

**DESARROLLO DE UNA PROPUESTA, A NIVEL TEÓRICO, PARA EL
TRATAMIENTO BIOLÓGICO DE LAS AGUAS RESIDUALES EN LA INDUSTRIA
LÁCTEA**

HUGO RICARDO DAZA MONROY

JUAN ESTEBAN FRASSER OSPINA

Proyecto Integral de Grado para optar al título de:

INGENIERO QUÍMICO

Orientadores

Diana Marcela Cuesta Parra

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA

FACULTAD DE INGENIERÍAS

PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA

BOGOTÁ D.C

2022

NOTA DE ACEPTACIÓN

Bogotá D.C. febrero de 2022

DIRECTIVOS DE LA UNIVERSIDAD

Presidente de la Universidad y Rector del Claustro

Dr. Mario Posada García-Peña

Concejero Institucional

Dr. Luis Jaime Posada García-Peña

Vicerrectora Académica y de Investigaciones

Dra. Alexandra Mejía Guzmán

Vicerrector Administrativo y Financiero

Dr. Ricardo Alfonso Peñaranda Castro

Secretario General

Dr. José Luis Macía Rodríguez

Decana Facultad de Ingeniería

Dra. Naliny Patricia Guerra Prieto

Director Programa Ingeniería Química

Dra. Nubia Liliana Becerra Ospina

Las directivas de la Universidad de América, los jurados calificadores y el cuerpo docente no son responsables por los criterios e ideas expuestas en el presente documento. Estos corresponden únicamente al autor.

DEDICATORIA

Dedico con todo corazón mi tesis a mi madre, tú has sido mi motor y mi fuerza en muchos momentos de mi vida, te amo y te admiro.

HUGO RICARDO DAZA MONROY

DEDICATORIA

Este trabajo va dedicado a mi familia la cual siempre me brindó su apoyo incondicional en todos los aspectos para ayudarme a sacar adelante mi formación profesional, gracias a ellos y al esfuerzo realizado he podido culminar esta etapa de mi vida. También quisiera realizar una dedicatoria especial a mi padre, que a pesar de no poder estar conmigo por circunstancias de la vida, siempre me brindó lo mejor y gran parte de este logro es gracias a él y al gran trabajo que hizo como padre. Se que siempre me seguirá guiando y será, junto con mi familia, mi mayor motor para seguir cosechando logros y alcanzando mis metas.

Juan Esteban Frasser Ospina

AGRADECIMIENTOS

Agradecer a Dios por su amor y bendición que desde niño me ha acompañado. A mi mamá por su dedicación y esfuerzo en cada etapa de mi vida, por tener siempre la fortaleza de salir adelante sin importar los obstáculos, gracias madre por creer en mí. A mis tías y a mi abuela porque me enseñaron el valor de una familia, gracias por su apoyo. A mis amigos por todas las experiencias vividas, les deseo muchos éxitos y que sigan creciendo en todos los ámbitos de su vida.

También agradezco a mi directora Diana Marcela Cuesta y a mis maestros por el esfuerzo que hacen cada día por formar los mejores profesionales, gracias por sus consejos y conocimientos entregados.

Por último, agradecer a mi amigo y compañero de trabajo Juan Esteban Frasser, la ayuda mutua desde primer semestre nos ha ayudado a crecer personal y profesionalmente para culminar esta etapa de nuestras vidas.

HUGO RICARDO DAZA MONROY

AGRADECIMIENTOS

En esta ocasión quisiera agradecer principalmente a mis padres, mi hermana y mi abuela, quienes han sido mi motor y mayor motivación durante toda la carrera, por ellos he llegado hasta este punto gracias a sus consejos, enseñanzas y todo el apoyo que me han brindado durante esta etapa de formación profesional; sin su compañía gran parte de esto no habría sido posible.

También, agradecer a la ingeniera Diana Marcela Cuesta por todo el apoyo brindado para culminar de manera exitosa la elaboración de este trabajo. Gracias a sus correcciones, recomendaciones y tareas todo esto fue posible.

Finalmente, agradecer a mi compañero Hugo Ricardo Daza, con quien desde un principio iniciamos este camino de formación profesional, durante el cual forjamos una amistad que nos permitió apoyarnos mutuamente para así poder llegar a este momento en el cual culminamos nuestros estudios.

Juan Esteban Frasser Ospina

TABLA DE CONTENIDO

	pág.
RESUMEN	15
INTRODUCCIÓN	17
OBJETIVOS	19
1. MARCO REFERENCIAL	20
1.1 Marco teórico	20
1.1.1 <i>Tratamiento de aguas residuales</i>	20
1.1.2 <i>Tratamiento biológico de aguas residuales</i>	23
1.1.3 <i>Aguas residuales en la industria láctea</i>	24
1.2 Marco legal	26
2. METODOLOGÍA	29
2.1. Primer objetivo	29
2.2. Segundo objetivo	29
2.3 Tercer objetivo	36
2.3.1 <i>Diseño del tanque de igualación</i>	37
2.3.2 <i>Diseño del sedimentador ABR</i>	38
2.3.3 <i>Diseño del tanque UASB</i>	38
2.4. Cuarto objetivo	41
2.4.1 <i>Costos de inversión</i>	41
3. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	43
3.1 Resultados primer objetivo	43
3.1.1 <i>Descripción del proceso productivo</i>	43
3.1.2 <i>Diagnóstico de efluentes generados por el proceso productivo</i>	45
3.2 Resultados segundo objetivo	53
3.2.1 <i>Eficiencia de remoción</i>	57
3.2.2 <i>Consumo de energía</i>	58
3.2.3 <i>Remoción de otros contaminantes</i>	60
3.2.4 <i>Producción de lodos</i>	62
3.3 Resultados tercer objetivo	65
3.3.1 <i>Diseño tanque de igualación</i>	66
3.3.2 <i>Diseño reactor ABR</i>	68

3.3.3 <i>Diseño reactor UASB</i>	69
3.4 Resultados cuarto objetivo	73
4. CONCLUSIONES	77
BIBLIOGRAFÍA	79
ANEXOS	87

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Parámetros de vertimiento para la elaboración de productos lácteos	27
Figura 2. Configuración del sistema de tratamiento biológico seleccionado	36
Figura 3. Representación del proceso productivo general que realiza la empresa de referencia.	44
Figura 4. Diagrama del proceso productivo llevado a cabo por la empresa referencia para la producción de yogurt griego y yogurt líquido.	45
Figura 5. Caudal Vs Tiempo, 3 de octubre de 2021	46
Figura 6. Caudal Vs Tiempo, 4 de octubre de 2021	47
Figura 7. pH Vs Tiempo, 3 de octubre de 2021	48
Figura 8. pH Vs Tiempo, 4 de octubre de 2021	49
Figura 9. Conductividad Eléctrica Vs Tiempo, 3 de octubre de 2021	49
Figura 10. Conductividad Eléctrica Vs Tiempo, 4 de octubre de 2021	50
Figura 11. TDS Vs Tiempo, 3 de octubre de 2021	50
Figura 12. TDS Vs Tiempo, 4 de octubre de 2021	51
Figura 13. Diagrama conceptual del diseño jerárquico para la selección.	53

Figura 14. Diagrama proceso de tratamiento biológico

66

Figura 15. Curva de caudal

67

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Escala fundamental de comparación por pares (Saaty, 1980) para la técnica AHP en el software Super Decisions®	31
Tabla 2. Descripción del artículo representado por cada opción.	32
Tabla 3. Parámetros In Situ.	46
Tabla 4. Parámetros en Laboratorio.	52
Tabla 5. Escala para representar juicios	54
Tabla 6. Comparación de eficiencias de remoción entre los artículos consultados	55
Tabla 7. Prioridad de los rangos en la eficiencia de remoción	58
Tabla 8. Prioridad de los rangos en el consumo de energía	59
Tabla 9. Prioridad de los rangos en la remoción de fosfatos.	61
Tabla 10. Prioridad de los rangos en la remoción de nitratos	62
Tabla 11. Prioridad de los rangos en la producción de lodos	63
Tabla 12. Resultado final proceso de selección.	64
Tabla 13. Datos de entrada para el diseño del reactor USB.	69
Tabla 14. Dimensionamiento de la zona de expansión de lodos del reactor UASB	70
Tabla 15. Dimensiones de la zona de separación de sólidos en el reactor UASB	71
Tabla 16. Dimensionamiento para la zona de sedimentación del reactor UASB	71

Tabla 17. Distribución del afluente en el reactor UASB	72
Tabla 18. Características de conducción en el reactor UASB.	72
Tabla 19. Condiciones requeridas en el reactor UASB.	73
Tabla 20. Costos del tratamiento seleccionado.	74
Tabla 21. Caudal y parámetros fisicoquímicos in-situ.	88

RESUMEN

En este documento se presenta el informe final del trabajo de grado que lleva como título “Desarrollo de una propuesta, a nivel teórico, para el tratamiento biológico de las aguas residuales en la industria láctea” que tiene como objetivo principal brindar una propuesta teórica para el tratamiento biológico de las aguas residuales generadas en una industria láctea que permita cumplir con la normatividad vigente.

Para iniciar el desarrollo de este trabajo, se realizó una amplia búsqueda bibliográfica de diferentes tipos de tratamientos biológicos aplicables a este tipo de industria que permitiera tener un buen grupo de referencias para llevar a cabo una comparación.

Para la comparación entre las referencias bibliográficas obtenidas, se hizo uso de un software especializado que permite determinar, por medio de análisis estadísticos, la mejor opción con base a criterios críticos previamente definidos para la situación presentada.

Por último, teniendo en cuenta la opción seleccionada por medio del software, se llevó a cabo un diseño biológico para determinar las características del reactor y también se realizó una determinación de los costos para tener en cuenta para una posible implementación de este tratamiento biológico en una industria láctea.

Como resultados, se presenta la caracterización del agua residual de la empresa láctea de referencia donde se evidencia que los valores de parámetros como aceites y grasas, DQO y DBO no cumplen con la Normatividad. En cuanto a la selección de un tratamiento biológico, realizada por medio de un software, se obtuvo como resultado la elección del artículo presentado por Siping Ji et al, el cual presenta una configuración que involucra un tanque de igualación, un sedimentador ABR y un reactor UASB.

Teniendo en cuenta el artículo seleccionado, se realizó el diseño de los tres equipos necesarios para el tratamiento biológico, teniendo como base la información de la empresa de referencia. Una vez realizado este diseño, se presenta el costo de inversión aproximado para implementar el sistema diseñado, para lo cual se estimó un valor total de 959'547.472 pesos colombianos.

PALABRAS CLAVE: industria láctea, aguas residuales, tratamiento de aguas, tratamiento biológico

INTRODUCCIÓN

Para la industria láctea, al ser un sector de gran importancia a nivel nacional, es importante que se lleve a cabo este tipo de proyectos, debido a que, al presentarse eventuales auditorías por parte de entidades ambientales, si no llevan a cabo un correcto tratamiento de sus aguas residuales, se puede ver afectada su imagen y funcionamiento debido a las consecuencias legales y económicas que pueden representar este tipo de falencias. Por lo tanto, es de gran importancia que este tipo de industria cumpla correctamente la norma establecida por el Ministerio De Ambiente Y Desarrollo Sostenible en la resolución No. 0631 del 17 de marzo del 2015. El no cumplimiento de esta normatividad puede llevar al cierre de las empresas dedicadas a este sector económico lo cual generaría un desabastecimiento en el mercado nacional de productos de alta importancia como lo son los producidos por la industria láctea. En la actualidad, el sector industrial es el mayor contribuyente de contaminantes orgánicos en el que se estima que aportan 51% en la DBO y 62% en la DQO. Debido a esta contaminación, entre 11,8 y 19 millones de personas en Colombia se encuentran altamente expuestos a riesgos en su salud por mala calidad del agua, según datos del Banco Mundial [35]

Para el desarrollo del presente trabajo de grado, se tuvo en cuenta una empresa láctea de referencia que cuenta con la necesidad de realizar un tratamiento a sus aguas residuales debido a que actualmente los valores que presentan los parámetros fisicoquímicos de sus aguas no cumplen con lo requerido por la ley colombiana. Con la implementación de un tratamiento biológico, la empresa busca generar un sistema el cual le permita poder hacer un vertimiento de estas aguas, cumpliendo con lo estipulado por las normas vigentes. Teniendo en cuenta esto, se obtuvo la información correspondiente al efluente generado en el proceso productivo de esta empresa, por medio de una caracterización del agua, para así poder hacer uso de esta en los procesos de diseño de los equipos requeridos por el tratamiento biológico seleccionado

Adicional al diseño de los equipos, este trabajo de grado también busca dar a conocer a la empresa los costos aproximados de inversión inicial que puede requerir la

implementación del tratamiento biológico de aguas residuales propuesto, en caso de que así lo deseen.

OBJETIVOS

Objetivo general

Desarrollar una propuesta a nivel teórico para el tratamiento biológico de las aguas residuales en una industria láctea

Objetivos específicos

- Diagnosticar el proceso productivo y la generación de efluentes.
- Seleccionar un tratamiento biológico para el tratamiento de efluentes.
- Describir las especificaciones técnicas del tratamiento biológico seleccionado
- Determinar los costos del tratamiento seleccionado.

1. MARCO REFERENCIAL

1.1 Marco teórico

1.1.1 *Tratamiento de aguas residuales*

El tratamiento de aguas residuales consiste en una serie de procesos físicos, químicos y biológicos cuya aplicación tiene como objetivo la eliminación o reducción de los diferentes contaminantes que pueden estar presentes en el agua efluente de actividades del ser humano. Su objetivo principal es producir agua limpia y/o reutilizable y un desecho sólido (lodo) para su disposición o reutilización [1].

Las aguas residuales pueden provenir de residencias, industrias, comercio, entre otras áreas que cuentan con la necesidad de un servicio de agua dentro de sus instalaciones. Estas aguas pueden ser tratadas dentro del mismo sitio donde se generan o pueden llevarse directamente a una planta de tratamiento. La necesidad de tratar este tipo de aguas se basa en los requerimientos y regulaciones legales vigentes en el lugar donde se están generando.

Para llevar a cabo el tratamiento de estas aguas, existen tres principales métodos que se exponen a continuación:

- Métodos físicos: Este método depende de las propiedades físicas de los contaminantes presentes en el agua como su peso específico, tamaño de partícula, viscosidad, etc. Entre los métodos más utilizados se encuentran la sedimentación, filtración, flotación, entre otros. [36]
- Métodos químicos: Este método, como su nombre lo dice, depende de las propiedades químicas de los contaminantes presentes o de los reactivos que se incorporan. Entre los métodos más utilizados están la precipitación, coagulación, procesos electroquímicos, intercambio iónico, oxidación, neutralización, entre otros. [36]
- Métodos biológicos: Este método involucra reacciones bioquímicas encargadas de eliminar contaminantes coloidales o solubles. Este tipo de procesos pueden ser

aeróbicos o anaeróbicos como lagunas aireadas, lodos activos, filtros verdes, entre otros. [36]

Por otro lado, los tratamientos de aguas residuales se suelen clasificar en cuatro etapas principales: tratamiento preliminar, tratamiento primario, tratamiento secundario y tratamiento terciario.

1.1.1 a. Tratamiento preliminar. En esta etapa se busca regular y medir el caudal que va a ingresar a la planta. Para esto, se lleva a cabo un proceso de filtración en donde se tiene como objetivo remover las grasas, los sólidos flotantes de gran tamaño y otro tipo de sólidos como arenas que puedan afectar el correcto funcionamiento de los equipos en la planta. Además, algunas veces se realiza un proceso de pre-aireación, con la cual se logra remover compuestos volátiles presentes en el agua que son los principales causantes de los malos olores en las aguas residuales [36].

1.1.1.b Tratamiento primario. En esta etapa del proceso, el objetivo es eliminar los sólidos en suspensión. Para realizar este proceso, se lleva a cabo una sedimentación por gravedad o asistida por sustancias químicas; para esto, el agua a tratar se deposita en grandes tanques decantadores y se dejan allí por un periodo de tiempo previamente definido que puede estar entre 1 a 2 horas. Cuando el proceso es asistido por sustancias químicas, se agregan compuestos como aluminio, polielectrolitos floculantes y sales de hierro que ayudan a completar el proceso. Además, se logra la precipitación de fósforo y de los sólidos en estado de coloides hasta en un 70% [2].

Entre los métodos más utilizados en esta etapa se encuentran:

- Sedimentación: En este proceso las partículas se depositan en el fondo del tanque donde se encuentra contenida en agua debido a la acción de la gravedad. Este método permite eliminar hasta en un 40% los sólidos que contiene el agua. [37]
- Flotación: Este método busca eliminar las grasas, espumas y aceites que se encuentran en la capa superficial del agua debido a su baja densidad. También se pueden eliminar partículas de baja densidad inyectando burbujas de aire lo cual

facilita su ascensión. Con este método se puede eliminar hasta un 75% de las partículas suspendidas. [37]

- Neutralización: Este método busca regular el pH del agua, que normalmente debe estar dentro del rango de 6-8.5. Cuando las aguas residuales son ácidas, se agregan sustancias alcalinas para aumentar el pH, mientras que, si el agua residual es alcalina, se suele utilizar dióxido de carbono para que el pH disminuya hasta valores normales. [2]

1.1.1.c Tratamiento secundario. El objetivo principal de esta etapa es reducir o eliminar la materia orgánica presente en el agua a través de un proceso biológico. Dentro de esta etapa se encuentran los procesos aeróbicos, anaeróbicos y fisicoquímicos como la floculación. En esta etapa se logra disminuir en gran parte la DBO (demanda biológica de oxígeno) y se remueven las cantidades extra de sólidos sedimentables. Algunos de los métodos más utilizados son:

- Lodos activos: Es un proceso de tipo aerobio en el cual se agregan flóculos de materia orgánica con microorganismos al agua residual y de forma constante se adiciona oxígeno para producir las reacciones deseadas. [2]
- Filtros verdes: Son cultivos especiales que se riegan con el agua residual que se desea tratar. Este tipo de cultivos se utilizan ya que están en capacidad de absorber gran variedad de compuestos contaminantes presentes en el agua. [2]
- Lechos bacterianos: Es un proceso de tipo aerobio en el cual se utilizan soportes donde se colocan los microorganismos. El agua residual que se desea tratar se va agregando en pocas cantidades para así mantener las condiciones aeróbicas y dar el tiempo necesario para la acción de los microorganismos. [2]
- Digestión anaeróbica: Como su nombre lo dice, es un proceso anaeróbico que se lleva a cabo en tanques totalmente cerrados. Dentro de estos tanques se adicionan bacterias que actúan sobre el agua residual y producen metano, ácidos, entre otros, cuando degradan la materia orgánica presente. [2]

1.1.1.d Tratamiento terciario. En esta etapa final, se llevan a cabo una serie de procesos como la eliminación de agentes patógenos como bacterias y de los nutrientes como fósforo y nitrógeno. Este tipo de procesos ayudan a aumentar la calidad del agua con el

objetivo de poder cumplir con los estándares y requerimientos legales para su posterior descarga. Para esta etapa se pueden aplicar métodos como ósmosis inversa, intercambio iónico, adsorción, entre otros [37].

1.1.2 Tratamiento biológico de aguas residuales

Los tratamientos biológicos para aguas residuales involucran una serie de importantes procesos de tratamiento que tiene en común el uso de microorganismos (entre los cuales se destacan las bacterias) para la eliminación de los contaminantes presentes en el agua, aprovechando su actividad metabólica sobre estos componentes [3].

Estos sistemas de tratamientos biológicos tienen tres objetivos principales los cuales son la reducción de la materia orgánica presente en el agua (biodegradable, tanto soluble como coloidal), reducir su contenido en nutrientes (nitrógeno y fósforo) y eliminar los diferentes patógenos y parásitos que puedan estar presentes [3].

Según la empresa Condorchem Envitech, este tipo de sistemas buscan aprovechar las características digestivas de estos microorganismos, para así llevar a cabo una degradación de los contaminantes presentes en el agua cruda. Las ventajas que ofrecen los tratamientos biológicos van desde la facilidad de operación hasta su bajo costo de implementación [37].

Dentro de este tipo de tratamientos existen tres principales sistemas:

1.1.2.a Sistema aerobio. En este tipo de sistemas, la presencia de oxígeno genera que este elemento sea el aceptor de electrones, por lo cual se obtienen rendimientos energéticos elevados, generando una gran producción de lodos. Su aplicación en aguas residuales se puede ver condicionada por la baja solubilidad del oxígeno en el agua [37].

En este tipo de sistemas, se busca aprovechar la acción de microorganismos capaces de degradar materia orgánica y otros contaminantes que se encuentran en el agua, en presencia de oxígeno, para su propio crecimiento [37]

1.1.2.b Sistema anaerobio. En este sistema, al no haber presencia de oxígeno, la función de aceptor de electrones puede recaer sobre el dióxido de carbono o sobre parte de la materia orgánica presente, obteniendo como resultado una reducción del carbono hasta su estado más reducido que es el metano. La aplicación de este tipo de sistema tiene como principal beneficio la obtención de un gas combustible. [3]

1.1.2.c Sistema anóxico. En este tipo de sistema, la función de aceptor de electrones la tiene el nitrato presente en el agua, lo cual genera que durante el proceso este se transforme en nitrógeno. Debido a esto, bajo ciertas condiciones, es posible conseguir una eliminación biológica de nitratos; proceso al cual se le conoce como desnitrificación. [3]

1.1.3 Aguas residuales en la industria láctea

El agua residual en la industria láctea normalmente se genera en procesos como pasteurización, homogeneización de la leche y a elaboración de productos lácteos, la composición, la concentración y el volumen del efluente depende de los procesos que se lleven a cabo dentro de la planta. De acuerdo con la norma colombiana se indica que los límites máximos de DBO para una industria láctea deben ser de 400 mg/L [4]. Estas aguas residuales están compuestas por una gran cantidad de materia orgánica como lo son proteínas grasas y lípidos, altos niveles de nitrógeno y fósforo y alta conductividad, lo que ocasiona grandes daños a la hora de verter estas aguas a cuerpos de agua sin un tratamiento previo. Estas aguas residuales en su mayoría son neutras o alcalinas, pero tienen una gran facilidad para volverse ácidas a causa de la fermentación de los azúcares [38].

Las aguas residuales en la industria láctea frecuentemente son tratadas con el uso de métodos biológicos para eliminar en su mayoría compuestos como fósforo e hidrógeno además habitualmente se utilizan diversos reactores, filtros, lagunas aireadas y una amplia variedad de especies bacterianas [38].

Usualmente para tratar el agua se utilizan procesos fisicoquímicos como la coagulación y tratamiento electroquímico los cuales no son del todo efectivos ya que no

degradan completamente los compuestos orgánicos además estos procesos suelen ser costosos, por esta razón se utilizan tratamientos biológicos y el uso de microorganismos benéficos (MB), los cuales contienen mezclas de levaduras, bacterias y hongos, estos MB son ideales en el tratamiento de aguas en la industria láctea ya que pueden utilizar los compuestos orgánicos como fuente de energía para procesos de crecimiento y metabolismo. Algunas de las bacterias que pueden integrar la mezcla de MB son: *Lactobacillus Sp*; las cuales producen ácido láctico, *Saccharomycetes spp*; en la etapa de metabolismo producen sustratos útiles para las bacterias lácticas, cabe resaltar que el uso de microorganismos eficientes es una de las mejores alternativas para el tratamiento de aguas en la industria láctea ya que son capaces de eliminar materia orgánica de una manera muy efectiva, normalmente los microorganismos eficientes son comunidades de más de 80 especies de microorganismos las cuales pueden llegar a convivir con otras comunidades microbianas [5].

Entre los procesos usados para tratar el agua en la industria láctea destacan los reactores de membrana los cuales ofrecen mayor eficiencia en los procesos de degradación de contaminantes en la industria los cuales pueden variar desde proteínas, compuestos diluidos y productos químicos que se usan en los lavados de los equipos [5].

Normalmente en el tratamiento de residuos orgánicos dentro del reactor se dan procesos anaerobios ya que no requieren oxígeno y son mayormente estables teniendo en cuenta su eficiencia biodegradable, normalmente estos procesos son usados en la industria láctea y en el tratamiento de agua residuales, algunas de las ventajas al utilizar tratamiento anaerobio es la producción de metano, combustible que usualmente es usado en las productoras de lácteos con el fin de proveer energía a la planta. Es normal manejar grandes cantidades de materia orgánica ya que el desarrollo de bacterias es lento y casi no produce formación de lodos, el mayor inconveniente es cuando dentro de una planta se produce queso o derivados ya que estos productos tienden a acidificar muy fácilmente con la fermentación de la lactosa disminuyendo su pH y a su vez disminuyendo la estabilidad en el sistema [5].

Entre los reactores para el tratamiento de aguas residuales industriales se encuentra el reactor UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket) o por sus siglas en español RAFA (reactor anaerobio de flujo ascendente) los cuales operan de manera continua y con flujo ascendente, fueron creados para altas concentraciones de materia orgánica que se manejan en la industria además que posee grandes ventajas como lo son bajos consumos de energía y bajos costos de operación, además que se obtienen índices de remoción de DBO/DQO bajos [39].

1.2 Marco legal

Para verificar el cumplimiento de la normatividad legal vigente, se tiene en cuenta la resolución No. 0631 del 17 de marzo del 2015, establecida por el Ministerio De Ambiente Y Desarrollo Sostenible [4], en el cual se tiene en cuenta el capítulo VI que presenta los “Parámetros fisicoquímicos y sus valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales de aguas residuales no domésticas (arnd) a cuerpos de aguas superficiales” [4].

Dentro de esta norma, lo principal es tener en cuenta el artículo 12 llamado “Parámetros fisicoquímicos a monitorear y sus valores límites máximos permisibles en los vertimientos de aguas residuales no domésticas -ARnD a cuerpos de aguas superficiales de actividades asociadas con elaboración de productos alimenticios y bebidas” [4], dentro de la cual se especifican los parámetros necesarios de vertimientos de aguas residuales no domésticas, teniendo en cuenta la elaboración de productos lácteos; los valores aceptados por la norma se encuentran descritos en la Figura 1, especificados para cada parámetro que se debe analizar.

Figura 1.

Parámetros de vertimiento para la elaboración de productos lácteos.

PARÁMETRO	UNIDADES	ELABORACIÓN DE PRODUCTOS LÁCTEOS
Generales		
pH	Unidades de pH	6,00 a 9,00
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg/L O ₂	450,00
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅)	mg/L O ₂	250,00
Sólidos Suspendedos Totales (SST)	mg/L	150,00
Sólidos Sedimentables (SSED)	mL/L	2,00
Grasas y Aceites	mg/L	20,00
Compuestos Semivolátiles Fenólicos	mg/L	
Sustancias Activas al Azul de Metileno (SAAM)	mg/L	Análisis y Reporte
Hidrocarburos		
Hidrocarburos Totales (HTP)	mg/L	
Compuestos de Fósforo		
Ortofosfatos (P-PO ₄ ³⁻)	mg/L	Análisis y Reporte
Fósforo Total (P)	mg/L	Análisis y Reporte
Compuestos de Nitrógeno		
Nitratos (N-NO ₃ ⁻)	mg/L	Análisis y Reporte
Nitritos (N-NO ₂ ⁻)	mg/L	Análisis y Reporte
Nitrógeno Amoniacal (N-NH ₃)	mg/L	Análisis y Reporte
Nitrógeno Total (N)	mg/L	Análisis y Reporte
Iones		
Cloruros (Cl ⁻)	mg/L	500,00
Sulfatos (SO ₄ ²⁻)	mg/L	500,00
Sulfuros (S ²⁻)	mg/L	

Nota. La figura presenta los valores permitidos para los parámetros de vertimiento para la elaboración de productos lácteos. Tomado de: *Ministerio de Ambiente Y Desarrollo Sostenible*. https://www.minambiente.gov.co/images/normativa/app/resoluciones/d1-res_631_marz_2015.pdf

Adicional a esto, dentro de la norma también se dan a conocer las características que debe cumplir una empresa para ser considerada como parte del sector de elaboración de productos lácteos; esto con el fin de garantizar que el lector tenga claridad sobre la norma que le aplica. La definición que entrega la resolución para este tipo de industria es:

«Elaboración de leche fresca líquida pasteurizada, esterilizada, homogeneizada, y/o tratada a altas temperaturas, elaboración de bebidas a base de leche, elaboración de

crema a partir de leche fresca líquida, pasteurizada, esterilizada u homogeneizada, elaboración de leche en polvo o leche condensada, azucarada o sin azúcar, elaboración de leche evaporada, elaboración de leche o crema en forma sólida, elaboración de mantequilla, elaboración de yogur, queso y cuajada, elaboración de suero de leche, elaboración de caseína y lactosa, elaboración de helados, sorbetes y postres a base de leche y elaboración de dulce de leche o arequipe» [4].

Por tanto, dentro de las anteriormente nombradas se tiene en cuenta la elaboración de yogur en la empresa láctea que se tiene como referencia.

También se debe tener en cuenta el decreto 3930 de 2010 por medio del cual el gobierno da a conocer los criterios de calidad y los trámites legales necesarios para adquirir los permisos de uso y vertimiento de las aguas tratadas y los requerimientos para estos mismos. [6]

2. METODOLOGÍA

2.1. Primer objetivo

En la primera parte del proyecto se buscó conocer el proceso productivo para la cual se llevó a cabo una visita técnica guiada donde se suministró información de operación y obtención de productos.

En cuanto a la situación actual de la gestión de aguas residuales en la empresa, se determinó qué tipos de residuos líquidos se están generando durante el proceso. Con el objetivo de identificar variables que permitan plantear una alternativa de tratamiento biológico, para que el agua tratada cumpla con las condiciones requeridas, la empresa permitió utilizar la información correspondiente a la caracterización del agua cruda realizada en el laboratorio ANALQUIM acreditado por el IDEAM, que incluye los parámetros pH, conductividad, turbiedad, demanda química de oxígeno (DQO), demanda biológica de oxígeno (DBO), total de sólidos disueltos (TDS), aceites y grasas y la determinación del caudal.

Para la determinación del caudal la empresa contrató un muestreo compuesto por 21 horas con muestras de 30 minutos, para el parámetro de pH se utilizó el método potenciométrico, para la conductividad se utilizó el método electrométrico, para TDS método gravimétrico y en la turbiedad se utilizó la técnica de nefelometría. Los métodos usados para la demanda química de oxígeno (DQO) fueron reflujos cerrados y calorimétrico, mientras que para la demanda bioquímica de oxígeno (DBO) se usó el método de incubación a cinco días y electrodo de membrana; para determinar las grasas y aceites se utilizó el método extracción líquido-líquido – partición gravimétrica.

2.2. Segundo objetivo

Para el desarrollo del segundo objetivo, se consultaron diferentes alternativas de tratamiento biológico de aguas residuales mediante la revisión de fuentes de información secundaria como tesis, artículos, revistas científicas, entre otros recursos virtuales y físicos, acerca del proceso llevado a cabo en efluentes provenientes de la industria láctea, con el fin de seleccionar un sistema de tratamiento biológico viable para la reducción de contaminantes presentes en este tipo de aguas. En este proceso de

selección, para el cual se invirtieron aproximadamente dos meses de trabajo, se consultaron principalmente fuentes como ScienceDirect, SpringerLink y la revista Virtual Pro, haciendo uso de palabras clave como tratamiento biológico de aguas residuales, aguas residuales en la industria láctea, tratamientos aerobios de aguas residuales, tratamientos anaerobios de aguas residuales, entre otros que permitieron realizar un filtro de la información.

Para la selección teórica del tratamiento biológico de agua se empleó el software de decisión multicriterio SUPER DECISIONS®, el cual pertenece a la Creative Decisions Foundation, una fundación dedicada a promover la educación, investigación y desarrollo de software a través de métodos avanzados para la toma de decisiones. Este software, de libre acceso, permitió llevar a cabo una comparación entre las diferentes alternativas de sistemas biológicos. Para este proceso, el software cuenta principalmente con dos técnicas que tratan con decisiones complejas; el Proceso Analítico Jerárquico y el Proceso de Red Analítica (AHP y ANP, respectivamente, por sus siglas en inglés). Estas técnicas de análisis, al igual que la fundación, fueron creadas por Thomas L. Saaty, un distinguido profesor en la escuela de negocios de posgrado de la Universidad de Pittsburgh en Estados Unidos.

Para el proceso presentado en este documento, se hizo uso del proceso analítico jerárquico (AHP), el cual es una teoría desarrollada para medir factores intangibles realizando distintas comparaciones por pares donde se utiliza una escala ya definida del 1 al 9. Esta escala funciona de la siguiente manera:

Tabla 1.

Escala fundamental de comparación por pares (Saaty, 1980) para la técnica AHP en el software Super Decisions®

VALOR	DEFINICIÓN	SIGNIFICADO
1	Igual importancia	Criterio A igual de importante que B
3	Importancia moderada	Se favorece ligeramente al criterio A sobre el B
5	Importancia grande	Se favorece fuertemente al criterio A sobre el B
7	Importancia muy grande	El criterio A es mucho más importante que el B
9	Importancia extrema	No hay duda que la importancia de A es mucho mayor que la de B
2,4,6, y 8		Valores intermedios, cuando es necesario matizar

Nota. Esta tabla muestra los valores establecidos, y su respectivo significado, para la comparación por pares que se realiza al momento de diseñar un análisis AHP en Super Decisions®. Tomado de: Proceso Analítico Jerárquico (Analytic Hierarchy Process, AHP), [En línea]. Disponible: <https://victoryepes.blogs.upv.es/2018/11/27/proceso-analitico-jerarquico-ahp/>. [Acceso: agosto 31, 2021].

Esta técnica, según la definición del Dr. Víctor Yepes Piqueras, catedrático de la Universidad Politécnica de Valencia, es:

«Un método que selecciona alternativas en función de una serie de criterios o variables, normalmente jerarquizados, los cuales suelen entrar en conflicto. En esta estructura jerárquica, el objetivo final se encuentra en el nivel más elevado, y los criterios y subcriterios en los niveles inferiores. Para que el método sea eficaz, es fundamental elegir bien los criterios y subcriterios, los cuales deben estar muy bien definidos, ser relevantes y mutuamente excluyentes (independencia entre ellos). Es importante que el número de criterios y subcriterios en cada nivel no sea superior a 7, para evitar excesivas comparaciones a pares» [7].

Esta técnica de análisis puede ser aplicada tanto para intangibles como para tangibles y puede ser utilizada, como se mencionó, para la toma de decisiones por medio de la estructuración de una jerarquía que tiene un objetivo, criterios y alternativas, para posteriormente realizar juicios comparativos por pares. Una vez realizadas estas comparaciones y asignados los valores, se sintetizan las prioridades de cada uno de los

elementos para así poder clasificar las alternativas. Es por esto, que el AHP es ampliamente utilizado en diferentes campos como gobierno, salud, negocios, educaciones, entre otros. [7]

Para el proceso de selección, en el cual se tuvieron en cuenta los artículos que presentaran un tratamiento biológico enfocado hacia la industria láctea o aguas residuales de alto contenido orgánico y tuvieran información sobre rendimientos obtenidos, se le asignó a cada uno un número de opción con el objetivo de facilitar el ingreso de la información al software como se muestra en la tabla 2:

Tabla 2.

Descripción del artículo representado por cada opción.

OPCIÓN	NOMBRE DEL ARTÍCULO	TIPO DE TRATAMIENTO	REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA
1	Integrated ABR and UASB system for dairy wastewater treatment: Engineering design and practice	ANAEROBIO	S. Ji, W. Ma, Q. Wei, W. Zhang, F. Jiang, y J. Chen, "Integrated ABR and UASB system for dairy wastewater treatment: Engineering design and practice", <i>Sci. Total Environ.</i> , vol. 749, p. 142267, dic. 2020, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.142267 [Acceso: octubre 21, 2021]
2	An eco-friendly strategy for dairy wastewater remediation with high lipid microalgae-bacterial biomass production	ANAEROBIO	T. Biswas, S. Bhushan, S. K. Prajapati, y S. Ray Chaudhuri, "An eco-friendly strategy for dairy wastewater remediation with high lipid microalgae-bacterial biomass production", <i>J. Environ. Manage.</i> , vol. 286, p. 112196, may 2021, DOI: 10.1016/j.jenvman.2021.112196 [Acceso: octubre 21, 2021]
3	Comparing the use of a two-stage MBBR system with a	AEROBIO	E. Zkeri <i>et al.</i> , "Comparing the use of a two-stage MBBR system with a methanogenic MBBR coupled with a microalgae reactor for medium-

	methanogenic MBBR coupled with a microalgae reactor for medium-strength dairy wastewater treatment		strength dairy wastewater treatment”, <i>Bioresour. Technol.</i> , vol. 323, p. 124629, mar. 2021, DOI: 10.1016/j.biortech.2020.124629 [Acceso: octubre 21, 2021]
4	A review of upflow anaerobic sludge fixed film (UASFF) reactor for treatment of dairy wastewater	AEROBIO	S. Sivaprakasam y K. Balaji, “A review of upflow anaerobic sludge fixed film (UASFF) reactor for treatment of dairy wastewater”, <i>Mater. Today Proc.</i> , vol. 43, pp. 1879-1883, ene. 2021, DOI: 10.1016/j.matpr.2020.10.822 [Acceso: octubre 21, 2021]
5	Reclamation of water from dairy wastewater using membrane bioreactor (MBR) – Membrane filtration processes	ANAEROBIO	R. Kumari, H. Ankit, y S. Basu, “Reclamation of water from dairy wastewater using membrane bioreactor (MBR) – Membrane filtration processes”, <i>Mater. Today Proc.</i> , vol. 47, pp. 1452-1456, ene. 2021, DOI: 10.1016/j.matpr.2021.03.452 [Acceso: octubre 22, 2021]
6	A vermifilter system for reducing nutrients and organic-strength of dairy wastewater	AEROBIO	G. J. Miito, P. Ndegwa, et al, “A vermifilter system for reducing nutrients and organic-strength of dairy wastewater” <i>et&l</i> , vol. 23, ago, 2021, DOI: https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.10.1648 [Acceso: oct. 31, 2021].
7	Moving bed biofilm reactor (MBBR) for dairy wastewater treatment	AEROBIO	A.D. Santos, R. C. Martins, R. M. Quinta-Ferreira, L. M. Castro, “Moving bed biofilm reactor (MBBR) for dairy wastewater treatment”, <i>Energy Reports</i> , vol. 6, no. 8, pp. 340-344, dec, 2020, DOI: https://doi.org/10.1016/j.egyr.2020.11.158 [Acceso: octubre 22, 2021]

8	Treatment of dairy industry wastewater using bacterial biomass isolated from eutrophic lake sediments for the production of agricultural water	AEROBIO/ANAEROBIO	M. Custodio, R. Peñaloza, C. Espinoza, W. Espinoza, J. Mezarina, "Treatment of dairy industry wastewater using bacterial biomass isolated from eutrophic lake sediments for the production of agricultural water", <i>BTR</i> , vol. 17, feb, 2022, DOI: https://doi.org/10.1016/j.biteb.2021.100891 [Acceso: octubre 23, 2021]
9	Biodegradation by bioaugmentation of dairy wastewater by fungal consortium on a bioreactor lab-scale and on a pilot-scale	AEROBIO	H. Djelal, A. Amrane, "Biodegradation by bioaugmentation of dairy wastewater by fungal consortium on a bioreactor lab-scale and on a pilot-scale", <i>JES</i> , vol. 25, no. 29, pp. 1906-1912, DOI: https://doi.org/10.1016/S1001-0742(12)60239-3 [Acceso octubre 22, 2021]
10	The investigation of dairy industry wastewater treatment in a biological high performance membrane system	AEROBIO	B. Farizoglu, S. Uzuner, "The investigation of dairy industry wastewater treatment in a biological high performance membrane system", <i>Biochemical Engineering Journal</i> , vol. 57, pp. 46-54, DOI: https://doi.org/10.1016/j.bej.2011.08.007 [Acceso: octubre 22, 2021]
11	Treatment of dairy industry wastewater by combined aerated electrocoagulation and phytoremediation process	AEROBIO	J. Akansha, P. V. Nidheesh, A. Gopinath, K. V. Anupama, y M. Suresh Kumar, "Treatment of dairy industry wastewater by combined aerated electrocoagulation and phytoremediation process", <i>Chemosphere</i> , vol. 253, p. 126652, ago. 2020, DOI: 10.1016/j.chemosphere.2020.126652 [Acceso: octubre 22, 2021]
12	Treatment performance and recovery of organic	ANAEROBIO	G. G. Kurup, B. Adhikari, y B. Zisu, "Treatment performance and recovery of organic components from high pH dairy wastewater using

	components from high pH dairy wastewater using low-cost inorganic ferric chloride precipitant		low-cost inorganic ferric chloride precipitant”, <i>J. Water Process Eng.</i> , vol. 32, p. 100908, dic. 2019, DOI: 10.1016/j.jwpe.2019.100908. [Acceso: octubre 22, 2021]
13	Optimization removal of color and organic solid pollutants from textile industry wastewater by electrocoagulation	ANAEROBIO	J. Esther Baby, I. Jaambavi, G. Rajeswari, y T. Akshaya, “Optimization removal of colour and organic solid pollutants from textile industry wastewater by electrocoagulation”, <i>Mater. Today Proc.</i> , abr. 2021, DOI: 10.1016/j.matpr.2021.03.339 [Acceso: octubre 22, 2021]
14	Biological treatment of saline domestic wastewater by using a down-flow hanging sponge reactor	AEROBIO	N. T. Dinh et al., “Biological treatment of saline domestic wastewater by using a down-flow hanging sponge reactor”, <i>Chemosphere</i> , vol. 283, p. 131101, nov. 2021, DOI: 10.1016/j.chemosphere.2021.131101 [Acceso: octubre 23, 2021]
15	Treatment of industrial wastewater with gamma irradiation for removal of organic load in terms of biological and chemical oxygen demand	ANAEROBIO	H. Hina, M. Nafees, y T. Ahmad, “Treatment of industrial wastewater with gamma irradiation for removal of organic load in terms of biological and chemical oxygen demand”, <i>Heliyon</i> , vol. 7, n.o 2, p. e05972, feb. 2021, DOI: 10.1016/j.heliyon.2021.e05972 [Acceso: octubre 23, 2021]
16	Recovery of dairy industry wastewaters by reverse osmosis. Production of boiler water	AEROBIO	A. Suárez, T. Fidalgo, y F. A. Riera, “Recovery of dairy industry wastewaters by reverse osmosis. Production of boiler water”, <i>Sep. Purif. Technol.</i> , vol. 133, pp. 204-211, sep. 2014, DOI: 10.1016/j.seppur.2014.06.041 [Acceso: octubre 23, 2021]

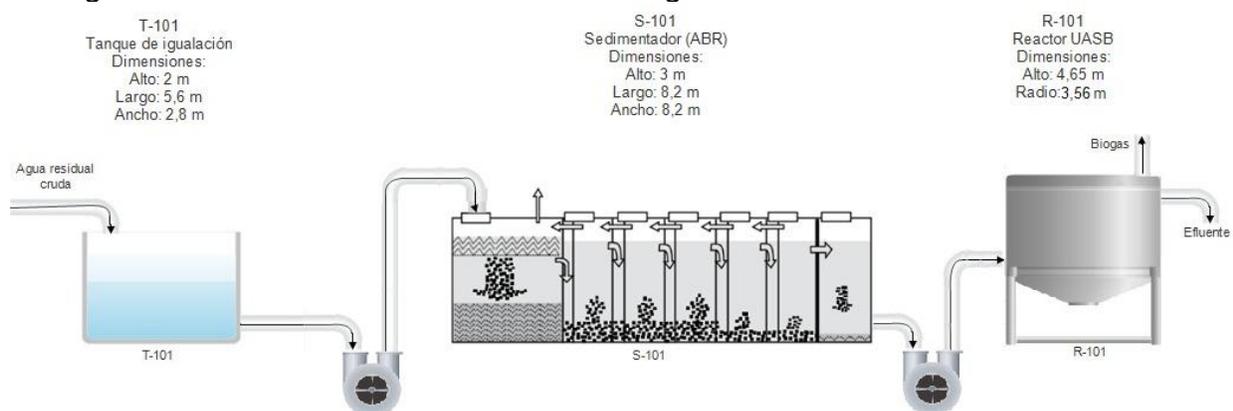
17	Horizontal subsurface flow constructed wetland for tertiary treatment of dairy wastewater: Removal efficiencies and plant uptake	AEROBIO	M. C. Schierano, M. C. Panigatti, M. A. Maine, C. A. Griffa, y R. Bogleione, "Horizontal subsurface flow constructed wetland for tertiary treatment of dairy wastewater: Removal efficiencies and plant uptake", <i>J. Environ. Manage.</i> , vol. 272, p. 111094, oct. 2020, DOI: 10.1016/j.jenvman.2020.111094 [Acceso: octubre 23, 2021]
----	--	---------	---

Nota. Descripción del artículo que representa cada opción tenida en cuenta incluyendo título, tipo de tratamiento y referencia bibliográfica.

2.3 Tercer objetivo

Para la descripción de las especificaciones técnicas del tratamiento seleccionado, se llevó a cabo un diseño básico del reactor biológico UASB y el sedimentador ABR necesarios para la depuración del agua residual de una empresa de la industria láctea. Para mantener el flujo constante y adecuado en el sistema se diseñó un tanque de igualación. La configuración correspondiente a este diseño se presenta en la Figura.

Figura 2.
Configuración del sistema de tratamiento biológico seleccionado.



Nota. Descripción gráfica de la configuración del sistema de tratamiento biológico seleccionado.

Esta configuración, en su etapa inicial, emplea un tanque de igualación el cual busca ayudar a regular el pH del agua y mantener un flujo constante en el sistema. En cuanto al sedimentador ABR, se emplea como un pretratamiento donde se usan filtros con el objetivo de reducir la carga orgánica, desnaturalizar proteínas, descomponer grasas y también se busca convertir la lactosa en ácido láctico lo cual ayuda a mejorar la eficiencia en la etapa final del proceso. Esta etapa final, que se dan en el reactor UASB, se cuenta con un manto de lodos en la zona inferior donde actúan microorganismos para degradar materia orgánica y demás contaminantes; una vez realizado este proceso, se obtiene biogás que puede ser utilizado como fuente de energía en el proceso productivo y un efluente con el agua tratada. Estos equipos, se complementan con bombas peristálticas que permiten mantener la velocidad de flujo adecuada y con sistemas de instrumentación y control como indicadores de nivel, temperatura o pH, que permiten llevar un control adecuado, detectar y prevenir fallas, y tener un registro del proceso que se lleva a cabo.

Para el diseño de estos tres equipos principales, fue necesario la aplicación de diferentes ecuaciones y datos empíricos, los cuales se obtuvieron de literatura de la IWA [25].

2.3.1 Diseño del tanque de igualación

Para el diseño del tanque de igualación, necesario para regular el flujo de entrada hacia el proceso de tratamiento biológico, se hizo uso del método gráfico que consiste en realizar una curva de caudales a partir de los datos que se obtuvieron en el proceso de determinación de este parámetro para así poder hallar, por medio de la gráfica, el máximo superior y máximo inferior los cuales al ser sumados nos arrojaron el volumen total requerido para nuestro proceso. Para hallar estos valores superior e inferior se aplicaron las ecuaciones 1, 2 y 3.

$$\text{Máximo superior} = \text{volumen superior máximo} - (mx + b) \quad (\text{Ec.1})$$

Donde:

$$(mx + b) = \text{ecuación de la recta}$$

Volumen superior máximo = valor más lejano por encima de la recta

$$\text{Máximo inferior} = (mx + b) - \text{volumen inferior máximo} \quad (\text{Ec.2})$$

Donde:

$$(mx + b) = \text{ecuación de la recta}$$

Volumen inferior máximo = valor más lejano por debajo de la recta

$$\text{Volumen total requerido} = \text{Máximo superior} + \text{Máximo inferior} \quad (\text{Ec.3})$$

2.3.2 Diseño del sedimentador ABR

Para la determinación de las dimensiones necesarias para el reactor ABR, se hizo uso de la ecuación 4 la cual tiene en cuenta el caudal de entrada del agua a tratar y el tiempo de retención hidráulica (HRT por sus siglas en inglés).

$$V_{abr} = Q \times HRT \quad (\text{Ec.4})$$

Donde:

Q = Caudal volumétrico del agua a tratar

HRT= Tiempo de retención hidráulica

2.3.3 Diseño del tanque UASB

2.3.3.a Zona de expansión de lodos.

$$\text{Volumen Total} = \frac{Q \times C}{COV} \quad (\text{Ec. 5})$$

Donde:

Q = Caudal volumétrico del agua a tratar

C = DQO del afluente

COV = Carga orgánica volumétrica

$$\text{Volumen de cada Unidad} = \frac{\text{Volumen total}}{\text{Número de unidades}} \quad (\text{Ec. 6})$$

$$\text{Caudal medio por unidad} = \frac{Q}{\text{Número de unidades}} \quad (\text{Ec. 7})$$

Donde:

Q = Caudal volumétrico del agua a tratar

$$\text{Caudal pico por unidad} = \text{Caudal por unidad} \times \text{Factor K2} \quad (\text{Ec. 8})$$

Donde:

Factor K2 = Valor empírico entre 1.5 y 2

$$\text{Área del reactor} = \frac{\text{Volumen de cada unidad}}{\text{Altura manto de lodos}} \quad (\text{Ec. 9})$$

Donde:

Altura de manto de lodos = Valor empírico de diseño comprendido entre 3m – 6m

$$\text{Radio del reactor} = \sqrt{\frac{\text{Área del reactor}}{\pi}} \quad (\text{Ec. 10})$$

$$\text{HRT para } Q_{\text{medio}} = \frac{\text{Volumen de cada unidad}}{\text{Caudal medio por unidad}} \quad (\text{Ec. 11})$$

Donde:

HRT = Tiempo de retención hidráulica

$$\text{Velocidad ascendente zona de lodos para } Q_{\text{medio}} = \frac{\text{Caudal medio por unidad}}{\text{Área del reactor}} \quad (\text{Ec. 12})$$

$$\text{HRT para } Q_{\text{pico}} = \frac{\text{Volumen de cada unidad}}{\text{Caudal pico por unidad}} \quad (\text{Ec. 13})$$

Donde:

HRT = Tiempo de retención hidráulica

$$\text{Velocidad ascendente zona de lodos para } Q_{\text{pico}} = \frac{\text{Caudal pico por unidad}}{\text{Área del reactor}} \quad (\text{Ec. 14})$$

2.3.3.b Zona de separación de sólidos.

$$\text{Área de abertura ingreso al sedimentador} = \frac{\text{Caudal medio por unidad}}{\text{Velocidad aberturas para } Q_{\text{medio}}} \quad (\text{Ec. 15})$$

$$\text{Velocidad de abertura para } Q_{\text{pico}} = \frac{\text{Caudal pico por unidad}}{\text{Área de abertura}} \quad (\text{Ec. 16})$$

$$\text{Área del separador} = \text{Diámetro reactor} \times \text{Ancho de separadores} \quad (\text{Ec. 17})$$

$$\text{Número de separadores} = \frac{\text{Área de abertura}}{\text{Área de separador}} \quad (\text{Ec. 18})$$

2.3.3.c Zona de sedimentación.

$$\begin{aligned} \text{Vol. de sedimentación} \\ &= \text{caudal medio por unidad} \\ &\times \text{HRT en sedimentación con } Q_{\text{medio}} \quad (\text{Ec. 19}) \end{aligned}$$

$$\text{Área disponible sedimentación} = \text{Área del reactor} - \text{Área abertura} \quad (\text{Ec. 20})$$

$$\text{Altura mínima de sedimentación} = \frac{\text{Volumen de sedimentación}}{\text{Área disponible sedimentación}} \quad (\text{Ec. 21})$$

$$\text{Velocidad con } Q_{\text{medio}} = \frac{\text{Caudal medio por unidad}}{\text{Área disponible sedimentación}} \quad (\text{Ec. 22})$$

$$\text{HRT en sedimentación con } Q_{\text{pico}} = \frac{\text{Caudal pico por unidad}}{\text{Volumen de sedimentación}} \quad (\text{Ec. 23})$$

$$\text{Velocidad con } Q_{\text{pico}} = \frac{\text{Caudal pico por unidad}}{\text{Área disponible sedimentación}} \quad (\text{Ec. 24})$$

2.3.3.d Distribución del afluente.

$$\text{Número de boquillas} = \frac{\text{Área del reactor}}{\text{Área de cada punto de alimentación}} \quad (\text{Ec. 25})$$

$$\text{Caudal por boquilla} = \frac{\text{Caudal medio por unidad}}{\text{Número de boquillas}} \quad (\text{Ec. 26})$$

2.3.3.e Características de conducción en el reactor.

$$\text{Velocidad en la tubería} = \frac{\text{Caudal por boquilla}}{\pi \times \text{diámetro de la tubería}^2} \quad (\text{Ec. 27})$$

2.4. Cuarto objetivo

De acuerdo con el último objetivo planteado se determinaron los costos del tratamiento biológico seleccionado previstos a un año, a partir de una matriz que permitió calcular los costos básicos de inversión y los costos de producción (consumo de energía y operario) requeridos.

2.4.1 Costos de inversión

Para determinar estos costos, se incluyó el valor de los equipos principales durante el tratamiento biológico seleccionado (reactor UASB, reactor ABR y tanque de igualación), estos valores fueron consultados en artículos, revistas, cotizaciones y bibliografía física y virtual. Dentro de esta consulta, se tuvieron en cuenta las dimensiones requeridas por cada uno de estos equipos.

De acuerdo a Zugarramurdi se establecen heurísticas con base a la instalación de los equipos e ingeniería y supervisión además se incluye gastos de instrumentación y control donde se tuvieron en cuenta los equipos e instrumentos necesarios para el correcto funcionamiento del proceso. De las heurísticas que este autor propone, se aplicaron las referentes a costos de instalación donde menciona que se considera como el 20% del costo de los equipos [30]

2.4.2 Costos de producción

Son aquellos relacionados con el proceso productivo, en este ítem se incluyen gastos como mano de obra directa y gastos indirectos de fabricación (energía eléctrica y mantenimiento), en el caso de mantenimiento se hizo uso de los porcentajes administrados por el autor Garrido en su libro Ingeniería de mantenimiento. [31]

Para los gastos de energía se tuvo en cuenta el tarifario publicado por la empresa encargada de suministrar este servicio en la ubicación donde se encuentra la empresa de referencias. Con base en esta información, se tuvo en cuenta el costo del kWh para así determinar un valor aproximado para un año de actividad.

También, se tuvo en cuenta la mano de obra directa necesaria. Este tratamiento requiere de un técnico que se encargue de supervisar el proceso y reporte al área encargada en caso de alguna falla o inconsistencia en el funcionamiento para evitar daños en los equipos. Para determinar este costo, se tuvo en cuenta la ley 278 de 1996 donde se estipulan las concertaciones salariales y laborales [42].

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

3.1 Resultados primer objetivo

3.1.1 Descripción del proceso productivo

Como se muestra en la figura 3, la empresa láctea de referencia cuenta con un proceso productivo del cual se obtienen dos productos diferentes, yogurt griego y yogurt líquido. El proceso en la empresa comienza desde la zona de crianza, donde cuentan con ganado lechero propio el cual se encuentran bajo estrictas condiciones de cuidado, para garantizar una buena calidad. Cuando estos animales alcanzan las condiciones de maduración, crecimiento y salud, se realiza el proceso de ordeño bajo altos estándares de calidad que buscan garantizar la obtención de un buen producto y un correcto trato del animal. Ya obtenida la leche, esta materia prima es analizada en el laboratorio de calidad para determinar si cuenta con las características indicadas para iniciar el proceso productivo.

Si el resultado de los análisis es positivo, la leche se transporta hasta la planta de producción para iniciar el proceso de los dos productos mencionados. Para la producción del yogurt griego, en la primera etapa a la leche se le retira la mayor cantidad de grasa por medio de un proceso de centrifugado; este proceso permite generar una capa superior con la nata presente y así facilitar su separación. Después de haber realizado esta separación, la leche pasa por un proceso de pasteurización a una temperatura aproximada de 138°C con el que se busca inactivar la mayor cantidad de bacterias indeseables que puedan estar presentes y afectar la calidad y duración del producto. Una vez realizado este proceso, a la leche se le agregan cultivos lácticos los cuales son bacterias fermentadoras y productoras de ácido láctico que ayudan a prevenir la acción de microorganismo patógenos, estas bacterias tienen como objetivo principal llevar a cabo el proceso de fermentación hasta alcanzar la consistencia deseada del yogurt.

Cuando se obtiene el yogurt griego, el producto pasa por un proceso de ultrafiltración en tres ocasiones, la ultrafiltración se realiza a través de una membrana con la cual se separa el flujo de entrada en dos flujos, esto permite que componentes como el agua,

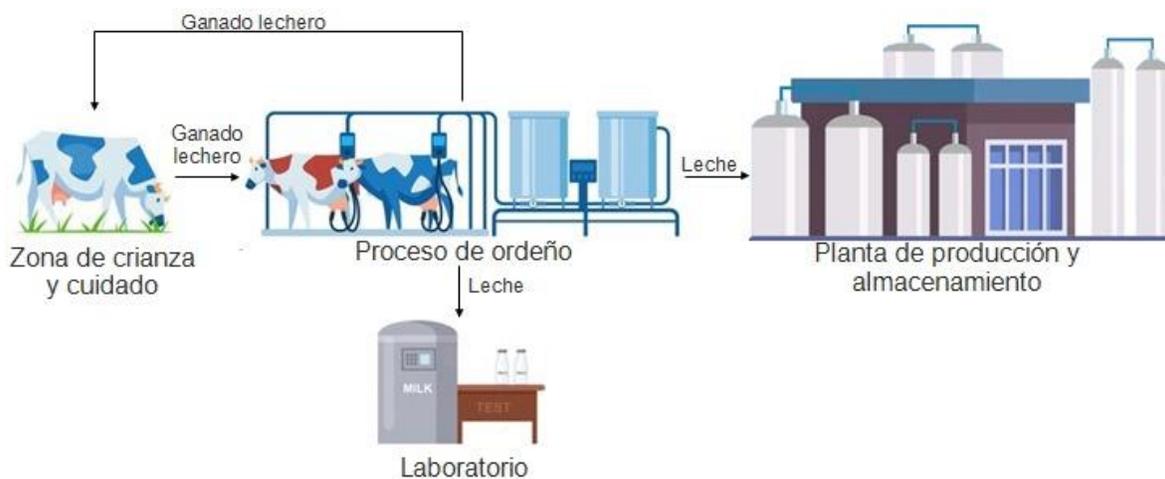
sales, lactosa y los ácidos atraviesan la membrana mientras que las grasas y proteínas son retenidas y por lo tanto se concentran. [9]

Como última etapa, al yogurt griego se le agrega la base de frutas correspondiente a cada referencia y se procede a realizar el proceso de empaqueo y sellado para llevarlo a refrigeración y posterior distribución. Este proceso se presenta en la figura 4.

Para el proceso de producción del yogurt líquido, la empresa referencia lleva a cabo el mismo proceso productivo descrito para el yogurt griego; sin embargo, en este proceso el tiempo de fermentación disminuye para evitar que se genere una textura cremosa y así obtener un producto líquido, así mismo este proceso cuenta con la adición de saborizantes y colorantes correspondientes a cada referencia como se describe en la figura 4.

Figura 3.

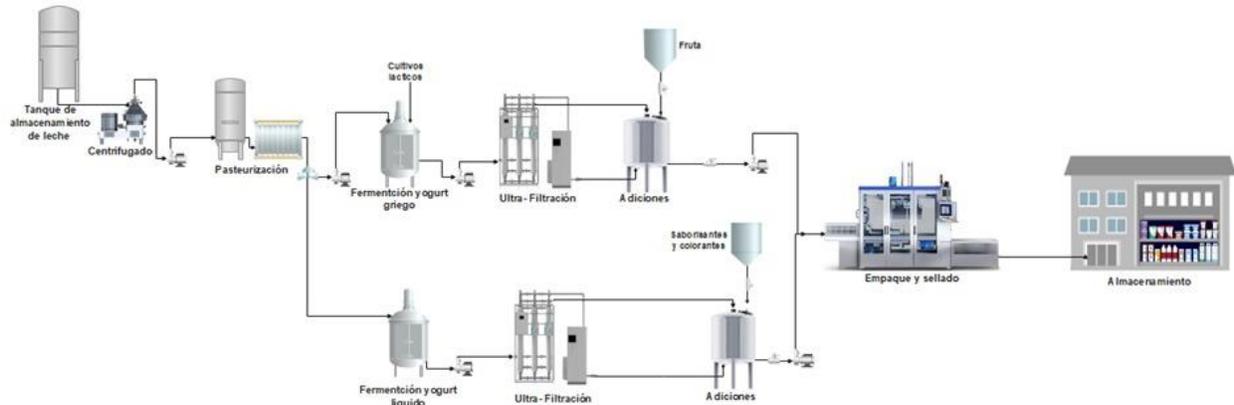
Representación del proceso productivo general que realiza la empresa de referencia.



Nota. La figura representa el proceso productivo general de la empresa láctea de referencia.

Figura 4.

Diagrama del proceso productivo llevado a cabo por la empresa referencia para la producción de yogurt griego y yogurt líquido.



Nota. La figura representa el proceso productivo de la empresa láctea de referencia para la elaboración de yogurt griego y yogurt líquido.

3.1.2 Diagnóstico de efluentes generados por el proceso productivo

Para el diagnóstico de efluentes se tuvo en cuenta los parámetros tomados In situ como caudal, pH, conductividad eléctrica y TDS, los cuales se definieron por medio de un aforo realizado en el mes de octubre del año 2021; en esta fecha se realizó una producción completa de las dos líneas de producto (Yogurt griego y Yogurt líquido), posterior a la producción se realizaron lavados de las unidades. Por otro lado, parámetros como aceites y grasas, demanda bioquímica de oxígeno, demanda química de oxígeno y turbiedad fueron analizados en el laboratorio Analquim ubicado en Bogotá Colombia.

Tabla 3.

Parámetros In Situ.

PARAMETRO	Unidades	Valor	Normatividad
pH	Unidades	4,6 - 10,8	6-9
Conductividad Eléctrica	(μ S/cm)	0 - 2156	--
TDS	(mg/L)	0 - 1086	--

Nota. Esta tabla muestra los parámetros evaluados en planta y si cumple con la normatividad establecida. Tomado de: datos enviados por la empresa Ambiente y Soluciones Integrales SAS.

El rango de pH de 4,6 a 10,8 unidades, se encuentra fuera de la norma establecida donde dice que para la elaboración de productos lácteos tiene que estar en un rango de 6 a 9 unidades mientras que para los parámetros conductividad eléctrica, TDS y turbiedad no aplica la Resolución No. 0631 del 17 de marzo del 2015.

A continuación, se muestra el comportamiento de los parámetros fisicoquímicos In situ para el mes de octubre de 2021, extraídos de la **Tabla 3** y del aforo volumétrico que se encuentra en el anexo 1, tabla 21.

Figura 5.

Caudal Vs Tiempo, 3 de octubre de 2021

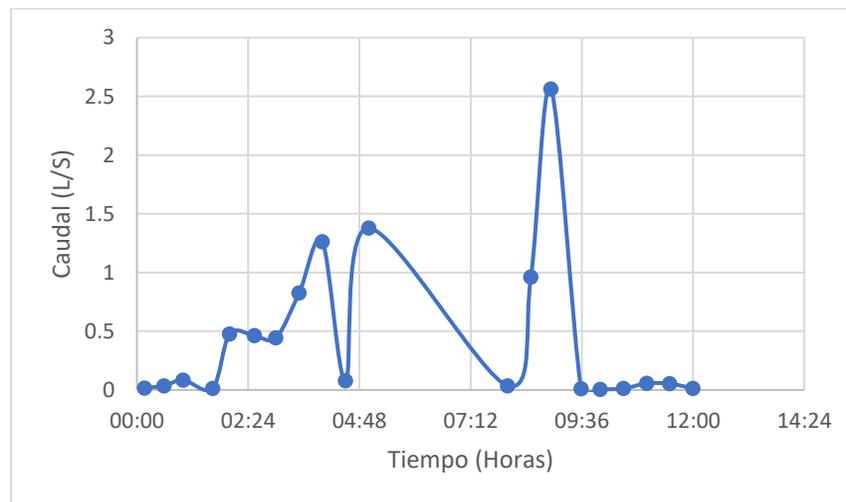


Nota. La figura representa el comportamiento del caudal el día 3 de octubre de 2021.

En el aforo de los caudales de los dos días **Figuras 5 y 6**, se registró el caudal máximo con un valor de 2,564 L/s, caudal medio de 0,432 L/s y un caudal mínimo de 0,006 L/s, esto con el fin de tener exactitud en los parámetros de diseño.

Figura 6.

Caudal Vs Tiempo, 4 de octubre de 2021



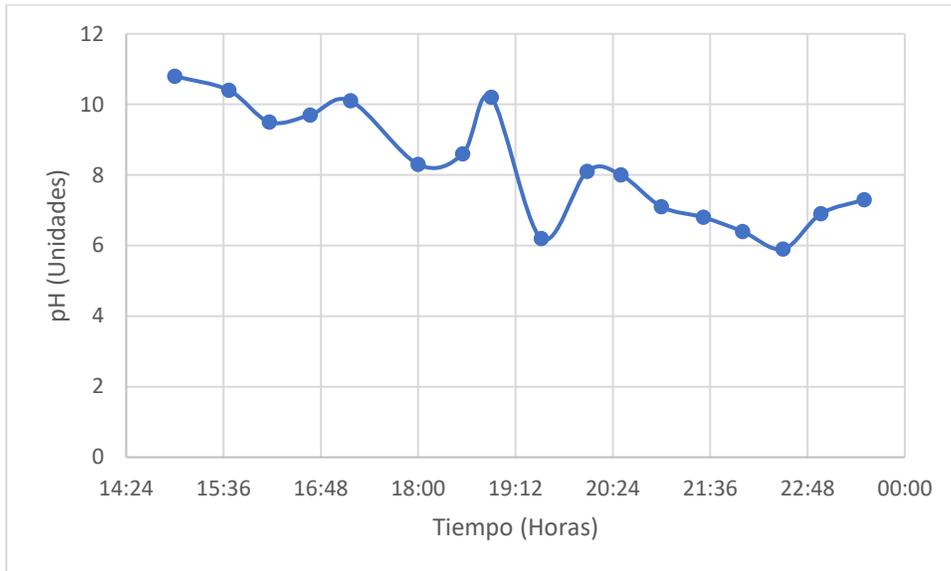
Nota. La figura representa el comportamiento del caudal el día 4 de octubre de 2021.

Como podemos observar en la **Figuras 5 y 6**, los momentos de inactividad o bajo caudal del orden menor a 0,5 L/s, el día 3 de octubre se encuentra en las horas 16:40 a 18:43 mientras que para el día 4 de octubre se presenta en las 00:10 a 1:38 horas y de 9:35 a 12:00 de la tarde, esto se debe a que el tiempo para llenar un tanque de 10 litros fue mayor. Mientras que a la 8:56 am del día 4 de octubre de 2021 se registró un pico de 2,564 L/s indicando que el tiempo de llenado del tanque fue muy bajo.

En las siguientes graficas se analiza el efecto del pH en el tiempo de aforo de los días 3 y 4 de octubre de 2021.

Figura 7.

pH Vs Tiempo, 3 de octubre de 2021

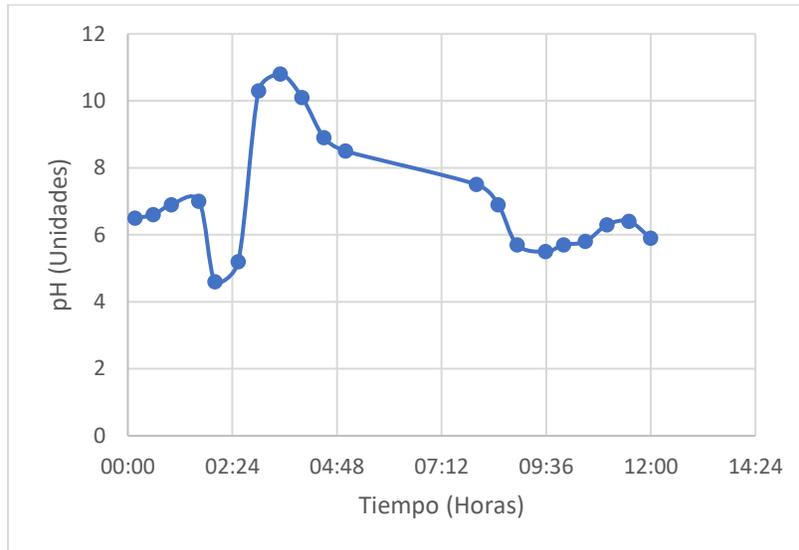


Nota. La figura representa el comportamiento del pH el día 3 de octubre de 2021.

De acuerdo a las **Figuras 7 y 8** obtenidas de la **Tabla 3** se evidencia el valor mínimo de pH 4,6 y su valor máximo 10,8 para los días 3 y 4 de octubre de 2021, estos valores no cumplen la regulación 0615 debido a que se encuentran fuera del rango 6 a 9 unidades para la elaboración de productos lácteos.

Figura 8.

pH Vs Tiempo, 4 de octubre de 2021

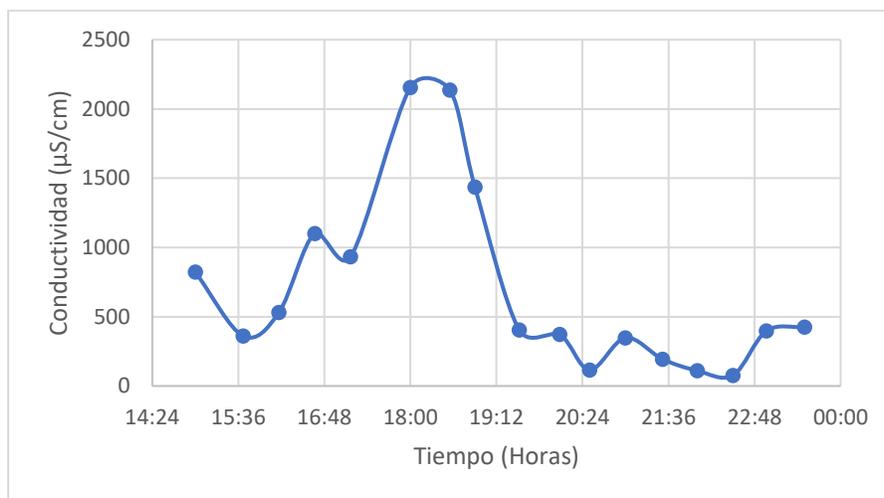


Nota. La figura representa el comportamiento del pH el día 4 de octubre de 2021.

A continuación, se presenta la gráfica obtenida para conductividad eléctrica en el aforo realizado los días 3 y 4 de octubre de 2021:

Figura 9.

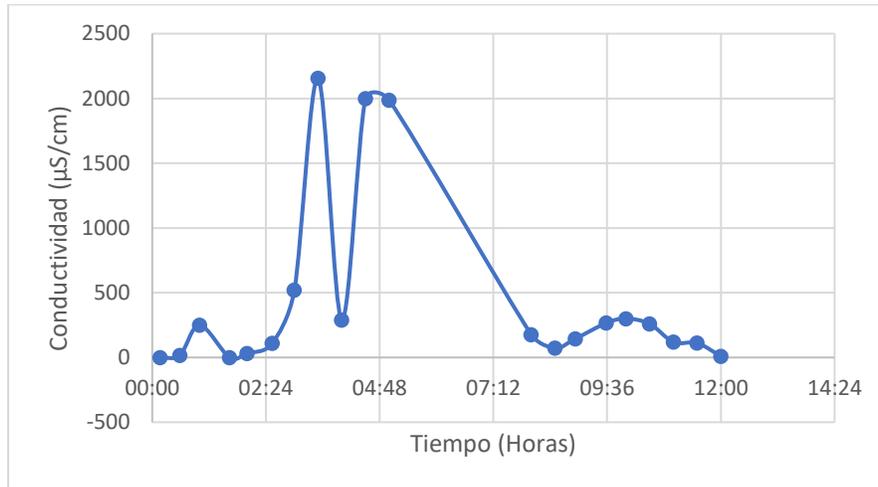
Conductividad Eléctrica Vs Tiempo, 3 de octubre de 2021



Nota. La figura representa el comportamiento de la conductividad el día 3 de octubre de 2021.

Figura 10.

Conductividad Eléctrica Vs Tiempo, 4 de octubre de 2021



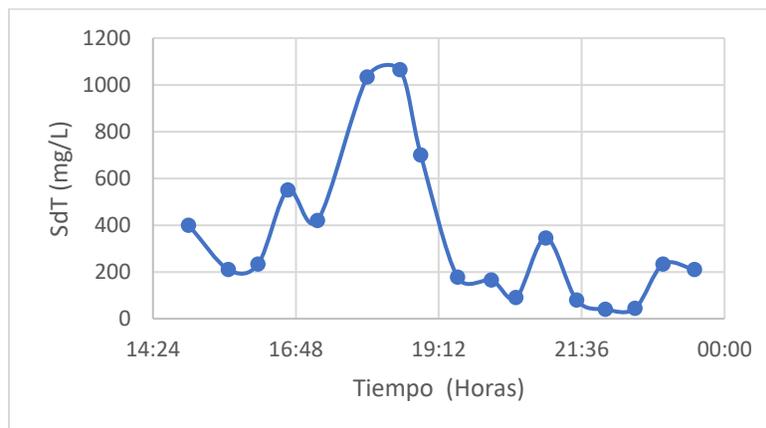
Nota. La figura representa el comportamiento de la conductividad eléctrica el día 4 de octubre de 2021.

Acorde a las **Figuras 9 y 10**, el valor máximo alcanzado de conductividad eléctrica durante el aforo volumétrico de dos días fue 2156 $\mu\text{S}/\text{cm}$ el día 4 de octubre de 2021 a las 3:30 PM.

Por último, se analizaron dos gráficas que muestran el comportamiento de los sólidos totales disueltos en los días 3 y 4 de octubre de 2021.

Figura 11.

TDS Vs Tiempo, 3 de octubre de 2021

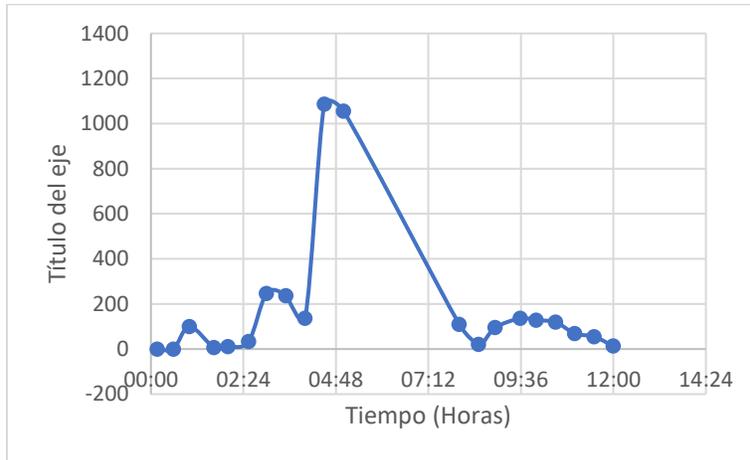


Nota. La figura representa el comportamiento de los sólidos totales disueltos el día 3 de octubre de 2021.

El valor máximo alcanzado en los dos días de aforo para los sólidos disueltos totales es de 1086 mg/L. Como podemos observar en las **Figuras 11 y 12**. La conductividad eléctrica es directamente proporcional a la cantidad de solidos disueltos por lo tanto si aumenta la concentración de solidos disueltos mayor será la conductividad.

Figura 12.

TDS Vs Tiempo, 4 de octubre de 2021



Nota. La figura representa el comportamiento de los sólidos totales disueltos el día 4 de octubre de 2021. Tomado de: Elaboración propia.

Posterior a analizar los datos in situ, se presenta los parámetros analizados en el laboratorio Analquim ubicado en Bogotá Colombia.

Tabla 4.

Parámetros en Laboratorio.

PARAMETRO	Unidades	Valor	Normatividad
	Unidad		
Turbiedad	Nefelométrica de Turbidez	630	--
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	(mg/L) O ₂	7230	450
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)	(mg/L) O ₂	3614	250
Aceites y grasas	(mg/L)	700	20

Nota. Esta tabla muestra los parámetros evaluados en el laboratorio Analquim, y si cumple con la normatividad establecida. Tomado de: datos enviados por la empresa Ambiente y Soluciones Integrales SAS.

De acuerdo con la **Tabla 4** obtenida en la caracterización del efluente analizada en laboratorio, se observa que los parámetros como aceites y grasas, demanda bioquímica de oxígeno y demanda química de oxígeno, no cumplen con la Resolución No. 0631 del 17 de marzo del 2015, establecida por el Ministerio de Ambiente Y Desarrollo Sostenible. En el cual se tiene en cuenta el capítulo VI. PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS Y SUS VALORES LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES EN LOS VERTIMIENTOS PUNTUALES DE AGUAS RESIDUALES NO DOMÉSTICAS (ARND) A CUERPOS DE AGUAS SUPERFICIALES. [10]

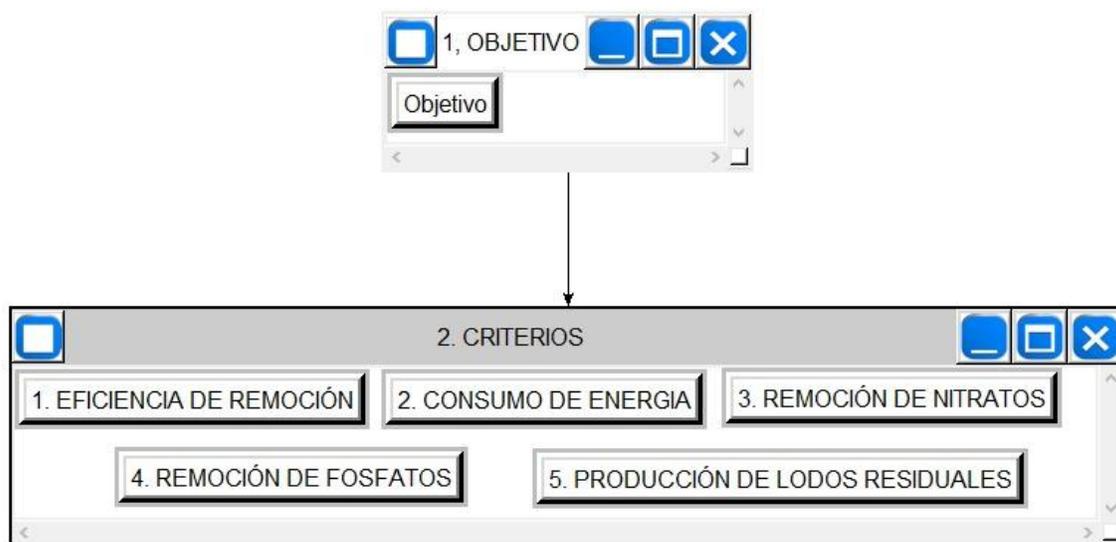
Respecto de los valores de DQO y DBO en agua residual son de 7230 y 3614 mgO₂/L, mientras que en la resolución 0631 se estipula que no deben pasar de 450 y 250 mgO₂/L. Por último, los aceites y grasas con un valor de 700 mg/L se encuentran por encima de lo establecido en la resolución, la cual indica que no pueden exceder los 20 mg/L.[10]

3.2 Resultados segundo objetivo

La selección del tratamiento biológico se realizó por medio del programa *Super Decisions*® que es “un software que toma decisiones basado en el método jerárquico (AHP) *Analytic Hierarchy Process* desarrollado en 1980 por Thomas L. Saaty, mediante la aplicación de técnicas matemáticas y psicológicas permite la resolución de problemas multicriterio para la toma de decisiones”[11], en la interface se ingresaron los dos ítems principales a tener en cuenta que son el objetivo y los criterios incluidos en la **Figura 13**, en el caso particular esta herramienta se ejecutó para la selección de un tratamiento biológico que cumpla con cuatro criterios evaluativos como lo son eficiencia de remoción, consumo de energía, remoción de otros contaminantes (nitratos y fosfatos) y producción de lodos.

Figura 13.

Diagrama conceptual del diseño jerárquico para la selección.



Nota. La figura representa el objetivo y los criterios de selección (eficiencia de remoción, consumo de energía, remoción de nitratos, remoción de fosfatos y producción de lodos residuales). Tomado de software *Super Decisions*®, [En Línea]. Disponible: en Software [Acceso: oct.16,2021].

Para seleccionar el tratamiento fue necesario comparar cada una de las alternativas por medio de pares ordenados, asignando una valoración de 1 a 9 al nivel de importancia que tiene un criterio respecto de otro, a continuación, se presenta la **Tabla 5** en la que se explican los valores de calificación utilizados para cada criterio:

Tabla 5.

Escala para representar juicios.

Escala numérica	Escala Verbal	Explicación Verbal
1	Igual importancia	Los dos elementos contribuyen igualmente a la propiedad o criterio
3	Moderadamente más importante un elemento que otro	El juicio y la experiencia previa favorecen a un elemento frente al otro
5	Fuertemente más importante un elemento que otro	El juicio y la experiencia previa favorecen fuertemente a un elemento frente al otro.
7	Mucho más fuerte la importancia de un elemento que la del otro.	Un elemento domina fuertemente
9	Importancia extrema de un elemento frente al otro	Un elemento domina al otro con el mayor orden de magnitud posible

Nota. Esta tabla muestra la escala para representar juicios y su explicación verbal. Tomado de: Expansión “*el proceso analítico jerárquico (ahp). fundamentos, metodología y aplicaciones*”, [En Línea]. Disponible: <https://bit.ly/3qblDkD> [Acceso: oct.16,2021].

Los valores 2, 4, 6 y 8 suelen utilizarse en situaciones intermedias, y las cifras decimales en estudios de gran precisión. [11]

Debido a que en la selección del tratamiento se evaluaron múltiples alternativas, se utilizó la herramienta *Ratings*, la cual realiza un análisis jerárquico dándole prioridad a uno o varios criterios, para este caso se tomó la eficiencia de remoción como criterio de mayor importancia en la selección dado que en los artículos consultados los autores

utilizaban este criterio para determinar el grado de contaminación del efluente. Esta herramienta se recomienda para casos en los que se tiene una amplia variedad de opciones de selección, debido a que no es necesario hacer calificación por pares, sino que se otorga una cuantificación diferente a los criterios de cada alternativa evaluada.[11] Para la selección final, el software tuvo en cuenta las calificaciones entregadas y la ponderación en cada uno de los criterios.

Para la selección de los criterios necesarios para la toma de decisiones en el software, se llevó a cabo la revisión de cada uno de los artículos consultados para así poder determinar cuáles eran los criterios que, en su mayoría, eran un factor común y eran utilizados por los diferentes autores para analizar el tratamiento que presentaban en su documento. Con base en esta revisión se seleccionaron como criterios la eficiencia de remoción basada en el DQO, consumo de energía, remoción de nitratos, remoción de fosfatos y la producción de lodos residuales, ya que eran factores tenidos en cuenta en la mayoría de los artículos consultados. De los criterios descritos, a la eficiencia de remoción de DQO se le otorgó una mayor prioridad en la selección ya que en los artículos se presentaba como el principal ítem de análisis además de ser el criterio del cual se presentaban valores en toda la bibliografía consultada, por lo tanto, como se muestra en la tabla 6, este se utilizó para una comparación inicial entre ellos.

Tabla 6.

Comparación de eficiencias de remoción entre los artículos consultados.

Opción	Nombre del articulo	Eficiencia de remoción (mg O2/L)
1	Integrated ABR and UASB system for dairy wastewater treatment: Engineering design and practice	98
2	An eco-friendly strategy for dairy wastewater remediation with high lipid microalgae-bacterial biomass production	84

3	Comparing the use of a two-stage MBBR system with a methanogenic MBBR coupled with a microalgae reactor for medium-strength dairy wastewater treatment	98
4	A review of upflow anaerobic sludge fixed film (UASFF) reactor for treatment of dairy wastewater	93
5	Reclamation of water from dairy wastewater using membrane bioreactor (MBR) – Membrane filtration processes	94,3
6	A vermifilter system for reducing nutrients and organic-strength of dairy wastewater	45
7	Moving bed biofilm reactor (MBBR) for dairy wastewater treatment	80 - 98
8	Treatment of dairy industry wastewater using bacterial biomass isolated from eutrophic lake sediments for the production of agricultural water	58,6% - 80%
9	Biodegradation by bioaugmentation of dairy wastewater by fungal consortium on a bioreactor lab-scale and on a pilot-scale	75
10	The investigation of dairy industry wastewater treatment in a biological high performance membrane system	95-99
11	Treatment of dairy industry wastewater by combined aerated electrocoagulation and phytoremediation process	97
12	Treatment performance and recovery of organic components from high pH dairy wastewater using low-cost inorganic ferric chloride precipitant	96
13	Optimization removal of color and organic solid pollutants from textile industry wastewater by electrocoagulation	92,46
14	Biological treatment of saline domestic wastewater by using a down-flow hanging sponge reactor	80,3
15	Treatment of industrial wastewater with gamma irradiation for removal of organic load in terms of biological and chemical oxygen demand	85

16	Recovery of dairy industry wastewaters by reverse osmosis. Production of boiler water	86,8
17	Horizontal subsurface flow constructed wetland for tertiary treatment of dairy wastewater: Removal efficiencies and plant uptake	68,7

Nota. La tabla 6 muestra las eficiencia de remoción de DQO de cada uno de los artículos tenidos en cuenta para la selección.

A continuación, se describe cada criterio evaluado en el software Super Decisions®:

3.2.1 Eficiencia de remoción

Para la selección del tratamiento, la eficiencia de remoción se basó en la capacidad que tiene el sistema para reducir la concentración en términos de DQO en mg O₂/L[cita]. En el caso de Siping Ji et al demostraron en su trabajo, en un sistema anaerobio, la remoción de 98% de materia orgánica.[12] Asimismo el autor S.Sivaprakasam en su artículo demuestra una remoción de aproximadamente 93% en un sistema anaerobio a partir de un reactor de flujo ascendente de lodos fijos.[13] Por otro lado para J.Akansha en su artículo, para un sistema aerobio, asegura que la aireación mejora el rendimiento de la electrocoagulación y junto con un proceso de fitoremediación logra la eliminación del 97% de la DQO.[14] Igualmente artículo publicado por el autor Eirini Zkeri asegura una remoción del 98% en un sistema aerobio a partir de un reactor de micro algas para el tratamiento de aguas residuales lácteas.[15] Por otra parte Geethu Gopinatha Kurup, obtuvo una remoción de 96% en un sistema anaerobio, este estudio propone recuperar compuestos orgánicos utilizando cloruro férrico de bajo costo como precipitante.[16]

A continuación, en la tabla 7, se observa el comportamiento de las prioridades asignadas a los diferentes rangos y su nivel de importancia para una selección de tratamiento adecuada.

Tabla 7.

Prioridad de los rangos en la eficiencia de remoción.

Rango	Prioridad
100% - 95%	0,433
94.9% - 90%	0,259
89.9% - 85%	0,158
84.9% - 80%	0,087
79.9% - 75%	0,044
74.9% - 0%	0,019

Nota. Esta tabla muestra la prioridad de los rangos en la eficiencia de remoción. Tomado de: Tomado de software *Super Decisions*®, [En Línea]. Disponible: En software [Acceso: oct.16,2021].

Como se puede observar en la **Tabla 7** la mayor prioridad se le asignó al intervalo entre 95 y 100% con la finalidad de seleccionar el artículo que presente la máxima remoción de compuestos orgánicos posible. Con esto, se busca poder garantizar una reducción de DQO considerable, que permita cumplir con la normatividad legal vigente.

Luego de analizar el primer criterio se procede a evaluar el consumo de energía registrado en planta.

3.2.2 Consumo de energía

Para el análisis de estos procesos, el consumo de energía se basa en la cantidad de energía requerida para el correcto funcionamiento de un sistema de tratamiento de aguas residuales. En esta ocasión, el criterio se enfoca en los tratamientos biológicos consultados y en los equipos involucrados que requieren de este servicio industrial. En la información consultada en los trabajos de investigación, este parámetro no es medido cuantitativamente en la mayoría de artículos, debido a que se enfocan en la eficiencia de remoción como criterio de importancia a la hora de realizar el tratamiento, por lo tanto,

para complementarla, se realizó una búsqueda para identificar el consumo de energía de algunos de los equipos involucrados en los tratamientos que se tienen como opción para ser seleccionados.

De acuerdo a lo planteado por J.F. Swinwood para la eliminación de productos químicos orgánicos en las aguas residuales con el uso de radiación gamma se necesitan alrededor de 120 kW incluidos bombas, enfriadores y otros equipos auxiliares [43]. Por otro lado, el uso de un reactor ABR teniendo en cuenta lo sugerido por Siping Ji, puede tener un alto consumo de energía debido a que el reactor hace uso de mínimo dos ventiladores de 22 kW [12]. Finalmente, el sistema propuesto por N. Kumar presenta una configuración para el reactor MBBR que logra consumir entre 0,6 y 0,8 kWh/m³ [44].

En la literatura consultada para la realización de este trabajo se usa este criterio como un factor diferenciador, cuando se puede demostrar que hubo una reducción en los costos en comparación con métodos convencionales o con otros métodos de tratamiento biológico. Por lo tanto, en la tabla 8, se observa la prioridad de los rangos en el criterio consumo de energía.

Tabla 8.

Prioridad de los rangos en el consumo de energía.

Rango	Prioridad
MUY ALTO	0,039
ALTO	0,069
PROMEDIO	0,194
BAJO	0,628
NO HAY DATOS	0,069

Nota. Esta tabla muestra la prioridad de los rangos en el consumo de energía. Tomado de Tomado de software *Super Decisions*®, [En Línea]. Disponible: En software [Acceso: oct.16,2021].

Como se puede observar en la **Tabla 8**, la mayor prioridad se le asignó al rango “BAJO” con la finalidad de obtener el tratamiento con el menor consumo de energía posible. Esto se hace con la intención de garantizar una posible reducción en los costos de este servicio industrial que aporten a la viabilidad de la aplicación del tratamiento biológico en esta industria.

Por otro lado, también existen compuestos orgánicos y otros contaminantes que afectan la calidad del agua, es por esto que en el análisis de trabajo se evalúa el criterio remoción de otros contaminantes.

3.2.3 Remoción de otros contaminantes

En esta área de estudio, la reducción de contaminantes se refiere a la capacidad que tiene un tratamiento de aguas residuales para eliminar los principales componentes que afectan la calidad del agua, como lo son los nitratos y fosfatos [27]. Para este criterio, se analizó la información consultada para poder determinar un rango porcentual de referencia y con esto poder otorgar la calificación que corresponde a cada una de las opciones.

En primer lugar Tethi Biswas en su artículo muestra un tratamiento aerobio donde se obtiene eficiencia de remoción de nitratos y fosfatos del 94 y 98 por ciento respectivamente, mediante fitorremediación y mejora en la productividad de lípidos utilizando un consorcio de microalgas y bacterias enriquecido a partir de un estanque de acuicultura alimentado con aguas residuales.[18] Por otro lado Gilbert J.Miito expresa en su trabajo escrito que un vermifiltro con sistema aerobio es capaz de reducir la carga de nitratos en un 74% y fosfatos en un 48%.[19] Asimismo, María C.Schierano propone evaluar la eficiencia de eliminación de contaminantes de un humedal construido de flujo subsuperficial horizontal (HSSFH) a escala piloto para el tratamiento de aguas residuales lácteas; el humedal logro una remoción de nitratos y fosfatos en un porcentaje de 47,8 y 29,9% respectivamente.[20] A su vez, el autor Eirini Zkeri y su artículo muestra un sistema aerobio a partir de un reactor de micro algas para el tratamiento de aguas residuales lácteas con una remoción de nitratos y fosfatos 65 y 11% aproximadamente.[15] Por otra parte, para un sistema anaerobio el autor Ranjana

Kumari, a partir de un sistema de tratamiento integrado de procesos MBR y de filtración por membrana, obtuvo porcentajes de remoción de fosfatos y de amonios de 98,7 y 77,5% aproximadamente.[21]

A continuación, se muestran las tablas con la prioridad que se le asignaron a los rangos en la remoción de fosfatos y nitratos.

Tabla 9.

Prioridad de los rangos en la remoción de fosfatos.

Rango	Prioridad
100% - 90%	0,532
89.9% - 80%	0,272
79.9% - 70%	0,120
69.9% - 0%	0,044
NO HAY DATOS	0,031

Nota. Esta tabla muestra la prioridad de los rangos en la eficiencia de remoción de fosfatos. Tomado de Tomado de software *Super Decisions*®, [En Línea]. Disponible: En software [Acceso: oct.16,2021].

La **Tabla 9** muestra que la mayor prioridad se le asignó al rango de 90 a 100%, ya que de esta manera se busca seleccionar un tratamiento con la mayor remoción de fosfatos posible. Con una alta remoción de este contaminante, se busca reducir el riesgo que genera.

Tabla 10.

Prioridad de los rangos en la remoción de nitratos.

Rango	Prioridad
100% - 90%	0,547
89.9% - 80%	0,258
79.9% - 70%	0,109
69.9% - 0%	0,045
NO HAY DATOS	0,041

Nota. Esta tabla muestra la prioridad de los rangos en la eficiencia de remoción de nitratos. Tomado de: software *Super Decisions* ®, [En Línea]. Disponible: En software [Acceso: oct.16,2021].

La mayor prioridad se le asigno al intervalo que comprende entre el 90 y 100% como se muestra en la **Tabla 10**, para así poder obtener un tratamiento con la mejor remoción de nitratos posible. Reducir el alto contenido de nitratos, además de reducir el riesgo que este genera, también permite ayudar a cumplir con la normatividad.

Finalmente se analizaron las sustancias contaminantes y peligrosas en el agua residual, por tal motivo se evaluó la producción de lodos que se produce durante el tratamiento.

3.2.4 Producción de lodos

Durante los procesos de tratamiento de aguas residuales, uno de los principales subproductos que se obtienen de este proceso son los lodos, que consisten en una mezcla de agua y sólidos que se obtienen de las diferentes etapas de depuración del agua, este subproducto suele ser líquido y su composición incluye componentes como materia orgánica, nitrógeno, fósforo, potasio y metales pesados como cadmio, cromo, zinc, entre otros [22]. Sin embargo, el tipo de composición varía según la carga de

contaminantes del agua tratada que está determinada por su origen, es decir, por el tipo de industria que la genera.

En los resultados reportados se encontró que, en los procesos de tratamiento de aguas residuales generadas por una industria láctea, se pueden obtener entre 3 y 5 toneladas diarias de lodos, esto depende del tamaño de la producción que tenga la empresa [12]. Sin embargo, los investigadores refieren la producción de lodos no de forma cuantitativa sino cualitativa, clasificándolos en producción muy alta, alta y promedio; para la ponderación del software *Super Decisions*® se agregó la opción de “no hay datos” puesto que en algunos artículos no se incluía esta información.

De acuerdo con los artículos analizados se encontró que para un sistema anaerobio la producción de lodos, en lo propuesto por Siping Ji, se redujo de 3 a 5 toneladas día a 3 toneladas mes[12] , sin embargo, este valor se tomó como una calificación cualitativa de bajo para no alterar los parámetros definidos.

A continuación, se observa la tabla con la prioridad que se le asignó a los rangos en la producción de lodos.

Tabla 11.

Prioridad de los rangos en la producción de lodos.

Rango	Prioridad
MUY ALTA	0,043
ALTA	0,077
PROMEDIO	0,189
BAJA	0,603
NO HAY DATOS	0,088

Nota. Esta tabla muestra la prioridad de los rangos en producción de lodos. Tomado de: software *Super Decisions*®, [En Línea]. Disponible: En software [Acceso: oct.16,2021].

Como se observa en la **Tabla 11**, la mayor prioridad fue asignada al rango “Baja” con la finalidad de obtener un tratamiento con la menor producción de lodos posible lo cual permite disminuir los costos que implica el posterior tratamiento de estos. Reducir este subproducto, también es de gran importancia para ayudar a disminuir la contaminación ambiental que puede generar el tratamiento de estos.

Una vez evaluadas todas las alternativas y los criterios descritos, la respuesta entregada por el software se muestra por medio de una tabla (tabla 12) donde se presentan las prioridades finales obtenidas por cada opción de selección. Estas prioridades finales tienen en cuenta la calificación que el programa le otorga a cada una de las opciones por cada criterio evaluado y la importancia que tiene sobre los demás.

Tabla 12.

Resultado final proceso de selección.

Name	Ideals	Normals	Raw
Opción 1	1,000	0.118	0.118
Opción 2	0,395	0.046	0.046
Opción 3	0,471	0.055	0.055
Opción 4	0,774	0.091	0.091
Opción 5	0,547	0.064	0.064
Opción 6	0,103	0.012	0.012
Opción 7	0,625	0.073	0.073
Opción 8	0,858	0.101	0.101
Opción 9	0,395	0.046	0.046
Opción 10	0,625	0.073	0.073
Opción 11	0,763	0.090	0.090
Opción 12	0,625	0.073	0.073
Opción 13	0,395	0.046	0.046
Opción 14	0,170	0.020	0.020
Opción 15	0,262	0.031	0.031
Opción 16	0,406	0.048	0.048
Opción 17	0,084	0.010	0.010

Nota. Esta tabla muestra resultado final proceso de selección. Tomado de: software *Super Decisions*®, [En Línea]. Disponible: En software [Acceso: oct.16,2021].

Los datos obtenidos nos permiten analizar el rendimiento que tuvo cada artículo durante el proceso de selección que se llevó a cabo. Con base en esta información, podemos determinar qué tan viable puede llegar a ser cada uno de ellos para ser aplicado en la industria láctea. Esta información, nos muestra que los artículos con la menor prioridad son aquellos que presentan resultados con eficiencias muy bajas, como por ejemplo la remoción de DQO (criterio al cual se le otorgó mayor importancia sobre los demás) o remoción de otros contaminantes. En este caso, los de más baja prioridad corresponden a la opción 6 donde el autor G. J. Miito, et al., presentan una eficiencia del 45% de reducción en DQO y 48% en remoción de fosfatos [40], y la opción 17 donde se obtiene una eficiencia de 68.7% para el DQO y 0.3% para fosfatos según lo reportado por M. C. Schierano, et al [41].

En la **Tabla 12**, la opción 1 y la opción 8 muestran porcentajes de 1 y 0,857745 respectivamente, siendo los mejor calificados en comparación con otras alternativas, esto representa que las opciones cumplen con los criterios de selección. Sin embargo, como resultado final, la opción 1 tiene una diferencia significativa respecto con las demás, lo cual permite concluir que, para el software Super Decisions®, esta es la mejor opción de tratamiento.

Finalmente se obtuvo que el tratamiento con las mejores condiciones, de acuerdo con los criterios analizados y la respuesta del software *Super Decisions*® fue *“Integrated ABR and UASB system for dairy wastewater treatment: Engineering design and practice”* propuesto por Siping Ji et al, debido a que tiene una eficiencia de remoción de 98% para reducir la concentración de DQO, bajo consumo de energía, eficiencia en la remoción de nitratos de 95% y además la producción de lodos es baja generando 3 toneladas por mes [12].

3.3 Resultados tercer objetivo

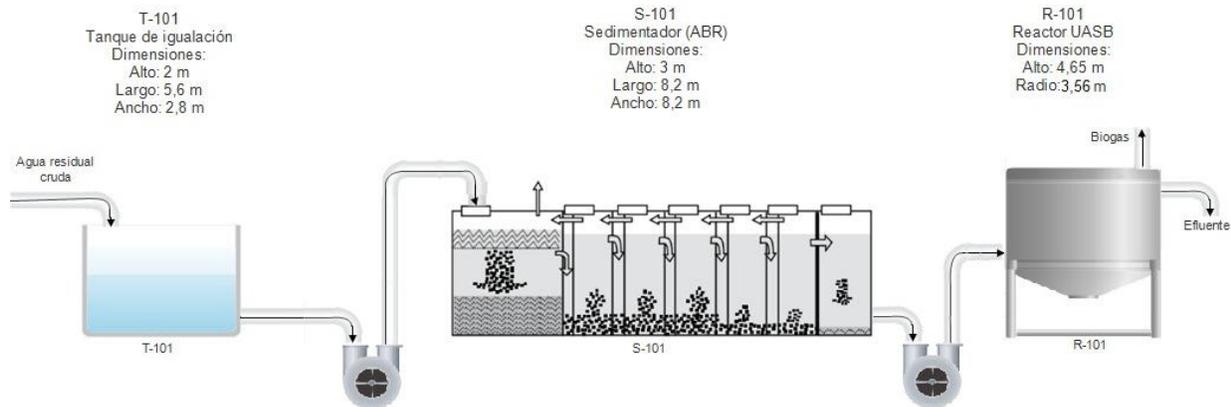
Con base en el artículo seleccionado por medio del software Super Decisions®, para el cumplimiento del tercer objetivo se llevó a cabo el diseño básico de los reactores biológicos requeridos para el tratamiento anaerobio, enfocado hacia el proceso productivo de la empresa de referencia, al igual que el diseño de un tanque de igualación

que tiene como objetivo mantener un flujo constante hacia los reactores. Este diseño se llevó a cabo haciendo uso de la información obtenida por medio de la empresa soporte.

En la figura 14 se presenta la configuración sugerida para el sistema de tratamiento biológico donde actúan los tres equipos diseñados.

Figura 14.

Diagrama proceso de tratamiento biológico.



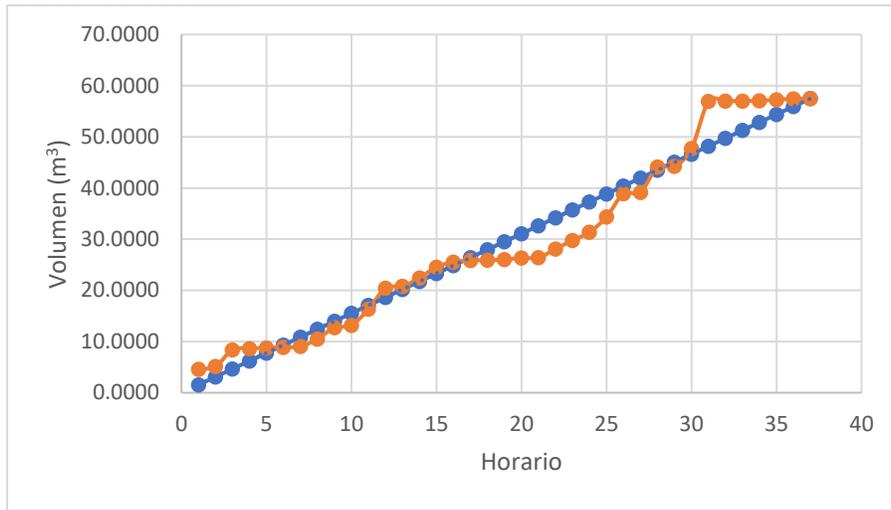
Nota. La figura 14 presenta la configuración de los principales equipos involucrados en el tratamiento biológico seleccionado.

3.3.1 Diseño tanque de igualación

Incluir el tanque de igualación tiene como objetivo mantener un flujo constante hacia los dos reactores biológicos, para así evitar tiempos muertos en la operación que podrían generar un aumento en los costos de operación, en el diseño del homogeneizador se aplicó la información de caudal obtenida durante el muestreo y aplicándola en la elaboración de una curva de caudal [26], que permitió determinar el volumen requerido para el tanque. Los datos se presentan en la figura 15.

Figura 15.

Curva de caudal.



Nota. La figura 15 presenta la curva de caudales utilizada para determinar el volumen del tanque de igualación.

Una vez obtenida la gráfica, se identificó el punto más lejano por encima de la recta y el punto más lejano por debajo de la recta para hallar los volúmenes correspondientes y así poder realizar el cálculo del volumen total necesario para el tanque el cual es la suma de estos dos valores. Para este proceso se aplicaron las ecuaciones 1, 2 y 3.

$$\text{Volumen máximo superior} = 56,9628 \text{ m}^3 - (1,5541 * 31 + 0)$$

$$\text{Volumen máximo superior} = 8,7857 \text{ m}^3$$

$$\text{Volumen máximo inferior} = (1,5541 * 21 + 0) - 26,3952 \text{ m}^3$$

$$\text{Volumen máximo inferior} = 6,2409 \text{ m}^3$$

$$\text{Volumen total requerido} = 8,7857 \text{ m}^3 + 6,2409 \text{ m}^3$$

$$\text{Volumen total requerido} = 15,0266 \text{ m}^3$$

Se determinó que el tanque de igualación del proceso debe tener una capacidad de $15,0266 \text{ m}^3$, las dimensiones sugeridas son 2 metros de alto, 5,6 metros de largo y 2,8 metros de ancho, cumpliendo con las recomendaciones de altura y relación ancho – largo, descritas por METCALF & EDDY [26].

3.3.2 Diseño reactor ABR

El reactor anaerobio con deflectores (ABR por sus siglas en inglés) tiene como objetivo realizar un pretratamiento para la posterior etapa que se lleva a cabo en el reactor UASB, en esta etapa, se busca reducir la mayor cantidad de materia orgánica presente en el agua residual cruda, desnaturalizar las proteínas y descomponer las grasas [23]. Para este reactor, se utilizó el caudal horario suministrado por la empresa láctea de referencia realizado entre los días 15 y 16 de diciembre de 2017 y se aplicó la ecuación 4.

Para el tiempo de retención hidráulica (HRT por sus siglas en inglés), que es el tiempo que el fluido permanece dentro del reactor, se utilizó un valor de diez (10) horas ya que se considera un valor típico para un reactor ABR según la información publicada por H. Nguyen, S. Turgeon y J. Matte [24].

$$V_{abr} = Q \times HRT$$

$$V_{abr} = \frac{20 \text{ m}^3}{\text{hora}} \times 10 \text{ horas}$$

$$V_{abr} = 200 \text{ m}^3$$

Una vez determinado el volumen del reactor ABR que se requiere para el proceso, se sugirieron las dimensiones del equipo para que cumpla con esta capacidad.

$$\text{Dimensiones} = 3\text{m alto} \times 8,2\text{m largo} \times 8,2\text{m ancho}$$

3.3.3 Diseño reactor UASB

Para el diseño del reactor UASB se realizaron los cálculos necesarios para cada una de las etapas involucradas en el proceso del tratamiento del agua residual donde se incluyen datos dimensionales y funcionales.

Para la determinación de estos valores, se aplicaron ecuaciones de diseño además de datos empíricos cuyos valores se encuentran establecidos por la Asociación Internacional del Agua [25].

En la tabla 13 se describen los parámetros de diseño del agua cruda para el reactor UASB:

Tabla 13.

Datos de entrada para el diseño del reactor UASB.

Datos de entrada		
Q de diseño	20	m ³ /h
	480	m ³ /dia
DQO afluente	7230	mg/L
	7.23	kg/m ³
Temperatura	28.43	°C

Nota. En esta tabla se muestran los datos de entrada al reactor UASB. Tomado de: información suministrada por la empresa Ambiente y Soluciones Integrales SAS.

Para la zona de expansión de lodos en el reactor se calcularon las dimensiones del reactor, el caudal medio y el caudal pico y la velocidad ascendente de los lodos descritos en **Tabla 14**, y requirieron del uso de las ecuaciones comprendidas desde la ecuación 5 hasta la ecuación 14 ubicadas en la metodología numeral 4.3.3 y de los datos empíricos para diseño [25].

Tabla 14.*Dimensionamiento de la zona de expansión de lodos del reactor UASB.*

ZONA DE EXPANSIÓN DE LODOS		
MEDICIÓN	VALOR	UNIDADES
Carga orgánica volumétrica	14.50	kg DQO/m ³ día
Volumen total	239.34	m ³
Número de unidades	2.00	unidades
Volumen de cada unidad	119.67	m ³
Caudal medio por unidad	240.00	m ³ /día
	10.00	m ³ /hora
Factor K2	2.00	
Caudal pico por unidad	480.00	m ³ /día
	20.00	m ³ /hora
Altura manto de lodos	3.00	m
Área del reactor	39.89	m ²
Radio del reactor	3.56	m
Velocidad ascendente en la zona de lodos para Q medio	0.25	m/hora
Revisión condiciones caudal medio		
HRT para Qmedio	11.97	hora
Velocidad ascendente en la zona de lodos para Q medio	0.25	m/hora
Revisión condiciones caudal pico		
HRT para Qpico	5.98	hora
Velocidad ascendente en la zona de lodos para Q pico	0.50	m/hora

Nota. Se presentan los dimensionamientos de la zona de expansión de lodos en el reactor UASB.

Una vez obtenido el dimensionamiento, se procedió a determinar las características necesarias en la zona de separación de sólidos, la cual se encarga de evitar que las partículas contaminantes salgan del reactor en el biogás o el agua tratada [25], en la tabla 15 se presenta el área de los separadores, la velocidad de apertura tanto para el caudal medio como para el caudal pico y la cantidad de separadores requeridos. Para el dimensionamiento fue necesario el uso de las ecuaciones comprendidas entre la ecuación 15 hasta la ecuación 18.

Tabla 15.

Dimensiones de la zona de separación de sólidos en el reactor UASB.

ZONA DE SEPARACIÓN DE SÓLIDOS		
MEDICIÓN	VALOR	UNIDADES
Profundidad de la zona de separación (h)	1.50	m
Velocidad aberturas Q_m	2.00	m/h
Área abertura	5.00	m ²
Velocidad aberturas Q_{pico}	4.00	m/h
Ancho de separadores	0.23	m
Radio del reactor	3.56	m
Área del separador	1.67	m ²
Número de separadores	3.00	unidades

Nota. Se presentan las dimensiones relacionadas a la zona de separación de sólidos en el reactor.

Para la zona de sedimentación se determinaron el área y la velocidad que tendrá la sedimentación dentro del reactor, aplicando las ecuaciones desde la número 19 hasta la 24 referenciadas en la metodología. Los datos obtenidos se presentan en la tabla 16.

Tabla 16.

Dimensionamiento para la zona de sedimentación del reactor UASB.

ZONA DE SEDIMENTACIÓN		
MEDICIÓN	VALOR	UNIDADES
HRT en sedimentación con Q_{medio}	2	hora
Volumen de sedimentación	20	m ³
Área unidad (Área del reactor)	39.890	m ²
Área separación sólidos (Área abertura)	5	m ²
Área disponible sedimentación	34.890	m ²
Altura mínima de sedimentación	0.57324	m
Velocidad con Q_{medio}	0.2866179	m/h
HRT en sedimentación con Q_{pico}	1	hora
Velocidad con Q_{pico}	0.5732358	m/h

Nota. Se muestra el dimensionamiento de la zona de sedimentación del reactor UASB.

Para la distribución del afluente dentro del reactor es necesaria la ubicación de boquillas, por lo tanto, se calcularon el número de boquillas, el área de cada punto de alimentación y el caudal por boquilla, las ecuaciones aplicadas comprenden entre la 25 y la 26 ubicadas en la metodología.

Tabla 17.

Distribución del afluente en el reactor UASB.

DISTRIBUCIÓN DEL AFLUENTE		
MEDICIÓN	VALOR	UNIDADES
Área de cada punto de alimentación	3.0344318	m ²
Número de boquillas	13.15	unidades
Caudal por boquilla	18.256955	m ³ /día
	0.0002113	m ³ /s

Nota. Se presenta el dimensionamiento y distribución del afluente en el reactor UASB.

En la tabla 18 se describen las características obtenidas para la conducción del agua hacia el reactor aplicando la ecuación 27:

Tabla 18.

Características de conducción en el reactor UASB.

TUBERIA		
MEDICIÓN	VALOR	UNIDADES
Diámetro tubería	50	mm
	0.05	m
Velocidad en la tubería	0.1076177	m/s

Nota. Se muestran las características de conducción requeridas en el reactor UASB.

En la tabla 19 se incluyen condiciones requeridas para el tratamiento de aguas residuales en el reactor UASB, de acuerdo con la IWA [25].

Tabla 19.

Condiciones requeridas en el reactor UASB.

CONDICIONES DE DISEÑO		
Número de reactores	2.00	unidad
Altura nivel del agua	4.65	m
Área del reactor	39.89	m
Radio del reactor	3.56	m

Nota. Se presentan las condiciones requeridas para el reactor UASB.

3.4 Resultados cuarto objetivo

En el análisis de costos se construyó una matriz con base en los artículos, revistas y bibliografía consultadas. Se evaluó el costo de los equipos según el concepto de reactor UASB, reactor ABR y tanque de igualación. Estos costos se estimaron teniendo en cuenta un periodo de un año.

Tabla 20.*Costos del tratamiento seleccionado.*

Concepto	Equipos	CANTIDAD	Costo fijo unitario \$col	Costo Variable \$col	Instalación \$col	Costo Total \$col
COSTOS DE INVERSIÓN						
Maquinaria + instalación	Reactor UASB	1	341,000,000		68,200,000	409,200,000
	Reactor ABR	1	272,800,000		54,560,000	327,360,000
	Tanque de igualación	1	10,775,832		2,155,166	12,930,998
	TOTAL					749,490,998
Instrumentación y control	Indicador de nivel	3	153,700		92,220	553,320
	Indicador de pH	3	158,561		95,137	570,820
	Indicador de caudal	2	168,620		67,448	404,688
	Indicador de Temperatura	2	234,023		93,609	561,655
	Válvula reguladora para gas	1	198,000		39,600	237,600
	Válvula reguladora para agua	3	140,113		84,068	504,407
	TOTAL					2,832,490
Ingeniería y supervisión			62,472,953			62,472,953
TOTAL COSTOS DE INVERSIÓN						814,796,441
COSTO DE PRODUCCIÓN						
Mano de obra directa				1,605,052		1,605,052
Gastos de fabricación						
Energía eléctrica				52,335,444		52,335,444
Mantenimiento			12,491,517			12,491,517
TOTAL COSTOS DE PRODUCCIÓN			12,491,517	53,940,496		66,432,012
TOTAL INVERSIÓN			12,491,517	53,940,496		881,228,453

Nota. Costos evalúalos para la implementación del tratamiento biológico.

El costo de inversión para el reactor UASB se considera teniendo en cuenta lo descrito por D. Domínguez [28], donde se muestra el costo total de una planta de tratamiento que involucra un reactor UASB. Para la determinación del costo de este reactor, el documento indica que se toma el 31 % del valor total de la planta diseñada, siendo este 1.100.000.000 para un caudal pico de 11 litros por segundo; con base en esta información se ajustó el precio a las condiciones del equipo requerido para el tratamiento seleccionado [28].

Respecto a los costos del equipo ABR, según el artículo propuesto por Orozco et al en 1998 "Full-scale anaerobic treatment of low strength brewery wastewater at sub-optimal temperatures" comprobó que el costo de construcción del ABR era un 20% menor que el

del reactor UASB [29]. Teniendo en cuenta esto, el costo de este equipo se calculó con base en el precio estimado para el reactor biológico.

Para la construcción de un tanque de homogenización en concreto reforzado, el costo directo por unidad se tomó de acuerdo a la “COTIZACIÓN OBRAS CIVILES COMPLEMENTARIAS PARA LA CONSTRUCCION PTARD ESE CARMEN EMILIA OSPINA PROYECTO DE LA ALCALDIA MUNICIPAL DE NEIVA, HUILA” [33].

Para estos equipos, también se tuvo en cuenta el costo de instalación el cual se tomó como el 20% del valor del equipo de acuerdo a lo mencionado por el autor A. Zugarramurdi en su libro Ingeniería económica aplicada a la industria pesquera donde evalúa la inversión inicial para una planta pesquera [30].

Para los costos que involucran instrumentación y control, se tuvieron en cuenta diferentes equipos necesarios para llevar un control adecuado del proceso, dentro de ellos se consideraron indicadores de nivel, indicadores de pH, válvulas de control para gases, válvulas de control para agua, indicadores de nivel e indicadores de temperatura. Para determinar su valor se consultaron catálogos de proveedores y la instalación se consideró un 20% del costo de los equipos [30].

Dentro de los costos, también se tuvo en cuenta la ingeniería y supervisión, esta se estimó como el 10% del total de los costos directos y abarca lo que son gastos de diseño, construcción, preparación de planos, etc., necesarios para la implementación del sistema de tratamiento [30].

Costos de producción.

Mano de obra directa: El salario del técnico asignado para supervisión de los equipos y del proceso, está basado en la disposición legal (ley 278 de 1996) según lo estipule la Comisión Permanente de Concertación de Políticas Salariales y Laborales [42].

Gastos indirectos de fabricación.

- Energía eléctrica: Para la determinación de estos costos, se tuvo en cuenta el consumo de energía reportado para el tratamiento seleccionado, el cual es inferior a los

0,5 kW h/t, y los costos de energía estipulados en el tarifario de Enel- Codensa 2021 para modalidad industrial y comercial que son de \$605,7343/kWh aproximadamente [34].

- Mantenimiento: Según Garrido el porcentaje de mantenimiento se debe tener en cuenta entre el 2 y 3%, por lo tanto, se consideró el 2% del valor total de los equipos. [31].

De acuerdo con lo mencionado, se estimó que el costo total para la implementación del tratamiento en la industria láctea es de aproximadamente ochocientos ochenta y un mil millones, doscientos veinte y ocho mil cuatrocientos cincuenta y tres pesos colombianos (\$881'228.453).

4. CONCLUSIONES

Para la empresa láctea de referencia es necesario implementar un sistema de tratamiento para sus aguas residuales ya que estas no cumplen en su totalidad con la normatividad establecida para su correcto vertimiento lo cual puede generar sanciones legales.

El software Super Decisions® está en capacidad de llevar a cabo un proceso de selección multicriterio de manera acertada ya que, por medio de su sistema estadístico, permite obtener resultados confiables.

El artículo seleccionado, fue el que presentó un mejor rendimiento global teniendo en cuenta cada uno de los criterios definidos para el proceso de selección. Este aspecto le permitió ser la mejor opción de tratamiento biológico dentro de la bibliografía consultada.

El tratamiento biológico para aguas residuales, que se presenta en el artículo seleccionado, propone una configuración que involucra tres equipos que incluyen un tanque de igualación, un sedimentador ABR y un reactor UASB, los cuales están en capacidad de tratar aguas con gran contenido de materia orgánica y tener un alto porcentaje de remoción de contaminantes. Estas características le permiten ser considerado como una opción de interés para empresas lácteas por el tipo de aguas residuales que allí se generan.

El tanque de igualación sugerido permite que el proceso de tratamiento biológico tenga un flujo constante y adecuado de agua para así evitar que el sistema tenga que ser detenido generando un aumento en los costos de operación.

El reactor ABR diseñado está en capacidad de tratar adecuadamente el caudal de agua proveniente del proceso productivo de la empresa láctea. El correcto funcionamiento de este reactor permite reducir la carga orgánica y degradar y desnaturalizar ciertas moléculas contaminantes para así mejorar los rendimientos del proceso en la etapa posterior de tratamiento.

El diseño del reactor UASB se realizó teniendo en cuenta cada una de las zonas del equipo que intervienen en el proceso del tratamiento biológico y las condiciones de

operación correspondientes a la empresa de referencia, esto para buscar el dimensionamiento que mejor se pueda adaptar.

Para la implementación del tratamiento biológico seleccionado, se estimó una inversión básica inicial de aproximadamente ochocientos ochenta y un mil millones, doscientos veinte y ocho mil cuatrocientos cincuenta y tres pesos colombianos (\$881'228.453), donde se tuvo en cuenta los costos de inversión (reactor UASB, reactor ABR, tanque de igualación y equipos de instrumentación y control) y costos de producción (mano de obra directa, energía eléctrica y mantenimiento).

BIBLIOGRAFÍA

- [1] EcuRed. (s.f.). “Tratamiento de aguas residuales”. [En línea]. https://www.ecured.cu/Tratamiento_de_aguas_residuales. [Acceso: octubre 15, 2020].
- [2] Tratamiento de Aguas Residuales. (s.f.). “Etapas del proceso de tratamiento”. [En línea]. <https://tratamientodeaguasresiduales.net/etapas-del-tratamiento-de-aguas-residuales/>. [Acceso: octubre 20, 2020].
- [3] PTAR-Uniminuto. (s.f.). “Tratamiento Biológico de Aguas Residuales”. [En línea]. <https://sites.google.com/site/ptaruniminuto/tratamiento-biologico-de-aguas-residuales>. [Acceso: octubre 20, 2020].
- [4] Ministerio De Ambiente Y Desarrollo Sostenible. (marzo 17, 2015). “Por la cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones”.
- [5] D. F. Armesto, L. A. García, D. Correa, J. A. Mouthon, “Biotratamiento de aguas residuales en la industria láctea”, Rev. Investig; vol. 11, n. ° 1, sep. 2015. [Online]. Disponible en: <http://repository.lasallista.edu.co:8080/ojs/index.php/pl/article/view/1125> [Acceso: Octubre 10, 2020]
- [6] Sistema Único de Información Normativa. (25, octubre, 2010). “decreto 3930 de 2010”. [En línea]. <http://suin-juriscal.gov.co/viewDocument.asp?ruta=Decretos/1878873>. [Acceso: sep, 06, 2021].
- [7] Universitat Politècnica de Valencia. (27 noviembre, 2018). “Proceso Analítico Jerárquico (Analytic Hierarchy Process, AHP)”. [En línea]. <https://victoryepes.blogs.upv.es/2018/11/27/proceso-analitico-jerarquico-ahp/>. [Acceso: agosto 31, 2021].

- [8] Netinbag.com. (s.f). “¿Qué es el proceso de red analítica?”. [En línea]. <https://www.netinbag.com/es/business/what-is-the-analytic-network-process.html>. [Acceso: septiembre 1, 2021].
- [9] Tetra Pak. (s.f). “Soluciones de filtración para leche líquida”. [En línea]. [https://www.tetrapak.com/es-co/solutions/processing/main-technology-area/membrane-filtration/liquid-milk#:~:text=%E2%80%8BLa%20Ultrafiltraci%C3%B3n%20\(UF\)%20se,y%20entre%20lactosa%20y%20minerales](https://www.tetrapak.com/es-co/solutions/processing/main-technology-area/membrane-filtration/liquid-milk#:~:text=%E2%80%8BLa%20Ultrafiltraci%C3%B3n%20(UF)%20se,y%20entre%20lactosa%20y%20minerales). [Acceso: septiembre 1, 2021].
- [10] «Resolucion631.pdf». Accedido: oct. 31, 2021. [En línea]. Disponible en: <http://www.emserchia.gov.co/PDF/Resolucion631.pdf>.
- [11] J. M. M. Jiménez, «el proceso analítico jerárquico (ahp). fundamentos, metodología y aplicaciones», p. 34, oct. 2021.
- [12] S. Ji, W. Ma, Q. Wei, W. Zhang, F. Jiang, y J. Chen, «Integrated ABR and UASB system for dairy wastewater treatment: Engineering design and practice», *Sci. Total Environ.*, vol. 749, p. 142267, dic. 2020, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.142267.
- [13] S. Sivaprakasam y K. Balaji, «A review of upflow anaerobic sludge fixed film (UASFF) reactor for treatment of dairy wastewater», *Mater. Today Proc.*, vol. 43, pp. 1879-1883, ene. 2021, doi: 10.1016/j.matpr.2020.10.822.
- [14] J. Akansha, P. V. Nidheesh, A. Gopinath, K. V. Anupama, y M. Suresh Kumar, «Treatment of dairy industry wastewater by combined aerated electrocoagulation and phytoremediation process», *Chemosphere*, vol. 253, p. 126652, ago. 2020, doi: 10.1016/j.chemosphere.2020.126652.
- [15] E. Zkeri *et al.*, «Comparing the use of a two-stage MBBR system with a methanogenic MBBR coupled with a microalgae reactor for medium-strength dairy wastewater treatment», *Bioresour. Technol.*, vol. 323, p. 124629, mar. 2021, doi: 10.1016/j.biortech.2020.124629.

- [16] G. G. Kurup, B. Adhikari, y B. Zisu, «Treatment performance and recovery of organic components from high pH dairy wastewater using low-cost inorganic ferric chloride precipitant», *J. Water Process Eng.*, vol. 32, p. 100908, dic. 2019, doi: 10.1016/j.jwpe.2019.100908.
- [17] A. Suárez, T. Fidalgo, y F. A. Riera, «Recovery of dairy industry wastewaters by reverse osmosis. Production of boiler water», *Sep. Purif. Technol.*, vol. 133, pp. 204-211, sep. 2014, doi: 10.1016/j.seppur.2014.06.041.
- [18] T. Biswas, S. Bhushan, S. K. Prajapati, y S. Ray Chaudhuri, «An eco-friendly strategy for dairy wastewater remediation with high lipid microalgae-bacterial biomass production», *J. Environ. Manage.*, vol. 286, p. 112196, may 2021, doi: 10.1016/j.jenvman.2021.112196.
- [19] «A vermifilter system for reducing nutrients and organic-strength of dairy wastewater - ScienceDirect». <https://www.sciencedirect.com/bdigital.sena.edu.co/science/article/pii/S2352186421002960> (accedido oct. 31, 2021).
- [20] M. C. Schierano, M. C. Panigatti, M. A. Maine, C. A. Griffa, y R. Boglione, «Horizontal subsurface flow constructed wetland for tertiary treatment of dairy wastewater: Removal efficiencies and plant uptake», *J. Environ. Manage.*, vol. 272, p. 111094, oct. 2020, doi: 10.1016/j.jenvman.2020.111094.
- [21] R. Kumari, H. Ankit, y S. Basu, «Reclamation of water from dairy wastewater using membrane bioreactor (MBR) – Membrane filtration processes», *Mater. Today Proc.*, vol. 47, pp. 1452-1456, ene. 2021, doi: 10.1016/j.matpr.2021.03.452.
- [22] «Lodos de depuración de aguas residuales». <https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/prevencion-y-gestion-residuos/flujos/lodos-depuradora/> (accedido nov. 02, 2021).

- [23] S. Ji, W. Ma, Q. Wei, W. Zhang, F. Jiang, J. Chen. "Integrated ABR and UASB system for dairy wastewater treatment: Engineering design and practice". *Science of The Total Environment*, vol.749, no.142267, diciembre, 2020, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142267> [Acceso: septiembre, 16, 2021].
- [24] H. Nguyen, S. Turgeon, J. Matte, "The Anaerobic Baffled Reactor", 5, marzo, 2010. [PDF]. Disponible: <https://cpb-us-w2.wpmucdn.com/wp.wpi.edu/dist/f/266/files/2010/12/Anaerobic-Baffled-Reactor-for-Wastewater-Treatment.pdf>. Acceso: Octubre, 27, 2021.
- [25] C. A. de Lemos, "Anaerobic Reactors", Minas Gerais, Brasil, (s.f). [PDF]. Disponible: <https://www.iwapublishing.com/sites/default/files/ebooks/9781780402116.pdf>. Acceso: octubre, 26,2021.
- [26] Scribd. (s.f). "Ingeniería de Aguas Residuales, Volumen 2, 3ra Edición – Metcalf & Eddy – freelibros – me", [En línea]. <https://es.scribd.com/document/510432984/Ingenieria-de-Aguas-Residuales-Volumen-2-3ra-Edicion-METCALF-EDDY-FREELIBROS-me>. [Acceso: octubre 26, 2021].
- [27] SEMARNAT, "El medio ambiente en México". Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales, [En línea]. Disponible https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe_resumen14/06_agua/6_2_3.html. [Acceso: Oct. 20, 2021].
- [28] S. de Cali, «Maestría en Ingeniería Facultad de Ingeniería y Ciencias», p. 151. Accedido: nov. 12, 2021. [En línea]. Disponible en: Modelo_costos_construccion_plantas.pdf (javerianacali.edu.co).
- [29] A. De Vegt, T. Vereijken, y F. Dekkers, «Full-scale anaerobic treatment of low strength brewery wastewater at sub-optimal temperatures», *Ind. Waste Conf. USA*, 1993, Accedido: nov. 15, 2021. [En línea]. Disponible en: https://scholar.google.com/scholar_lookup?title=Full-scale+anaerobic+treatment+of+low+strength+brewery+wastewater+at+sub-

optimal+temperatures&author=De+Vegt%2C+A.+%28Paques%2C+Inc.%2C+Exton
%2C+PA.%29&publication_year=1993

- [30] A. Zugarramurdi, *Ingeniería económica aplicada a la industria pesquera*. Food & Agriculture Org., 1998. <http://www.fao.org/docrep/003/V8490S/v8490s00.HTM> [accedido noviembre 12 de 2021].
- [31] S. G. Garrido, «Ingeniería de Mantenimiento», p. 38. <http://www.renovetec.com/ingenieria-del-mantenimiento.pdf> [accedido noviembre 12 de 2021].
- [32] A. Fernández, V. Pastore, F. Rodríguez, Producción de furfural, Proyecto final, facultad regional resistencia de ingeniería química, Universidad tecnológica nacional, Resistencia, Argentina, 2019.
- [33] SINAH. cotizacion obras civiles complementarias para la construccion ptard ese carmen emilia ospina. p. 29. Accedido: nov. 12, 2021. [En línea]. Disponible en: <https://community.secop.gov.co/Public/Archive/RetrieveFile/Index?DocumentId=29777320>.
- [34] «Tarifario-enero-2021.pdf». Accedido: nov. 16, 2021. [En línea]. Disponible en: <https://www.enel.com.co/content/dam/enel-co/espac3%B1ol/personas/1-17-1/2021/Tarifario-enero-2021.pdf>
- [35] Orarbo, "Causas y consecuencias de la contaminación del agua en Colombia". Observatorio Regional Ambiental y de Desarrollo Sostenible del Rio Bogotá, [En línea]. Disponible: <http://www.orarbo.gov.co/es/con-la-comunidad/noticias/causas-y-consecuencias-de-la-contaminacion-del-agua-en-colombia> [Acceso: Dic. 03, 2021]
- [36] iagua. (s.f.), "El proceso de tratamiento de aguas residuales y eliminación de contaminantes emergentes", [En línea]. <https://www.iagua.es/blogs/lander-rodriguez-jorge/proceso-tratamiento-aguas-residuales-y-eliminacion-contaminantes>. [Acceso: diciembre 4, 2021].

- [37] Condorchem envitech, "Sistemas con reactores aeróbicos para tratar aguas residuales". Condorchem envitech, [En línea]. Disponible: <https://condorchem.com/es/blog/sistemas-con-reactores-aerobicos-para-tratar-aguas-residuales/> [Acceso: Dic. 4, 2021]
- [38] Condorchem envitech, "Tratamiento de aguas residuales de la industria láctea". Condorchem envitech, [En línea]. Disponible: <https://condorchem.com/es/blog/tratamiento-de-aguas-residuales-de-la-industria-lactea/> [Acceso: Dic. 5, 2021]
- [39] Aguas Claras Engenharia, "Reactor UASB:Sepa que és y como funciona". Aguas claras engenharia, [En línea]. Disponible: <https://aguasclarasengenharia.com.br/reactor-uasb-sepa-que-es-y-como-funciona/> [Acceso: Dic. 5, 2021]
- [40] G. J. Miito, P. Ndegwa, et al, "A vermifilter system for reducing nutrients and organic-strength of dairy wastewater" et&l, vol. 23, ago, 2021, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.101648> [Acceso: oct. 31, 2021].
- [41] M. C. Schierano, M. C. Panigatti, M. A. Maine, C. A. Griffa, y R. Boglione, "Horizontal subsurface flow constructed wetland for tertiary treatment of dairy wastewater: Removal efficiencies and plant uptake", J. Environ. Manage., vol. 272, p. 111094, oct. 2020, DOI: 10.1016/j.jenvman.2020.111094 [Acceso: octubre 23, 2021]
- [42] "Ley 278 de 1996 - EVA - Función Pública". <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=4928> (accedido nov. 16, 2021).
- [43] J.F. Swinwood, "Tecnologías de las radiaciones para el tratamiento de desechos: Una perspectiva global". [Accedido: dic. 15, 2021]. [En línea]. Disponible en: https://www.iaea.org/sites/default/files/36102681115_es.pdf

[44] N. Kumar, P. Banyal "Techno-Economic Assessment of Full Scale MBBRs Treating Municipal Wastewater Followed by Different Tertiary Treatment Strategies: A Case Study from India". [Accedido: dic. 15, 2021] [En línea]. Disponible en: [http://www.neptjournal.com/upload-images/NL-58-32-\(30\)B-3339.pdf](http://www.neptjournal.com/upload-images/NL-58-32-(30)B-3339.pdf)

LISTA DE SIGLAS

ABR: Anaerobic Baffled Reactor (Reactor anaerobio con deflectores)

UASB: Upflow Anaerobic Sludge Blanket (Reactor anaerobio de flujo ascendente)

IWA: International Water Association (Asociación internacional del agua)

HRT: Hydraulic Retention Time (Tiempo de retención hidráulica)

MBBR: Moving Bed Biological Reactor (Reactor biológico de lecho móvil)

DBO: Demanda biológica de oxígeno

DQO: Demanda química de oxígeno

IDEAM: Instituto de hidrología, meteorología y estudios ambientales

ANP: Analytic Process Network (Proceso analítico en red)

ARND: Aguas residuales no domésticas

ANEXOS

ANEXO 1.

CAUDAL Y PARÁMETROS FÍSICOQUÍMICOS IN-SITU

Tabla 21.

Caudal y parámetros físicoquímicos in-situ.

AFORO VOLUMETRICO		CAUDAL			Físicoquímicos in-situ		
Nº de Toma	Hora	T (s)	V (L)	Q (L/s)	pH (Und)	Conductividad (µS/cm)	SdT (mg/L)
1	15:00	7.82	10	1.279	10.8	823	400
2	15:40	68.5	10	0.146	10.4	362	210
3	16:10	11.02	10	0.907	9.5	531	234
4	16:40	140	10	0.071	9.7	1102	550
5	17:10	278	10	0.036	10.1	933	420
6	18:00	321.4	10	0.031	8.3	2156	1033
7	18:33	234.08	10	0.043	8.6	2137	1064
8	18:54	24.41	10	0.41	10.2	1437	700
9	19:31	16.32	10	0.613	6.2	406	177
10	20:05	77.53	10	0.129	8.1	372	166
11	20:30	11.49	10	0.87	8.0	116	90
12	21:00	8.73	10	1.145	7.1	348	345
13	21:31	98.56	10	0.101	6.8	194	80
14	22:00	22.28	10	0.449	6.4	111	40
15	22:30	16.73	10	0.598	5.9	77	45
16	22:58	36.99	10	0.27	6.9	398	233
17	23:30	119.4	10	0.084	7.3	426	210
18	00:10	573.7	10	0.017	6.5	0	0
19	00:35	288.8	10	0.035	6.6	17	0

20	01:00	119	10	0.084	6.9	250	100
21	01:38	724.6	10	0.014	7.0	0	7
22	02:00	20.96	10	0.477	4.6	32	10
23	02:32	21.66	10	0.462	5.2	110	33
24	03:00	22.47	10	0.445	10.3	520	246
25	03:30	12.11	10	0.826	10.8	2156	237
26	04:00	7.92	10	1.263	10.1	290	137
27	04:30	130.3	10	0.077	8.9	2000	1086
28	05:00	7.25	10	1.379	8.5	1986	1055
29	08:00	276.2	10	0.036	7.5	177	110
30	08:30	10.4	10	0.962	6.9	72	20
31	08:56	3.9	10	2.564	5.7	145	95
32	09:35	998.5	10	0.01	5.5	266	136
33	10:00	1562.2	10	0.006	5.7	300	128
34	10:30	855.1	10	0.012	5.8	259	119
35	11:00	177.2	10	0.056	6.3	119	69
36	11:30	187.3	10	0.053	6.4	111	55
37	12:00	780.6	10	0.013	5.9	10	13

Nota. Datos obtenidos durante el muestreo para la determinación de caudal y parámetros fisicoquímicos. Tomado de: Ambiente y Soluciones Integrales SAS.

ANEXO2.

RECOMENDACIONES

Los cálculos y análisis presentados en este documento se realizaron con base en las características de una empresa láctea de referencia, por lo tanto, no han de ser tomadas como referente para sectores industriales diferentes, puesto que las condiciones y características de operación pueden variar de manera significativa.

El diseño de los reactores biológicos se realizó con base en la información disponible y facilitada por la empresa soporte del presente trabajo; sin embargo, debido a las restricciones sanitarias actuales no fue posible obtener toda la información necesaria para un diseño completo. Teniendo en cuenta esto, en caso de realizar un análisis similar, es necesario complementar los cálculos con los datos pertinentes.

El diseño de los reactores, presentado en este documento, se realizó teniendo en cuenta la información obtenida sobre la empresa láctea de referencia, por lo tanto, en caso de realizar un análisis similar, es necesario verificar esta información, hacer las correcciones en caso de ser necesario y complementarla para obtener datos más adecuados para cada caso particular.

La determinación de los costos presentados en la matriz se realizó teniendo en cuenta únicamente la inversión que se debe realizar en los equipos involucrados, en la operación y en el mantenimiento, debido a la falta de información sobre la distribución de la planta de producción, espacios disponibles, distancias, entre otros. Con base en esto, en caso de realizar un análisis similar, se recomienda complementar esta información para poder definir los costos completos.