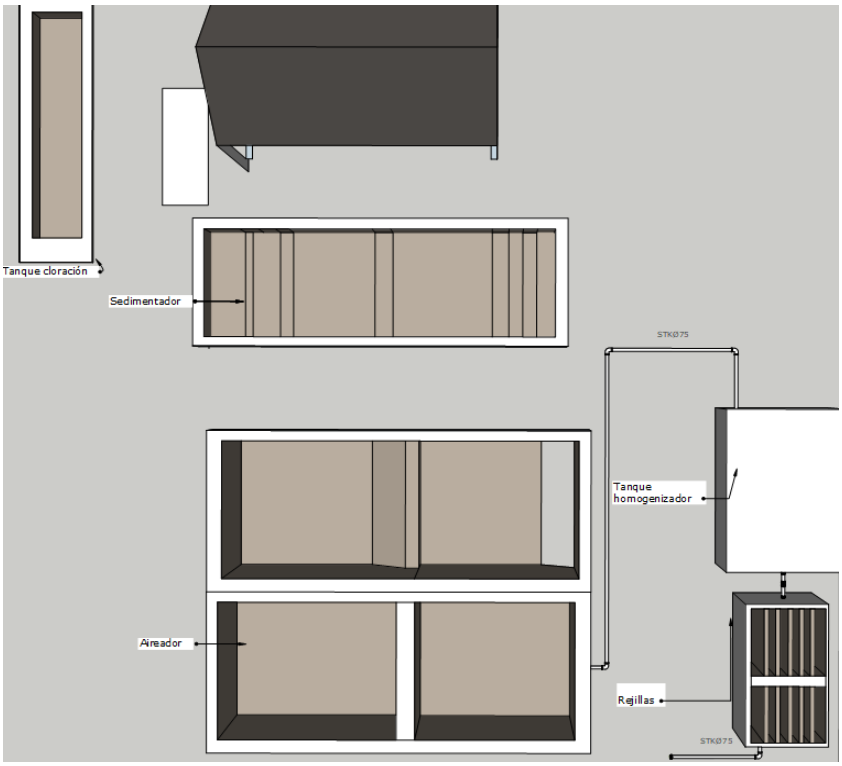


**Figura 29.** *Diseño de la planta de tratamientos.*

*Fuente: elaboración propia con sketchUp.*

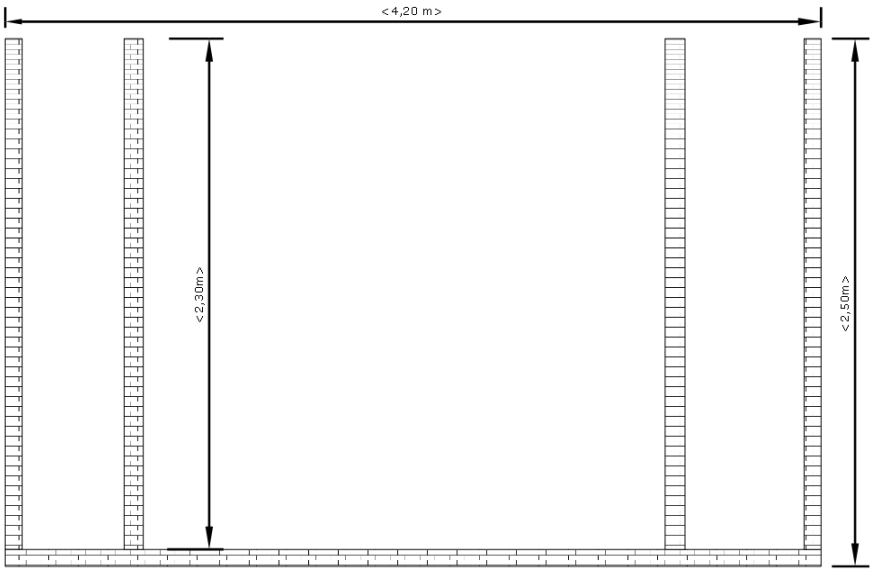


*Figura 30.* Tanque de cloración

*Fuente: elaboración propia con sketchUp.*

## 5.4. Diseño de la bomba

Según el Informe del Programa de Gestión Ambiental Institucional (2018) hay aproximadamente 55 personas que pertenecen a la Escuela de Ciencias Ambientales de la Universidad Nacional.

Sin embargo, debido a la poca presencia de estudiantes por la pandemia se supone que 55 personas aproximadamente realizan descargas en los sanitarios por día. Asimismo, utilizando una dotación teórica de consumos de descarga de sanitarios correspondiente a 40 l/hab*d se calculó el caudal promedio ($Q_{Promedio}$) y un coeficiente de variación de caudal máximo diario con respecto al caudal medio diario ($K_1$) con el valor de 1,3 (poblaciones menores a 12 500) para el cálculo del caudal máximo diario (López, 2005). Además, teniendo en cuenta que el número total de horas al día será aproximadamente 12 horas (X) se calculó el caudal de diseño ($Q_{diseño}$).

Para los cálculos de diámetro de impulsión se utilizó la ecuación de Bresse ($D_i$) y se tomó el diámetro de 10” que corresponden a 0,254 m. Con lo anterior se determinó la velocidad en la tubería ($V_i$)obteniendo un valor de 1,189 m/s, dato que se encuentra entre 1,0 y 3,0 m/s, según lo recomendado por López (2005). Con respecto a la tubería y velocidad se determina utilizando el mismo diámetro de impulsión.

**Cálculos de altura dinámica de elevación**

La altura estática de succión es aproximadamente 2 m y una altura estática de impulsión es de 35 m, se obtiene una altura estática total de 37 m. Las pérdidas por succión se calcularon con las longitudes de la Anexo 2. Tomando en cuenta los siguientes accesorios para diámetros de 10”:

- Codo de radio (90°): 7,90 m
- Tubería recta: 5 m
- Válvula de pie: 65,00 m
- Entrada de la borda: 7,50 m
- Reducción extrínseca: 1,52 m

Con lo anterior se tiene una longitud equivalente total de 86,92 metros y utilizando la ecuación de Hazen Williams (J) multiplicado por la longitud se obtiene la pérdida de succión total de 0,451 m.

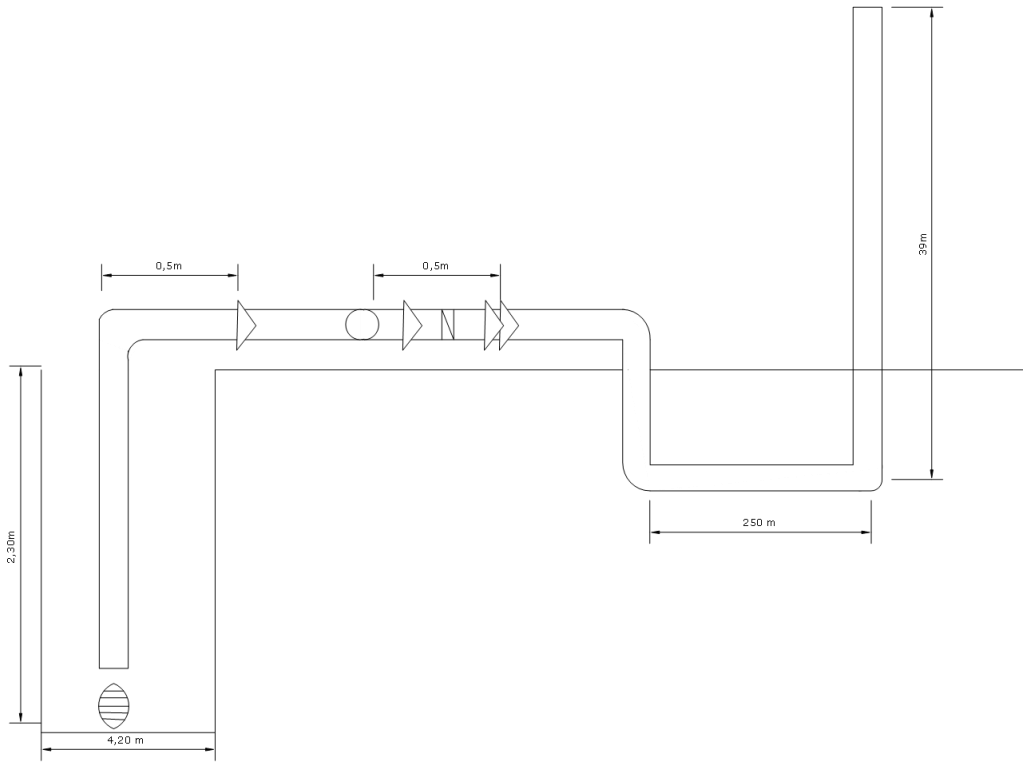


**Figura 31**. *Diseño bombeo*

*Fuente: elaboración propia con SketchUp.*

En las pérdidas, en la impulsión se utilizaron los siguientes accesorios (según los recomendados por López, 2005):

Expansión Concéntrica: 3,050 m

Válvula de retención horizontal: 32,000 m

Válvula de cortina: 1,700 m

4 codos de 90°: 31,600 m

Te con cambio de dirección: 16,000 m

Tubería: 200,000 m

Se tiene una longitud equivalente en la impulsión de 284,35 m y multiplicado por la ecuación de Hazen Williams (J) se obtiene una pérdida de impulsión de 1,429 m.

La altura de velocidad en la descarga ($V_{Descarga}$) se calculó utilizando la aceleración de la gravedad obteniendo un valor de 0, 087 m. Con base a todos los cálculos de altura anteriormente, se obtiene que la Altura dinámica total de elevación es de 43, 000 m.

**Cuadro 20.** *Ecuaciones aplicadas para el cálculo de caudales.*

| Ecuación | Ecuación Aplicada | Resultado |
|---|---|---|
| $Q_{Promedio}=\frac{Consumo\ total*Población}{86{,}400}$ | $Q_{Promedio}=\frac{40\ L/hab*d*55\ hab}{86{,}400}$ | $Q_{Promedio}$= 25,460 L/s |
| $Q_{máx\ diario}=(K_1)*Q_{Promedio}$ | $Q_{máx\ diario}$= (1,3) *25,460 L/s | $Q_{máx\ diario}$= 33,102 L/s |
| $Q_{diseño}=\frac{Q_{máx\ diario}}{X}$ | $Q_{diseño}=\frac{0{,}033\ m^3/s}{(12/24)\ h}$ | $Q_{diseño}$= 0,063 $m^3/s$ |
| $D_i = 1{,}3 * (x)^{1/4} * \sqrt{Q_{diseño}}$ | $D_i = 1{,}3 * (12/24)^{1/4} * \sqrt{0{,}063\ m^3/s}$ | $D_i$ =0, 268 m |
| $V_i=\frac{Q_{diseño}}{Área\ (\pi*(r)^2)}$ | $V_i=\frac{0{,}063\ m^3/s}{\pi*(\frac{0{,}254\ m}{2})^2}$ | $V_i$= 1,189 m/s |
| $J=(\frac{Q_{diseño}}{(0{,}2785*150*(D)^{2{,}63}})^{\frac{1}{0{,}54}}$ | $J=(\frac{0{,}063\ m^3/s}{(0{,}2785*150\ (0{,}254\ m)^{2{,}63}})^{\frac{1}{0{,}54}}$ | $J$= 0,005 m/m |
| $(V_{descarga})=\frac{(V_i)^2}{2g}$ | $(V_{descarga})=\frac{(1{,}189\ m/s)^2}{2\ (9{,}8\ m/s)}$ | $(V_{descarga})$= 0,087 m |

Para la selección de la bomba se tomó, a partir de las curvas características suministradas por López (2005) tomando los siguientes valores:

**Cuadro 21.** *Curvas características de la bomba.*

| Q $m^3/s$ | H (m) |
|---|---|
| 0,045 | 45,80 |
| 0,055 | 45,40 |
| 0,063 | 44,50 |
| 0,067 | 43,40 |
| 0,071 | 41,80 |

**Fuente:** López (2005).

Con base al cuadro 21 y los valores calculados de caudal de diseño de 0,033 $m^3$/s y una altura dinámica de 43,00 m, se observa (Figura 32) que el rango de operación de la bomba se encuentra dentro de las características de la bomba.

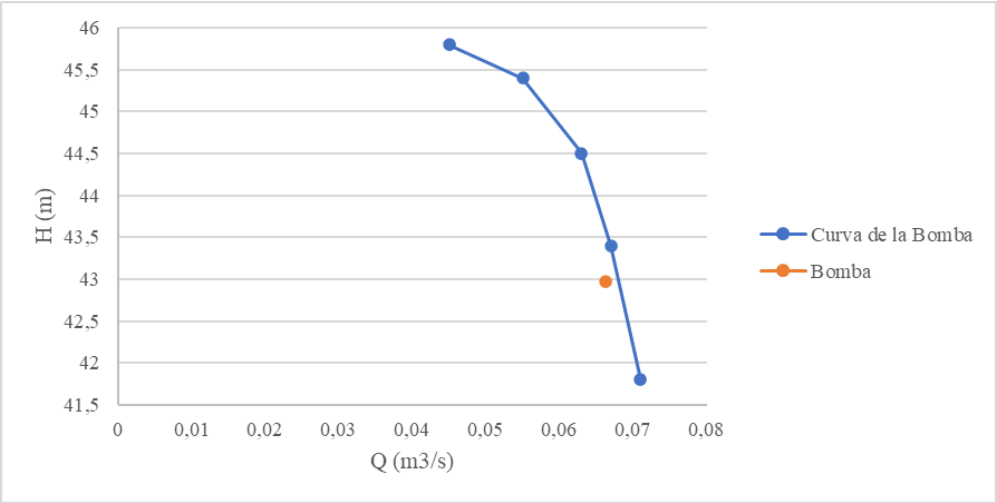


**Figura 32.** *Curva característica de la bomba.*

Sin embargo, se deben establecer condiciones de operación desfavorables, es decir, niveles extremos (máximos y mínimos) para diferentes caudales. Por esta razón, se repiten los cálculos anteriores tomando en cuenta, caudales inferiores y superiores al caudal de diseño obteniendo el siguiente cuadro:

**Cuadro 22.** *Caudales inferiores y superiores.*

| Q | Pérdidas | | Altura | Altura estática | | Altura dinámica | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $m^3$/s | Succión | Impulsión | Vel | Min | Máx | Min | Máx |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 40 | 42 | 40 | 42 |
| 0,045 | 0,22 | 0,70 | 0,04 | 40 | 42 | 40,96 | 42,96 |
| 0,05 | 0,27 | 0,85 | 0,05 | 40 | 42 | 41,17 | 43,17 |
| 0,055 | 0,32 | 1,01 | 0,06 | 40 | 42 | 41,39 | 43,39 |
| 0,06 | 0,38 | 1,19 | 0,07 | 40 | 42 | 41,64 | 43,64 |
| 0,065 | 0,44 | 1,38 | 0,08 | 40 | 42 | 41,90 | 43,90 |
| 0,07 | 0,50 | 1,58 | 0,10 | 40 | 42 | 42,18 | 44,18 |
| 0,075 | 0,57 | 1,80 | 0,11 | 40 | 42 | 42,48 | 44,48 |

En la figura 33 se observa que el rango de operación de la bomba se encuentra entre los valores máximos y mínimos. Para estás condiciones se obtiene una eficiencia de 85%.

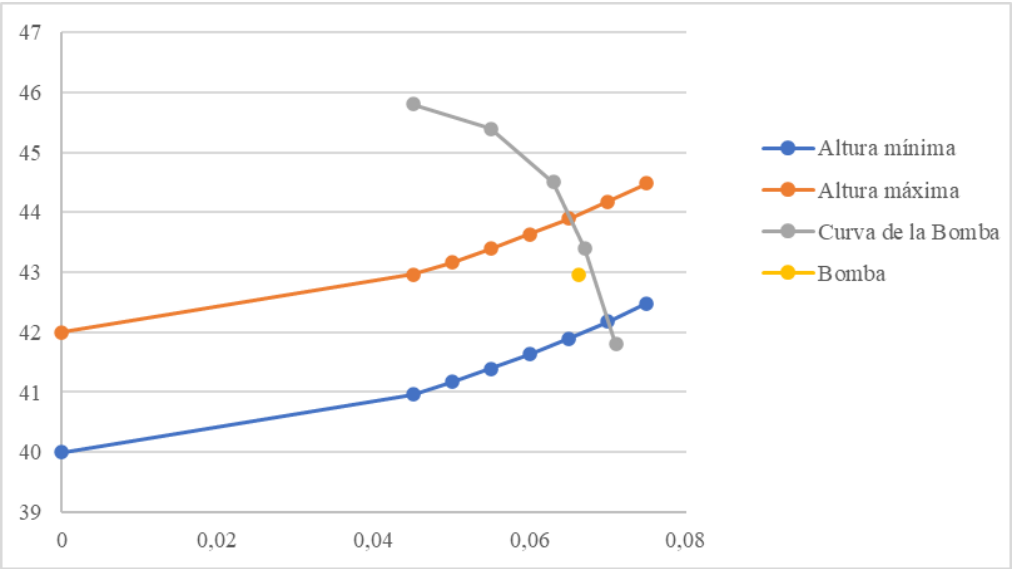


**Figura 33.** *Curva característica de la bomba y operación del sistema*

## 6. Conclusiones

Con base en el proyecto, se ha desarrollado una propuesta para la implementación de un sistema de tratamiento terciario en la planta del Campus Omar Dengo. Este sistema propuesto se centra en un proceso de filtrado y desinfección mediante cloración. En consecuencia, esta iniciativa adquiere una importancia significativa en la lucha contra la escasez de suministro de agua en la Universidad Nacional, representando una medida efectiva para abordar este desafío.

Asimismo, a partir de la caracterización en la planta de tratamientos del Campus Omar Dengo se obtuvo de DBO un porcentaje de remoción de 97,28%, debido a que en el afluente se obtuvo 290 ±3,70 mg/l y efluente de 7,90 ±0,70 mg/l. Asimismo, en el parámetro demanda química de oxígeno se demuestra un porcentaje de remoción de un 96,66% reduciendo la concentración de DQO en el afluente de 867,40 ±7,60 y en el efluente de 28,90 ±0,17 mg/l. En el parámetro de sólidos suspendidos totales se observa una concentración de 604,56 ±0,65mg/l en el afluente y en el efluente de 10,65 ±0,21 mg/l con un porcentaje de reducción de 98,22%. Refiriéndose al parámetro de sólidos sedimentables del afluente 24,000 ±0,060 ml/l y en el efluente de <0,05ml/l con un porcentaje de remoción de 99,58%. En grasas y aceite un porcentaje de remoción de 97,92% y de Sustancias Activas al Azul de Metileno de 99,4%. Por lo tanto, se establece que la PTAR cumple con todos los límites máximos permisibles requeridos por la legislación nacional.

A partir de la aplicación de la matriz de selección y las pruebas piloto, se ha establecido que el método seleccionado para la desinfección del agua residual es la cloración, debido a que es un método que se ajusta a los costos, la disponibilidad de espacio, la eficiencia y la operatividad.

En la primera corrida se obtuvo un punto de quiebre de 0,41 mg/l, utilizando una dosis de 5,69 mg/l de hipoclorito de sodio al 3,5%. No obstante, los datos no presentaron correlación, lo que significa que no mostraron una relación coherente o consistente entre sí. Como consecuencia, se llevó a cabo una segunda corrida para obtener el punto de quiebre de la curva de cloración.

El punto de quiebre de la curva de cloración se encuentra en 0,42 mg/l. En el cual, extrapolando los datos dosis a utilizar para la cámara de cloración que tiene una capacidad de 24,50 m3 (24000 litros). Con una dosis de 2,42 mg/l se necesitan 580,80 mg/l con un tiempo de contacto de 30 mins para tener un margen de seguridad.

Para el diseño de la bomba, se definieron el rango de operación de la bomba en la estación de bombeo entre 56 a 66 l/s rango que cubre el caudal de diseño (63 l/s) Para estás condiciones se obtuvo una eficiencia de 85%.

## 7. Recomendaciones

Se recomienda realizar nuevamente un levantamiento físico químico de la planta de tratamientos del Campus Omar Dengo, debido a que los análisis de este proyecto se dieron en condiciones de pandemia donde no se encontraba la misma cantidad de personal en la Escuela de Ciencias Ambientales. Sin embargo, este proyecto contiene datos y caracterizaciones valiosas que funcionan de soporte en un futuro proyecto de reuso del agua residual de la planta de tratamientos.

En el caso de la planta de tratamientos del Campus Omar Dengo se debe considerar construir este sistema de desinfección para el aprovechando el agua residual como un subproducto del saneamiento.

La implementación de este proyecto será un plan de contención, en caso de desabastecimiento del agua potable en la época seca. Asimismo, la Universidad Nacional se verá como una institución comprometida con proyectos que beneficien el ambiente.

Se debe de considerar la importancia de la estación de bombeo en este proyecto evaluando los criterios de diseño mencionados en los resultados, siendo la bomba un parámetro fundamental para que este sistema funcione correctamente. Se recomienda un panel de seguridad eléctrico para evitar cortocircuitos o apagones de la bomba de agua y de esta forma, evitar un riesgo eléctrico.

## 7. Referencias bibliográficas


Acevedo, L. (2015). *Evaluación de procesos de desinfección (Cloro y UV) en sistemas de tratamiento de aguas servidas descentralizadas (Humedales construidos).* (Tesis para habilitación de ingeniería ambiental). Facultad de Ciencias Ambientales. Universidad de Concepción, Chile. http://www.eula.cl/giba/wp-content/uploads/2017/09/tesis-loreto-acevedo-2015.pdf

Arab Water Council. (2017). Reuse of Treated Wastewater: An Opportunity Not to Be Wasted. *Arab Water Council Journal, 8*(1), 11-14. http://search.ebscohost.com.una.idm.oclc.org/login.aspx?direct=true&AuthType=ip,uid,url&db=asn&AN=134847588&lang=es&site=ehost-live

Astorga, Y. (s.f.). *Décimo tercer informe Estado de la Nación: Situación del Recurso Hídrico.* http://repositorio.conare.ac.cr:8080/rest/bitstreams/09410a50-190c-4738-878f-95d7adfbd0ba/retrieve.

Alzate, J. (2019). *Remoción biológica de nitrógeno por nitrificación y desnitrificación aeróbica en reactor de cargas secuenciales sbr.* (Trabajo de Tesis de Maestría en Tecnología e Higiene de los Alimentos). Universidad Nacional de la Plata, Facultad de Ingeniería, La Plata, Argentina. http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/84134/Documento_completo.pdf-PDFA2u.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Ángulo, A,. (2021) Métodos de extrapolación y algunas aplicaciones. Trabajo de fin de Grado. Curso académico 2021-2022. Universidad de Valladolid. https://uvadoc.uva.es/bitstream/handle/10324/57972/TFG-G5972pdf.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Banco Internacional de Reconstrucción y Fomento. (2020). *De residuo a recurso: Cambiando paradigmas para intervenciones más inteligentes para la gestión de aguas residuales en América Latina y el Caribe,* Washington, Estados Unidos: Banco Mundial. https://openknowledge.worldbank.org/bitstream/handle/10986/33436/146823SP.pdf

Brádan, R. (2016). Garantía de funcionamiento de estaciones de sistemas terciario. Universidad Politécnica de Madrid. https://oa.upm.es/39398/1/Ruben_Brandan_Gordillo.pdf

Belzona. (2010). T*ratamiento de Aguas Residuales.* Miami, USA. Belzona. https://www.belzona.com/es/solution_maps/wastewater/money_map.pdf

Brenes, J. (2006). *Proyecto de tratamiento terciario de ozonización del agua de salida de una E.D.A.R convencional para su reutilización en el riego del campo de golf.* (Proyecto final de Ingeniería Química). Universidad de Cádiz, España. http://hdl.handle.net/10498/6383

Camacho, B. (2016). *Análisis de las estrategias de adaptación a la escasez hídrica de las empresas vitivinícolas del Valle de Guadalupe.* (Tesis de maestría administración integral del ambiente). Centro de Investigación Científica y de Educación Superior, Tijuana, México. https://www.colef.mx/posgrado/wp-content/uploads/2016/12/TESIS-Camacho-Garza-Abraham.pdf

Cárdenas, G., Sánchez, I. (2012). Nitrógeno en aguas residuales: orígenes, efectos y mecanismos de remoción para preservar el ambiente y la salud pública. 15(1). 72 - 88. http://www.scielo.org.co/pdf/reus/v15n1/v15n1a07.pdf

Castillo, M. y Laurent, I. (2016). P*ropuesta de diseño de un sistema de tratamiento de las aguas residuales especiales generadas en las plantas de concreto del Proyecto Hidroeléctrico Reventazón del Instituto Costarricense de Electricidad, Siquirres, Limón, Costa Rica.* (Proyecto de graduación licenciatura en Gestión Ambiental). Escuela de Ciencias Ambientales. Universidad Nacional, San José, C.R. http://hdl.handle.net/11056/13494

Centeno, E. y Murillo, A. (2019). *Tipología de las tecnologías de tratamiento de aguas residuales ordinarias instaladas en Costa Rica, Revista de Ciencias Ambientales 53*(2), 97-110. https://www.revistas.una.ac.cr/index.php/ambientales/article/view/12082/16774

Chavarría, D. (2014). *Dimensionamiento, conceptualización y propuesta de un sistema de tratamiento de aguas residuales del Centro Nacional de Ciencias y Tecnología de Alimentos (CITA)*. (Proyecto de graduación de licenciatura en ingeniería química). Escuela de química. Universidad de Costa Rica, San José, C.R. http://hdl.handle.net/10669/16768

Chavarría, F., Mora, O. y Sánchez, P. (s.f.). *Plan del Programa Gestión Ambiental Institucional 2017-2020.* Universidad Nacional, Heredia, C.R. https://documentos.una.ac.cr/bitstream/handle/unadocs/8101/Programa%20de%20Gesti%c3%b3n%20Ambiental%20Institucional%20PGAIUNA%202017%20v5.0.pdf?sequence=2&isAllowed=y

Chávez, I. (2017). *Diseño e implementación de un sistema de tratamiento de Aguas residuales.* Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí, Ecuador. https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/6134928.pdf.

Comisión Nacional del Agua (Ed.). (2019). *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento*. Comisión Nacional del Agua. https://files.conagua.gob.mx/conagua/mapas/SGAPDS-1-15-Libro23.pdf

Costa Rica, Asamblea Legislativa. (1995). *Ley Orgánica del Ambiente, N° 7554.* https://www.pgrweb.go.cr/scij/Busqueda/Normativa/Normas/nrm_texto_completo.aspx?param1=NRTC&nValor1=1&nValor2=27738&nValor3=93505&strTipM=TC

Costa Rica, Asamblea Nacional Constituyente. (1949). *Constitución Política de la República de Costa Rica*. http://www.pgrweb.go.cr/scij/busqueda/normativa/normas/nrm_texto_completo.aspx?param1=NRTC&nValor1=1&nValor2=871

Costa Rica, AyA, MINAE y MINSA. (2016). *Política Nacional de Saneamiento en Aguas Residuales 2016 - 2045*. Costa Rica: AyA-MINAE-MS. https://www.aya.go.cr/Noticias/Documents/Politica%20Nacional%20de%20Saneamiento%20en%20Aguas%20Residuales%20marzo%202017.pdf

Costa Rica, Poder Ejecutivo. (2007). *Reglamento de Vertido y Reuso de Aguas Residuales, Decreto Ejecutivo N° 33601.* http://www.pgrweb.go.cr/scij/Busqueda/Normativa/Normas/nrm_texto_completo.aspx?param1=NRTC&nValor1=1&nValor2=59524&nValor3=83250&strTipM=TC

Costa Rica, Poder Ejecutivo. (2008). *Reglamento del Canon Ambiental por Vertidos, Decreto Ejecutivo N° 34431.* http://www.pgrweb.go.cr/scij/Busqueda/Normativa/Normas/nrm_texto_compleo.aspx?param1=NRTC&nValor1=1&nValor2=62896&nValor3=81024&strTipM=TC

Costa Rica, Poder Ejecutivo. (2016). *Reglamento de Aprobación y Operación de Sistemas de Tratamiento de Aguas Residuales, Decreto Ejecutivo N°39887.* http://www.pgrweb.go.cr/scij/Busqueda/Normativa/Normas/nrm_norma.aspx?param1=NRM&nValor1=1&nValor2=82487&nValor3=105490&strTipM=FN

Costa Rica, Poder Ejecutivo. (2015). Reglamento para el Manejo y Disposición Final de Lodos y Biosólidos N° 39316-S. http://www.pgrweb.go.cr/scij/Busqueda/Normativa/Normas/nrm_texto_completo.aspx?param1=NRTC&nValor1=1&nValor2=80715&nValor3=0&strTipM=TC

Costa Rica, Poder Ejecutivo. (2020). Ley General de Salud N° 5395. http://www.pgrweb.go.cr/scij/Busqueda/Normativa/Normas/nrm_norma.aspx?param1=NRM&nValor1=1&nValor2=6581&nValor3=0&strTipM=FN

CTE. (2018). *Uv disinfection cost study. metropolitan water reclamation district of greater Chicago.* (Cost study). Chicago. https://pcb.illinois.gov/documents/dsweb/Get/Document-62934/R08-9%2C102008%20%20_1%20Draft%20SWRP%20Vol%201.pdf

Fernández, A. y Letón, P. (2007). *Tratamientos avanzados de aguas residuales industriales.* Dirección General de Universidades e Investigación, España. https://www.madrimasd.org/uploads/informacionidi/biblioteca/publicacion/doc/VT/VT2_Tratamientos_avanzados_de_aguas_residuales_industriales.pdf

García, L. (2017). *Evaluación del tratamiento terciario actual de la planta de tratamiento de aguas residuales del campus central de la Universidad Rafael Landívar para determinar la remoción de la carga microbiológica contaminante en la descarga hacia el río contreras.* (Proyecto de grado de licenciatura en químico industrial). Facultad de ingeniería, Universidad Rafael Landívar, Asunción, Guatemala. http://recursosbiblio.url.edu.gt/tesiseortiz/2017/02/13/Garcia-Luis.pdf

Gensch, R., Jennings, A., Renggli, S. & Reymond, P. (s.f.). *Compendium of Sanitation Technologies in Emergencies.* Global WASH. http://washcluster.net/emersan-compendium

González, J. y Gómez, K. (2016). *Optimización de la planta de tratamiento de aguas residuales del municipio de Bojacá-Cundinamarca.* (Trabajo de Grado para optar al título de Ingeniero Civil). Universidad Católica de Colombia, Bogotá, Colombia. https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/13907/4/OPTIMIZACIÓN%20PLANTA%20DE%20TRATAMIENTO%20DE%20AGUAS%20RESIDUALES%20DEL%20MUNICIPIO%20DE%20BOJACÁ.pdf

González, M. (2014). *Mejoramiento de la eficiencia de sistemas anaerobios y aerobios de tratamiento de aguas residuales domésticas a través de humedales artificiales.* (Trabajo de grado para optar por el grado de ingeniería civil). Facultad de ingeniería. Corporación Universitaria Minuto de Dios, Bogotá, Colombia. https://repository.uniminuto.edu/bitstream/handle/10656/4812/T.IC%20GONZALEZ%20JIMENEZ%20SEBASTIAN%20MAURICIO.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ). (2017). *Manual para la cloración del agua en sistemas de abastecimiento de agua potable en el ámbito rural*. Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit.https://sswm.info/sites/default/files/reference_attachments/GIZ%202017.%20Ma

nual%20para%20la%20cloraci%C3%B3n%20del%20agua%20en%20sistemas%20de%20abastecimiento%20de%20agua%20potable.pdf

Hernández, R. (2014). *Metodología de la investigación.* Edificio Punta Santa Fe.

Iglesias, J. (2013). *Cálculo y diseño de una EDAR de Biodiscos.* (Proyecto final de graduación). Departamento de Ciencia e Ingeniería de Materiales e Ingeniería Química. Universidad Carlos III de Madrid.

Knobelsdorf, M. (2005). *Eliminación biológica de nutrientes en un aru de baja carga orgánica mediante el proceso vip*. (Tesis doctoral). Universitat Politècnica de Catalunya. España. https://www.researchgate.net/publication/39426677_Eliminacion_biologica_de_nutrientes_nitrogeno_y_fosforo_mediante_un_proceso_discontinuo_de_fangos_activados

López, J. y Boluda, N. (2014). *Estudio de viabilidad de un proceso de eliminación de amonio mediante electro oxidación en la EDAR Valle del Vinalopó (Elda).* (Trabajo final de máster). Universidad de Alicante, España.

López, R. (2005). *Elementos de Diseño para Acueductos y Alcantarillados.* Centro Editorial, Escuela Colombiana de Ingeniería.

Lozano-Rivas, W. (2012). *Diseño de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales.* Fundamentos de diseño de plantas depuradoras de aguas residuales. Universidad Nacional Abierta y Distancia Bogotá, Colombia. https://www.researchgate.net/publication/298354134_Diseno_de_Plantas_de_Tratamiento_de_Aguas_Residuales

Madrid, España. https://e-archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/18089/PFC_Jose_Antonio_Iglesias_Gonzalez.pdf

Noyola, A., Morgan-Sagastumbre, J. y Guereca, L. (2013). *Selección de tecnologías para el tratamiento de aguas residuales municipales: guía de apoyo para ciudades pequeñas y medianas.* México. http://www.pronatura-sur.org/web/docs/Tecnologia_Aguas_Residuales.pdf

Oyarzo, M. (2007). *Precipitación química del fósforo mediante la adición de sulfato de aluminio en plantas de tratamiento de aguas.* (Trabajo de titulación). Universidad de Magallanes. http://www.umag.cl/biblioteca/tesis/oyarzo_vargas_2007.pdf

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (2017). *Reutilización de aguas para agricultura en América Latina y el Caribe.* Santiago, Chile. http://www.fao.org/3/a-i7748s.pdf

Programa Estado de la Nación (2018). *Estado de la Nación en Desarrollo Humano Sostenible 2018*. San José, C.R. PEN. http://repositorio.conare.ac.cr/handle/20.500.12337/2983

Programa Estado de la Nación (2019). *Estado de la Nación en Desarrollo Humano Sostenible 2019.* San José, C.R. PEN http://repositorio.conare.ac.cr/handle/20.500.12337/7808

Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos de las Naciones Unidas. (2017). *Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2017. Aguas residuales: El recurso desaprovechado*. UNESCO. https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000247647

PNUD. (2020). *Objetivo 6: agua limpia y saneamiento.* Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo. https://www.cr.undp.org/content/costarica/es/home/sustainable-development-goals/goal-6-clean-water-and-sanitation.html

Ramírez, J. (2007). Tratamiento de aguas residuales ordinarias y el control de la contaminación ambiental en Costa Rica. *Revista Hidrogénesis, 1*, 1. https://www.aya.go.cr/centroDocumetacion/Revista%20Hidrognesis/Revista%20Hidrog%C3%A9nesis%20Vol.%205%20N%C2%B0%201,%20Julio%202007.pdf

Reyes, F (2019). *Suspensión de actividades por falta del servicio de agua fcen.* [Felipe.reyes.solares@una.cr].

Rodriguez, D., Serrano, H., Delgado, Nolasco, D., Saltiel, G. (2020). De residuo a recurso: Cambiando paradigmas para intervenciones más inteligentes para la gestión de aguas residuales en América Latina y el Caribe. © World Bank, Washington, DC. http://hdl.handle.net/10986/33436

Reyes, M. (2016). *Uso del cloro en las plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas: desinfección y formación de subproductos.* (Tesis de maestría). Instituto Politécnico. https://www.repositoriodigital.ipn.mx/bitstream/123456789/23350/1/Tesis%20Gpe%20Reyes%20.pdf

Romero, J. (2010). *Tratamiento de agua residual*. Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería.

Rosal, R. (2019). *Ecuaciones y Cálculos para el Tratamiento de Aguas* (pp.453-460). Paraninfo, Madrid. https://www.researchgate.net/publication/330144584_Ozonizacion

Sabogal, B., Palacios, J. y Pandoja, C. (2013). Optimización de energía en sistemas de bombeo. *Informador Técnico (Colombia) 77*(1), 47-58. https://www.researchgate.net/publication/317120774_Optimizacion_de_energia_en_sistemas_de_bombeo

Monge, S., Silva, A. y Bengoa, C. (s.f.). *Manual técnico sobre procesos de oxidación avanzada aplicados al tratamiento de aguas residuales industriales.* Red de Tratamiento y reciclaje de aguas industriales mediante soluciones sostenibles fundamentadas en procesos biológicos. http://www.cyted.org/sites/default/files/manual_sobre_oxidaciones_avanzadas_0.pdf

Sánchez, M., Villalobos, N., Gutiérrez, E. y Caldera Y. (2012). Diseño de un equipo de desinfección por luz ultravioleta para el tratamiento de aguas residuales con fines de reutilización. *Revista Tecnocientífica URU 2*, 11-18. https://www.researchgate.net/publication/282723534_Diseno_de_un_equipo_de_desinfeccion_por_luz_ultravioleta_para_el_tratamiento_de_aguas_residuales_con_fines_de_reutilizacion

Sáenz, B. (2019). *Caracterización de arena impregnada con dióxido de titanio como catalizador heterogéneo en el proceso de ozonización de aguas contaminadas con naproxeno, ketoprofeno y cimetidina*. (Informe de graduación). Escuela de química. Universidad de Costa Rica. San José, C.R. http://repositorio.sibdi.ucr.ac.cr:8080/jspui/bitstream/123456789/9145/1/44240.pdf

Sánchez, C. (2015). *Intercambio iónico. serie: Tratamientos terciarios.* (Ficha Técnica). Universidad de Cataluña. *https://www.wateractionplan.com/documents/177327/558161/Intercambio+iónico.pdf/a832c542-7c3a-4d31-789b-5f318eced659*

Severiche, C., Castillo, M. y Acevedo, R. (2013). Manual de Métodos Analíticos para la Determinación de Parámetros Fisicoquímicos Básicos en Aguas. Cartagena de Indias, Colombia. Fundación Universitaria Andaluza Inca Garcilaso. https://www.researchgate.net/profile/Ca_Severiche-Sierra_Jr/publication/329153132_Manual_de_Metodos_Analiticos_para_la_Determinacion_de_Parametros_Fisicoquimicos_Basicos_en_Aguas/links/5bf81de4458515a69e364106/Manual-de-Metodos-Analiticos-para-la-Determinacion-de-Parametros-Fisicoquimicos-Basicos-en-Aguas.pdf

Suarez, A. (2016). *Propuesta de dimensionamiento de un sistema de ultrafiltración, para tratar agua permeada almacenada.* (Proyecto integral de grado). Fundación Universidad De América, Bogotá, Colombia. https://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/481/1/6091168-2016-2-IQ.pdf

Soto, S. (2016). *Cinética.* Tecnológico de Costa Rica. https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/10111/Cin%C3%A9tica.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Tchobanoglous, G., Stensel, H. D., Tsuchihashi, R., Burton, F., Abu-Orf, M., Bowden, G, … Pfrang, W. (2014). *Wastewater Engineering: Treatment and Resources Recovery*. Mc Graw-Hill, Inc.

Tchobanoglous G., Trusell R., Hand D., Crittenden J. and Howe K. (2012). Principles of water treatment. London: Wiley

TEBAG. (2020). *Información del proyecto Hotel Le Cabanon*. https://tebag.cr/showcase/hotel-le-cabanon/

Toledo, C. (2020). *Desinfección mediante Luz Ultravioleta, Cloro y Ozono*. ISA Ingeniería y Servicios Ambientales. https://isa.ec/desinfeccion-mediante-luz-ultravioleta-cloro-y-ozono/

Universidad Nacional de Costa Rica. (2018). *Informe anual, UNA-Campus Sostenible.* Universidad Nacional, Heredia, C.R. http://documentos.una.ac.cr/bitstream/handle/unadocs/10289/Informe%20UNACS%202018.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Universidad Nacional. (2003). UNA-GACETA 07-2003. http://www.cu.una.ac.cr/index.php?option=com_remository&Itemid=97&func=fileinfo&id=1735

Universidad Nacional. *Protocolo para la disposición final de desechos peligrosos en la Universidad Nacional. UNA.* Universidad Nacional, Heredia, C.R. http://www.documentos.una.ac.cr/bitstream/handle/unadocs/5368/10.%20Protocolo%20del%20manejo%20de%20residuos%20peligrosos%20de%20la%20UNA.pdf?sequence=10&isAllowed=y

Velázquez, S., Linares, I., Jiménez, M., Islas, M. y Lucero, M. (2018). Fundamentos y avances en la desinfección del agua residual. *Ciencias del agua: perspectiva desde la academia* (1)142-156. https://www.researchgate.net/publication/325128348_Fundamentos_y_avances_en_la_desinfeccion_del_agua_residual

Villalobos, R., Bermúdez, T., & Romero, M. (2013). Percepción de la rehabilitación forestal de la zona de protección del río Pirro tienen sus vecinos. *Revista De Ciencias Ambientales*, *46*(1), 75-83. https://doi.org/10.15359/rca.46-2.7

Zaraté, G. (2016). *Dimensionamiento y costeo de un sistema de tratamiento terciario que permita el reuso del efluente de una planta de tratamiento de aguas residuales de una empresa procesadora de carnes de aves.* (Proyecto de graduación de licenciatura en ingeniería química). Escuela de química. Universidad de Costa Rica, San José, C.R. http://hdl.handle.net/10669/78450

Xylem. (2021). *Sistema de ozono modular*. Xylem let's solve water. https://www.xylem.com/es-cr/products-services/treatment-products--systems/disinfection-and-oxidation/ozone-systems/modular-ozone-system/

## 8. Anexos

**Anexo 1.** *Diámetros comerciales*

| Diámetro de la Tubería de succión (mm) | Velocidad máxima (m/s) |
|---|---|
| 2” | 0.0508 m |
| 3” | 0.0762 m |
| 4” | 0.1016 m |
| 6” | 0.1524 m |
| 8” | 0.2032 m |
| 10” | 0.2540 m |
| 12” | 0.3048 m |

**Fuente:** Elaboración propia (2023) con base en López (2005).

**Anexo 2.** *Pérdidas localizadas en longitudes equivalentes (m).*

| *Elemento* | *pulg* | *2* | *3* | *4* | *8* | *10* |
|---|---|---|---|---|---|---|
| *Codo 90°* | | | | | | |
| *Radio medio* | | *1,4* | *2,1* | *2,8* | *5,5* | *6,7* |
| *Entrada* | | | | | | |
| *Normal* | | *0,7* | *1,1* | *1,6* | *3,5* | *4,5* |
| *Borda* | | *1,5* | *2,2* | *3,2* | *6,0* | *7,5* |
| *Válvula* | | | | | | |
| *De pie* | | *14,0* | *20,0* | *23,0* | *52,0* | *65,0* |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| *T de retención* | *6,4* | *9,7* | *12,9* | *25,0* | *32,0* |
| *Compuerta* | *0,4* | *0,5* | *0,7* | *1,4* | *1,7* |
| *T de Salida* | | | | | |
| *Bilateral* | *3,5* | *5,2* | *6,7* | *13,0* | *16,0* |

**Fuente:** Elaboración propia (2023) con base en López (2005).

***Anexo* 3.** *Entrevista estructurada*

**Entrevista estructurada aplicada a la encargada de la planta de tratamiento de la Universidad Nacional, Campus Omar Dengo.**

Encargado: Paula Brenes Altamirano

Profesión: Ingeniera en biotecnología

**Tema: "**Diseño de un sistema para el reuso del agua residual de la planta de tratamientos de la Universidad Nacional, campus Omar Dengo en el período 2020-2021".

Somos estudiantes de la Licenciatura en Ingeniería en Gestión Ambiental, como parte del proyecto final de graduación se pretende elaborar una propuesta de sistema de tratamiento del agua residual proveniente de la planta del Campus Omar Dengo, mediante los principios de tratamiento terciario para que se aproveche y contribuya a la disminución del desabastecimiento del recurso hídrico de la Universidad Nacional.

Debido a su experiencia en la planta de tratamientos, se realizará una serie de preguntas con el fin de recopilar información relevante sobre la planta de tratamientos.

**Proceso de tratamiento**

1. ¿Cuál es la extensión de la planta de tratamiento?
2. ¿Cuál es el caudal de la planta de tratamientos?
3. ¿Cuál es el tipo de tratamiento de aguas residuales que se aplica en el lugar?
4. ¿Cuáles son los procesos unitarios que se realizan en la planta de tratamiento?
5. ¿Qué características poseen estos procesos unitarios?
6. ¿Utilizan algún tipo de floculante o coagulante, de ser la respuesta si, cuantas cantidades se utilizan?
7. ¿Se realizan análisis fisicoquímicos en el efluente y afluente de la planta de tratamiento, con qué frecuencia se realizan estos muestreos?

8. En años anteriores, ¿han valorado la posibilidad del reuso de estas aguas residuales en la Institución?
9. ¿Se cuenta con disponibilidad física y financiera para la implementación de un sistema de reuso?
10. ¿Cuáles han sido los principales problemas que se generan en el sistema de tratamiento diseñado que actualmente

**Anexo 4.** *Criterios y fórmulas para el diseño de tratamiento terciario según el método de desinfección.*

| **Método de desinfección** | **Criterio o fórmulas de diseño** |
|---|---|
| Cloración | Para la determinación de la concentración del cloro a partir de la solución madre se utilizará las siguientes ecuaciones:<br><br>C1*V1 = C2*V2<br>Donde:<br>C1: Concentración Inicial<br>V1: Volumen inicial<br>C2: Concentración Final<br>V2: Volumen Final<br><br>Asimismo, para la determinación de la dosis de hipoclorito de sodio se utilizará la siguiente ecuación:<br><br>DNaClO = $Cl^{-} * \frac{M\ de\ NaClO}{M\ de\ Cl^{-}} * \rho\ de\ NaClO$<br>Donde:<br>DNaClO: Dosis de Hipoclorito de sodio (ml/m3)<br>$Cl^{-}$:Dosis de Cloruro (g/m3)<br>M de NaClO: Masa Molar de Hipoclorito de sodio (g/mol)<br>M de $Cl^{-}$: Masa Molar de cloruro (g/mol) |

| | |
|---|---|
| | $\rho\ de\ NaClO$: Densidad de Hipoclorito de sodio (g/mol) |
| Ozonación | Según Brenes (2006), la cantidad de ozono producido depende de las características físicas del equipo, suministro de energía, factor de potencia, humedad y polvo de gas de alimentación, temperatura del gas ozonizado y de la concentración del gas de alimentación.<br><br>● Características del generador y producción de ozono:<br><br>P=4*k*f*Va* [cd*(Vo-va)-Va*Cd]<br><br>Donde:<br>P: Producción de ozono<br>Va: Voltaje aplicado al hueco de descarga.<br>Vo: Valor máximo o pico de voltaje aplicado.<br>Cd: Capacidad de dieléctrico.<br>Ca: Capacidad de hueco de descarga.<br>f: Frecuencia de la corriente suministrada.<br>k: Constante.<br><br>● Suministro de energía:<br><br>Método A: Frecuencia baja (60 hertz) constante voltaje variable. Se tiene una fuente de energía, pasa a un transformador variable, seguidamente a un transformador de alta tensión y por último al generador de ozono. |

Método B: Frecuencia media (600 hertz) constante voltaje variable. Se tiene una fuente de energía, pasa a un convertidor de frecuencia, seguidamente a un transformador de variable y a un transformador de alta tensión y por último al generador de frecuencia.

Método C: Voltaje constante frecuencia variable. Se tiene la fuente de energía. Pasa a un convertidor de variable frecuencia y seguidamente a un transformador de alta tensión. Por último, al generador de ozono.

- **Factor de potencia:**

A menor factor de potencia mayor requerimiento de energía eléctrica.

$$Fp=Kw/kVa$$

Donde:

Fp: Factor de potencia, en términos de voltaje y amperaje.

Kw: Potencia aparente

Kva: Potencia real.

- **Humedad y polvo de gas:**

La humedad y polvos de gas disminuye la cantidad de gas de alimentación.

| | |
|---|---|
| Membrana | Estas dependen del tipo del tamaño del poro, debido que determina el tamaño de las partículas que puede atravesar la barrera. Entre estas se encuentra:<br>● Microfiltración: El tamaño del poro oscila entre 0,1 y 10 micrómetros, remueven proteínas y ácidos grasos generalmente<br>● Ultrafiltración: El tamaño del poro oscila entre 0,1 y 0,01 micrómetros, se utilizan para la remoción de virus, bacterias y protozoos<br>● Nanofiltración: El tamaño del poro oscila entre 0,01 y 0,035 micrómetros, remueve especialmente iones<br>● Osmosis inversa: No son porosas a partir de 0,0001, se utilizan normalmente para la desalinización del agua |
| Radiación Ultravioleta | Para el diseño de un sistema de radiación ultravioleta se considera:<br>● **Determinación de los microorganismos**<br>Se determina por la técnica de fermentación de tubos múltiples (número más probable) de acuerdo APHA.<br>● **Porcentaje de remoción**<br>$\% r = \frac{coliformes\ iniciales - coliformes\ finales}{coliformes\ iniciales}$x100<br><br>lnt = lnk – m lnI<br><br>Donde,<br><br>I: Intensidad de luz UV (mW/cm2) |

k y m: son las constantes de desinfección**.**

- **Tiempo de residencia**

$$t = \frac{k}{I^m}$$

Donde,

t: Tiempo de residencia

K y m: Constante de desinfección.

- **El área de flujo**

**Q = V x A**

Donde,

Q: Caudal.

V: Volumen

A: Área de flujo

- **Ancho**

A = h x w

Donde:

A: Área de flujo

h: Altura

w: Ancho

- **Longitud del equipo**

L=V*t

Donde,

L: Longitud del equipo

V: Volumen

t: Tiempo de residencia

- **Área exposición**

  Área exposición= L X w

Donde:

L: Longitud del equipo

w: Ancho

- **Potencia (D) de salida de la lámpara o las lámparas requeridas para el proceso de desinfección**

$$D = I \times t$$

Donde:

D: Dosis de desinfección

I: Intensidad de luz UV

t: tiempo de residencia o exposición

**Fuente:** Elaboración propia (2023) con datos de Zaraté (2016), Brenes (2006) y Gutiérrez, Caldera, Sánchez (2012).

**Anexo 5.** *Fórmulas para el diseño de la bomba*

| Nombre de fórmula | Fórmula |
|---|---|
| Ecuación 1. Potencia teórica | Pt= Q *$p$* g * HB<br><br>Donde:<br><br>Pt: Potencia teórica (W)<br>Q: Caudal (m3/ s)<br>p: Densidad de flujo (kg/m3)<br>g: Constante de gravedad (m/s2)<br>HB: Carga de trabajo de la bomba (m) |
| Ecuación 2. Carga de trabajo de la bomba | $HB= \quad hf + \left[\frac{P_2}{\rho g} + \frac{V_2^2}{2g} + Z_2\right] - \left[\frac{P_1}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} + Z_1\right]$<br><br>Donde:<br><br>P2: Presión en la salida ($Pa$)<br>P1: Presión en la entrada ($Pa$)<br>V1: Velocidad a la salida ($m/\ s$)<br>V2: Velocidad a la entrada ($m/\ s$)<br>Z1: Altura en la salida ($m$)<br>Z2: Altura en la entrada ($m$)<br>hf: Pérdida de carga ($m$)<br>HB: Carga de trabajo de la bomba ($m$) |
| Ecuación 3. Factor de Reynolds | Re= $\frac{D*\rho*V}{\mu}$ |

| | |
|---|---|
| | Donde:<br>Re: Factor de Reynolds<br>D: Diámetro de tubería *(m)*<br>V: Velocidad del fluido ($m/s$)<br>μ: Viscosidad (cp)<br>$\rho$: Densidad de flujo ($kg/m^3$) |
| Ecuación 4. Potencial real de la bomba | Pr= $\frac{Pt}{\eta}$<br>Donde:<br><br>Pr: Potencia real de la bomba (*Hp*)<br>Pt: Pt: Potencia teórica (*W*)<br>$\eta$: Eficiencia de la bomba |
| Ecuación 5. Pérdida de carga | $hf = \frac{f * L_{eq} * v^2}{2Dg}$<br><br>Donde:<br>hf: Pérdida de carga (*m*)<br>Leq: Longitud equivalente *(m)*<br>V: Velocidad del fluido ($m/s$)<br>D: Diámetro de la tubería *(m)*<br>f: Coeficiente de fricción |

**Fuente:** Elaboración propia (2023) con datos de Zaraté (2016).

**Anexo 6.** *Análisis básicos del agua residual de la planta de tratamientos en el período del 2018-2019.*

| | 2018 | 2019 | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | **IV Trimestre** | **I Trimestre** | **II Trimestre** | **III Trimestre** | **IV Trimestre** | **Límite máximo permisible** |
| DBO (mg/l) | 13,00 ±1,000 | 34,000 ±2,000 | 30,000 ±2,000 | 13,000 ±1,000 | 16,000 ±2,000 | 50,000 |
| DQO (mg/l) | 40,000 ±1,00 | 61,000 ±2,000 | 54,000 ±2,000 | 90,000 ±12,000 | 36,000 ±2,000 | 50,000 |
| Sólidos Suspendidos Totales (mg/l) | 18,000 ±0,900 | 27,000 ±1,000 | 17,000 ±0,900 | 121,000 ±5,000 | 5,000 ±0,001 | 50,000 |
| Sólidos Sedimentables (ml/l/h) | 0,100 ±0,001 | 0,000 ±0,001 | 0,100 ±0,001 | 0,200 ±0,050 | 1,000 ±0,050 | 1,000 |
| G y A (mg/l) | 4,000 ±0,001 | 11,000 ±1,000 | 4,000 ±0,001 | 4,000 ±0,001 | 9,000 ±2,000 | 30,000 |
| SAAM (mg/l) | 0,540 ±0,060 | 7,600 ±0,900 | 0,480 ±0,001 | 0,200 ±0,001 | 0,420 ±0,050 | 5,000 |
| pH | 6,300 ±0,040 | 7,390 ±0,040 | 6,900 ±0,040 | 7,320 ±0,060 | 6,290 ± 0,060 | 5- 9 |
| Temperatura (ºC) | 23,000 ±1,000 | 24.000 ±14,000 | 24,000 ±1,000 | 24,000 ±1,000 | 23,000 ±1,000 | 15°C ≤ T ≤ 40°C |
| Caudal (m3 /día) | 422,000 ±6,000 | 106.000 ±5,000 | 97,000 ±5,000 | 148,000 ±7,000 | 119,000 ±6,000 | --------- |

**Fuente:** Elaborado con datos de los reportes operacionales código CA18-1214R01-1, CA19-0480-R01-1, CA19-0798-R01-1, CA19-1094-R01-1, U006-250220-01.

**Anexo 7.** *Metales presentes en el agua residual en el periodo del 2018-2019.*

| **Metales (mg/l)** | **Período de muestreo** | | | | | **Límites Máximos Reglamento** |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | **2018** | **2019** | | | | |
| | **IV Trimestre** | **I trimestre** | **II Trimestre** | **III Trimestre** | **IV Trimestre** | |
| Aluminio | 0,060 ±0,002 | 0,014 ±1,000 | 0,025 ±0,001 | 0,013 ±0,001 | 0,010± 0,001 | 5 |
| Arsénico | 0,002 ±0,001 | 0,002 ±0,001 | 0,002 ±0,001 | 0,002 ±0,001 | 0,002 ±0,001 | 0,1 |
| Bario | 0,003 ±0,001 | 0,003 ±0,001 | 0,045 ±0,009 | 0,090 ±0,002 | 0,003 ±0,001 | 5 |
| Boro | 0,500 ±0,001 | 0,600 ±0,001 | 0,580 ±0,050 | 0,560 ±0,050 | 0,500 ±0,001 | 3 |
| Cadmio | 0,001 ±0,001 | 0,001 ±0,001 | 0,001 ±0,001 | 0,001 ±0,001 | 0,001 ±0,001 | 0,1 |
| Cianuro | 0,005 ±0,001 | 0,005 ±0,001 | 0,005 ±0,001 | 0,005 ±0,001 | ------ | 1 |
| Cobre | 0,040 ±0,001 | 0,040 ±0,001 | 0,040 ±0,001 | 0,040 ±0,001 | 0,040 ±0,001 | 0,5 |
| Cromo | 0,002 ±0,001 | 0,002 ±0,001 | 0,004 ±0,000 | 0,002 ±0,001 | 0,002 ±0,001 | 1,5 |
| Estaño | 0,006 ±0,001 | 0,006 ±0,001 | 0,006 ±0,001 | 0,006 ±0,001 | 0,006 ±0,001 | 2 |
| Mercurio | 0,001 ±0,001 | 0,011 ±0.000 | 0,001 ±0,001 | 0,001 ±0,001 | 0,001 ±0,001 | 0,01 |
| Níquel | 0,006 ±0,001 | 0,006 ±0,001 | 0,110 ± 0,006 | 0,006 ±0,001 | 0,006 ±0,001 | 1 |
| Plata | 0,001 ±0,001 | 0,050 ±0,001 | 0,050 ±0,001 | 0,001 ±0,001 | 0,050 ±0,001 | 1 |
| Plomo | 0,001 ±0,001 | 0,001 ±0,001 | 0,070 ±0.005 | 0,001 ±0,001 | 0,001 ±0,001 | 0,5 |
| Selenio | 0,006 ±0,001 | 0,006 ±0,001 | 0,006 ±0,001 | 0,006 ±0,001 | 0,006 ±0,001 | 0,05 |
| Zinc | 0,050 ±0,001 | 0,050 ±0,001 | 0,050 ±0,001 | 0,060 ±0,005 | 0,050 ±0,001 | 5 |
| Fenoles y crisoles | 0,020 ±0,001 | 0,620 ±0,030 | 0,020 ±0,001 | 0,021 ±0,002 | ------ | 1 |
| Fluoruro | 0,169 ±0,009 | 0,320 ±0,020 | 0,340 ±0,020 | 0,210 ±0,040 | ------ | 10 |
| Sulfito | 0,200 ±0,001 | 0,200 ±0,001 | 0,200 ±0,001 | 0,200 ±0,001 | ------ | 1 |
| Sulfuros | 0,200 ±0,001 | 0,100 ±0,001 | 0,100 ±0,001 | 0,930 ±0,010 | ------ | 25 |

**Fuente:** Elaborado con datos de los reportes operacionales código CA18-1214R01-1, CA19-0480-R01-1, CA19-0798-R01-1, CA19-1094-R01-1, U006-250220-01.

**Anexo 8.** *Metales presentes en el agua residual en el periodo del 2018-2019.*

| Metales (mg/l) | Promedio | Incertidumbre Promedio | Desviación estándar | Máximo | Mínimo | Límites máximos permisibles |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Aluminio | 0,024 | ± 0,201 | 0,021 | 0,060 | 0,010 | 5 |
| Arsénico | 0,002 | ± 0,001 | 0,000 | 0,002 | 0,002 | 0,1 |
| Bario | 0,029 | ± 0,003 | 0,039 | 0,090 | 0,003 | 5 |
| Boro | 0,548 | ± 0,021 | 0,046 | 0,600 | 0,500 | 3 |
| Cadmio | 0,001 | ± 0,001 | 0,000 | 0,001 | 0,001 | 0,1 |
| Cianuro | 0,004 | ± 0,001 | 0,002 | 0,005 | 0,001 | 1 |
| Cobre | 0,040 | ± 0,001 | 0,000 | 0,040 | 0,040 | 0,5 |
| Cromo | 0,002 | ± 0,001 | 0,001 | 0,004 | 0,002 | 1,5 |
| Estaño | 0,006 | ± 0,001 | 0,000 | 0,006 | 0,006 | 2 |
| Mercurio | 0,003 | ± 0,001 | 0,004 | 0,011 | 0,001 | 0,01 |
| Níquel | 0,027 | ± 0,002 | 0,047 | 0,110 | 0,006 | 1 |
| Plata | 0,030 | ± 0,001 | 0,027 | 0,050 | 0,001 | 1 |
| Plomo | 0,015 | ± 0,002 | 0,031 | 0,070 | 0,001 | 0,5 |
| Selenio | 0,125 | ± 0,001 | 0,266 | 0,600 | 0,006 | 0,05 |
| Zinc | 0,142 | ± 0,002 | 0,200 | 0,500 | 0,050 | 5 |
| Fenoles y crisoles | 0,136 | ± 0,007 | 0,270 | 0,620 | 0,001 | 1 |
| Fluoruro | 0,208 | ± 0,018 | 0,136 | 0,340 | 0,001 | 10 |
| Sulfito | 0,160 | ± 0,001 | 0,089 | 0,200 | 0,001 | 1 |
| Sulfuros | 0,266 | ± 0,003 | 0,378 | 0,930 | 0,001 | 25 |

**Fuente:** Elaborado con datos de los reportes operacionales del 2018-2019.

**Anexo 9.** *Resultados de los análisis microbiológicos del efluente de la planta de tratamientos.*

Laboratorio de Análisis San Martín

Experiencia y Tecnología a su Servicio

**Informe de Ensayos Microbiología**

ilac-MRA ECA

Laboratorio de Ensayo
Alcance de Acreditación Nº: LE-012
Acreditado a partir de: 30.10.2001
Alcance disponible en www.eca.or.cr

| | | | |
|---|---|---|---|
| **Cliente:** | Universidad Nacional | | |
| **Subcliente:** | Campus Omar Dengo | | |
| **Dirección:** | Avenida 1, Calle 9 | | |
| **Provincia:** | Heredia | **Código reporte:** | CA20-0557-2 |
| **Cantón:** | Cantón Central de Heredia | **Fecha de muestreo:** | 07/10/2020 |
| **Distrito:** | Heredia | **Fecha de recepción:** | 07/10/2020 |
| **Muestreador:** | Ricardo Solano . Personal del Laboratorio San Martín | **Fecha de reporte:** | 22/10/2020 |

Permiso Sanitario de Funcionamiento del Laboratorio San Martín #34-2020 dado el 14/01/2020, vence el 14/01/2022.
Métodos de análisis acreditados por el ECA identificados en este informe por medio de un asterisco (*). Para consulta de variables acreditadas ingresar a la página del ECA (http://www.eca.or.cr/acr_lab.php) en el link del Laboratorio San Martín.

| | |
|---|---|
| **Código LSM** | CA20-0557 |
| **Punto de muestreo** | Agua tomada de la salida de la Planta de Tratamiento. |

**Resultados**

| Ensayo | Resultado |
|---|---|
| * Coliformes fecales | 23,0 NMP/100 mL |
| ** Nemátodos | Ausente huevecillos/L |

Metodología de análisis: Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 23rd ed. 2017. Especificaciones al dorso.

**Observaciones:**

**Código CIIU:** 8530 **Actividad:** Enseñanza Superior

**Simbologías:**
NMP: Número más probable Negativo=<LC=< 3
Para la interpretación de resultados ver Reglamento de Vertido y Reuso de aguas residuales. Decreto 33601 – MINAE – S
Metodología para Nemátodos: Concentración Técnica Ritchie (éter formol) y de Faust.
Negativo <1 huevecillo/L

*Plan de Muestreo: Según el MTDT-01 (Método de trabajo para el muestreo y custodia de aguas).

** Métodos de ensayo no acreditados

Dra. Priscilla Rojas Sánchez
Cod.2036

**Anexo 10.** *Resultados de metales pesados presentes en el efluente de la planta de tratamientos.*

| Metales (mg/l) | Valor µg /l | Valor mg/l | Límites máximos permisibles |
|---|---|---|---|
| Aluminio | 396 ± 83 | 0,396± 0,083 | 5 |
| Antimonio | 0,192 ± 0,17 | 0,00019± 0,00017 | |
| Arsénico | Nd | ND | 0,1 |
| Bario | 13,7± 2,3 | 0,0137±0,0023 | 5 |
| Boro | -- | --- | 3 |
| Cadmio | 0,0517 ± 0,0040 | 0,0000571± 0,000004 | 0,1 |

| | | | |
|---|---|---|---|
| Cianuro | -- | --- | 1 |
| Cobre | 7,42 ± 0,93 | 0,00742±0,00093 | 0,5 |
| Cromo | 2,15 ± 0,27 | 0,00215±0,00027 | 1,5 |
| Estaño | -- | --- | 2 |
| Hierro | 0,687 ± 108 | 0,687± 0,108 | |
| Mercurio | 0,380 ± 0,067 | 0,000380± 0,000067 | 0,01 |
| Níquel | 1,71 ± 0,19 | 0,00171± 0,00019 | 1 |
| Plata | 4,40 ± 0,42 | 0,00440±0,00042 | 1 |
| Plomo | 2,96 ± 0,43 | 0,00296±0,00043 | 0,5 |
| Selenio | 0,059 ± 0,35 | 0,000059± 0,00035 | 0,05 |
| Zinc | 39,1 ± 3,9 | 0,039±0,0039 | 5 |
| Fenoles y cresoles | 0,000 | 0 | 1 |
| Fluoruro | Nd | ND | 10 |
| Sulfito | 0,050 ± 0,080 | 0,000050± 0,00008 | 1 |
| Sulfuros | 0 | 0± 0 | 25 |

**Fuente:** Datos reportados por el LAA y el laboratorio San Martín. Nd: no detectado

***Anexo 11.*** *Límites máximos admisibles según el tipo de reuso de agua residual*

| **Tipo de reúso** | **Descripción** | **Parámetros** | | |
|---|---|---|---|---|
| | | **Nematodos intestinales (promedio aritmético N.º De huevos por litro)** | **Coliformes Fecales (NMP/100 ml)** | **Factor multiplicador** |
| 1 | Reuso urbano | 1 | 1 000 | 1 |
| 2 | Riego con acceso restringido | 1 | 10 000 | 1,5 |
| 3 | Reuso agrícola en cultivos de alimentos que no se procesan previo a su venta | 1 | 1 000 | 1 |
| 4 | Reuso agrícola en cultivos de alimentos que se procesan previo a su venta | 1 | 10 000 | 1,5 |
| 5 | Reuso agrícola en cultivos no alimenticios | 1 | ----- | 2 |
| 6 | Reuso recreativo | 1 | 10 000 | 1 |
| 7 | Reuso paisajístico | 1 | ----- | 2 |
| 8 | Reuso en la construcción | 1 | 1 000 | 1 |